

Maak er het uwe van

Brecht Robeyns

Inhoud

Artikelen

Onopgelost probleem in de natuurkunde	1
Onopgeloste problemen in de natuurkunde	1
Baryogenese	2
Bolbliksem (natuurverschijnsel)	2
Donkere materie	4
Higgsboson	9
Higgsveld	11
Licht van Hessdalen	12
Magnetische monopool	14
Melkwegstelseldraaiingsprobleem	15
Naga Vuurballen	16
Pioneeranomalie	17
Protonverval	19
Theorie van alles	19
Veldentheorie van alles	22
Onopgelost probleem	23
Byblos-syllabenreeks	23
Cypro-Minoïsch schrift	25
Fermiparadox	26
Lineair A	29
Schijf van Phaistos	31
Onopgelost probleem in de wiskunde	37
Onopgeloste vraagstukken in de wiskunde	37
Harmonisch-delergetal	38
Lychrel-getal	39
Perfect getal	40
Probleem van Burnside	42
Problemen van Landau	43
Rieselgetal	43
Sierpińskigetel	44
Spiraal van Ulam	45

Wiskundig vermoeden	47
Vermoeden	47
ABC-vermoeden	47
Vermoeden van Andrica	49
Vermoeden van Brocard	50
Vermoeden van Collatz	50
Elliptisatievermoeden van Thurston	53
Vermoeden van Goldbach	54
Vermoeden van Legendre	55
Vermoeden van Poincaré	56
Regulier priemgetal	59
Riemann-hypothese	60
Stelling van Fermat	62
Standaardmodel van de deeltjesfysica	65
Standaardmodel van de deeltjesfysica	65
Algemene relativiteitstheorie	67
Algemene relativiteitstheorie	67
Anti-de Sitter-metriek	72
Causale structuur	74
De Sitter-metriek	75
Einstein-vergelijking	78
Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-metriek	80
Gravitationele tijdsdilatatie	80
Kerrmetriek	81
Metrische uitdijning van de ruimte	83
Naakte singulariteit	84
Penrose-diagram	85
Scalaire kromming	86
Susskind-Hawking battle	87
Tensoren in de algemene relativiteitstheorie	90
Zwaartekrachtsgolf	94
Tensoren in de relativiteitstheorie	95
Christoffelsymbolen	95
Einstein-tensor	96
Elektromagnetische veldtensor	97

Energie-impuls-tensor	100
Metriek	102
Ricci-tensor	102
Viergradiënt	103
Vierpotentiaal	104
Viervector	106
Kwantummechanica	110
Kwantummechanica	110
Aharonov-Bohm-effect	116
Algemene bespreking van Bose-Einsteincondensatie	119
Annihilatie	124
Antimaterie	125
Atoomkern	128
Biofoton	129
Bloch-vector	130
Born-Oppenheimerbenadering	130
Bose-Einsteincondensaat	131
Bose-Einsteinstatistiek	133
Braan	134
Clebsch-Gordan-coëfficiënten	135
Complete verzameling van commuterende observabelen	140
Constante van Dirac	141
Constante van Planck	142
Correspondentieprincipe	143
CP-symmetrie	143
CPT-symmetrie	147
De Haas-van Alphen-effect	147
Decoherentie	148
Deuteron	149
Dichtheidsfunctionaaltheorie	149
Dichtheidsmatrix	150
Dirac-operator	151
Dirac-vergelijking	151
Diracnotatie	152
Diraczee	154
Dualiteit van golven en deeltjes	155
Elektron	157

Elektronenconfiguratie	160
Elektronenschil	161
Elementair deeltje	164
EPR-paradox	169
Excitatie (kwantummechanica)	172
Fermi's gulden regel	173
Fermi-Diracstatistiek	174
Fermi-niveau	175
Fermion	175
Feynman-Kac-formalisme	176
Fijnstructuur	178
Fonon	181
Foto-elektrisch effect	181
Foton	184
Fracton	186
Franck-Condon-principe	186
Fundamentele natuurkracht	187
Gedelokaliseerd elektron	188
Generaties van de materie	190
Geometrische fase	190
Gestimuleerde emissie	191
GMR-effect	191
Golffunctie	194
Golfgetal	197
Hartree-Fock-methode	198
Hermitische matrix	200
Hermitische operator	201
Historisch overzicht van de Bose-Einsteincondensatie	202
Hypothese van De Broglie	204
Ineenstorten van de golffunctie	205
Interferentiecontrast	206
Interpretatie van de kwantummechanica	208
Jablonski-diagram	216
Josephson-junctie	216
Karakterisering van de Bose-Einsteincondensatie	217
Klassieke kwantummechanica	220
Klein-Gordonvergelijking	220
Knoopvlak	223

Kopenhaagse interpretatie	224
Koppelingsconstante	226
Kwantum	227
Kwantumbaas	228
Kwantumchemie	228
Kwantumchromodynamica	229
Kwantumcomputer	234
Kwantumelektrodynamica	236
Kwantumfluctuatie	237
Kwantumgetal	237
Wiskundige structuur van de kwantummechanica	239
Kwantumoptica	240
Kwantumput	241
Kwantumschuim	241
Kwantumsprong	241
Kwantumtoestand	242
Kwantumveldentheorie	245
Ladingconjugatie	255
Lagetemperatuurfysica	255
Laserkoeling	256
Leptongetal	257
Loop-kwantumzwaartekracht	257
Matrixmechanica	258
Meetprobleem in de kwantummechanica	258
Multiversum	259
Muon	261
Muon-neutrino	262
Kwantumverstrengeling	263
Neutrino	266
Neutron	269
Non-lokaal	270
Observabele	271
Oerstof	271
Onzekerheidsrelatie van Heisenberg	274
P-braan	277
Padintegraal	277
Pariteitsymmetrie	279
Pauli-matrix	280

Pentaquark	281
Periodiek systeem/Golffuncties	282
Periodiek systeem/Tabel met verkorte benoeming van de elektronenconfiguratie	283
Planckdeeltje	287
Plancklengte	287
Plancktemperatuur	288
Plancktijd	288
Positron	289
Post-Hartree-Fock	291
Postulaten van de kwantummechanica	292
Principe van lokaliteit	296
Proton (deeltje)	296
Quark	297
Quark-gluonplasma	300
Qubit	301
Regel van Hund	303
Renormalisatie	303
Rydberg-formule	310
Schrödinger-operator	312
Schrödingervergelijking	315
Schrödingers kat	319
Snaartheorie	322
Spin (kwantummechanica)	329
Stelling van Bell	330
Stern-Gerlach-experiment	335
Stralingswet van Wien	337
Subschil	340
Super-Kamiokande	340
Supergeleiding	341
Supersymmetrie	343
Tau (lepton)	344
Theorema van Koopmans	345
Theoretische chemie	345
Toepassingsmogelijkheden voor Bose-Einsteincondensaten	346
Tunneleffect	350
Tweespletenexperiment	352
Uitsluitingsprincipe van Pauli	358
Ultravioletcatastrofe	360

Veel-werelden-interpretatie	361
Veld (natuurkunde)	362
Verschuivingswet van Wien	364
Virtueel deeltje	367
Vreemdheid	368
Waarschijnlijkheidsamplitude	369
Waarschijnlijkheidsinterpretatie van Born	371
Waterstofatoom	371
Wentzel-Kramers-Brillouin-benadering	372
Wereldkristal	375
Wet van Planck	376
Deeltje	382
Deeltje	382
Deeltjesfysica	383
Antimuon	387
Antineutrino	387
Antineutron	388
Antiproton	388
Antitau	389
Atoom	389
Baryon	394
Boson (deeltje)	396
Elektron-antineutrino	397
Elektron-neutrino	398
Exotisch deeltje	398
Gluon	399
Graviton	400
Hadron	401
IJkboson	401
Ion (deeltje)	403
Kaon	404
Lepton (subatomair deeltje)	405
Majorana-deeltje	406
Meson	408
Moleculaire entiteit	409
Molecuul	409
Muon-antineutrino	416

Nucleon	416
Pion (natuurkunde)	417
Proef van Millikan	418
Subatomair deeltje	420
Tachyon	425
Tau-antineutrino	425
Tau-neutrino	426
Top-quark	427
Vectorboson	428
W-boson	429
Z-boson	430
Fundamentele natuurkracht	431
Elektromagnetisme	431
Sterke kernkracht	435
Zwaartekracht	435
Zwakke kernkracht	440
Kwantumveldentheorie	443
Asymptotische vrijheid	443
Casimireffect	443
Feynmandiagram	445
Globale symmetrie	446
Nulpuntsenergie	446
Spinor	447
Spontane symmetriebreking	448
Stelling van Noether	449
Vertexoperatoralgebra	453
Virasoro-algebra	454
Yukawa-potentiaal	454
Snaartheorie	457
Calabi-Yau-variëteit	457
D-braan	458
M-theorie	459
Membraan (M-theorie)	460
Supergravitatie	460
Relativiteit	463

Absolute ruimte	463
Antizwaartekracht	463
Ce Tecpatl	465
D'Alembertiaan	466
Arthur Eddington	467
Eenparig cirkelvormige beweging	468
Eenparig rechte lijnige beweging	470
Eenparig versnelde beweging	471
Ehrenfest-paradox	472
Eigentijd	473
Albert Einstein	476
Einstein-De Sittermodel	498
Einsteinring	499
Einsteins wonderjaar	500
Equivalentieprincipe	503
Friedmann-vergelijking	508
Gebeurtenis (relativiteit)	509
Gesloten tijdachtige kromme	510
Gravity Probe B	510
Invariantie	513
Roy Kerr	514
Kinetische energie	515
Kosmologische constante	518
Lichtkegel	519
Lorentzklok	520
Lorenz-ijk	521
Massa-energiere relatie	521
Meerdimensionaal	528
Michelson-Morley-experiment	529
Minkowski-diagram	531
Minkowski-ruimte	534
Ontaarde materie	537
Relativistisch elektromagnetisme	538
Relativiteitsprincipe	541
Relativiteitstheorie	542
Ruimtetime	544
Schwarzschildradius	547
Signatuur (natuurkunde)	548

Singulariteit (natuurkunde)	549
Sneller dan het licht	549
Tijdreizen	550
Tsjerenkov-effect	554
Vierde dimensie	555
Vierimpuls	557
Vierstroom	557
Waarnemingshorizon	558
Wereldlijn	559
Wormgat	562
Zwaartekrachtspotentiaal	564
Zwaartekrachtsveld	565
Zwart gat	566
Speciale relativiteitstheorie	574
Gelijktijdigheid	574
Inertiaalstelsel	576
Lengtecontractie	579
Lorentz-groep	580
Lorentzfactor	581
Lorentzinvariantie	583
Lorentztransformatie	587
Relativistische impuls	590
Rustmassa	595
Snelheidstransformatie	596
Speciale relativiteitstheorie	599
Tijddilatatie	603
Tweelingparadox	607
Zwart gat	609
Accretieschijf	609
Cygnus X-1	610
Reissner-Nordströmmetrick	611
Sagittarius A	614
Schwarzschildmetrick	615
Spaghettificatie	617
V404 Cygni	618

voorlopig slot **619**

Referenties

Paginabronnen en auteurs 620

Afbeeldingsbronnen, licenties en bijdragers 630

Paginalicenties

Licentie 636

Onopgelost probleem in de natuurkunde

Onopgeloste problemen in de natuurkunde


Dit is een onvolledige lijst van enkele **onopgeloste problemen in de natuurkunde (ook wel fysica)**. Enkele zijn theoretisch omdat de bestaande theorieën de waarnemingen en verschijnselen niet kunnen verklaren. Andere zijn experimenteel. Dit betekent dat het moeilijk is een experiment op te stellen of om een verschijnsel van dichtbij te bestuderen. Nog andere balanceren op de grens van de pseudowetenschappen. Dit zijn wetenschappen die door gerenommeerde fysici niet als zodanig worden onderkend.

Verschijnselen waarvoor nog geen verklaring is.

- De kosmologische constante: Het staat nu vast dat de expansie van het heelal versnelt. Hoe komt dat?
 - De bolbliksem: wat gloeit daar precies? Hoe kan dat verklaard worden?
 - Baryon asymmetrie: hoe komt het dat er meer materie is dan antimaterie?
 - Fundamentele constanten in de fysica: waarom zijn ze zoals ze zijn en niet anders?
 - Melkwegstelseldraaiingsprobleem: hoe komt het dat de buitenste elementen van de Melkweg even snel rond de kern draaien als de binnenste. Als mogelijke oorzaken worden de donkere materie en een gewijzigde dynamica van Newton voorgesteld. Welke theorie is de juiste, als er al een juiste is?
 - Kosmische inflatie: Is de theorie van de kosmische inflatie correct?
 - Gravitatiegolven: Is ons heelal gevuld met gravitatiestraling van de oerknal? Of is zij van astronomische oorsprong zoals rond elkaar wentelende neutronensterren? Wat kunnen we hieruit leren i.v.m. kwantum zwaartekracht en algemene relativiteit?
 - Magnetische monopolen: Zijn er deeltjes die "magnetische lading" dragen. En zo ja, waarom zijn die zo moeilijk te ontdekken?
 - Neutrino massa: Welk is de massa van de verschillende neutrino's?
 - Protonverval: Vervallen protonen? Zo ja, wat is hun halfwaardetijd?
 - Kwantumchromodynamica (QCD) in niet-perturbatieve omgeving: De formules van de QCD blijken niet te kloppen voor de energieniveaus van atoomkernen.
-

Baryogenese

In de kosmologie is **baryogenese** de algemene term voor hypothetische fysieke processen die een asymmetrie veroorzaken tussen baryonen en anti-baryonen in het heel vroege heelal die resulteerden in de materie die tegenwoordig deel uitmaakt van het heelal.

<p><i>Geplaast op:</i> 01-02-2008</p>	<p><i>Dit artikel is een beginnetje over natuurkunde. U wordt uitgenodigd op bewerken ^[1] te klikken om uw kennis aan dit artikel toe te voegen.</i></p>	
---	--	---

Referenties

[1] <http://en.wikipedia.org/wiki:Baryogenese>

Bolbliksem (natuurverschijnsel)

Een **bolbliksem** is een helder oplichtend bolvormig object met een diameter van maximaal 40 centimeter, dat soms waargenomen wordt in de buurt van een blikseminslag en dan secondelang zichtbaar is. Het is een atmosferisch verschijnsel waar lange tijd geen afdoende verklaring voor was. Een bolbliksem doet zich meestal voor bij zwaar onweer maar er zijn ook gevallen bekend waarin een bolbliksem optrad tijdens helder weer.

Ooggetuigenverslagen

De meeste waarnemingen zeggen iets over de afmeting, de baan en de kracht van de bolbliksem. De grootte is vrij gering, ongeveer vergelijkbaar met de omvang van een tennisbal en slechts zelden zo groot als een voetbal. Er zijn, onder andere door piloten, bolbliksems gesignaleerd van dertig meter diameter. Vaak wordt het verschijnsel waargenomen langs bovengrondse hoogspanningskabels of langs een dakgoot. Soms zweeft de bolbliksem door een straat. Meestal dooft de bol uit zonder schade aan te richten. In sommige gevallen is de bolbliksem met een explosie geëindigd en ooit kwam een bolbliksem in een regenton aan zijn einde, waarbij het water in de ton begon te koken.

Bolbliksems kunnen ook binnenshuis doordringen en er zijn meldingen dat de bol via een schoorsteen, deur of raam binnenkwam. Tot de merkwaardigste verhalen



Gravure van 4 mannen in een kamer die opgeschrikt worden door een bolbliksem

behoort het binnendringen via gesloten ramen, soms met schade, maar soms ook zonder enig spoor na te laten. Dit laatste sluit aan bij de theorie die veronderstelt dat de bolbliksem een elektronenwolk (plasma) is. Toch is ook die theorie niet zonder bezwaren, omdat doorgaans aangenomen wordt dat een elektronenwolk niet secondelang kan blijven bestaan.



Ook zouden bolbliksems in vliegtuigen waargenomen zijn, waarbij ze door de cabine zweven.

De meeste waarnemingen zijn gedaan in enkele seconden en onder gevaarlijke omstandigheden. Metingen aan natuurlijkvoorkomende bolbliksem bestaan niet. Dat maakt het moeilijk om verklaringen van dit verschijnsel te bevestigen of te weerleggen.

Verklaringen voor bolbliksems

Sommige deskundigen denken dat het gewoon een blikseminslag is, waarvan het beeld secondelang op het netvlies blijft staan. Aannemelijk is dat het om een bijverschijnsel van een inslag gaat. Er zijn ook mensen die beweren dat ze het door het glas via een spiegel hebben waargenomen, zodat het niet direct op het netvlies geschreven kan worden.

Een recente verklaring^[1] van onderzoekers uit Nieuw-Zeeland gaat ook uit van een blikseminslag. Als de hoeveelheid koolstof in de grond bij het inslagpunt 1 à 2 keer groter is dan de hoeveelheid siliciumoxide, ontstaat bij een temperatuur boven 3000 graden silicium of verbindingen daarvan. Heel kleine deeltjes hiervan vormen fijne dradennetwerken in de vorm van pluizige bollen. De energie die de bol doet gloeien is het gevolg van oxidatie. Bijna alle aspecten van bolbliksems kunnen hieruit verklaard worden: deze kan zowel als een nachtkars uitgaan als eindigen in een explosie.

Een andere verklaring is het aansteken van sporen van aardgas of moerasgas door een zware bliksemlading. Het is bekend dat een arm gasmengsel (slechts enkele procenten brandbaar gas in een mengsel met omgevingslucht) niet tot ontbranding kan komen, *tenzij* men het aansteekt met een zware boogontlading van tientallen tot meer dan honderd kiloampère. De theorie is dan dat in een weiland moerasgas is ontstaan of dat in een straat rioolgas is ontsnapt dat bij een hele zware bliksemlading ontsteekt. Deze theorie verklaart waarom bolbliksem praktisch altijd samengaat met zwaar onweer. Bovendien hebben proeven met arme gasmengsels en zware ontstekingsstromen verschijnselen laten zien die eruit zagen als bolbliksem.

Kunstmatige bolbliksems

Hoewel vroege pogingen om bolbliksems op te wekken niet succesvol waren, slaagden onderzoekers in 2005 in het Duitse Max Planck Instituut voor Plasmafysica om bolbliksemvormige objecten te creëren door over een glas water een potentiaalverschil van 5000 volt te zetten, waardoor er voor een korte periode tot maximaal 60 ampère aan stroom door het water loopt. De watermoleculen vallen door de hitte die dit veroorzaakt uiteen in ionen, die samen een bolvormige plasmawolk vormen.

In 2007 verscheen een artikel in New Scientist magazine waarin Braziliaanse wetenschappers er eveneens in slaagden bolbliksems in het laboratorium te creëren^[2], waarvan video-opnames zijn gemaakt (zie noot^[3]). Een team onder leiding van Antônio Pavão en Gerson Paiva van de Federale universiteit van Pernambuco in Brazilië gebruikte roosters van silicium die slechts 350 micrometers dik waren en plaatste die tussen twee elektrodes waarna er stroom tot 140 ampère door gestuurd werd. Door de elektroden iets uit elkaar te plaatsen werd een boogspanning gecreëerd die het silicium deed verdampen. Hierdoor werden gloeiende delen van silicium gecreëerd die soms gedurende een periode tot 8 seconden bolbliksems ter grootte van een ping-pongbal vormden. Uit de niet duidelijk gedefinieerde oppervlakten van deze bolbliksems kwamen kleine vlammen die het object naar voren of opzij bewogen. Daarnaast werden spiraalvormige rooksporen waargenomen die de suggestie wekken dat de bolbliksems zeer snel ronddraaien. Op basis van de blauw-witte tot oranje witte kleuren wordt geschat dat deze bolbliksems temperaturen van circa 2000 Kelvin hebben^[4].

Een Nederlands bedrijf, genaamd Convectron N.V., heeft in 1985 geprobeerd om synthetische bolbliksems te maken door middel van schakelvonken waarbij stromen van ongeveer 200.000 ampère lopen, en deze te stabiliseren. Het bedrijf ging uit van de theorie dat de energiebron van een bolbliksem een vorm van kernfusie was. Hieruit is nooit een serieus resultaat gekomen.

Referenties

- [1] ontwikkeld door John Abrahamson en James Dinniss van de University of Canterbury in Christchurch, zie o.a. NRC Handelsblad 5 februari 2000
- [2] "Lightning balls created in the lab", New Scientist Magazine, issue 2586, 10 januari 2007, p12 e.v.
- [3] ftp://ftp.aip.org/epaps/phys_rev_lett/E-PRLTAO-98-047705/
- [4] Artikel in de New Scientist online, benaderd op 14 januari 2007 (<http://www.newscientist.com/article/mg19325863.500>)

Donkere materie

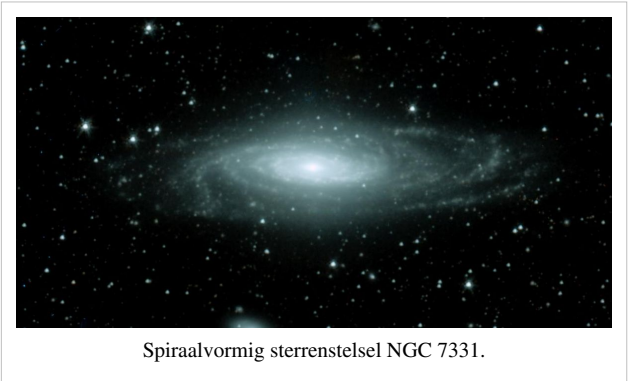
Donkere materie is een hypothetische soort materie in het heelal, die niet zichtbaar is met optische middelen en dus niet te detecteren via de elektromagnetische straling die ons op aarde bereikt. Daarom wordt ze donkere materie genoemd, om haar te onderscheiden van de zichtbare materie. In 2009 (Caldwell en Kamionkowski) wordt gedacht dat de totale hoeveelheid massa/energie van het heelal bestaat uit

- 74% donkere energie
- 22% donkere materie
- 4% normale materie (baryonen).

Donkere materie wordt verondersteld te bestaan om de waargenomen baanbeweging van verre sterren en afgeplatte spiraalvormige sterrenstelsels (zoals ons eigen Melkwegstelsel) te verklaren op een wijze die zowel consistent is met de zwaartekrachttheorie als met de relativiteitstheorie. De zichtbare materie in deze sterrenstelsels heeft namelijk niet genoeg massa om de bewegingssnelheid van de sterrenstelsels in hun baan om het gemeenschappelijk zwaartepunt te kunnen verklaren. Om de bewegingssnelheid met de bestaande zwaartekrachttheorie en de relativiteitstheorie te kunnen verklaren, veronderstellen astronomen dat er extra materie aanwezig is die tot dusverre niet gedetecteerd kan worden.

Donkere materie en afgeplatte spiraalstelsels

In 1933 liet Fritz Zwicky zien dat er iets moest bestaan als donkere materie. Zijn observaties van sterrenstelsels in de Comacluster toonden bij acht daarvan dat ze snelheden bezaten die vele malen groter waren dan verwacht. De snelheden die Zwicky mat bedroegen 3 miljoen kilometer per uur, wat zou impliceren dat de massa zo'n 50 maal groter was dan verwacht werd op grond van de waarnemingen. Zwicky nam aan dat *dunkele Materie*, donkere materie dus, verantwoordelijk was voor deze hoge snelheden.



Spiraalvormig sterrenstelsel NGC 7331.

Rond 1978 deden de Amerikaanse sterrenkundigen Vera Rubin en Kent Ford snelheidsmetingen op afgeplatte spiraalvormige sterrenstelsels, zoals ons eigen Melkwegstelsel. De snelheidsmetingen werden uitgevoerd aan wolken waterstofgas, die zichtbaar zijn in de verste buitengebieden van het spiraalstelsel, waar vrijwel geen sterlicht geproduceerd wordt. Bij elliptische stelsels kon deze meetmethode niet worden toegepast, doordat hierin vrijwel geen gas voorkomt. Met de bekende gravitatiewetten werd uit de gemeten rotatiesnelheid van de afgeplatte stelsels de benodigde massa berekend. Deze massa was veel groter dan de massa die aanwezig was in de zichtbare sterren en gaswolken.

Anders gezegd: de buitengebieden van de spiraalstelsels draaien sneller rond dan verwacht werd op grond van de bekende massa. Dit heet het melkwegstelseldraaiingsprobleem. Er moet dus een sterker zwaartekrachtsveld zijn. Hiervoor werd hypothetisch aangenomen dat er onzichtbare massa aanwezig was in de sterrenstelsels. Deze werd donkere materie genoemd omdat ze niet zichtbaar is.

Het ontbreken van zwarte massa in elliptische sterrenstelsels (zie verderop in dit artikel) enerzijds, en een mogelijke alternatieve verklaring van de afwijkende gravitatiewet door een aanpassing van die wet voor verre afstanden anderzijds, geeft aan dat de theorie van de donkere materie niet de enige mogelijke verklaring is voor de afwijkende rotatiesnelheid van verre afgeplatte sterrenstelsels.

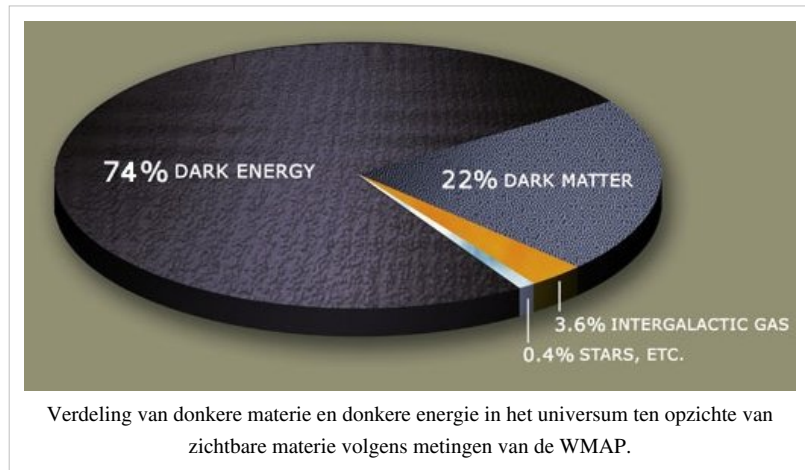
Eigenschappen

Opdat donkere materie een hypothetische verklaring zou kunnen zijn voor de bewegingssnelheid van sommige sterrenstelsels, moet die donkere materie aan de volgende eigenschappen voldoen:

- zij heeft massa
- zij bevindt zich in grote hoeveelheden in alle sterrenstelsels in het heelal
- zij is niet zichtbaar, of anderszins te detecteren via de elektromagnetische straling die ons op aarde bereikt.

Oerknal

Donkere materie is ook een mogelijke oplossing voor bepaalde inconsistenties in de theorie van de oerknal. Metingen met de WMAP brachten aan het licht dat 23 % van de massa van het heelal donkere materie is, dat is veel meer dan de 4 % 'gewone' zichtbare materie. 73 % van de massa is donkere energie volgens $E=mc^2$. Niemand weet echter wat donkere materie is. Het verklaren van de aard van donkere materie is een van de grote problemen van de kosmologie. In filosofische terminologie gaat het om de gepostuleerde zogenaamde oerstof. Een mogelijke hypothese is het bestaan van deeltjes die slechts een zwakke interactie met hun omgeving hebben, de WIMP-deeltjes.



Klonters?

Op grond van onderzoek dat in het voorjaar van 2006 is gepubliceerd, beweren onderzoekers van het Instituut voor Astronomie van de Universiteit van Cambridge te hebben berekend dat donkere materie alleen voorkomt in "klonters" met een diameter van tenminste 1000 lichtjaar en een massa van ca. 30 miljoen zonnemassa's. Zij trekken hieruit de conclusie dat de gemiddelde snelheid van de donkere materie ongeveer 9 km/s bedraagt, hetgeen overeenkomt met een relatief hoge temperatuur van ongeveer 10 000 kelvin [1].

Donkere materie en elliptische sterrenstelsels

In april 2003 presenteerde een Europees team van astronomen verrassend nieuws op de Brits-Ierse National Astronomy Meeting in Dublin: elliptische sterrenstelsels lijken geen donkere materie te bevatten. Deze ontdekking was mogelijk door een nieuwe meettechniek, de Planetaire Nevel Spectrograaf waarbij gebruik werd gemaakt van planetaire nevels in plaats van waterstofgas.

Een verklaring voor deze waarneming is er nog niet. Misschien hebben elliptische sterrenstelsels een andere ontstaansgeschiedenis dan spiraalstelsels. Of misschien is de donkere materie verdwenen door de wisselwerking met andere stelsels.

Er is dus nog een dubbel mysterie:

- Wat is de aard van donkere materie in spiraalstelsels?
- Waardoor is er geen donkere materie in elliptische stelsels?

Men veronderstelt dat de meeste massa van het universum bestaat uit donkere massa. Er zou zeven maal zo veel donkere materie zijn als zichtbare materie. Dit is slechts een vierde van wat nodig is om de expansie van het universum te stoppen. Het bepalen van de aard van de donkere massa is bekend als 'het donkerematerieprobleem' of 'het probleem van de ontbrekende massa'. Het is één van de belangrijkste problemen van de moderne kosmologie.

Het meest algemene standpunt is dat donkere materie bestaat uit elementaire deeltjes, niet de gangbare elektronen, protonen en neutronen, maar neutrino's, axionen of hypothetische deeltjes gekend als zwak wisselwerkende massieve deeltjes (WIMPs), zoals de "neutralino's" (dit deeltje wordt voorspeld in supersymmetrische theorieën als een lineaire combinatie van de superpartners van het foton, het Z-boson en het neutrale higgsboson) of misschien is het

een nog meer exotische vorm van materie.

Alternatieve zwaartekracht in sterrenstelsels

- Een alternatieve mogelijkheid om de gravitatiekrachten in sterrenstelsels te verklaren is te veronderstellen dat de gravitatiekrachten in sterrenstelsels groter zijn dan de Newtoniaanse bij grote afstanden. Dit kan men doen door te veronderstellen dat de kosmologische constante negatief is. (Deze waarde wordt verondersteld positief te zijn op basis van recente observaties.)
- Een andere mogelijkheid is een veranderende Newtoniaanse dynamica te veronderstellen. Een benadering, voorgesteld door Finzi (1963) en opnieuw door Sanders (1984), is de gravitatiepotentiaal U te vervangen door de veralgemeende uitdrukking

$$U = \frac{Gm(1 - Be^{-r/\rho})}{(1 - B)r}$$

waarin m de massa voorstelt, r de afstand, G de constante van Cavendish en B en ρ aanpasbare parameters zijn. Binnen de mechanica van Newton geldt $B = 0$ en of $\rho =$ oneindig.

Al deze benaderingen leiden echter tot moeilijke verklaringen van de verschillende gedragingen van de verschillende sterrenstelsels en clusters, terwijl deze makkelijk te beschrijven zijn door verschillende hoeveelheden donkere materie te veronderstellen. Een andere theorie voor de zwaartekracht moet ook het volgende kunnen verklaren:

1. de details van de vele zwaartekrachtslenzen,
2. verdeling van de achtergrondstraling
3. de groteschaalstructuren en
4. de precisieingen in ons zonnestelsel.

De huidige zwaartekrachtstheorie kan dit alles met de algemene relativiteitstheorie al wel verklaren.

Gegevens van de rotatiecurves van sterrenstelsels geven aan dat ongeveer 90 procent van de massa van een sterrenstelsel onzichtbaar is en alleen door het effect dat het op de zwaartekracht heeft ontdekt kan worden.

Soorten

Men veronderstelt dat er verschillende soorten donkere materie kunnen zijn:

- Baryonische donkere materie (*baryonic dark matter*). Dit zijn dezelfde deeltjes die ook elders voorkomen (in het bijzonder protonen en neutronen, die beiden baryonen zijn, vandaar de naam), maar op plaatsen die ervoor zorgen dat het niet, zoals de gewone sterren en gaswolken, zichtbaar is. Te denken valt aan planeten, bruine dwergen en zwarte gaten.
- Koude donkere materie (*cold dark matter*), ook wel WIMPs genoemd (voor *Weakly Interacting Massive Particles*). Dit bestaat uit nog onbekende deeltjes die massa hebben, maar geen lading, en ook niet onderhevig zijn aan de sterke kernkracht. Ze interageren dus alleen via de zwaartekracht en eventueel de zwakke kernkracht of nog onbekende krachten die 'gewone' materie niet voelt. In de loop der jaren zijn heel wat kandidaten voorgesteld; momenteel gelden de deeltjes die door de theorie van de supersymmetrie worden voorspeld (of althans de lichtste en daarom stabiele daarvan, vermoedelijk het neutralino) als de meest vooraanstaande kandidaat.
- Hete donkere materie (*hot dark matter*) verschilt daarin van koude donkere materie, dat de afzonderlijke deeltjes zeer licht zijn. Ze bewegen zich daardoor met een snelheid die dicht tegen de lichtsnelheid aanligt. Een voor de hand liggende kandidaat is hier het neutrino, dat, als het massa zou hebben (wat nog niet definitief is aangetoond, maar wel zeer waarschijnlijk lijkt), precies aan de voorwaarden voor hete donkere materie zou voldoen. Er worden echter ook wel andere kandidaten genoemd, zoals het axion.

Berekeningen geven aan dat er te weinig baryonische materie kan zijn om alle donkere materie te verklaren. Dit ligt aan de nucleosynthese in het jonge heelal. De aangetroffen abundanties (relatieve hoeveelheid voorkomen) van de

diverse elementen en isotopen leveren daardoor behoorlijk strenge limieten aan de dichtheid van de baryonische materie in het jonge heelal.

Ook een model met alleen hete donkere materie voldoet niet. Hete donkere materie heeft veel minder de neiging om samen te klonten (dichtheidsvariaties te vormen) dan baryonische en koude materie. Als alle niet-baryonische materie heet zou zijn, zou er daarom onvoldoende samenklontering zijn om het ontstaan van sterrenstelsels te verklaren. Hete donkere materie wordt daarom steeds besproken als een deel van een gemengde theorie voor donkere materie.

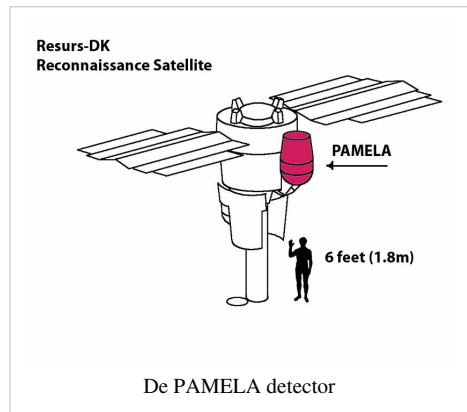
Waarnemingen

Er zijn in 2009 zo'n 20 experimentele projecten om WIMPs te detecteren (Caldwell en Kamionkowski). Het gaat erom de 10 tot 100 keV waar te nemen die een WIMP uit de halo van de Melkweg achterlaat bij botsing met een atoomkern in een detector. Het probleem is dit verschijnsel te scheiden van de enorme ruis.

Het DAMA-experiment in het Gran Sasso-laboratorium onder de Apenijnen gaf aanwijzingen voor een stroom van donkere materie die spoort met de aardbaan door de halo van donkere materie rond de Melkweg. Maar dit resultaat is (nog) niet bevestigd door andere experimenten. De massa van de eenvoudigste supersymmetrische WIMP die werd voorgesteld ter verklaring van de DAMA-bevindingen, werd uitgesloten door andere experimenten.

Een andere mogelijkheid is de waarneming van de annihilatie van WIMPs, waarbij hoog-energetische fotonen en kosmische stralen in de vorm van positronen, antiprotonen en neutrino's vrijkomen met mono-energetische gammastraling. De dichtstbijzijnde bronnen zijn het centrum van de Melkweg, waar de dichtheid van donkere materie hoog is en de kernen van dwergstelsels rond de Melkweg.

In 2008 nam PAMELA - een detector voor kosmische straling op een satelliet - een onverwachte overvloed van positronen waar, net als de ballonproef ATIC die met een calorimeter werkte. Deze positronen zouden afkomstig kunnen zijn van de annihilatie van WIMPs.



Bronnen

Wetenschappelijk

- Caldwell, Robert en Kamionkowski, Marc: *Dark matter and dark energy*, Nature, 458 (2009)487-489 (2 april 2009)

Populair

- Govert Schilling, *Kosmische kiwi draait zonder donkere materie*, Volkskrant 19 april 2003.
- Anouck Vrouwe : *Duistere deeltjes*, Algemeen Dagblad 3/9/03
- Engelstalige Wikipedia



Zie de categorie [\[/wiki/Commons:Category:Dark matter?uselang=nl#mw-subcategories Dark matter\]](#) van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.

Referenties

[1] <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/4679220.stm>

Higgsboson

Het **higgsboson**, **higgsdeeltje** of **Brout-Englert-Higgs-deeltje** is een naar Peter Higgs vernoemd elementair deeltje dat door François Englert en Robert Brout voor het eerst werd voorspeld.^[1] Op 4 juli 2012 werd bekendgemaakt dat met behulp van de Large Hadron Collider een deeltje is ontdekt waarvan de massa overeenkomt met die van het higgsboson. Waarschijnlijk gaat het hier om het betreffende deeltje, maar nieuwe metingen moeten uitsluitsel geven.^[2]

Het higgsboson is van fundamenteel belang: het moet bestaan om het standaardmodel van de deeltjesfysica kloppend te maken. Het is de drager van het higgsveld, dat in het hele universum aanwezig zou zijn. Door de higgsbosonen krijgen alle andere deeltjes massa.^[3] Het ontbrekende puzzelstuk wordt in de populaire media ook wel het **Godsdeeltje** genoemd, iets wat natuurkundigen over het algemeen verafschuwen omdat het een misleidende term is.^{[4][5]}

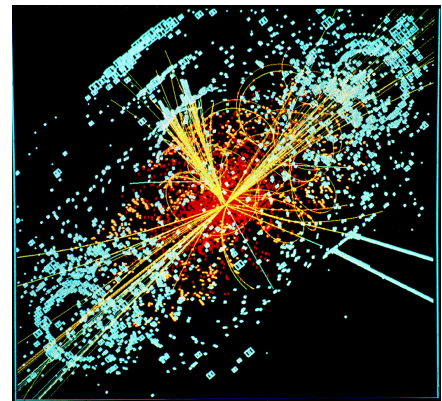
Volgens sommige nieuwe theorieën, in het bijzonder theorieën met supersymmetrie, zou er niet één soort higgsboson bestaan, maar een familie van verschillende higgsbosonen.

Het higgsboson zal spin 0 hebben en zal vervallen via patronen die goed voorspelbaar zijn.

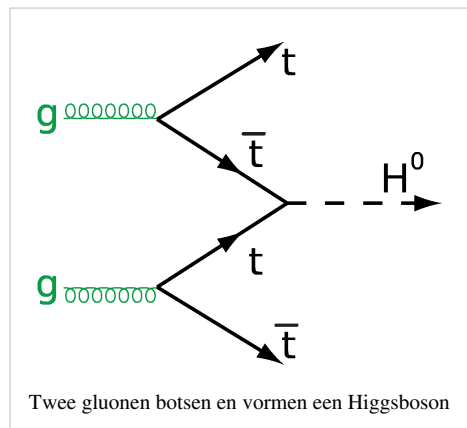
Massa van een higgsboson

Het standaardmodel kan de massa van een higgsboson niet voorspellen. De experimentele zoektocht naar het higgsdeeltje bij de LEP-experimenten heeft een onderlimiet van 114 GeV/c² bepaald. De meeste voorspellingen zeggen dat het 'lichtste' higgsboson (er kunnen meerdere soorten higgsbosonen zijn met verschillende massa) een massa zal hebben die slechts iets hoger is dan de huidige techniek kan aantonen, rond de 120 GeV/c² of minder.

De jacht naar het higgsdeeltje speelde zich af in de Tevatron-versneller van het Fermilab in Chicago, maar de Tevatron is sinds 30 september 2011 gesloten. Met de komst van de Large Hadron Collider (LHC) bij het CERN in Genève, die op 10 september 2008 in gebruik werd genomen, hoopte men het higgsboson dan uiteindelijk echt te kunnen waarnemen.



Simulatie van het hypothetische verval van een higgsdeeltje, CMS/CERN

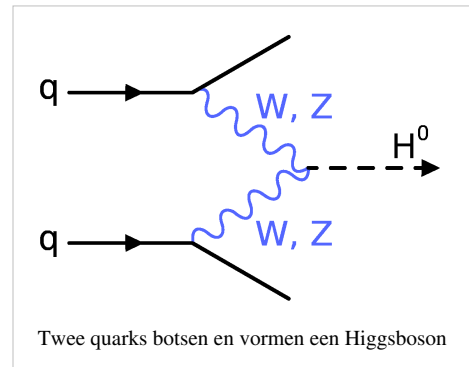


Twee gluonen botsen en vormen een Higgsboson

Grenzen voor de massa van het higgsboson

Met een massa van $125,3 \text{ GeV}/c^2$, lijkt het er op dat het standaardmodel bruikbaar blijft tot aan de theoretische grenzen die aangegeven zijn door de plancklengte, bij $10^{16} \text{ TeV}/c^2$.

Veel theoretici verwachten dat geheel nieuwe natuurkundige wetten zullen blijken te gelden voordat de grens van de TeV-massa's bereikt wordt. Zij baseren zich daarbij op een aantal onregelmatigheden in het standaardmodel. De hoogst mogelijke massa die het higgsboson zou kunnen hebben zonder dat het standaardmodel inconsistent wordt, is ongeveer $1 \text{ TeV}/c^2$ (ca. 1000 u).



Waarnemingen en theorie geven aanwijzingen voor grenzen waarbinnen die massa zal moeten vallen. Het gaat dan met name om de bestaande metingen van de massa van de top-quark en de W- en Z-bosonen.

Het higgsboson speelt, net zoals de top-quark, door hogere orde kwantumcorrecties een kleine maar meetbare rol bij de productie van W- en Z-bosonen. Door de combinatie van metingen is een (indirecte) bovenlimiet van ongeveer $144 \text{ GeV}/c^2$ verkregen. Een pikant detail is dat de waarschijnlijkste massa volgens deze indirecte methode rond (slechts) $76 \text{ GeV}/c^2$ ligt. Deze lage waarde is echter al uitgesloten door de (directe) zoektocht naar het higgsdeeltje bij de LEP-experimenten die een onderlimiet van $114 \text{ GeV}/c^2$ hebben bepaald.

Ontdekking van het higgsboson

Op 13 december 2011 maakte CERN, het Europees Centrum voor Kernonderzoek, bekend dat ze in de meetresultaten van het LHC aanwijzingen hadden gevonden dat er een nieuw deeltje, mogelijk het higgsboson, bestaat. Het boson werd met waarschijnlijkheid $2,3 \sigma$ (97%) waargenomen door de ATLAS- en CMS-detectoren van de Large Hadron Collider.

Op 4 juli 2012 werd officieel aangekondigd dat er een nieuw deeltje (met een heeltallige spin ongelijk aan 1 en daarom mogelijk het higgsdeeltje) gevonden was. De massa is $125,3 (\pm 0,6) \text{ GeV}/c^2$ met een waarschijnlijkheid van $4,9 \sigma$.^[2] Verder onderzoek zal moeten uitwijzen of dit deeltje inderdaad het (lichtste) higgsboson is of een ander nieuw deeltje: een ander nieuw fundamenteel deeltje of (meer waarschijnlijk) een nieuw samengesteld deeltje.

'Godsdeeltje'

De bijnaam van het higgsboson is 'Godsdeeltje', in het Engels *God particle*.^[6] Deze naam zou volgens onderzoekers voor het eerst gebruikt zijn in 1993. De natuurwetenschapper en nobelprijswinnaar Leon Lederman schreef een boek over het deeltje, getiteld *The God Particle: If the Universe is the Answer, What is the Question?*. Lederman zou tegen een aantal vrienden gezegd hebben, dat hij zijn boek *The Goddamned Particle* had willen noemen, om zo uiting te geven aan de frustraties over het niet kunnen vinden van het deeltje. Zijn uitgever zou die titel niet hebben geaccepteerd, mogelijk omdat het kwetsend voor gelovigen zou kunnen zijn. Hij zou de uiteindelijke titel hebben voorgesteld.

'Lederman heeft een hoop uit te leggen', zei de Britse wetenschapper Peter Higgs, die in de jaren zestig het bestaan van het veelbesproken deeltje voorstelde.

James Gillies, woordvoerder van het CERN, was meer vergevingsgezind ten aanzien van de bijnaam. 'Het deeltje heeft natuurlijk niets met God te maken', verklaarde hij. 'Maar ik begrijp waarom mensen het zo noemen. Het higgsboson is cruciaal om de natuur te begrijpen.'



Zie de categorie [\[/wiki/Commons:Category:Higgs boson?uselang=nl#mw-subcategories Higgs boson\]](#) van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.

Fysische deeltjes

Atomaire deeltjes: Molecuul · Atoom · Ion

Subatomaire deeltjes: Nucleon · Atoomkern

Bosonen: Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson

Fermionen: Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Higgsveld

Het **higgsveld** is een hypothetisch energieveld, dat volgens de theorie de massa van de elementaire deeltjes veroorzaakt.

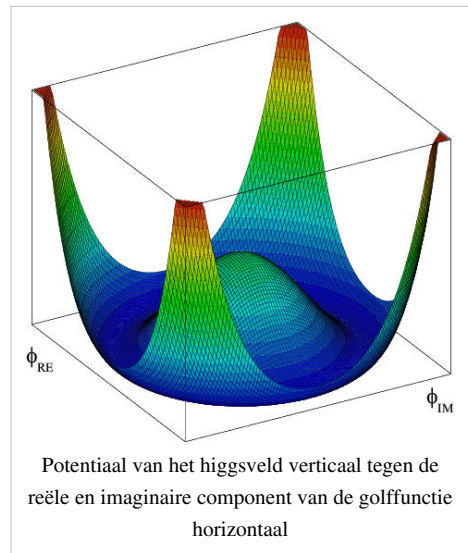
Het higgsveld heeft de status van een wetenschappelijke hypothese (veronderstelling): het zou moeten bestaan om het standaardmodel van de deeltjesfysica kloppend te maken. De dragers van het higgsveld noemt men higgsbosonen. Op 4 juli 2012 werd door wetenschappers van CERN officieel bekendgemaakt dat het higgsboson waarschijnlijk experimenteel ontdekt is, hoewel nieuwe metingen nog uitsluitel moeten geven.^[1]

Beschrijving

Zonder massa (traagheid) is het kleinste duwtje al genoeg om iets snel weg te laten schieten, dus zou alles met de lichtsnelheid door elkaar heen moeten vliegen. Dat is klaarblijkelijk niet zo, en op 31 augustus

1964 publiceerden de Belgische natuurkundigen François Englert en Robert Brout een manier om de massa van elementaire deeltjes te verklaren.^[2] Het higgsboson, waarnaar sinds 2008 met de Large Hadron Collider gezocht wordt, werd echter vernoemd naar Peter Higgs, die op 15 september 1964, dus na Englert en Brout, een soortgelijke theorie publiceerde. Het higgsveld verklaart het bestaan van traagheid met de toevoeging van een extra energieveld aan het standaardmodel.

Simplistisch gezegd zijn higgsbosonen de klontjes in een dikke soep (het higgsveld) waar alle deeltjes doorheen bewegen; hoe meer higgsbosonen er aan een deeltje 'blijven plakken', hoe moeilijker het beweegt en hoe meer massa het deeltje dat er doorheen beweegt dus heeft. Het higgsveld zou een alom aanwezig energieveld moeten zijn, waar alle deeltjes hun massa aan ontleen.



Fysisch-technische eigenschappen

In de technische formulering komt het higgsveld tot stand door spontane lokale symmetriebreking, waarvan het higgsboson het Goldstone-boson is. Het veld heeft twee complexwaardige vrijheidsgraden. Het koppelt aan de andere velden met een Yukawa-koppeling, waarvan de koppelingsconstante evenredig is met de massa van het andere deeltje. Een bijzondere eigenschap van het veld is, dat het zijn laagste energieniveau niet bij veldwaarde 0, maar een specifieke positieve veldsterkte heeft.

Bronnen, noten en/of referenties

- *Een eerste versie van dit artikel was met toestemming van de auteur overgenomen van* (<http://johannez.nl/content/theorie/voorwoord.htm>) (<http://johannez.nl/content/theorie/voorwoord.htm>)

Licht van Hessdalen

Het **Licht van Hessdalen** is een nog onverklaard lichtspektakel^[1] dat zich regelmatig voordoet in de vallei van Hessdalen, in de stad Holtålen, Noorwegen.

Beschrijving

Al zeker sinds 1940 zijn er vreemde, spookachtige lichteffecten gezien in Hessdalen. Een piek in het aantal rapporteringen ligt tussen december 1981 en de zomer van 1984 toen het spektakel zich 15 tot 20 keer per week voordeed. Sindsdien nam de activiteit af en wordt het spookachtige licht nog zo'n 10 tot 20 keer per jaar gespot.

Onderzoek

Sinds 1983 zijn wetenschappers, met aan het hoofd professor Erling Strand, op zoek naar een verklaring. In 1998 werd de "Hessdalen AMS" gebouwd: een volledig automatisch observatorium dat sindsdien elk lichtfenomeen heeft opgenomen. In het "Hessdalen EMBLA"- programma doen wetenschappers en studenten onderzoek om een verklaring te vinden.

Het licht beweegt zich door de lucht en boven het aardoppervlak tegen een snelheid van ongeveer 300 meter per seconde. Meestal zijn er meerdere lichtbollen te zien die elkaar lijken te volgen. Men zou kunnen zeggen dat de lichtbollen met elkaar verbonden zijn met een onzichtbare staaf of touw. Wanneer het licht de grond raakt, laat het daar sporen na. Het licht wordt dan niet geabsorbeerd in de grond, maar zal op zeker ogenblik terug de hoogte inschieten. Men heeft monsters genomen van die grondsporen en de directe omgeving. Uit analyse is gebleken dat het licht niet uitermate warm of koud is, want de structuur van het zand is ongewijzigd gebleven. Opmerkelijk is wel dat de bacteriën in het "aangetaste" zand dood waren in tegenstelling tot het onmiddellijk nabij gelegen zand. Ook wanneer het licht sneeuw raakt, is deze niet gesmolten of bevroren. Wel is het duidelijk dat "iets" de sneeuw heeft geraakt, gezien er een visueel patroon is wat niet voorkomt in de nabije omgeving. Ook de sneeuw werd onderzocht en men kwam terug tot de conclusie dat bacteriën in de "aangetaste" sneeuw werden gedood. Personen die het licht met eigen ogen hebben gezien, zijn van mening dat het zich niet willekeurig beweegt, maar in een "intelligente structuur".^[2]

Mogelijke verklaringen

Hoewel er geen wetenschappelijke verklaringen zijn, ontstonden er wel enkele hypothesen:

- Licht afkomstig van auto's, vliegtuigen, reflecties...: Gezien het licht ook sporen nalaat daar waar het de grond raakt, kan dit hierdoor niet worden verklaard.
- Effect van het poollicht: De beweging en vorm van het poollicht is niet in overeenstemming met het licht van Hessdalen.
- Het licht wordt veroorzaakt door een ongekend proces waardoor er een verbranding ontstaat tussen lucht en scandium dat aanwezig is in het zand van de vallei.^[3]
- Het licht wordt gevormd door ionisatie van lucht met alfadeeltjes afkomstig van radon.
- Het licht is afkomstig van het Piëzo-elektrisch effect. Verder onderzoek heeft uitgewezen dat het Piëzo-elektrisch effect niet sterk genoeg zou zijn om het effect in Hessdalen te verklaren.

Referenties

[1] Video van het lichteffect op <http://www.youtube.com> (<http://www.youtube.com/watch?v=fSgPBOBSJrI>)

[2] National Geographic, serie "Supernatural", aflevering "The Mystery Lights", uitzending "woensdag 4 januari 2012"

[3] http://www.itacomm.net/ph/2007_HAUGE.pdf

Externe links

- Homepage van het Project Hessdalen (<http://www.hessdalen.org/>)
- Hessdalen Lights op wondermondo.com (<http://www.wondermondo.com/Countries/E/Norway/SorTrondelag/Hessdalen.htm>)
- UFO Evidence: Project Hessdalen (<http://www.ufoevidence.org/topics/projecthessdalen.htm>)

Magnetische monopool

Een **magnetische monopool** is een hypothetisch elementair deeltje dat één magnetische pool (een monopool) bevat - slechts een noord- of een zuidpool, niet allebei. Hun bestaan wordt voorspeld door diverse kosmologische en natuurkundige theorieën, maar pogingen om ze te vinden zijn tot nog toe tevergeefs gebleken.

Het was bij het onderzoek naar het monopoolprobleem, dat inhoudt dat er volgens de gangbare oerknaltheorieën veel te veel magnetische monopolen gevormd zouden moeten worden, dat Alan Guth het idee van de kosmische inflatie ontwikkelde.

Literatuur

- Brau, Charles A.. *Modern Problems in Classical Electrodynamics*, Oxford University Press, 2004 ISBN 0-19-514665-4.
- Jackson, John David. *Classical Electrodynamics*, 3rd, Wiley, New York, 1999 ISBN 0-471-30932-X.
- Milton, Kimball A. (June 2006). *Theoretical and experimental status of magnetic monopoles*^[1]. *Reports on Progress in Physics* **69** (6): 1637–1711. DOI:10.1088/0034-4885/69/6/R02^[2].
- Shnir, Yakov M.. *Magnetic Monopoles*, Springer-Verlag, 2005 ISBN 3-540-25277-0.

Externe links

- (en) Magnetic Monopole Searches (collegedictaat)^[3]
- (en) Particle Data Group summary of magnetic monopole search^[4]
- (en) 'Race for the Pole' Dr David Milstead^[5] Freeview 'Snapshot' video door Vega Science Trust en BBC/OU.

Referenties

- [1] <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0602040>
[2] <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/69/6/R02>
[3] <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0302011>
[4] <http://pdg.lbl.gov/2004/listings/s028.pdf>
[5] <http://www.vega.org.uk/video/programme/56>
-

Melkwegstelseldraaiingsprobleem

Het **Melkwegstelseldraaiingsprobleem** is een afwijking tussen de waargenomen draaisnelheden van materie in de schijfdelen van spiraalstelsels en de voorspellingen van de Wetten van Newton betreffende de oplichtende massa. De aanwezigheid van deze tegenstrijdigheid is volgens astronomen een aanwijzing voor het bestaan van donkere materie in de halo van het melkwegstelsel.

In het begin van de jaren '80 bleek uit waarnemingen voor het eerst dat spiraalstelsels niet draaien zoals verwacht volgens de Keplerdynamica. Gebaseerd op dit model zou materie (zoals sterren en gas) in het schijfgedeelte van een spiraal net zo om het centrum van het stelsel moeten draaien als op de manier waarop planeten in ons zonnestelsel om de zon heen draaien, dat is, volgens de Newtonmechanica. Zou men zich hier op baseren, dan zou men verwachten dat de gemiddelde baansnelheid van een object op een bepaalde afstand van het grootste deel van de

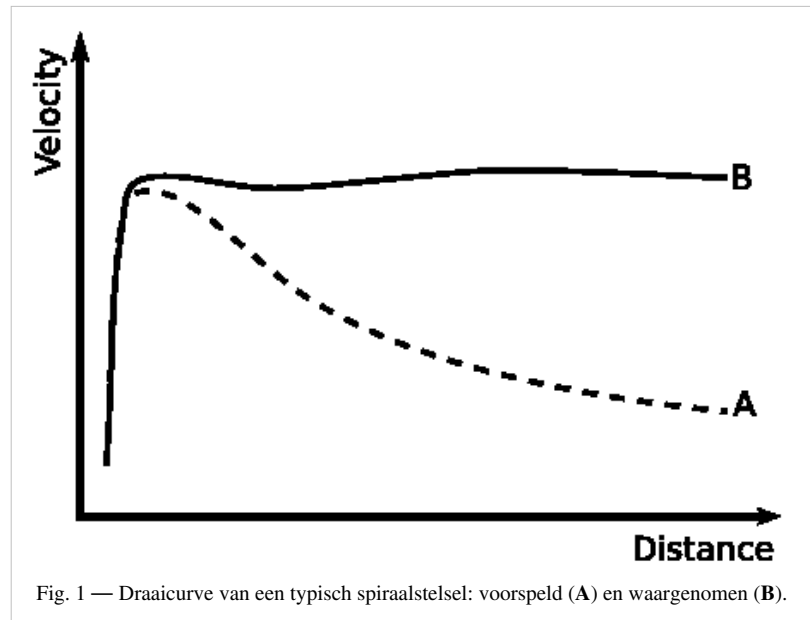


Fig. 1 — Draaicurve van een typisch spiraalstelsel: voorspeld (A) en waargenomen (B).

massadistributie omgekeerd evenredig zou afnemen met de vierkantswortel van de straal van de baan (de gestippelde lijn in fig. 1). Op het moment van de ontdekking van de afwijking dacht men dat de meeste massa van het melkwegstelsel zich in de centrale bult zou moeten bevinden.

Observaties van de draaicurve van spiraalstelsel stemmen hier echter niet mee overeen. Integendeel, de curves nemen in het geheel niet af volgens de verwachte omgekeerde vierkantswortelrelatie maar zijn vrij "vlak" -- buiten de centrale bult is de snelheid een bijna constante functie van de straal (de vaste lijn in fig. 1). De verklaring die de minste aanpassingen aan de natuurwetten vereist is dat er een aanzienlijke hoeveelheid materie die geen licht uitzendt ver buiten het centrum van het melkwegstelsel aanwezig is. Men oppert dat deze extra massa het gevolg is van donkere materie in de halo, waarvan het bestaan 40 jaar eerder was geopperd door Fritz Zwicky in zijn studie naar de massa's van clusters. Op dit moment zijn er een groot aantal observationele bewijzen die wijzen op de aanwezigheid van koude donkere materie en het bestaan ervan is een belangrijk onderdeel van het huidige Lambda-CDM-model dat de kosmologie van het heelal beschrijft.

Een kleine minderheid van de natuurkundigen en sterrenkundigen hebben hun ongemak over de donkeremateriethorie geuit en sommigen hebben zelf een aantal alternatieve verklaringen bedacht. Een van de meest populaire verklaringen die geopperd zijn is de fenomenologische aangepaste Newtondynamica-theorie. Deze theorie stelt dat de afwijkingen niet het gevolg zijn van problemen met de massa-/lichtverhoudingen of kleine details in ons begrip van het kosmologische gedrag van donkere materie, maar eerder het gevolg van dat de natuurkunde van de zwaartekracht op grote schalen niet gelijk blijft. Hoewel deze theorie redelijk succesvol is in het reproduceren van enkele statistische melkwegstelseigenschappen en sleutelobservaties die als bewijs gezien worden voor donkere materie, lijkt dit problemen te geven bij waarnemingen van clusters. Pogingen een theoretische basis op te stellen die goed genoeg is om andere effecten zoals de anisotropiën in de kosmische achtergrondstraling en zwaartekrachtlenzen worden nu pas ontwikkeld.

In 2005 publiceerden twee natuurkundigen van de Victoriauniversiteit een artikel^[1] dat het melkwegstelseldraaiingsprobleem feitelijk veroorzaakt wordt door een onjuiste toepassing van de Newtonmechanica en in feite niet aanwezig is als in plaats hiervan algemene relativiteit wordt gebruikt. Deze conclusie werd snel betwist^[2] als dubieus omdat het bepaalde aannames deed over de bron van de zwaartekracht in een melkwegstelsel. Geen van deze artikelen heeft nog collegiale toetsing ondergaan.

Externe links

- Syllabus sterrenkunde van de Universiteit van Amsterdam over dit onderwerp^[3]

Bronnen, noten en/of referenties

Naga Vuurballen

De **Naga Vuurballen**, ook wel **Mekong Vuurballen** genoemd, is een lichtfenomeen dat zich voordoet boven de Mekong-rivier en dit tussen Isan in Thailand en Laos. Vanuit het water stijgen rode ballen (tot de grootte van een basketbal) en verdwijnen tientallen tot honderden meters hoger zonder ergens enige vorm van hoorbaar geluid te maken.^[1] Dit fenomeen doet zich voor over een afstand van 250 km op een plaats waar de rivier 500 tot 800 meter breed is. Ook stijgen er dergelijke ballen uit nabijgelegen rivieren en meren. Er is nog geen afdoende wetenschappelijke uitleg hoe deze ballen ontstaan.^[2]

De vuurballen kunnen op elk moment opstijgen, maar er is een opmerkelijke stijging tijdens de laatste dagen van oktober, die samenvallen met de festiviteiten van Wan Awk Pansa (= het einde van Vassa) en het einde van het regenseizoen. Dit is echter geen garantie: er zijn jaren bekend waar het hoogtepunt pas enkele dagen na de festiviteiten was.

Bekendheid

De vuurballen zijn lange tijd onbekend gebleven buiten het betreffende gebied. Pas aan het begin van 1990 kregen de festiviteiten meer aandacht, waardoor de vuurballen wereldwijd bekend werden.

Mythe

De lokale bevolking beweert dat hun voorouders de vuurballen al zagen. Er bestaat hierover een mythe. In de Mekong-rivier leven Naga's die regelmatig vuur spuwen tijdens hun reis. Aan het einde van het regenseizoen keert Boeddha van de hemel terug naar aarde. De Phaya Naga (= *koning van de Naga's*) begroet Buddah uit respect veelvuldig. Dit laatste verklaart dan waarom er in deze periode opmerkelijk meer verschijningen zijn.

Mogelijke verklaringen

- Volgens skeptist Brian Dunning worden de vuurballen op een of andere manier afgeschoten. De vuurballen worden door de lokale bevolking onthaald als vuurwerk en telkens er eentje opstijgt is er applaus en gejuw. Als men aan de overkant van de Mekong iets zou afschieten, zou het ongeveer 2,5 seconden duren eer dat geluid de toeschouwers heeft bereikt. Op dat ogenblik is er ofwel nog te veel gejuich bij het publiek waardoor het schot niet hoorbaar is, ofwel is het schot zo stil dat het de afstand al niet overbrugt. Volgens hem is het onmogelijk dat de vuurballen ontstaan door een of andere natuurlijke chemische reactie^[3]
- In 2002 was er sprake dat soldaten uit Laos al jaren verantwoordelijk zijn voor een optische illusie die deze vuurballen verklaarden. De festiviteiten van het einde van het regenseizoen en "Wan Awk Pansa" vallen in Thailand niet altijd op dezelfde avond als in Laos. Dat zou verklaren waarom het toppunt van vuurballen soms

later is. Er is echter nooit bewijs gevonden dat het leger uit Laos betrokken partij is.

- In de sedimenten van de Mekong zitten gassen. Deze gassen ontsnappen. Een onbekend chemisch proces zorgt ervoor dat het gas ontbrandt bij het verlaten van het water.
- Sommige skeptici beweren dat de vuurballen een hoax zijn gezien het fenomeen financieel interessant is. Anderen zijn van mening dat dit bijna niet kan: als de vuurballen al bekend waren bij voorouders en deze opstijgen over een afstand van 250 km, dan is het quasi onmogelijk om dit strikt geheim te houden omdat er te veel mensen bij betrokken zouden zijn.
- De vuurballen worden veroorzaakt door een variant op de Chinese vuurballon.

Referenties

- [1] Video van Naga Vuurballen (<http://www.youtube.com/watch?v=NvrzVKRFQVA>)
- [2] Naga Fireballs op wondermondo.com (<http://www.wondermondo.com/Countries/As/Thailand/NongKhai/NagaFireballs.htm>)
- [3] Naga Fireballs: What is the source of the glowing balls that rise from the Mekong river each October? Naga Fireballs: What is the source of the glowing balls that rise from the Mekong river each October? (<http://skeptoid.com/episodes/4183?title=The>)

Externe links

- Engelse vertaling van een Thais rapport over de vuurballen. (http://www.thaifolk.com/doc/literate/payanak/payanak_e.htm)

Pioneeranomalie

De **Pioneeranomalie** of het **Pioneereffect** is een afwijking in de route van ver verwijderde ruimtevaartuigen ten opzichte van het berekende traject, vooral vastgesteld bij Pioneer 10 en Pioneer 11. De afwijking werd voor het eerst vastgesteld in 1980 en is sinds 1994 het voorwerp van onderzoek en hypothesen. Pas 2012 kwam er een vrij sluitende verklaring voor deze afwijking: warmtestraling.

Beschrijving

Pioneer 10 en 11 zijn onbemande ruimtevaartuigen die ons zonnestelsel verlaten. Ze hebben enkele planeten onderzocht en bevinden zich thans buiten de planeetbanen. De belangrijkste kracht die op hen inwerkt, is de aantrekkingskracht van de zon. Door deze kracht vertragen deze ruimtevaartuigen stelselmatig. Metingen van de positie en de snelheid (zoals met het Dopplereffect) van deze ruimtevaartuigen over de jaren heen geven echter aan dat de gemeten vertraging groter is dan zou kunnen verwacht worden. Deze extra vertraging zou overeenkomen met een kracht die ongeveer 10^{10} maal zo klein is als de zwaartekracht op aarde.

Specifiek aan Pioneer 10 en 11 is dat ze gedurende heel lange periodes zonder enige aandrijving of bijsturing blijven bewegen. Ze hebben dat niet nodig, want ze hebben geen specifiek doel meer. Veel andere ruimtevaartuigen worden regelmatig bijgestuurd, zodat minieme afwijkingen onmeetbaar worden in vergelijking met de uitgevoerde bijsturingen. Een ander storend effect van sommige ruimtevaartuigen is dat ze een krachtbron aan boord hebben waaruit kleine hoeveelheden ongecontroleerde straling vrijkomt. Op basis van de derde wet van Newton veroorzaakt deze straling dus ook een kracht op het ruimtevaartuig die verantwoordelijk kan zijn voor afwijkingen in de baan.

Verklaring

Er zijn twee grote families in de verklaringen voor dit Pioneereffect. De eerste gaat uit van klassieke fysica, terwijl de andere verklaringen bepaalde elementen uit de fysica gebruikt op basis van deze anomalie.

Vertragsingsmodel

In deze verklaringen wordt verwezen naar oorzaken die de minieme gemeten kracht kunnen verklaren. Zo wordt verwezen naar de Kuipergordel of donkere materie, naar interplanetaire materie, zonnewind of kosmische straling. Het probleem met verschillende van deze oorzaken is dat de mogelijk resulterende krachten vaak vele malen kleiner zijn dan wat bij de Pioneer-toestellen vastgesteld wordt. Naast deze externe oorzaken werd ook gezocht naar elementen uit de Pioneers zelf die een vertragend effect zouden kunnen hebben. Warmtestraling is daarbij het meest waarschijnlijke.

Warmtestraling

Op dit moment is een asymmetrische warmtestraling de meest waarschijnlijke verklaring voor deze anomalie. Beide Pioneers zijn uitgerust met kernbrandstof en de warmtestraling die hierbij vrijkomt vertoont een zekere assymetrie, o.a. door de antennes die enkel aan de zonnkant voorkomen en waartegen de warmtestraling zou weerkaatsen. Reeds in 2008 waren experts het erover eens dat deze assymetrie voldoende is om één derde van de waargenomen anomalie te verklaren. Een zwak punt in deze verklaring zat op dat moment in het degressieve aspect van deze thermische straling: naarmate de nucleaire brandstof opgebruikt wordt, zakt de hoeveelheid warmte en dus zou ook de afwijking die ze veroorzaakt jaar na jaar zwakker moeten worden, wat niet meteen duidelijk bleek uit de metingen van de anomalie zelf. Maar volgens Slava Turyshev van het Jet Propulsion Laboratory in een paper onder de titel "Support for temporally varying behavior of the Pioneer anomaly from the extended Pioneer 10 and 11 data sets," te publiceren in *Physical Review Letters* in 2011, zou de anomalie wel degelijk zwakker worden naarmate de tijd vordert en niet constant zijn zoals eerst werd aangenomen.^[1] Verder onderzoek leidde in 2012 tot de conclusie dat, als rekening wordt gehouden met de assymetrische warmtestraling van de reactoren, er geen statistisch significante afwijking meer is in het traject van de Pioneer ruimtetuigen.^[2]

Nieuwe fysica

In deze verklaringen worden bepaalde principes van de fysica op de helling gezet.^[3] Zo zou het kunnen dat in een omgeving met zeer lage gravitatiekrachten bepaalde effecten optreden die niet meetbaar zijn op aarde. Dit wordt o.a. beschreven in de hypothese van de aangepaste Newtoniaanse dynamica. Ook de theorie van het uitdijende heelal kan een effect hebben op de tijdsmeting.^[4] Verder wordt er verwezen naar het Casimireffect, of naar een mogelijk verschil tussen gravitatiemassa en inertiële massa, wat het zogenoemde equivalentieprincipe op de helling zou zetten. Sommige wetenschappers zien een verband met de Fly-by anomalie die afwijkingen beschrijft die ruimtevaartuigen ondergaan tijdens het voorbijvliegen van de aarde.

Verwijzing

- [1] Turyshev, Slava. [Turyshev Support for temporally varying behavior of the Pioneer anomaly from the extended Pioneer 10 and 11 Doppler data sets]. *Pioneer Anomaly due to Thermal Radiation*. Cornell University. Geraadpleegd op 22 July 2011.
- [2] Slava G. Turyshev, Viktor T. Toth, Gary Kinsella, Siu-Chun Lee, Shing M. Lok, Jordan Ellis, *Support for the thermal origin of the Pioneer anomaly*, 11 april 2012 (<http://arxiv.org/abs/1204.2507>)
- [3] Slava G. Turyshev & Viktor T. Toth, *The Pioneer Anomaly* (<http://www.livingreviews.org/lrr-2010-4>), *Living Rev. Relativity* 13, 2010, 4, <http://www.livingreviews.org/lrr-2010-4>. Retrieved 4 September 2010
- [4] C. Johan Masreliez, *The Pioneer Anomaly - A cosmological explanation* (<http://www.springerlink.com/content/u7572500u82688p6/>). preprint (http://www.estfound.org/downloads/pioneer_paper.pdf) (2005) *Ap&SS*, v. 299, no. 1, pp. 83–108 → $a_p = H_0 \cdot c$

Protonverval

Het standaardmodel van deeltjesfysica verklaart dat protonen stabiel zijn, dat wil zeggen dat de wetten van de fysica niet toestaan dat een proton spontaan in een positron en fotonen vervalt wegens behoud van het baryongetal. Nochtans heeft men onlangs voorgesteld dat de overheersing van materie over antimaterie in het heelal het resultaat is van een zeer lichte onevenwichtigheid in de verhouding materie/antimaterie die zeer vroeg in zijn vorming voorkwam. Deze onevenwichtigheid zou uitzonderlijk klein geweest zijn, in de orde van 1 in elke 10.000 deeltjes. Nadat het grootste deel van de materie en de antimaterie was vernietigd, was materie al wat over was van de baryonische materie in ons huidige heelal.

Dit betekent dat in wezen niet de wet van behoud van het baryonenaantal wordt gebroken, maar het **protonenverval** het onvermijdelijke mechanisme was om het baryonenaantal terug naar de evenwichtstoestand te brengen, in de zin dat het de originele onevenwichtigheid in het heelal corrigeerde om al de huidige materie in ons heelal mogelijk te maken.

Bronnen, noten en/of referenties

- Dit artikel of een eerdere versie ervan is (gedeeltelijk) vertaald vanaf de Engelstalige Wikipedia ^[1], die onder de licentie Creative Commons Naamsvermelding/Gelijk delen ^[2] valt. Zie deze pagina ^[3] voor de bewerkingsgeschiedenis.

Referenties

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/En%3Aproton_decay?oldid=12732583
[2] <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>
[3] http://en.wikipedia.org/wiki/En%3Aproton_decay?offset=20050331&action=history

Theorie van alles

De **theorie van alles** of **unificatietheorie** is een (nog niet bestaande) theorie die de verschillende fundamentele theorieën in de natuurkunde met elkaar verenigt. Zo'n theorie zou alle elementaire deeltjes en de fundamentele natuurkrachten in één model samenbrengen. Dit model zou dan hebben gegolden in de allereerste minieme fractie van een seconde na de oerknal. Hoewel Einstein als een van de eersten poogde zijn algemene relativiteitstheorie te verzoenen met de kwantummechanica in één enkele veldentheorie, wat hem overigens niet gelukt is, heeft hij de term "theorie van alles" nooit gebruikt.

Problemen bij unificatie

In de natuurkunde worden de deeltjes en de krachten daartussen beschreven door middel van velden. Een unificatietheorie probeert de vier fundamentele krachten (of velden) van de natuur te verenigen:

- Sterke kernkracht: kracht die quarks samenhoudt in neutronen en protonen, en die neutronen en protonen samenhoudt in de atoomkern. Het uitwisseldeeltje voor deze kracht is het gluon.
- Elektromagnetische kracht: de kracht die op elektrisch geladen deeltjes inwerkt. Het foton is het uitwisseldeeltje voor deze kracht.
- Zwakke kernkracht: verantwoordelijk voor radioactiviteit, een afstotende interactie op korte afstand tussen elektronen, neutrino's en quarks. Wordt geregeld door de W-bosonen en het Z-boson.
- Zwaartekracht: een aantrekkingskracht op zowel korte als lange afstand, die op *alle* deeltjes werkt, maar tevens op het niveau van de microwereld veel en veel zwakker is dan de andere krachten. Doordat deze kracht echter evenredig toeneemt met de massa, wordt hij toch belangrijk op het niveau van wat voor ons gewone, alledaagse objecten zijn, en is het tevens de kracht die ervoor zorgt dat er niets zomaar van de aarde afvliegt en dat manen,

planeten en sterren in hun baan door de ruimte blijven. De vooralsnog hypothetische uitwisseldeeltjes worden gravitonen genoemd.

De eerste drie krachten worden beschreven door het standaardmodel, een kwantummechanische veldentheorie. De zwaartekracht is onderdeel van de algemene relativiteitstheorie. Een conflict tussen de beide modellen ontstaat in situaties waarin ze allebei zouden moeten worden toegepast: sterke zwaartekrachtsvelden op kleine schaal, bijvoorbeeld bij een zwart gat of tijdens de oerknal. In dat soort gevallen blijkt dat de combinatie geen zinvolle uitkomsten geeft. Er komen bijvoorbeeld oneindig grote getallen uit. Dat betekent dat er iets niet klopt. Het wachten is dus op een theorie van alles, die de twee wereldbeelden (in licht aangepaste vorm) in zich verenigt.

Geschiedenis

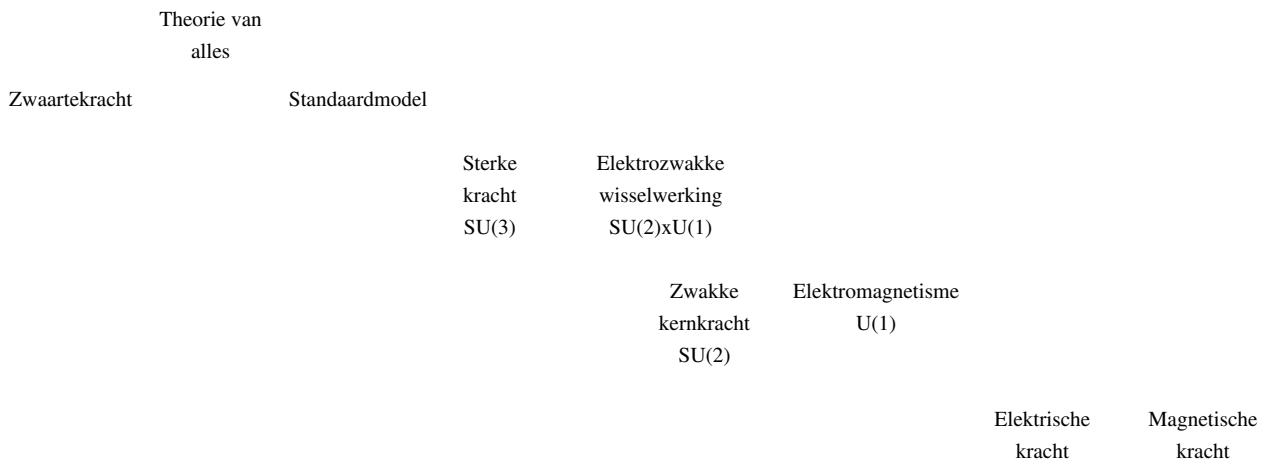
In de geschiedenis van de fysica hebben er verschillende verenigingen plaatsgevonden, die ogenschijnlijk verschillende fenomenen in een groter kader plaatsen. In chronologische volgorde:

- Aan het eind van de 18e eeuw kende men drie krachten: zwaartekracht, elektrische kracht en magnetische kracht. Door (onder andere) het werk van Hans Christian Ørsted, die ontdekte dat elektrische en magnetische fenomenen gerelateerd zijn, begon men te zoeken naar één enkele achterliggende theorie. Naar aanleiding van het werk van Gauss, Faraday en Ampère, slaagde James Clerk Maxwell er in om alle wetten van elektriciteit en magnetisme samen te vatten in slechts vier vergelijkingen. De Wetten van Maxwell worden tot op vandaag gezien als een bijzonder elegante en bondige vereniging van de talloze elektromagnetische fenomenen die onze werkelijkheid voor een groot deel maakt tot wat ze is. Het is ook omwille van dit inzicht dat men over 'elektromagnetisme' is beginnen spreken, in de plaats van 'elektriciteit en magnetisme'.
- In het begin van de 20e eeuw besepte men, naar aanleiding van de ontdekking van radioactiviteit, dat er nog een kracht werkzaam moet zijn in ons heelal. Deze kracht doopte men de zwakke kernkracht. De lange weg tot het beter begrijpen van deze kracht mondde uit in het succesvol beschrijven van deze kracht, en uiteindelijk het inzicht dat deze kracht eigenlijk in een groter kader te beschrijven is, tezamen met de elektromagnetische kracht. Voor de bijdragen aan de unificatie van de zwakke en de elektromagnetische wisselwerking in een enkele theorie van de zogenaamde Elektrozwakke wisselwerking, ontvingen Abdus Salam, Sheldon Glashow en Steven Weinberg in 1979 de Nobelprijs voor de Natuurkunde.
- Maar naast de zwakke kernkracht, besepte men dat voor het verklaren van de stabiliteit van atoomkernen nog een andere kracht moet invoeren. Deze kracht werd Sterke kernkracht gedoopt. Na vele experimenten vanaf 1950, slaagden Gell-Mann, Ne'eman en Zweig er in deze kracht op een goede manier te beschrijven. De theorie werd Kwantumchromodynamica genaamd. Omdat deze theorie gelijkaardig geformuleerd is als de theorie van de elektrozwakke interactie, is het vrij natuurlijk om beiden samen te voegen. Deze theorie noemt men het Standaardmodel. Deze theorie is (voor zover we weten) in staat om **alle** bekende fenomenen (behalve zwaartekracht) te beschrijven. De theorie verklaart waarom kernen bij elkaar blijven, waarom sommige kernen radioactief zijn, hoe chemische bindingen werken, Tot op vandaag wordt de theorie gezien als de mooiste vereniging van natuurkrachten in de geschiedenis van de fysica.

Ondanks al deze unificaties, is er nog een puzzel die tot op vandaag niet opgelost is. Het is immers nog een groot vraagstuk hoe men het bovengenoemde Standaardmodel kan samenvoegen met de theorie van Zwaartekracht. Hoewel dat op het eerste gezicht niet zo moeilijk lijkt, zijn er fundamentele problemen. Het Standaardmodel is immers een kwantum-theorie. De beste beschrijving die we hebben van zwaartekracht (relativiteitstheorie) is echter een "klassieke theorie", niet kwantummechanisch dus. Veel fysici zijn het erover eens dat de uiteindelijke samenvoeging van de theorie van Zwaartekracht en het Standaardmodel vereist dat we een kwantummechanische versie van zwaartekracht kunnen formuleren. Het is dus al verschillende decennia lang het hoogste doel van de theoretische fysica om een consistente theorie van kwantumzwaartekracht (ook wel 'kwantumgravitatie' genaamd) te formuleren.

Als dat lukt, kunnen we alle bekende natuurwetten in één enkel kader beschrijven. Zoiets zouden we dan de "Theorie van alles" noemen.

Deze uitleg wordt mooi samengevat in de volgende figuur:



De aanduidingen SU(3), SU(2) en U(1) zijn de wiskundige aanduiding van de theorie. Meer technisch: het zijn de ijkgroepen van de overeenkomstige Kwantumveldentheorie.

Kandidaten voor een theorie van alles

De meest beloftevolle poging tot volledige unificatie is tot nu toe de snaartheorie. Deze theorie is wiskundig erg elegant, en heeft veel goede eigenschappen. Het is immers een goede kwantumgravitatie-theorie, maar heeft een probleem. Er zijn enkele verschillende versies van de theorie, en het is ook niet duidelijk of er een versie is die exact overeenkomt met onze werkelijkheid. Zelfs als die er al is, blijft dan nog de moeilijkheid om aan te duiden welke versie dan de juiste is. Een van de problemen is dat de trillingspatronen die door de snaartheorie worden voorgesteld volgens de formule $E=mc^2$ van Einstein een hoeveelheid energie (en daarmee massa) produceren die vele malen groter is dan de Planckmassa. Dit is in tegenspraak met het feit dat de massa's die elementaire deeltjes zoals quarks en neutrino's hebben zeer dicht bij 0 ligt. Deze ogenschijnlijke inconsistentie hoeft echter niet het einde voor de supersnaartheorie te betekenen, omdat ook bekend is dat dergelijke deeltjes al snel de neiging hebben instabiel te zijn, dat wil zeggen uit elkaar te vallen. Het volgende doel is daarom te bewijzen dat de trillingspatronen die door de snaartheorie worden voorgesteld de geringe massa van de elementaire deeltjes exact kunnen verklaren ^[1].

Er zijn ook andere theorieën, zoals Loop-kwantumzwaartekracht, en andere minder bekende pogingen, maar ook daar zijn er nog geen succesvolle kandidaten die echt in aanmerking komen om een theorie van kwantumzwaartekracht te zijn, die onze werkelijkheid beschrijft.

Anekdote

Einstein trachtte in zijn laatste levensjaren al een unificatie van alle natuurwetten te bereiken. Het is hem (of zijn leerlingen Theodor Kaluza en Oscar Klein) wel gelukt een model te formuleren dat elektromagnetisme en zwaartekracht in één model verenigt. Hoewel erg interessant, is deze theorie geen kwantum-theorie van gravitatie, maar een klassieke vereniging van beide theorieën. Het was wel een eerste voorbeeld van een fysische theorie die het bestaan van extra dimensies aannam. Deze visie is later nog veel teruggekomen. In de snaartheorie is het bijvoorbeeld strikt noodzakelijk dat er veel meer dimensies zijn dan de voor ons bekende ruimtetijd-dimensies. Verklaren hoe het komt dat we die extra dimensies niet zien is een van de grote uitdagingen voor de snaartheorie ^[1].

Referenties

[1] De ontrafeling van de kosmos: over de zoektocht naar de theorie van alles, Brian Greene, Het Spectrum, 2005

Veldentheorie van alles

Een **veldtheorie van alles** of **geünifieerde veldentheorie** is een theorie van alles in de vorm van een kwantumveldentheorie. Eenvoudig gezegd: dit is een theorie waarin alle bekende natuurkrachten (zowel zwaartekracht als alle krachten van het Standaardmodel) worden beschreven met een theorie waarbij de fundamentele grootheden velden zijn, die leven op een bepaalde achtergrond (de ruimtetijd). Het is niet zeker of zo een theorie bestaat, en zelfs als dat zo zou zijn, hebben we daar vandaag de dag nog geen goede kandidaat voor.

Achtergrond

Het is al verschillende decennia een zoektocht in de theoretische natuurkunde om een theorie te vinden die alle tot nu toe bekende natuurkrachten verenigt in één enkel model. De grote uitdaging is het verenigen van de kwantumtheorie met de zwaartekrachtstheorie van Einstein. Dit zijn immers twee verschillende uithoeken van de fysica zoals we ze nu kennen, en zijn -bijzonder genoeg- erg moeilijk om te vermengen in één enkele theorie. De beste kandidaat tot nu toe is snaartheorie, maar deze is nog niet bewezen. Echter, de snaartheorie is **geen** veldentheorie van alles, omdat snaartheorie geen gewone veldentheorie is. Vanuit het standpunt van snaartheorie lijkt het dus dat een theorie van alles noodzakelijk andere bouwstenen heeft dan een gewone veldentheorie. Dat zou dus eventueel suggereren dat het een *veldentheorie* van alles niet mogelijk is, hoewel dat uiteraard niet uitgesloten is.

Er is echter ook een minder sterke betekenis van de term "veldtheorie van alles". Doorheen de vorige eeuw zijn alle bekende natuurkrachten (op zwaartekracht na) verenigd geworden in een elegante theorie, het Standaardmodel, door deze krachten te formuleren als ijktheorieën. Het idee van een ijktheorie is dat ogenschijnlijk verschillende velden in wezen één object (veld) vormen, dat er anders uitziet -afhankelijk van de beschrijving, of 'ijk' van het systeem. Momenteel lijkt het er op dat er drie ijkgroepen bestaan, $SU(3)$, $SU(2)$, $U(1)$. Het zou echter mogelijk zijn dat deze velden allemaal behoren tot één enkele ijkgroep. Dat zou betekenen dat alle materie en energie die we om ons heen zijn in wezen verschillende 'looks' van een achterliggend fundamenteel veld zijn. Als zo een theorie bestaat, zou men ook dit een verenigde veldentheorie kunnen noemen. Dat is dan een zwakkere betekenis dan de voorgaande, in de zin dat deze theorie alle krachten, behalve zwaartekracht, in een geheel zou gieten. Hoewel minder ambitieus dan een algehele theorie van alles, zou ook zo een theorie terecht met de term unificatie bestempeld kunnen worden. Zo een theorie noemt men dan ook wel GUT, wat staat voor Grote geUnificeerde Theorie. Ondanks verschillende pogingen in deze richting, zoals bijvoorbeeld zgn. $SU(5)$ -unificatie voorgesteld door de fysicus Howard Georgi, is er tot op vandaag nog geen echt overtuigende kandidaat voor de GUT bekend.

Onopgelost probleem

Byblos-syllabenreeks

De **Byblos-syllaben**, meestal **pseudo-hiërogliefen** genoemd, zijn een schriftvorm, sinds 1928 gevonden te Byblos (Libanon) op in totaal negen koperen platen en spatels en stenen reliëfs. Ze stammen vermoedelijk uit de 18e tot 15e eeuw v.Chr. en in sommige tekens lijkt Egyptische invloed zichtbaar. Het gaat om een syllabisch schrift, dus een schrift waarbij ieder teken net als bij de meeste hiërogliefen een lettergreep aangeeft, dat door Feniciërs gebruikt werd. Het heeft ongeveer 120 tekens. Sommige geleerden beweren dat het schrift geen invloed heeft gehad op het latere Fenicische schrift, anderen menen van wel.

Er bestaat geen ontcijfering van het Byblosschrift die algemeen aanvaard wordt, ook al zijn er verschillende voorgesteld (Dhorme 1946, Mendenhall 1986, Garbini 1988): een systematische en controleerbare ontcijfering is dan ook zeer moeilijk vanwege de geringe hoeveelheid documenten (alle teksten samen bevatten slechts 1038 tekens). In het boek 'Het Byblosschrift ontcijferd' (oktober 2010) licht dr. Jan G.P. Best toe hoe hij vanuit archeologische benadering tot de ontcijfering van het schrift is gekomen na veertig jaar onderzoek. Volgens Jan Best namen de schrijvers van Byblos een kwart van de tekens van Lineair A over met de bijbehorende klankwaarden. Hij begon aan zijn ontleding omdat hij meer wilde weten over de oude brons- en tinhandel.^[1] Volgens Best was het breken van de code niet mogelijk geweest zonder de hulp van het Egyptisch Hiëroglifisch, het Kretenzisch Hiëroglifisch en het Lineair A, dat hij denkt te hebben gereconstrueerd.

Externe link

- Byblosschrift ontcijferd [2]

Bronnen

- Jan Best: Het Byblosschrift ontcijferd, in het voetspoor van Willem Glasbergen (2010)

Noot

T E15 18x	† H7 ix	† H6 5x	†† G17 33x	† E12 3x	† B1 2x	† B3 22x	† B2 4x
† E17 2x	† B7 2x	† E18 7x	† E18' 2x	† E18'' 2x	† E18''' ix	† H1 10x	† F1 8x
† H2 ix	† I2 ix	† E16 2x	† C1 ix	† E19 18x	† H8 ix	† H8' ix	† A16 15x
† I4 ix	† G8 36x	† ix	† G16 2x	† I3 ix	† E20 3x	† H5 4x	† G14 2x
† G13 2ix	† F3 7x	† A13 3x	† I10 ix	† E7 63x	† H4 ix	† E8 47x	† E9 2x
† E6 29x	† G10' ix	† I1 2x	† A15 40x	† C2 8x	† A20 3x	† B11 27x	† E5 26x
† B4 ix	† G3 25x	† B8 20x	† B9 5x	† B6 6x	† G2 ix	† E14 17x	† B13 3x
† B12 6x	† E1 9x	† E2 ix	† G2' 3x	† A14 8x	† I5 ix	† E24 2x	† G9 ix
† B5 15x	† A18 10x	† I7 ix	† G4 2ix	† G5 ix	† I9 ix	† G10 2x	† I12 ix
† D1 15x	† E4 4x	† D3 30x	† D2 24x	† D4 26x	† D5 6x	† G6 28x	† D8 4x
† D6 4x	† D7 ix	† G7 18x	† E13 5x	† F6 2x	† H3 2x	† E10 16x	† G15 6x
† I8 ix	† I6 ix	† E23 11x	† G1 18x	† E22 25x	† E25' 2x	† B10 2x	† A17 19x
† E3 5x	† E11 15x	† A12 7x	† E21 5x	† F5 15x	† A21 10x	† D9 17x	† E21' ix
† E26 2x	† G12 3x	† F2 ix	† F4 ix	† G11 ix	† A1 ix	† A2 ix	† A3 8x
† A4 8x	† A9 2x	† A11 ix	† A19 ix	† A10 20x	† A5 ix	† A6 4x	† A7 ix
† A8 ix	† A8' ix	† I11 ix	† G10' ix	† ix	† A9' ix	† ix	† ix
† ix	† ix	† ix	† ix	† ix	† ix	† ix	† ix
BYBLOS SYLLABARY							
hvd 2006							

Cypro-Minoïsch schrift

Het **Cypro-Minoïsch schrift** (ook wel **Oud-Cypriotisch schrift** of **Lineair C**, afgekort **CM**) is een tot op heden niet volledig ontcijferd schriftstelsel, vermoedelijk een syllabisch schrift, dat in de Late Bronstijd (ca. 15e-12e eeuw) gebruikt werd. Het schrift is aangetroffen in Ugarit en Latakia. Het schrift heeft zich ontwikkeld uit het Minoïsche Lineair A en is de voorganger van het Cypriotisch schrift, dat van de 11e tot de 4e eeuw in gebruik was.

Binnen het Cypro-Minoïsch schrift onderscheidt men drie nauw verwante schriftsystemen (CM I, CM II en CM III). Daarnaast is er nog een archaïsche variant, die nog zeer dicht bij het Lineair A staat. Recentelijk zijn echter twijfels geuit of CM I wel een coherente groep vormt.^[3] Door vergelijking met verwante ontcijferde schriftsystemen zoals Lineair B en het Cypriotisch schrift, zijn ongeveer 50 lettergreepsymbolen met redelijke zekerheid ontcijferd. Desondanks zijn de teksten in het Cypro-Minoïsch schrift nog niet leesbaar, omdat de Cypro-Minoïsche taal nog onbekend is.

In totaal bestaat het schrift uit 114 lettergreepsymbolen, waarvan er 24 in alle drie de schrifttypen vertegenwoordigd zijn.^[4] Vondsten in het Cypro-Minoïsch schrift bestaan hoofdzakelijk uit literaire teksten op gebrande kleitabletten, wellicht votiefinscripties, vijf kleicilinders met nog onbekende functie, en kleine kleiballetjes met inscripties.

Noten

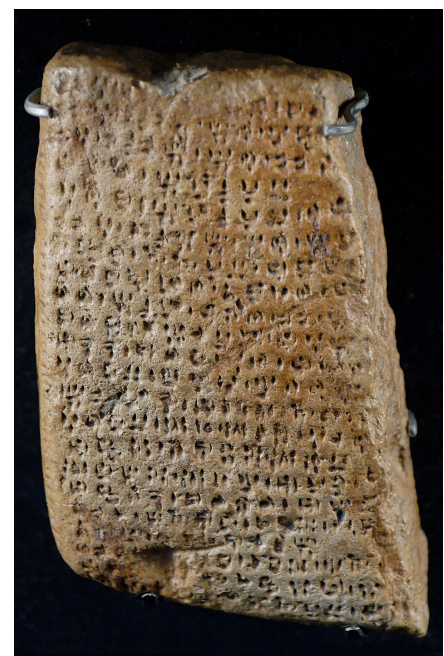
- [1] Emilia Masson, Étude de vingt-six boules d'argile inscrites trouvées a Enkomi et Hala Sultan Tekke (Chypre), (zie onder referenties), pp.14, nr. 8, figuur 8
- [2] Émilie Masson, Deux fragments de tablettes chypro-minoennes trouvés a Enkomi en 1953 et 1969, *Journal des Savants* (1978) pp.49-86
- [3] Thomas G. Palaima, Cypro-Minoan Scripts, in: Y. Duhoux e.a. (ed.), *Problems in Decipherment*, Leuven, Peeters, 1997, pp. 121-188
- [4] Wellicht moeten de aantallen iets hoger worden weergegeven, omdat ze gebaseerd zijn op de onvolledige lijst van CM I bij Masson, *Cyprominoica*.

Referenties

- Emilia Masson, Étude de vingt-six boules d'argile inscrites trouvées a Enkomi et Hala Sultan Tekke (Chypre), *Studies in Mediterranean Archaeology* 31,1, Studies in the Cypro-Minoan Scripts 1. Åström, Göteborg 1971. ISBN 91-85058-41-6, ISBN 91-85058-42-4
- Emilia Masson, Cyprominoica - Repertoires, Documents de Ras Shamra, Essais d'Interpretation, *Studies in Mediterranean Archaeology* 31,2, Studies in the Cypro-Minoan Scripts 2. Åström, Göteborg 1974. ISBN 91-85058-41-6, ISBN 91-85058-43-2 (bevat o.a. een lijst met lettergreepsymbolen)
- P. Meriggi, I nuovi testi Ciprominoici, in: *Minos* 13 (1973) 197ff.
- Werner Nahm, Studien zur kypro-minoischen Schrift I, *Kadmos* 20 (1981) 52-63.
- Werner Nahm, Studien zur kypro-minoischen Schrift II, *Kadmos* 23 (1984) 164-179.



Cypro-Minoïsch kleiballetje (CM I)^[1]



Cypro-Minoïsche kleitablet uit Enkomi (CM II)^[2]

- Stephan Hiller, Die kypro-minoïschen Schriftsysteme, *Archiv für Orientforschung*, Beiheft 20. Berger, Horn 1985.
- E. Masson, A propos du grand cylindre inscrit d'Enkomi, *Kadmos* 12 (1973) 79-80.
- O. Masson, Répertoire des inscriptions chypro-minoïennes, *Minos* 5 (1957), 9-27. (met een door latere tekstvondsten inmiddels onvolledige lijst van Cypro-Minoïsche inscripties)



Zie de categorie [\[/wiki/Commons:Category:Cypro-Minoan inscriptions?uselang=nl#mw-subcategories Cypro-Minoan inscriptions\]](#) van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.

Fermiparadox

De **Fermiparadox** is een paradox waarin hoge schattingen voor de kans op het bestaan van intelligent buitenaards leven in schril contrast staan met een gebrek aan bewijs daarvoor.

De leeftijd van het universum en het reusachtige aantal sterren lijken aanwijzingen voor de aanname dat buitenaards leven veel zou moeten voorkomen (zie de vergelijking van Drake). Tijdens een lunch in 1950 praatte de natuurkundige Enrico Fermi daarover met zijn collega's, en zou toen hebben gezegd: "Waar *zijn* ze dan? Als er zo veel buitenaardse beschavingen in de Melkweg zijn, waarom is er dan geen bewijs, zoals sondes, ruimteschepen of radio-uitzendingen?"

Deze eenvoudige vraag "Waar zijn ze dan?" (of, "Waar is iedereen?") is misschien apocrief maar in het algemeen krijgt Fermi de eer voor het op heldere en eenvoudige wijze onder woorden brengen van het vraagstuk van de waarschijnlijkheid van buitenaards leven.

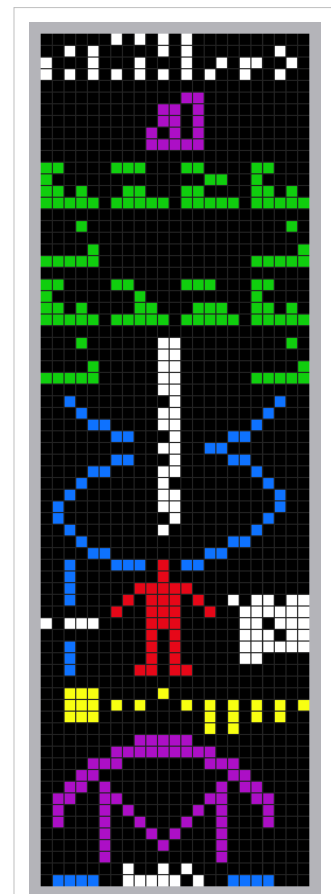
Er is een breed scala van mogelijke oplossingen voor de Fermi-paradox voorgesteld. Al deze oplossingen vallen onder een van de drie hoofdcategorieën: 1) buitenaards leven bestaat niet 2) buitenaards (intelligent) leven bestaat maar heeft nog nooit contact gelegd met de aarde 3) buitenaards leven heeft in het verleden of het heden op enigerlei wijze contact gelegd met de aarde.

Basis

De Fermiparadox is een conflict tussen een argument van schaal plus waarschijnlijkheid en het ontbreken van bewijs. Een completere definitie kan als volgt omschreven worden:

De grootte en leeftijd van het universum suggereert dat er veel technologisch geavanceerde buitenaardse beschavingen zouden moeten bestaan. Deze hypothese is echter inconsistent met het ontbreken van gevonden bewijs die deze stelling ondersteunt.

Buitenaards leven bestaat niet



Een grafische voorstelling van de *Areciboboodschap* - de eerste menselijke test van het gebruik van radiogolven in de poging om te communiceren met buitenaardse beschavingen

Aarde is uniek

- De aarde is uniek en is de enige planeet in het uni- of multiversum die levende wezens herbergt. Het is ondanks decennialang onderzoek en speculatie nog steeds niet duidelijk hoe uit levenloze stoffen vanzelf leven kan ontstaan (zie abiogenese). Mogelijk is de aarde de enige plek in de geschiedenis van het multiversum, waar zich ooit leven heeft ontwikkeld.

Buitenaards leven bestaat maar heeft nog nooit contact gemaakt met de aarde

Zeldzaamheid

- Intelligent leven is extreem zeldzaam of wij zijn zelfs het enige of het verst ontwikkelde bewuste leven in het heelal. Het vanzelf ontstaan van leven is uiterst zeldzaam en de ontwikkeling naar intelligente wezens verloopt zeer traag.
- Intelligent leven bestaat wel, maar is, net zoals wij, nog niet ver genoeg ontwikkeld om andere planeten te bereiken. Het heelal bestaat te kort voor de ontwikkeling van zulk intelligent leven.

Niet duurzaam

- Intelligent leven roeit zichzelf spoedig uit in een kernoorlog of door andere zelfveroorzaakte rampen.

Intelligent leven wordt al snel "bovenmenselijk"

- Intelligent leven groeit binnen kort tijdsbestek uit tot een technologische singulariteit en is daarna onherkenbaar voor ons.
- De mens is een fase in de ontwikkeling van intelligent leven, die daarna automatisch overgaat in een intelligent wezen met de mogelijkheden van wat wij engelen of goden zouden noemen. In die volgende fase zijn technische communicatiemiddelen van nu niet meer nodig omdat men dan wellicht telepathisch communiceert. Men reist dan met een onbeperkte snelheid door het heelal met speciale ijl-stoffelijke lichamen. Zoals de huidige mens niet meer als gelijke kan/wil communiceren met dieren, zo hebben die "goden" niet meer de behoefte of interesse om te communiceren met mensen. We kunnen dus alleen andere wezens van een gelijk ontwikkelingsniveau ontmoeten. Dit stuit echter op technische problemen van codering van informatie en van energie om de immense afstanden te overbruggen. De kans op een sonde, ruimtevaartuig of overdracht is te gering door de geringe tijd dat de typisch menselijke (tussen)fase in een bepaald stelsel zal bestaan.
- Ander intelligent leven begeeft zich in andere dimensies. De snaartheorie gaat er van uit dat op zeer kleine schaal de ruimte niet vier-, maar tien-, of zelfs elfdimensionaal is. De zes 'extra' dimensies zijn 'opgerold', en daardoor niet waarneembaar.

Angst

- Intelligent leven vermijdt uit eigen beweging elk contact met ons.

Ongediertebestrijding

- Er is in het universum iets of iemand aanwezig die intelligent leven opspoort en vervolgens uitroeit als 'ongedierte'. Alle beschavingen die eventueel in het verleden contact hadden kunnen leggen met de aarde zijn hier aan ten prooi gevallen. Om de een of andere wijze is de aarde nog niet opgespoord of is zij nog niet ver genoeg in haar ontwikkeling om de moeite waard te zijn om te worden uitgeroeid.

Buitenaards leven bestaat en heeft (ooit) contact met de aarde (gemaakt)

Buitenaardsen zien bewust af van contact

Buitenaardsen zijn aanwezig, maar voor de mensheid niet detecteerbaar

Buitenaardse intelligentie is allang gearriveerd op Aarde maar om voor ons onbekende redenen kiest het ervoor zich niet openbaar te vertonen. Hun extreem geavanceerde technologie, die het mogelijk maakt om ons te bereiken, maakt het voor hen ook mogelijk om zich onzichtbaar voor ons over de Aarde te bewegen. Een collega van Fermi, de Hongaar Leó Szilárd, maakte hierover de grap dat "aliens" inderdaad al hier zijn en dat de mens ze kent als Hongaren.

Dierentuinhypothese

De dierentuinhypothese stelt dat er superintelligent buitenaards leven bestaat dat er voor kiest om geen contact met het leven op aarde op te nemen om de menselijk beschaving zo de kans te geven om zich in lijn met zijn eigen natuurlijke evolutie te ontwikkelen.^[1]

Deze ideeën zijn misschien wel het meest aannemelijk als er een relatief universele culturele of juridische entiteit zou bestaan die zijn wil aan een veelheid aan buitenaardse beschavingen op kan leggen. In een universum zonder hegemoniale macht zouden sommige willekeurige beschavingen met onafhankelijke doelstellingen het naar alle waarschijnlijkheid in hun belang vinden om contact te maken. Dit maakt een met beschaafd leven gevuld universum, waar echter duidelijk omschreven en effectief afdwingbare regels gelden, plausibeler.

Deze theorie kan instorten onder een foutieve uniformiteit van motief aanname: er is niet meer nodig dan dat een enkele cultuur of beschaving binnen ons detectiebereik besluit om zich niet aan de dwingende voorschriften te houden. De waarschijnlijkheid van een dergelijke overtreding neemt toe met het aantal beschavingen. Misschien is een voldoende technologisch en sociaal geavanceerde beschaving echter in staat om de handhaving van regels effectiever af te dwingen dan de huidige mensheid gewoon is.

T.W. Hair ^[2] heeft een Monte Carlo-analyse uitgevoerd op de tijdspannes die tussen het verschijnen van de verschillende beschavingen in de Melkweg liggen, dit op basis van gemeenschappelijke astrobiologische aannames die suggereren dat aangezien de eerste beschaving zo'n indrukwekkende voorsprong op later ontstane beschavingen zou hebben, zij in de gelegenheid was om de dierentuinhypothese als een galactische/universele norm op te leggen en de resulterende "paradox" door een cultureel stichtereffect, met of zonder de voortdurende activiteit van de eerste stichtende beschaving.

Voetnoten

[1] (1973). *The zoo hypothesis*. *Icarus* **19** (3).

[2] Hair, Thomas W. (2011). "Temporal Dispersion of the Emergence of Intelligence: An Inter-arrival Time Analysis", *International Journal of Astrobiology* 10(2): 131–135 (2011), (<http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=8143571>)

Lineair A

Het **Lineair A** is een schrift dat ontwikkeld is door de Minoïsche beschaving op Kreta (3000 - 1370 v.Chr.). Het is het eerste Europese schrift. Het is nog steeds niet geheel ontcijferd, omdat men de taal niet kent.

Ontstaan en gebruik

Aanvankelijk bestond het schrift als beeldschrift uit ideogrammen. Hierbij stelde elk teken een voorwerp, handeling of persoon voor; het doet denken aan Egyptische hiërogliefen. De tekens werden in klei gedrukt met stempels.

De Kretenzers maakten gebruik van het Lineair A om de administratie van het paleis bij te houden. Van veel van de ca. 90 schrifttekens is wel de uitspraak bekend, omdat de vorm van die tekens bijna hetzelfde is als in het latere Lineair B, maar de taal is geen Grieks (maar Prehelleens) en voor een deel nog steeds een raadsel.

Semitische hypothese

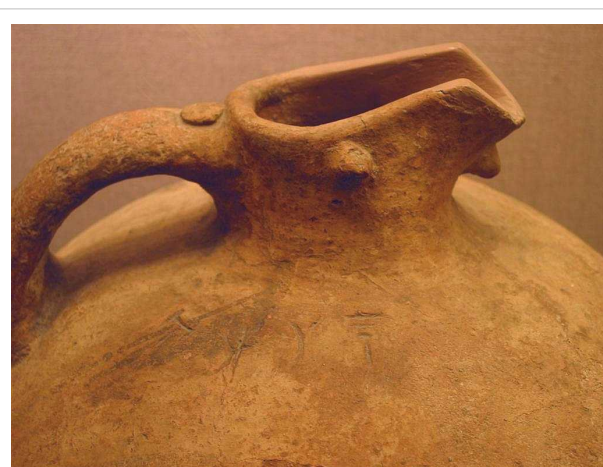
Een van de meer serieuze mogelijkheden is dat de taal van het Lineair A tot de (West-)Semitische taalgroep behoort. Deze stelling is vooral door Cyrus H. Gordon verdedigd, in een reeks publicaties sinds 1956^[1]. Een feit is dat een aantal woorden waarvan we zowel de uitspraak, als uit de context de betekenis kennen, overeen lijkt te komen met gebruikelijke woorden in talen als het Hebreeuws of Fenicisch. Gordon claimde voor zo'n twee dozijn woorden Semitische parallellen te kunnen aanwijzen.

Een voorbeeld is het woord "ku-lo" waarmee totalen van inventarisaties worden aangeduid: dit correspondeert met Semitisch "kull" ("kul", "kol") = "totaliteit, geheel". Maar zoals ons woord "totaal" ontleend is aan het Latijn, zo zou ook in het Lineair A het woord "ku-lo" een leenwoord kunnen zijn. Het gebruik van het woord "ku-lo" bewijst dus niet dat de taal van het Lineair A Semitisch is, en de meeste deskundigen staan sceptisch tegenover Gordons hypothese.

Meer recent heeft de Nederlander Jan G.P. Best in een lange reeks publicaties geprobeerd de "Semitische oplossing" voor het Lineair A aannemelijk te maken. Hij identificeerde de taal van Lineair A als een Noordwest-Semitische taal en onderbouwde zijn theorie met een opmerkelijke veelvoud aan argumenten. Niet alleen wist hij aan de hand van geschiedkundige argumenten aannemelijk te maken dat Kreta vanaf ca. 2000 v.Chr. een belangrijke doorgangplaats was voor internationale handel tussen Europa, Egypte en de Levant, ook was hij in staat de tekeninventaris van het Lineair A terug te voeren op drie bronnen: de Egyptische hiërogliefen, authentieke Kretenzische tradities en het Assyrisch-Babylonisch spijkerschrift. Apert onwetenschappelijk kan echter een lezing van een Lineair A-teken genoemd worden, dat Best (in zijn *Het Byblosschrift ontcijferd* (2010),)afleidt van de Oudegyptische hieroglyef van 'twee naar voren uitgestrekte armen' dat in de egyptologie standaard wordt gelezen als *k3*. De ware uitspra(a)k(en) daarvan rond 2000 v.Chr. staat/staan niet vast, want vocalen werden *niet* weergegeven in het Oudegyptisch, maar waarschijnlijk klonk die als 'ko' of 'koe', zeker zo in latere perioden: b.v. in het woord *hai-koe-pta(h)* "tempel van de



Tabletten met *Lineair A* gevonden in Santorini



Lineair A-inscriptie op een kruik, afkomstig uit Akrotiri.

generatieve energie van de god Ptah (van Memfis)'(in het Ugaritisch weergegeven als *hqpt*) waarvan uiteindelijk het Griekse *Ai-gy-ptos* -dan als landsnaam, dus de naam *Egypte*, is afgeleid. Het van dezelfde stam *k3* afgeleide woorddeel *k3-* in het Oudegyptische samengestelde toponiem *k3-km* "Zwarte Stier" wordt zo ook in het Grieks als *Kochome* weergegeven. Dit fonologisch gegeven van *k3* gold, wanneer de oorspronkelijke betekenis van het Egyptische ideogram tenminste overeenkwam met of nauw gelieerd bleef met het beeldteken *k3*. Werd ditzelfde Egyptische teken echter als *fonogram* geschreven in b.v. uitheemse in Egypte gebruikte woorden, dan kon de klank ervan alle vocale kanten opgaan: *ke, ki, ko, koe, ka*. Toch leest Best het volgens hem op Kreta overgenomen Egyptische teken zonder enige twijfel en uitleg als de *ene* Lineair A-lettergreep met vaste uitspraak: *ka*. En waarom leest Best '(de Egyptische god) Re' voor het Kretenzisch teken van een 'lotus' (als het al een lotusbloem is)? Waarom nam men op Kreta dan niet het simpele Egyptische teken van de zonnescijf (een cirkel)over om die *Egyptische* godsnaam mee weer te geven? Het wordt door dr.Jan Best helaas niet uitgelegd. (Deze kritische noten naar drs.Carles Wolterman, egyptoloog) Niet alleen de qua taalmateriaal spaarzame en voor een ontcijfering nauwelijks toereikende kleitabletten wist Best als Semitisch te interpreteren, hij slaagde er bovendien in de langere zogenaamde "Libation inscriptions" als Noordwest-Semitisch te interpreteren. Deze teksten zijn met name belangrijk, omdat ze in de regel complete zinnen vormen, waardoor de grammaticale eigenschappen van de taal gemakkelijker kunnen worden geanalyseerd.

Een hoofdprobleem bij de toetsing van een ontcijfering van het Lineair A is het geringe aantal teksten in dat schrift. Daardoor is intern bewijs moeilijk te vinden. Nieuwe hoop rijst, nu duidelijk is geworden dat in Byblos teksten zijn gevonden in een schrift dat vele tekens met het Lineair A gemeenschappelijk heeft en bovendien volgens de consensus van de geleerden eveneens Semitisch noteert. Mochten deze teksten inderdaad overtuigend als Semitisch geïnterpreteerd kunnen worden, dan kan met behulp van die teksten de geldigheid van de ontcijfering van het Lineair A door Jan G.P. Best bevestigd worden. Een toenemend aantal geleerden van overal op aarde raakt overtuigd van de juistheid van de ontcijfering door Jan G.P. Best, die in 2009 in Ugarit-Forschungen publiceerde dat hij het Byblosschrift eveneens heeft ontcijferd. Over het Lineair A zegt hij tegenwoordig dat het niet om ontcijfering maar om 'reconstructie' gaat. ^[2]

Vedische hypothese

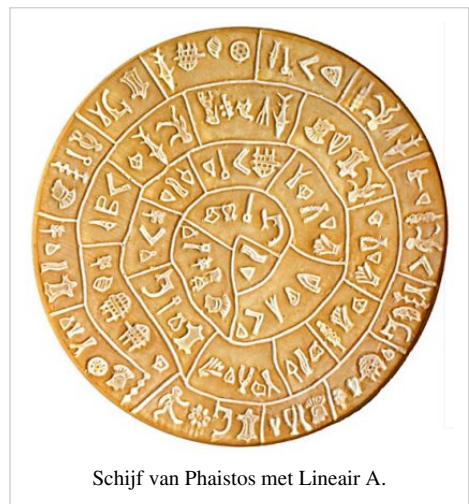
Zeer recent is de fascinerende theorie geopperd dat de Minoïsche taal gerelateerd is aan het Vedisch, en daarmee een Indo-Europese taal zou zijn. Ook zou de Minoïsche cultuur gerelateerd zijn aan die van de Indusvallei. Zie de artikelen in het tijdschrift *Minoa*.^[3]Wikipedia:Bronvermelding

Ontwikkeling

In de loop der tijd werden deze tekens vereenvoudigd en uiteindelijk bleven er alleen lijnen over: zogenoemd lineair schrift. Niet enkel werden de tekens vereenvoudigd tot lijnen, ze stelden ook geen begrippen meer voor, maar lettergrepen van een woord (syllabisch schrift).

Onderscheid met Lineair B

Het lineair lettergrepenschrift van de Kretenzers heet "Lineair A" om het te onderscheiden van dat van de Myceners of Achaeërs, dat behalve op Kreta voornamelijk ook op het Griekse vasteland werd gebruikt, het "Lineair B". Het Lineair B ontwikkelde zich, na de vestiging van de Myceners op Kreta, uit het Lineair A. De taal van dit Lineair B is Grieks.



Schijf van Phaistos met Lineair A.

Referenties

- [1] Vóór de Bijbel; Het Spectrum Aula pocket, 1966, bladz 271,
- [2] Jan G.P. Best *Het Byblosschrift ontcijferd - In het voetspoor van Willem Glasbergen* Amsterdam, 2010, p. 95
- [3] Minoa (<http://www.minoa.nl>)

Externe link

- Minoa, elektronisch tijdschrift over de Minoïsche taal en cultuur (<http://www.minoa.nl>)

Schijf van Phaistos

De **Schijf van Phaistos**, ook wel bekend als **Phaistos Disk** of **discus van Phaestus** (Grieks: Δίσκος της Φαιστού), is een archeologische vondst die op het Griekse eiland Kreta is gedaan.

Beschrijving

De schijf heeft een diameter van ongeveer 16 centimeter, is ongeveer 16-19 millimeter dik. Het tablet is van aardewerk, waarop aan beide zijden in een spiraalvorm met stempeltjes pictogrammen zijn ingedrukt die mogelijk een alfabet vormen.

De herkomst is onzeker: misschien Klein-Azië, een gissing van de archeoloog Arthur Evans, of misschien Kreta zelf, hoewel op een paar voorwerpen na de meeste Kretenzische kunst in symboliek en stijl nogal afwijkt. Het teken van de 'mannenkop met hoofdtooi (van veren, riet?)' is wel vergeleken met de Egyptische afbeeldingen van dergelijk getooide Filistijnse krijgers die oorspronkelijk uit Klein-Azië schijnen te zijn gekomen.

De schijf, in 1908 gevonden op de Minoïsche site Phaestus (op Kreta), wordt aan de hand van de archeologische context gedateerd op ongeveer 1700 tot 1600 v.Chr. Momenteel wordt het voorwerp bewaard in het archeologisch museum te Iraklion.



Kant A van het origineel

Ontcijferd schrift

Er is veel gespeculeerd over de taal waarin de schijf is geschreven, en over de inhoud van de tekst, maar weinig hierover is zeker. Doordat de tekst kort is, is het moeilijk bij de ontcijfering statistische methodes te gebruiken. Zolang wat er op de schijf staat niet is ontcijferd, is het zelfs niet eens helemaal zeker dat het om een tekst in een natuurlijke taal gaat. Een zekere Peter Aleff heeft zelfs een boek laten verschijnen waarin hij beweert dat het gaat om een bord voor het - uit de Bronstijd inderdaad bekende - spel Senet.













John Chadwick noemde de schijf 'het eerste document in machineschrift ter wereld'^[1] omdat het werd vervaardigd door een reeks reliëfstempels (per teken een stempel) in natte klei te drukken. De maker van de stempels moet van plan zijn geweest meer documenten met deze stempels op te stellen.



























Hoewel de schijf afkomstig is uit een gedocumenteerde opgraving, valt niet uit te sluiten dat het gaat om een vervalsing.^[2] Een thermoluminescentiedatering, die uitsluitel zou kunnen geven, heeft tot op heden niet plaatsgevonden.



Analyse van het schrift


Het schrift is vermoedelijk een lettergreepalfabet, gezien het vrij grote aantal tekens: 45. Statistisch gezien is het waarschijnlijk dat in een zo korte tekst, 241 of 242 karakters, nog een dozijn andere tekens niet vertegenwoordigd is. De tekst loopt van buiten naar binnen en lijkt verdeeld te zijn in dertig woorden aan de ene kant en 31 aan de andere. Bij de fabricage is er door de maker op één punt een verbetering aangebracht. De lijst van tekens is de volgende, inclusief frequentie:


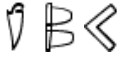
















N°	Glyfe	Beschrijving door Evans	Aantal	Opmerkingen
01		"voetganger"	11	
02		"bevederd hoofd"	19	meest frequent symbool, altijd bij het begin van een woord
03		"getatoeëerd hoofd"	2	
04		"gevangene"	1	
05		"kind"	1	
06		"vrouw"	4	
07		"helm"	18	
08		"pantservuist"	5	
09		"tiara"	2	
10		"pijl"	4	alleen op kant A

11		"boog"	1	
12		"schild"	17	12 keer in groep 02-12; vergeleken met Lineair B <i>qe</i> and Luwisch <i>TURPI</i>
13		"knuppel"	6	
14		"kluisters"	2	
15		"haak"	1	
16		"zaag"	2	
17		"deksel"	1	
18		"boemerang"	12	vergeleken met Lineair A/B 37, Linear B <i>ti</i>
19		"winkelhaak"	3	alleen op kant A; vergeleken met Linear B <i>sa</i>
20		"dolium"	2	
21		"kam"	2	
22		"slinger"	5	alleen op kant B
23		"zuil"	11	vergeleken met Lineair A/B 05 of Lineair A/B 06, Linear B <i>to</i> of <i>na</i>
24		"bijenkorf"	6	vergeleken met Linear B <i>wa</i>
25		"schip"	7	
26		"hoorn"	6	
27		"runderhuid"	15	
28		"stierenpoot"	2	
29		"kat"	11	
30		"ram"	1	
31		"adelaar"	5	alleen op kant A
32		"duif"	3	
33		"tonijn"	6	
34		"bij"	3	
35		"plataan"	11	vergeleken met Linear B <i>te</i>
36		"wingerd"	4	alleen op kant B; vergeleken met Linear B <i>ni</i> (vijgeboom)

37		"papyrus"	4	
38		"rosette"	4	
39		"lelie"	4	
40		"ossenkop"	6	
41		"fluit"	2	
42		"rasp"	1	
43		"zeef"	1	vergeleken met Linear B ta_2
44		"bijltje"	1	
45		"golf"	6	vergeleken met Linear B ra_2

Tekst

(A1) 	(A2) 	(A3) 	(A4) 
(A5) 	(A6) 	(A7) 	(A8) 
(A9) 	(A10) 	(A11) 	(A12) 
(A13) 	(A14) 	(A15) 	(A16) 
(A17) 	(A18) 	(A19) 	(A20) 
(A21) 	(A22) 	(A23) 	(A24) 
(A25) 	(A26) 	(A27) 	(A28) 
(A29) 	(A30) 	(A31) 	
(B1) 	(B2) 	(B3) 	(B4) 
(B5) 	(B6) 	(B7) 	(B8) 
(B9) 	(B10) 	(B11) 	(B12) 

(B13) 	(B14) 	(B15) 	(B16) 
(B17) 	(B18) 	(B19) 	(B20) 
(B21) 	(B22) 	(B23) 	(B24) 
(B25) 	(B26) 	(B27) 	(B28) 
(B29) 	(B30) 		

Ontcijfering

Er zijn talloze pogingen gedaan het schrift te ontcijferen. Vaak door leken, die meestal de typische beginnersfout maken de tekst te willen lezen als een reeks logogrammen. Maar ook linguïsten van naam hebben hun reputatie op het spel gezet door een poging te wagen. Steven Roger Fischer ging er in de jaren tachtig vanuit dat de taal Grieks is en door vergelijking met twee van de andere Kretenzische schriften: Lineair A en Lineair B, meende hij tot een doorbraak gekomen te zijn. Het zou om een oproep tot de strijd gaan om een invasie af te slaan. Hoewel zijn interpretatie bijval kreeg van het publiek, waren zijn collegae eensgezind in hun afwijzing. In de 21e eeuw is Achterberg ervan uitgegaan dat de taal Luwisch was en het een landakte betrof. De Amsterdamse zgn. Alverna Research Groep rond dr. Jan Best publiceerde eveneens een dergelijke reconstructie waarin de eigennaam *Nestor* zou voorkomen. Wikipedia:Bronvermelding

Het grote probleem met iedere poging ligt hem hierin dat de tekst zo kort is dat er te veel mogelijke oplossingen zijn. Het kan daardoor niet getoetst worden of één ervan de juiste is. Zolang er geen andere teksten gevonden worden, lijkt het ontcijferen daardoor principieel onmogelijk. Zelfs als de oorspronkelijke schrijver ons ergens de betekenis had onthuld, zou om dezelfde reden niet kunnen bewezen worden dat hij de ware betekenis heeft neergeschreven.

Trivia

- Onno Quist bestudeert in Harry Mulisch' De ontdekking van de hemel deze schijf.
- De schijf werd nagemaakt en gebruikt voor de Nederlandse televisieserie Bassie & Adriaan: De Verzonken Stad.

Bronnen, noten en/of referenties



Zie de categorie [\[/wiki/Commons:Category:Phaistos disk?uselang=nl#mw-subcategories Phaistos disk\]](#) van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.

Onopgelost probleem in de wiskunde

Onopgeloste vraagstukken in de wiskunde

In principe zijn er zeer veel **onopgeloste vraagstukken in de wiskunde** aangezien het gebied waar de wiskunde betrekking op heeft oneindig groot is. Desondanks zijn er in de loop van de geschiedenis van de wiskunde enkele onopgeloste vraagstukken naar voren gekomen die binnen de wetenschap als zeer belangrijk gekenmerkt worden.

De millenniumprijsproblemen

In het jaar 2000 stelde het Clay Institute in Cambridge in Massachusetts de (volgens het instituut) zeven belangrijkste onopgeloste vraagstukken in de wiskunde op en loofde voor de oplossing van een probleem een prijs van een miljoen Amerikaanse dollar uit. Tot nu toe is van dit zogenoemde millenniumprijsprobleem alleen het bewijs van het Vermoeden van Poincaré opgelost door Grigori Perelman in 2002. De zeven millenniumprijsproblemen zijn:

- Het bewijs van het Vermoeden van Birch en Swinnerton-Dyer
- Het bewijs van het Vermoeden van Hodge
- De analyse van het bestaan en de regulariteit van de oplossingen van de driedimensionale incompressibele Navier-Stokes-vergelijkingen.
- De oplossing van het P = NP probleem
- Het bewijs van het Vermoeden van Poincaré (opgelost in 2002 door Grigori Perelman)
- Het bewijs van de Riemann-hypothese
- Het oplossen van de vraagstukken binnen de Yang-Mills-theorie

De aanleiding voor het Clay Institute voor het opstellen van de millenniumproblemen was dat honderd jaar eerder (op 8 augustus 1900) David Hilbert de 23 problemen van Hilbert had geformuleerd op het Internationaal Wiskundecongres in Parijs, waarbij hij de wiskunde uitdaagde om ze voor het jaar 2000 op te lossen. Bij deze 23 problemen zat ook het nog altijd niet gegeven bewijs van de Riemann-hypothese.

Andere bekende onopgeloste vraagstukken

- Het bewijs van het Vermoeden van Collatz
 - Het bewijs van het Vermoeden van Goldbach
 - Het bewijs van het ABC-vermoeden
 - Zijn er oneindig veel priemtwelingen? En zijn er zelfs oneindig veel priemvierlingen en priemzeslingen?
 - Bestaat er een snel algoritme voor de factorisatie van integers?
 - Het bewijs van het Vermoeden van Legendre
 - Bestaan er oneven perfecte getallen?
 - Voor welke natuurlijke getallen n bestaan er eindige projectieve (of affiene) platte vlakken van de orde n ? Alleen voor priem machten? Voor $n = 12, 15, 18, 26, \dots$?
-

Externe links

- Website over de problematiek van een bewijs met een computer ^[1]
- Website van het Clay Institute over de zeven millenniumproblemen ^[2]

Referenties

[1] <http://www.zeit.de/2003/34/T-Orangestapel>

[2] <http://www.claymath.org/millennium>

Harmonisch-delergetal

Een **harmonisch-delergetal** is een natuurlijk getal waarvan het harmonisch gemiddelde van de delers een geheel getal is. Men noemt zo een getal ook een **Ore-getal** of **harmonisch getal van Ore**, naar de Noorse wiskundige Øystein Ore (1899-1968) die het begrip definieerde^[1]. Ore noemde ze kortweg harmonische getallen (niet te verwarren met de bekende harmonische getallen).

De delers van het getal 6 bijvoorbeeld, zijn 1, 2, 3 en 6. Het harmonisch gemiddelde daarvan is:

$$\frac{4}{\frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{6}} = 2.$$

Zes is dus een harmonisch-delergetal.

De eerste harmonisch-delergetallen zijn:

1, 6, 28, 140, 270, 496, 672, 1638, 2970, 6200, 8128, 8190 (Reeks A001599 ^[2] uit de OEIS).

Er zijn 45 harmonisch-delergetallen kleiner dan 10.000.000^[3].

Voor een harmonisch-delergetal n geldt, dat het rekenkundig gemiddelde van de delers van n zelf een deler is van n ; of anders gezegd: n is een veelvoud van het rekenkundig gemiddelde van zijn delers. 140 bijvoorbeeld heeft twaalf delers: 1, 2, 4, 5, 7, 10, 14, 20, 28, 35, 70 en 140. De som daarvan is 336, en het gemiddelde $(336/12) = 28 = 140/5$.

Ore bewees, dat elk perfect getal een harmonisch-delergetal is. Het omgekeerde is echter niet waar: 140 bijvoorbeeld, is geen perfect getal.

Er zijn, behalve het triviale geval 1, geen oneven harmonisch-delergetallen bekend. Ore vermoedde, dat er geen oneven harmonisch-delergetallen bestaan buiten 1^[4]. Als dit vermoeden bewezen kan worden, zou daaruit volgen dat er geen oneven perfecte getallen bestaan. Dit vermoeden is nog niet bewezen. Wel is reeds bekend dat alle harmonische delergetallen, waarvan het harmonisch gemiddelde kleiner is dan 300, even zijn^[5]; en het is bewezen dat een oneven harmonisch-delergetal in ieder geval deelbaar moet zijn door een priemgetal groter dan 100.000^[6].

Bronnen, noten en/of referenties

Lychrel-getal

Een **Lychrel-getal** is een natuurlijk getal dat niet in een palindroom resulteert na een eindig aantal keren iteratief optellen van de vorige uitkomst en diezelfde uitkomst met de cijfers in omgekeerde volgorde. De naam *Lychrel* werd in 2002 voorgesteld door Wade VanLandingham en het is een ruw anagram van *Cheryl*, de naam van zijn vriendin.

Het is niet bewezen dat er Lychrel-getallen bestaan. Het bestaan van Lychrel-getallen is een vermoeden. Wel zijn er getallen die met behulp van de computer tot vele miljoenen cijfers gecontroleerd zijn zonder in een palindroom te eindigen.

Overzicht

Veel getallen eindigen al na enkele stappen in een palindroom:

$$23 + 32 = 55,$$

$$138 + 831 = 969.$$

$$377 + 773 = 1150, 1150 + 511 = 1661.$$

De eerste tien getallen waarvan men vermoedt dat het Lychrel-getallen zijn, zijn:

$$196, 295, 394, 493, 592, 689, 691, 788, 790, 879.$$

Er is een zekere systematiek in deze kandidaten, want als 196 een Lychrel-getal zou blijken te zijn, zijn ook 295, 394, 493, 592, 691 en 790 Lychrel-getallen, omdat:

$$196 + 691 = 887 = 295 + 592 = 394 + 493 = \dots$$

Het algoritme om na te gaan of een getal mogelijk een Lychrel-getal is, wordt naar de kleinste kandidaat wel *196-algoritme* genoemd.

Zoektocht

196 zelf is door Wade VanLandingham tot ruim 750 miljoen iteraties doorberekend, tot een getal van 300 miljoen cijfers waarbij hij gebruik maakte van door de Nederlander Eric Goldstein geschreven software. In mei 2006 is Wade echter gestopt met, zoals hij het zelf noemde, *the quest*.

Ongeveer 80% van alle getallen onder de 10.000 eindigen in een palindroom in vier iteraties of minder en ongeveer 90% in zeven iteraties of minder. Alle getallen bestaande uit een of twee cijfers eindigen altijd een palindroom. Sommige getallen vereisen een groot aantal iteraties om te eindigen in een palindroom, zoals 89 (24 iteraties)^[1] of 1030020097997900 (197 iteraties)^[2]. Het huidige record staat op 261 iteraties voor het getal 1186060307891929990^[3] dat eindigt in een palindroom met 119 cijfers:

$$44562665878976437622437848976653870388884783662598425855963436955852489526638748888307835667984873422673467987856626544$$

Bronnen, noten en/of referenties

- (en) p196.org (<http://www.p196.org/>) - Site over het onderzoek naar Lychrel-getallen.
- (en) 196 Palindrome Quest (<http://www.jasondoucette.com/worldrecords.html>) - Website van Jason Doucette met informatie en statistieken over de zoektocht naar een palindroom en records.
- (en) Overzicht iteraties (<http://www.jasondoucette.com/pal/1>) - Website van Jason Doucette: wijzig het getal in de URL om de iteraties voor een bepaald getal te zien.
- (en) Lychrel number (<http://mathworld.wolfram.com/LychrelNumber.html>) op MathWorld.
- (en) Sequence A023108 (<http://www.research.att.com/~njas/sequences/A023108>) in On-Line Encyclopedia of Integer Sequences.

Perfect getal

Een **perfect getal** of **volmaakt getal** is een positief natuurlijk getal dat gelijk is aan de som van zijn echte delers (dus buiten zichzelf, 1 wordt als echte deler meegerekend). In formulevorm: als $s(n)$ de som is van alle delers van n , met uitzondering van n zelf, dan noemen we n een perfect getal als geldt $s(n) = n$.

De oude Grieken kenden alleen de eerste vier perfecte getallen.

Perfect getal	Som van zijn delers	ontbinding
6	1 + 2 + 3	$2^1(2^2-1)$
28	1 + 2 + 4 + 7 + 14	$2^2(2^3-1)$
496	1 + 2 + 4 + 8 + 16 + 31 + 62 + 124 + 248	$2^4(2^5-1)$
8128	1 + 2 + 4 + 8 + 16 + 32 + 64 + 127 + 254 + 508 + 1016 + 2032 + 4064	$2^6(2^7-1)$
33.550.336		$2^{12}(2^{13}-1)$

Een alternatieve definitie is als volgt te geven. Met $\sigma(n)$ wordt aangeduid de som van alle positieve delers van n , inclusief 1 en n zelf. Een getal n is perfect als $\sigma(n) = 2n$.

Geschiedenis van perfecte getallen

Vermoedelijk maakten de oude Egyptenaren al studies van perfecte getallen. Het is bekend dat Pythagoras perfecte getallen onderzocht. Perfecte getallen hadden in die tijd een religieuze status. In de beginjaren van het christendom bijvoorbeeld was er een theorie dat de getallen 6 en 28 door God gekozen waren als perfecte getallen: 6 is het aantal dagen waarin God de aarde had geschapen en 28 het aantal dagen waarin de maan om de aarde draait. De heilige Augustinus (354-430) schreef ooit: *Zes is geen perfect getal omdat God de aarde in zes dagen geschapen heeft, maar God heeft de aarde in zes dagen geschapen omdat zes een perfect getal is.*

Nicomachus van Gerasa kwam rond het jaar 100 met de volgende vijf stellingen, zonder deze overigens te bewijzen (inmiddels is bekend dat stelling 1 en 3 onjuist zijn):

1. Het n -de perfecte getal heeft n cijfers
2. Alle perfecte getallen zijn even
3. Perfecte getallen eindigen alternerend op een 6 of een 8
4. Perfecte getallen zijn te schrijven als $2^{n-1}(2^n-1)$ als 2^n-1 een priemgetal is (zie ook boven)
5. Er zijn oneindig veel perfecte getallen

Deze stellingen zijn in Europa eeuwenlang voor waar aangenomen. De Europeanen waren gedurende de vroege Middeleeuwen onbekend met het wiskundig onderzoek in de Arabische landen, onder andere door Ibn al-Haytham en Ismail ibn Ibrahim ibn Fallus. De laatste wiskundige stelde in het begin van de 13e eeuw een lijst op met tien perfecte getallen, waarvan de eerste zeven inderdaad juist zijn, maar deze lijst raakte pas eeuwen later in Europa bekend^[1]. De vierde stelling van Nicomachus werd in Europa veralgemeend tot: *Perfekte getallen zijn te schrijven als $2^{n-1}(2^n-1)$ voor alle oneven getallen n .*

In 1536 bewees Hudalrichus Regius dat deze veralgemening niet klopte voor $n=11$: $2^{10}(2^{11}-1)$ is geen perfect getal. Ook bewees hij dat $2^{12}(2^{13}-1) = 33.550.336$ het vijfde perfecte getal is. Hiermee was meteen het ongelijk van de eerste stelling van Nicomachus bewezen: het vijfde perfecte getal heeft een lengte van acht cijfers. In 1603 vond Pietro Cataldi het zesde perfecte getal $2^{16}(2^{17}-1) = 8.589.869.056$. Hiermee was bewezen dat de derde stelling van Nicomachus niet klopte, aangezien zowel het vijfde als het zesde perfecte getal op een zes eindigen. Cataldi vond ook het zevende perfecte getal $2^{18}(2^{19}-1) = 137.438.691.328$. Cataldi claimde nog een viertal andere perfecte

getallen gevonden te hebben, maar later werd aangetoond dat slechts een van deze vier getallen juist was.

Wiskundige eigenschappen

Er is een aardig verband tussen perfecte getallen en een speciaal soort priemgetallen, de *mersennepriemgetallen*. Mersennepriemgetallen zijn priemgetallen van de vorm $2^n - 1$, waarbij n een priemgetal is. Er geldt namelijk: als $2^n - 1$ een priemgetal is, dan is $2^{n-1}(2^n - 1)$ een perfect getal. Het omgekeerde geldt ook: ieder (in ieder geval even) perfect getal kan geschreven worden als $2^{n-1}(2^n - 1)$ waarbij n een priemgetal is en $2^n - 1$ een mersennepriemgetal.

Bijvoorbeeld: voor $n = 3$ geldt dat $2^n - 1 = 2^3 - 1 = 7$ een priemgetal is.

$2^{n-1}(2^n - 1)$ wordt dan $2^2(2^3 - 1) = 4 \times 7 = 28$ is een perfect getal.

Alle even perfecte getallen zijn tevens zeshoeksgetal, driehoeksgetal en harmonisch-delergetal.

Momenteel is nog onbekend of er ook oneven perfecte getallen bestaan. Tot nu (eind 2003) is er nog geen gevonden. Wel is al zeker dat als er een oneven perfect getal is, dit groter dan 10^{300} moet zijn. Het moet ook minstens acht verschillende priemfactoren hebben, zelfs minstens 11 als het niet deelbaar is door drie. Een van de priemfactoren moet groter zijn dan 10^7 , twee groter dan 10^4 en drie groter dan 100.

Ook is de som van de inversen van de delers van een perfect getal (exclusief 1, inclusief de inverse van het getal zelf) altijd 1, bijvoorbeeld voor het getal 6:

$$2^{-1} + 3^{-1} + 6^{-1} = 1.$$

Voetnoten

- [1] (en) Pagina 328 uit het werk "The Development of Arabic Mathematics" door "Rushdī Rāshid" (http://books.google.nl/books?id=vSkCISvU_9AC&pg=PA328&lpg=PA328&dq=Ibn+Fallus&source=bl&ots=vrkFV54OHR&sig=oF9GrsUDFoRjfm17vwSIJdsSFdA&hl=nl&ei=_puzSZSuDsS0-Abl18z6Ag&sa=X&oi=book_result&resnum=3&ct=result)

Externe link

- (en) Alle 44 tot nu toe gevonden perfecte getallen (<http://amicable.homepage.dk/perfect.htm>)

Bijzondere getallen

Bevriende getallen · Bijna perfect getal · Constante van Euler-Mascheroni · Constante van Gelfond · Constante van Kaprekar · Kaprekargetal · e · Fermatgetal · Gebrekkig getal · Getal van Graham · Getal van Skewes · Gulden snede · Kaprekargetal · Mersennepriemgetal · Natuurlijk getal · Overvloedig getal · Perfect getal · Pi · Plastisch getal · Priemgetal · Priemtweeling · Samengesteld getal · Semiperfect getal · Sphenisch getal · Vreemd getal

Probleem van Burnside

Het **probleem van Burnside** werd in 1902 geponereerd door William Burnside. Het is een van de oudste en meest invloedrijke vragen in de groepentheorie. Het probleem van Burnside vraagt zich af of een eindig genererende groep, waarin elk element een eindige orde heeft, noodzakelijkerwijs ook een eindige groep is. In gewone taal; wanneer men door het kijken naar afzonderlijke elementen van een groep, vermoedt dat de gehele groep eindig is, is dit dan inderdaad het geval? Het probleem kent vele varianten, die verschillen in de aanvullende voorwaarden, die aan de orden van de groeps-elementen worden opgelegd.

Beknopte geschiedenis

Initiële werkzaamheden wezen op een bevestigend antwoord. Als bijvoorbeeld een groep G wordt gegenereerd door m elementen en de orde van elk element van G een deler van 4 is, dan is G eindig. Verder bewezen A.I. Kostrikin (voor het geval van een priemexponent) en Efim Zelmanov (voor het algemene geval) dat er onder de eindige groepen met een gegeven aantal generatoren en exponenten, altijd een grootste bestaat. Issai Schur toonde aan dat elke eindig gegenereerde periodieke groep, die een deelgroep van de groep van inverteerbare $n \times n$ complexe matrices vormt, eindig is; hij maakte gebruik van deze stelling om de stelling van Jordan-Schur te bewijzen ^[1]

Voetnoten

[1] Curtis, Charles; Reiner, Irving. *Representation Theory of Finite Groups and Associated Algebras*, John Wiley & Sons, 1962, p. 256-262

Externe link

- (en) Geschiedenis van het probleem van Burnside (http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/HistTopics/Burnside_problem.html) op MacTutor

Problemen van Landau

Op het internationale congres van wiskundigen in 1912 besprak Edmund Landau vier basisproblemen met betrekking tot de priemgetallen. Landau karakteriseerde deze vier problemen in zijn toespraak als "niet aanvalbaar bij de huidige stand van de wetenschap". Zij staan nu bekend als de **problemen van Landau**.

1. Het vermoeden van Goldbach: Kan elk even geheel getal groter dan 2 worden geschreven als de som van twee priemgetallen?
2. Het priemtweeling vermoeden: Zijn er oneindig veel priemgetallen p zodanig dat $p + 2$ ook een priemgetal is?
3. Het vermoeden van Legendre: Bestaat er altijd ten minste een priemgetal tussen opeenvolgende kwadraten?
4. Zijn er oneindig veel priemgetallen p zodanig dat $p - 1$ een kwadraat is? Met andere woorden: bestaan er oneindig veel priemgetallen van de vorm $n^2 + 1$? ^[1].

Anno 2009 zijn al deze vier problemen nog niet opgelost.

Externe link

- [\(en\) Problemen van Landau op MathWorld](#) ^[2]

Bronnen, noten en/of referenties

Rieselgetal

Een **Rieselgetal** is een oneven getal k met de eigenschap dat voor alle gehele getallen n het getal $k \times 2^n - 1$ geen priemgetal is. De Zweed Hans Riesel bewees in 1956 dat er oneindig veel van dergelijke getallen bestaan. Het getal 509 203, het kleinst bekende, is ook door hem gevonden. Als je hierbij een positief veelvoud van 11 184 810 optelt, krijg je weer een Rieselgetal. Rieselgetallen vertonen een grote overeenkomst met Sierpińskigetallen.

Bewijs

Het bewijzen dat een getal een Rieselgetal is gaat door middel van een *covering-set*. Dit is een verzameling priemgetallen die bij een Rieselgetal k hoort. Voor iedere n geldt nu dat $k \times 2^n - 1$ deelbaar is door een van deze getallen. Zo heeft $509\,203 \times 2^n - 1$ de covering-set $\{3, 5, 7, 13, 17, 241\}$.

Om te bewijzen dat $\{3, 5, 7, 13, 17, 241\}$ een covering-set is voor 509.203 gaan we modulus het product van de set rekenen, dit is 5.592.405.

- $3 \mid 509\,203 \times 2^0 - 1$
- $5 \mid 509\,203 \times 2^1 - 1$
- $3 \mid 509\,203 \times 2^2 - 1$
- $241 \mid 509\,203 \times 2^3 - 1$
- ...
- $7 \mid 509\,203 \times 2^{23} - 1$

$$509\,203 * 2^{24} = 509\,203 * 2^0 \pmod{5\,592\,405}$$

Vanwege deze congruentie kan je n reduceren modulo 24, dus is bewezen dat 509 203 een Rieselgetal is.

- $509\,203 \times 2^n - 1$ heeft covering-set $\{3, 5, 7, 13, 17, 241\}$
 - $762\,701 \times 2^n - 1$ heeft covering-set $\{3, 5, 7, 13, 17, 241\}$
 - $777\,149 \times 2^n - 1$ heeft covering-set $\{3, 5, 7, 13, 19, 37, 73\}$
 - $790\,841 \times 2^n - 1$ heeft covering-set $\{3, 5, 7, 13, 19, 37, 73\}$
-

- $992\,077 \times 2^n - 1$ heeft covering-set $\{3, 5, 7, 13, 17, 241\}$

Het Rieselprobleem

Het **Rieselprobleem** bestaat uit het bepalen van het kleinste Rieselgetal. Er wordt beweerd dat dit 509 203 is. Om dit te bewijzen dient bij alle oneven getallen $k < 509\,203$ een getal n te worden gezocht zodat $k \times 2^n - 1$ een priemgetal is. Omstreeks eind 2007 waren er nog 72 getallen te gaan, sinds september 2008 nog 63.^[1] Als bij deze 63 getallen een priemgetal wordt gevonden, is 509 203 echt het kleinste Rieselgetal.

Rieselzeef

Rieselzeef is een distributed computingproject waaraan iedereen kan deelnemen met zijn pc. Je computer downloadt een programma dat priemgetallen gaat zoeken van de vorm $k \times 2^n - 1$ voor de overgebleven k 's. Het project is nu ondergebracht bij PrimeGrid.

Externe links

- Riesel Sieve Project ^[2]
- Informatie en status van het probleem ^[3]

Bronnen, noten en/of referenties

Sierpińskigetel

Een **Sierpińskigetel** is een oneven natuurlijk getal k waarvoor geldt dat de gehele getallen van de vorm $k \cdot 2^n + 1$ samengestelde getallen zijn (dat wil zeggen geen priemgetallen) voor alle natuurlijke getallen n .

In 1960 bewees Waclaw Sierpiński dat er een oneindig aantal oneven gehele getallen k bestaan die geen priemgetallen opleveren.

Het **probleem van Sierpiński** luidt dan als volgt: "Wat is het kleinste Sierpińskigetel?".

In 1962 stelde John Selfridge de volgende stelling voor, die nu bekend staat als het **vermoeden van Selfridge**: 78 557 is het antwoord op het probleem van Sierpiński. Selfridge bewees dat 78 557 een Sierpiński-getal is. Meer precies, $78557 \cdot 2^n + 1$ is voor elke n deelbaar door minimaal één van de volgende factoren: 3, 5, 7, 13, 19, 37 of 73.

Om aan te tonen dat 78.557 werkelijk het kleinst mogelijke Sierpińskigetel is, moet aangetoond worden dat alle oneven getallen kleiner dan 78.557 *geen* Sierpińskigetallen zijn. In 2002 werd dit reeds aangetoond voor bijna alle getallen: voor zeventien andere getallen was nog niet aangetoond dat ze geen Sierpińskigetallen zijn. Seventeen or bust, een distributed computingproject, test de resterende getallen. Het project, nu ondergebracht bij PrimeGrid, heeft tot nu toe^[1] van 11 van de 17 getallen aangetoond dat het geen Sierpińskigetallen zijn, als laatste 33.661 in oktober 2007, door te berekenen dat $33661 \cdot 2^{7031232} + 1$, een getal van 2.116.617 cijfers, een priemgetal is.

Sierpińskigetallen tonen een grote overeenkomst met Rieselgetallen die voldoen aan een sterk gelijkende formule.

Bronnen, noten en/of referenties

Spiraal van Ulam

De **spiraal van Ulam** is een spiraal van de natuurlijke getallen waarbij de priemgetallen gemarkeerd zijn. Het blijkt dan dat de priemgetallen in bepaalde diagonale patronen voorkomen. De spiraal werd ontdekt door de wiskundige Stanisław Marcin Ulam in 1963.

De spiraal

Tijdens een wetenschappelijke bijeenkomst tekende Ulam uit verveling een rooster in de vorm van een spiraal waarop hij de natuurlijke getallen neerzette met het getal 1 in het midden:

```

37—36—35—34—33—32—31
|
38 17—16—15—14—13 30
|
39 18 5— 4— 3 12 29
|
40 19 6 1— 2 11 28
|
41 20 7— 8— 9—10 27
|
42 21—22—23—24—25—26
|
43—44—45—46—47—48—49...

```

Hij markeerde vervolgens de priemgetallen:

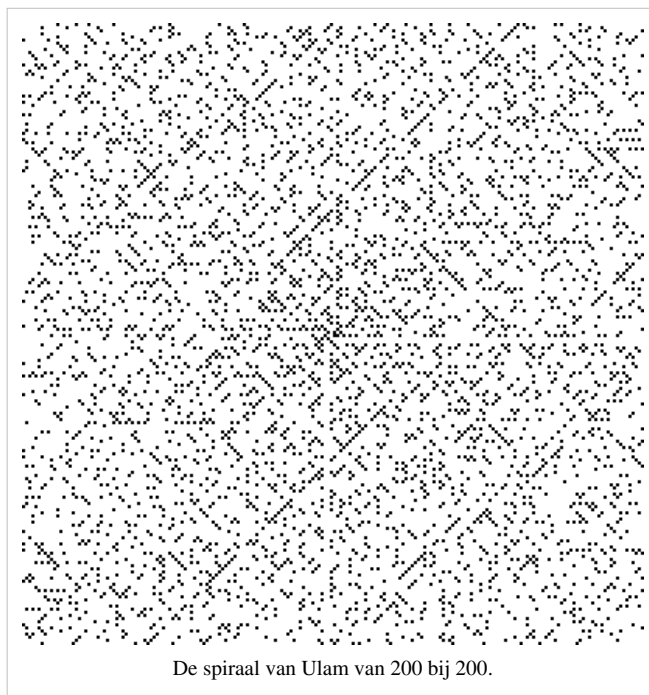
```

37— — — — — 31
|
| 17— — — — 13
|
| | 5— — 3 | 29
|
| 19 | — 2 11 |
|
41 | 7— — — |
|
| — — 23— — — |
|
43— — — — 47— — ...

```

Hij zag, tot zijn verbazing, dat de priemgetallen de neiging hebben om zich op diagonalen van de spiraal te bevinden. De diagonalen zijn ook zichtbaar wanneer er heel veel getallen in een spiraal worden geplaatst. Het opvallende is dat priemgetallen zich meer op bepaalde diagonalen bevinden dan op andere. Het patroon is ook zichtbaar wanneer men met een ander getal begint.^[1] De reden waarom deze patronen ontstaan is nog niet bekend.

Ulam's ontdekking was dermate belangwekkend dat de spiraal op de voorkant van de *Scientific American* van maart 1964 werd afgebeeld. In die editie stond een artikel over de spiraal van Martin Gardner getiteld *Mathematical Recreations: The Remarkable Lore of the Prime Number*.^[1]



Kenmerken

Het bestaan van deze diagonalen geeft aan dat er rijen van priemgetallen gegenereerd kunnen worden met de volgende functie $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$:

$$f(n) = an^2 + bn + c, \text{ waarbij } a, b, c \in \mathbb{Z}.^{[1]}$$

De door Leonhard Euler ontdekte formule

$$f(n) = n^2 - n + 41$$

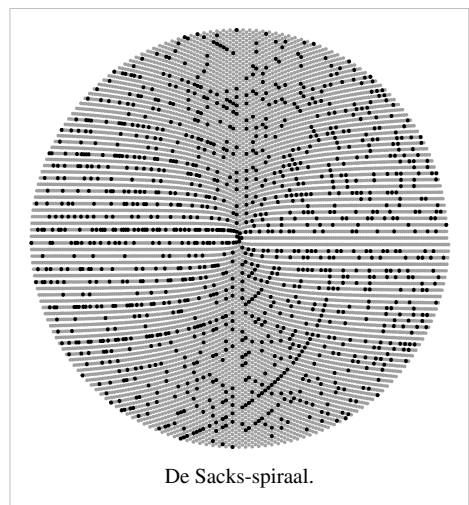
die priemgetallen oplevert voor $0 \leq n \leq 40$ is zichtbaar op de diagonaal als men begint met het getal 41 in het midden.^[1] Ook de formule

$$f(n) = n^2 + n + 17$$

is ontdekt door Euler; deze levert priemgetallen op voor $0 \leq n \leq 15$.

Varianten

De spiraal van Sacks is een variant van de spiraal van Ulam. Deze spiraal werd in 1994 gemaakt door Robert Sacks. Op deze spiraal worden de getallen, beginnend bij 0, op een Archimedes-spiraal geplaatst in plaats van de vierkante spiraal die Ulam gebruikte.



Externe links

- (en) Prime Spiral op MathWorld ^[2]

Bronnen, noten en/of referenties



Zie de categorie *[/wiki/Commons:Category:Ulam spiral?uselang=nl#mw-subcategories Ulam spiral]* van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.

Wiskundig vermoeden

Vermoeden

Een **vermoeden** is een bewering waarvan men denkt dat deze waar is, zonder daarvan zeker te zijn.

In de wiskunde is een vermoeden een wiskundige uitspraak waarvan wiskundigen denken dat deze waar is, terwijl er nog geen sluitend bewijs voor gevonden is. Wordt het bewijs geleverd, dan spreekt men van een stelling.

Sommige stellingen kunnen jarenlang vermoedens blijven. Het bekendste geval, en één van de extreemste, was de laatste stelling van Fermat, die van 1637 tot 1995 onbewezen bleef.

ABC-vermoeden

Het **ABC-vermoeden** is een vermoeden (dat wil zeggen een uitspraak waarvan men vermoedt, maar niet heeft bewezen, dat zij waar is) uit de getaltheorie.

Het vermoeden

Het ABC-vermoeden is een uitspraak over gehele getallen A , B en $C=A+B$. Voor een getal n wordt $rad(n)$, het *radicaal* van n gedefinieerd als het product van alle verschillende priemgetallen in de ontbinding van n . Als bijvoorbeeld

$$n = 2^5 \times 3^7 \times 11 \times 17^2 = 222479136, \text{ dan is } rad(n) = 2 \times 3 \times 11 \times 17 = 1122. \text{ Nu kunnen we de}$$

kwaliteit van een drietal definiëren als

$$q = \frac{\log c}{\log rad(abc)}$$

dus $c = rad(abc)^q$

Het ABC-vermoeden zegt nu:

Voor elke $\alpha > 1$ zijn er slechts eindig veel getallen a , b en c met $\text{ggd}(a, b) = 1$, zodanig dat $q \geq \alpha$

Let wel dat we moeten stellen dat $\text{ggd}(a, b) = 1$ anders kunnen we elke a , b en c uit een drietal met 2 vermenigvuldigen, en wordt c twee keer zo groot zonder dat het radicaal toeneemt, en kunnen we dus drietallen construeren met willekeurig grote kwaliteit.

Het ABC-vermoeden is voorlopig slechts een vermoeden, er lijkt nog geen uitzicht op een bewijs in de nabije toekomst.

Er bestaat een rijtje van records, waarbij de grootst bekende waarde van q bepalend is. Momenteel (juli 2007) is het record $q = 1.62991$ voor de som $2 + 3^{10} \times 109 = 23^5$.

Dat het ABC-vermoeden een sterke uitspraak is, kan bijvoorbeeld worden gezien doordat het zeer eenvoudig de stelling van Fermat bewijst. Stel dat bewezen zou worden dat er geen getallen a en b zijn met $q > 2$. Dan zou dat voor getallen a , b en c met

$$a^n + b^n = c^n \text{ en } \text{ggd}(a, b) = 1$$

betekenen dat

$$c^n < (rad(a^n b^n c^n))^2 = (rad(abc))^2 \leq (abc)^2 < c^6.$$

Het zou dus betekenen dat oplossingen van Fermat alleen mogelijk zijn voor $n < 6$. Voor $n < 6$ is de stelling van Fermat echter al sinds 1825 bewezen, dus volgt hieruit dat de stelling van Fermat waar is.

Open problemen

Er zijn nog veel onopgeloste problemen omtrent het ABC-vermoeden. Hieronder is een selectie:^[1]

- Is er een bovengrens H , zodat $q < H$ voor alle abc-drietallen? Dit wordt ook wel de *zwakke versie* van het ABC-vermoeden genoemd.
- Het is bekend dat er voor iedere n een c te vinden is zodanig dat deze c in n abc-drietallen voorkomt. Maar het is nog niet bekend wat de kleinste c is die in n drietallen voorkomt.
- Wat zijn de waarden die $b-a$ aan kan nemen. Kan het verschil iedere willekeurige waarde aannemen? En zijn er waarden die vaak of minder vaak voorkomen?
- Bij een abc-drietal a, b, c is altijd een van de getallen deelbaar door 2. Dit komt omdat twee oneven getallen opgeteld altijd even zijn. Maar is er voor elke n een drietal waarbij a, b en c niet deelbaar zijn door 3, 4, 5, ..., n ?
- Zijn er oneindig veel *abc-tweelingen*, dit wil zeggen twee drietallen met gelijke c en gelijke kwaliteit?

n drietallen met constante b

Voor iedere n is er een b die in n drietallen te vinden is.^[2]

Neem voor deze b namelijk 3^{42m+27} , m zodat b groter is dan 2^{21n+18} en voor de a 's 2^{21i+18} met $i = 0$ tm $n-1$.

Nu heb je dus n tweetallen met radicaal 6. C is nu $2^{21i+18} + 3^{42n+27}$. modulo 49 geldt:

$$\begin{aligned} c &= 2^{21i+18} + 3^{42n+27} = \\ &= (2^{21})^i * 2^{18} + (3^{42})^n * 3^{27} = \\ &= 1^i * 43 + 1^j * 6 = 0 \pmod{49} \end{aligned}$$

Het radicaal is dus maximaal $6/7 * c$ voor deze n drietallen.

Q.E.D.

Andere definitie van kwaliteit

Naast de standaard definitie van kwaliteit is het ook mogelijk om te kijken naar het product van a, b en c , in plaats van alleen naar c .^[3] Nu geldt dus:

$$\rho = \frac{\log abc}{\log rad(abc)}$$

Dit worden ABC-Szpiro-drietallen genoemd

De grootste gevonden kwaliteit van een Szpiro-drietal is 4,41901, voor

$$13 \times 19^6 + 2^{30} \times 5 = 3^{13} \times 11^2 \times 31.$$

Externe link

- The ABC conjecture home page ^[4]
- Reken Mee met ABC ^[5]
- ABC@home ^[6]

Voetnoten

- [1] (http://www.rekenmeemetabc.nl/?item=sub_17)
- [2] <http://www.rekenmeemetabc.nl/files/Weezepoel.txt>
- [3] (<http://www.math.unicaen.fr/~nitaj/abc.html#Ten> <i>abc</i>-Szpiro)
- [4] <http://www.math.unicaen.fr/~nitaj/abc.html>
- [5] <http://www.rekenmeemetabc.nl>
- [6] <http://abcathome.com/>

Vermoeden van Andrica

Het **vermoeden van Andrica** (genoemd naar Dorin Andrica) is een vermoeden ten aanzien van priemgetalhiaten tussen priemgetallen. ^[1]

Het vermoeden van Andrica stelt dat de ongelijkheid:

$$\sqrt{p_{n+1}} - \sqrt{p_n} < 1$$

geldt voor alle n , waar p_n het n -de priemgetal is.

Als

$$g_n = p_{n+1} - p_n$$

het n -de priemgetalhiat weergeeft, dan kan het vermoeden van Andrica worden herschreven als

$$g_n < \sqrt{p_{n+1}} + \sqrt{p_n}.$$

Voetnoten

- [1] D. Andrica, *Note on a conjecture in prime number theory. (Notitie over een vermoeden in de priemgetaltheorie* Studia Univ. Babeş-Bolyai Math. **31** (1986), nr. 4, 44--48.

Externe links

- ^(en) Het vermoeden van Andrica (<http://planetmath.org/encyclopedia/AndricasConjecture.html>) op PlanetMath
 - ^(en) Het gegeneraliseerd vermoeden van Andrica (<http://planetmath.org/?op=getobj&from=objects&id=9636>) op PlanetMath
 - ^(en) Het vermoeden van Andrica op MathWorld (<http://mathworld.wolfram.com/AndricasConjecture.html>)
-

Vermoeden van Brocard

In de getaltheorie, een deelgebied van de wiskunde is het **vermoeden van Brocard** een vermoeden dat er ten minste vier priemgetallen liggen tussen

$$(p_n)^2 \text{ en } (p_{n+1})^2, \text{ voor } n > 1,$$

waar p_n het n^{de} priemgetal is.^[1] Het wordt algemeen aangenomen dat het vermoeden van Brocard correct is. Anno 2009 geldt het vermoeden echter nog als onbewezen. Het vermoeden is genoemd naar de Franse wiskundige Henri Brocard.

Het aantal priemgetallen tussen kwadraten van priemgetallen bedraagt 2, 5, 6, 15, 9, 22, 11, 27, ...^[2]

Het vermoeden van Legendre dat er een priemgetal ligt tussen elk opeenvolgend paar van kwadraten van gehele getallen impliceert dat er ten minste twee priemgetallen liggen tussen kwadraten van priemgetallen voor $p_n \geq 3$ aangezien $p_{n+1} - p_n \geq 2$.

Voetnoten

[1] (en) het vermoeden van Brocard op MathWorld (<http://mathworld.wolfram.com/BrocardsConjecture.html>)

[2] rij A050216 (<http://oeis.org/A050216>) in OEIS

Vermoeden van Collatz

Het **vermoeden van Collatz** is een vermoeden uit de getaltheorie dat de volgende iteratie bestudeert die ook wel de hagesteenreeks wordt genoemd:

Neem een willekeurig geheel getal n .

- Als n even is
 - Deel n door 2
- Als n oneven is
 - Vermenigvuldig n met 3
 - Tel er 1 bij op

Het vermoeden van Collatz zegt nu dat welk natuurlijk getal je ook kiest, als je dit proces maar lang genoeg herhaalt, n uiteindelijk altijd 1 wordt. Dit vermoeden is voor het eerst geformuleerd door Lothar Collatz in 1937. Tot op heden is het vermoeden nog niet bevestigd of weerlegd.

Wiskundige notatie

De wiskundige notatie is als volgt:

Begin met het definiëren van een functie:

$$f(n) = \begin{cases} n/2 & \text{als } n \equiv 0 \\ 3n + 1 & \text{als } n \equiv 1 \end{cases} \pmod{2}$$

Maak een rij a waarin de functie f steeds wordt herhaald. In wiskundige notatie ziet dit er als volgt uit:

$$a_i = \begin{cases} f(a_{i-1}) & \text{als } i > 0 \\ n & \text{als } i = 0 \end{cases}$$

Nu is het vermoeden als volgt:

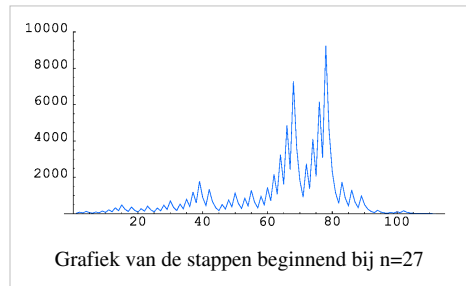
$$(\forall n \in \mathbb{N}, \exists i \in \mathbb{N})(a_0 = n, a_i = 1)$$

Voorbeelden

Als voorbeeld neem $n = 12$, de rij a ziet er nu als volgt uit: 12, 6, 3, 10, 5, 16, 8, 4, 2, 1.

Neem $n = 15$, dan ontstaat een veel langere rij: 15, 46, 23, 70, 35, 106, 53, 160, 80, 40, 20, 10, 5, 16, 8, 4, 2, 1.

Bij $n = 27$ duurt het 111 stappen, totdat (via een maximum boven 9.000) de waarde 1 wordt bereikt: 27, 82, 41, 124, 62, 31, 94, 47, 142, 71, 214, 107, 322, 161, 484, 242, 121, 364, 182, 91, 274, 137, 412, 206, 103, 310, 155, 466, 233, 700, 350, 175, 526, 263, 790, 395, 1186, 593, 1780, 890, 445, 1336, 668, 334, 167, 502, 251, 754, 377, 1132, 566, 283, 850, 425, 1276, 638, 319, 958, 479, 1438, 719, 2158, 1079, 3238, 1619, 4858, 2429, 7288, 3644, 1822, 911, 2734, 1367, 4102, 2051, 6154, 3077, 9232, 4616, 2308, 1154, 577, 1732, 866, 433, 1300, 650, 325, 976, 488, 244, 122, 61, 184, 92, 46, 23, 70, 35, 106, 53, 160, 80, 40, 20, 10, 5, 16, 8, 4, 2, 1.



De langste rij voor een startwaarde onder 100 miljoen, is 949 stappen lang voor de startwaarde 63.728.127.

De langste rij voor een startwaarde onder 1 miljard, is 986 stappen lang voor de startwaarde 670.617.279.

Optimaliseringen

- Als n deelbaar is door 4 deel dan n door 4.

Verklaring: n is even. Deel n door 2 en hij is weer even. Deel dan n weer door 2.

- Algemeener: Alle factoren 2 in de priemontbinding kunnen verwijderd worden.

Verklaring: Zolang n een factor 2 heeft, is het even en dient het door 2 gedeeld te worden. Hierdoor wordt het aantal factoren 2 één minder.

- Als n oneven is, vermenigvuldig dan met $3/2$ en tel er $1/2$ bij op.

Verklaring: n is oneven. vermenigvuldig n met 3, $3n$ blijft nu oneven. Tel 1 bij $3n$ op, nu wordt $3n+1$ even en dus deel door 2.

- We hoeven alleen te bewijzen dat $(\forall n \in \mathbb{N}, \exists i \in \mathbb{N})(a_0 = n, a_i < n)$

Verklaring: Als bewezen kan worden dat er voor elke n een getal p voorkomt in de rij waarvoor geldt $p < n$, dan zal er een getal q voorkomen dat kleiner is dan p , en weer een getal kleiner dan q , net zolang totdat dit resulteert in 1.

- Dit hoeft alleen bewezen te worden voor getallen $3 \pmod 4$.

Verklaring: Getallen 0 of $2 \pmod 4$ worden meteen kleiner: omdat door 2 gedeeld wordt. Getallen $1 \pmod 4$ worden na $3n+1 \pmod 4$ en ze zijn nu deelbaar door 4. $3/4n+1/4 < n$ (voor $n > 1$)

- Bij hogere modulo's vallen er meer getallen uit, zoals $n = 3 \pmod 16$.

Verklaring: $n = 3 \pmod 16$, $3n+1 = 10 \pmod 16$, $3/2n+1/2 = 5 \pmod 8$, $9/2n+5/2 = 0 \pmod 8$ $9/16n+5/16 < n$. Voor $n \pmod 1024$ blijven er slechts 64 mogelijkheden over. (Dit is 6.25%) voor $n \pmod 1024^2$ blijft er slechts 2% over.

- Bij het oneven getal $n=2^p \cdot q-1$, kan je meteen door naar $3^p \cdot q-1$.

Verklaring: $f(n) = 2^p \cdot q-1$, $f(n+1) = 2^p \cdot 3 \cdot q-2$, $f(n+2) = 2^{p-1} \cdot 3 \cdot q-1 \rightarrow \dots \rightarrow f(n+2^p) = 3^p \cdot q-1$.

Aanwijzingen

Er is een aantal aanwijzingen dat het vermoeden van Collatz waar is.

Voor alle getallen onder $5,76 * 10^{18}$ is inmiddels (18 januari 2009) gecontroleerd dat ze aan het vermoeden voldoen. Het probleem met het controleren is, dat het alleen het vermoeden kan weerleggen. Als het vermoeden waar is, kan er geen bewijs voor gevonden worden op deze manier.

Daarnaast geldt dat als je naar alle *oneven* getallen kijkt, ieder getal gemiddeld $3/4$ is van het getal ervoor, en als dat lang genoeg wordt herhaald, het getal dus steeds kleiner wordt.

Opmerkelijkheden

Er zijn getallen n te creëren die $p-1$ keer door 2 gedeeld moeten worden en de p -de keer met 3 vermenigvuldigd moeten worden en met 1 verhoogd moeten worden. Deze getallen zijn van de vorm $2^{p-1} \bmod 2^p$. Bij deling door 2 worden ze $2^{p-2} \bmod 2^{p-1}$. Herhaal dit net zo lang tot ze $2^0 \bmod 2^1$ worden.

Ook is mogelijk getallen te maken die $p-1$ keer met 3 moeten worden vermenigvuldigd en 1 verhoogd. Na iedere keer maal 3 plus 1 moet je natuurlijk door 2 delen.

- $n = 2^{p-1} - 1 \bmod 2^p$. Dit is een oneven getal.
- Vermenigvuldigd met 3 wordt $2^{p-1} - 3 \bmod 2^p$.
- Plus 1: $2^{p-1} - 2 \bmod 2^p$.
- Gedeeld door 2: $2^{p-2} - 1$ of $2^{p-2} - 1 + 2^{p-1} = 3 * 2^{p-2} - 1 \bmod 2^p$

Dit is gelijk aan: $2^{p-2} - 1 \bmod 2^{p-1}$ Waar eerst p stond staat nu $p-1$. Blijf dit herhalen tot er 0 overblijft. Dan is $2^0 - 1 \bmod 2^1$ en dit betekent dat p even is.

Het opmerkelijkste hieraan is dat deze getallen slechts 1 uit elkaar liggen.

Met de computer

Voorbeeld in de programmeertaal PHP:

```
$n = 12;
print $n;
while ($n!=1) { ($n&1) ? $n = ($n * 3) + 1 : $n /= 2; print ' '. $n; }
```

Externe links

- Het vermoeden van Collatz ^[1] Het vermoeden van Collatz op je Ti-84/Ti-83

Referenties

[1] <http://www.calcprograms.nl/wiskunde/39/Collatz>

Elliptisatievermoeden van Thurston

William Thurstons **elliptisatievermoeden** stelt dat een gesloten 3-variëteit met een eindige fundamentealgroep sferisch is, dat wil zeggen dat deze 3-variëteit een Riemann-metrik met een constante positieve sectionele kromming heeft. Een 3-variëteit met een dergelijke metrik wordt overdekt door de 3-sfeer, bovendien zijn de groepen van overdekkende transformaties isometrieën van de 3-sfeer.

Dit betekent dat als de originele 3-variëteit in feite een triviale fundamentealgroep heeft, het dan homeomorf naar de 3-sfeer is (via de overdekkende afbeelding). Het elliptisatievermoeden is een speciaal geval van het vermeetkundigingsvermoeden van Thurston, dat in 2003 door Grigori Perelman werd bewezen. Met dit bewijs was tevens het vermoeden van Poincaré bewezen, dit omdat het elliptisatievermoeden van Thurston logisch equivalent is aan twee eenvoudigere vermoedens: het vermoeden van Poincaré en het sferische ruimtevormvermoeden.

Referenties

Voor het bewijs van de veronderstellingen, zie de verwijzingen in de artikelen over het vermeetkundigingsvermoeden van Thurston of vermoeden van Poincaré

- (en) William Thurston, *Three-dimensional geometry and topology. Vol. 1.* geredigeerd door Silvio Levy. Princeton Mathematical Series, 35. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1997. x+311 blz, ISBN 0-691-08304-5.
- (en) William Thurston, *The Geometry and Topology of Three-Manifolds* ^[1], 1980 Princeton collegedictaten over meetkundige structuren op 3-variëteiten, waar hij aan het begin van sectie 3 zijn elliptisatievermoeden formuleert

Referenties

[1] <http://www.msri.org/publications/books/gt3m/>

Vermoeden van Goldbach

Het **Vermoeden van Goldbach** is een van de oudste onopgeloste problemen in de getaltheorie en in de gehele wiskunde. Het vermoeden werd geuit in een brief die Christian Goldbach aan Leonhard Euler in 1742 schreef. Het vermoeden luidt:

Elk even getal groter dan 2 kan geschreven worden als de som van twee priemgetallen (een priemgetal mag hierbij twee keer gebruikt worden).

In prenex-normaalvorm:

$$\forall n \exists p \exists q \forall a, b, c, d [(n > 1, a, b, c, d > 1) \Rightarrow ((p + q = 2n) \wedge (ab \neq p) \wedge (cd \neq q))]$$

Dit vermoeden is door veel theoretici onderzocht, tot op heden zonder een definitief resultaat, maar met behulp van computers is het vermoeden gecontroleerd voor even getallen tot 4×10^{18} , op 5 juni 2006, door Oliveira e Silva.

De meeste mathematici geloven dat het vermoeden waar is, meestal gebaseerd op statistische overwegingen van de waarschijnlijkheidsverdeling van de priemgetallen: heel grote even getallen kunnen meestal op zeer vele manieren als de som van 2 priemgetallen worden geschreven.

We weten dat een even getal als som van ten hoogste 6 priemgetallen kan worden geschreven, en in 1966 toonde Chen aan dat elk voldoende groot even getal geschreven kan worden als de som van een priemgetal en een getal met ten hoogste twee priemfactoren. 'Voldoende groot' betekent dat er hoogstens een eindig aantal uitzonderingen is, maar dat niet bekend is hoe groot de grootste uitzondering is, als er al een uitzondering bestaat.

Vermeldenswaard in dit verband is ook de bewezen stelling van Vinogradov, die stelt, dat elk 'voldoende groot' oneven getal te schrijven is als de som van 3 priemgetallen.

Externe link

- <http://wims.unice.fr/wims/wims.cgi?module=tool/number/goldbach.en> verdeelt een door de bezoeker ingevoerd even getal in twee priemtermen

Vermoeden van Legendre

Het **vermoeden van Legendre**, opgesteld door Adrien-Marie Legendre, stelt dat er voor elk positief geheel getal n een priemgetal tussen n^2 en $(n + 1)^2$ bestaat.

De priemgetalstelling stelt dat het werkelijke aantal priemgetallen tussen n^2 en $(n + 1)^2$ (reeks A014085 ^[1] in OEIS) ongeveer

$$n/\log(n)$$

bedraagt, dat wil zeggen bijna even veel als het aantal priemgetallen kleiner dan of gelijk aan n .

Als het vermoeden van Legendre waar is, zou het priemgetalhiaat tussen twee opeenvolgende priemgetallen gelijk zijn aan

$$O(\sqrt{p});$$

Dit gevolg wordt nauwkeuriger geformuleerd in het vermoeden van Andrica.

Harald Cramer vermoedde dat het priemgetalhiaat altijd veel kleiner is

$$O(\log^2 p)$$

als het vermoeden van Cramer waar is, volgt daar ook uit dat het vermoeden van Legendre waar is. Cramer bewees ook dat de Riemann-hypothese een zwakkere grens

$$O(\sqrt{p} \log P)$$

op de omvang van het grootste priemgetalhiaat impliceert.

Het vermoeden is een van de problemen van Landau (1912) en is anno 2012 nog onbewezen.

Externe links

- (en) Vermoeden van Legendre op MathWorld ^[2]

Referenties

[1] <http://www.research.att.com/~njas/sequences/A014085>

[2] <http://mathworld.wolfram.com/LegendresConjecture.html>

Vermoeden van Poincaré

In 1904 stelde Henri Poincaré dat er een eenvoudig criterium moet zijn om te zien of een n -dimensionale gekromde ruimte de vorm van een n -sfeer heeft. De n -sfeer of n -dimensionale sfeer is de veralgemening van de gewone tweedimensionale sfeer naar hogere dimensies, of nog: de rand van een $(n+1)$ -dimensionale bol.

Concreet zegt het **vermoeden van Poincaré** dat elke gesloten gekromde ruimte die homotoop is met een sfeer, er ook homeomorf mee is. Velen hebben in de twintigste eeuw gezocht naar een bewijs voor dit vermoeden, zonder succes. In 1960 werd het bewijs geleverd voor ruimten van dimensie groter dan vier door Stephen Smale. Michael Freedman vervulde dit in 1983 voor dimensie vier. Voor dimensie $n=3$ bleef het probleem open tot 2002. In die vorm was het een van de Millenniumprijsproblemen waarvoor een prijs van 1 miljoen dollar is uitgelooft. In 2002 en 2003 zijn er bewijzen opgesteld door Grigori Perelman, die daarna wereldwijd door wiskundigen werden bestudeerd en aangevuld.

Exact geformuleerd luidt het probleem in drie dimensies:

Zij V een compacte driedimensionale (topologische) variëteit (zonder rand). Kan de fundamenteaalgroep van V triviaal zijn zonder dat V homeomorf is met S^3 , de driedimensionale sfeer?

In het algemeen is homotopie-equivalentie zwakker dan homeomorfisme, zelfs binnen de beperkte klasse der compacte driedimensionale variëteiten; getuigen hiervan de lensruimten van Tietze.

Geschiedenis

Vraag die Poincaré zich stelde

Aan het begin van de 20e eeuw werkte Henri Poincaré aan de grondslagen van de topologie - een gebied dat eerst combinatorische topologie en later algebraïsche topologie werd genoemd. Hij was met name geïnteresseerd in welke topologische eigenschappen een sfeer karakteriseerden.

Poincaré claimde in 1900 dat homologie, een instrument dat hij op basis van eerder werk van Enrico Betti had ontwikkeld, voldoende zou zijn om te bepalen dat een 3-variëteit een 3-sfeer was. In een artikel uit 1904 kwam hij echter met een tegenvoorbeeld, een ruimte, die men tegenwoordig de Poincaré-homologiesfeer noemt, die zijn claim uit 1900 ontkrachtte. De Poincaré-sfeer was het eerste voorbeeld van een homologiesfeer, een variëteit met dezelfde homologie als een sfeer. Om vast te kunnen stellen dat een Poincaré-sfeer zich onderscheidt van de 3-sfeer voerde Poincaré een nieuwe topologische invariante in, de fundamenteaalgroep. Hij liet zien dat een Poincaré-sfeer een fundamenteaalgroep van orde 120 heeft, terwijl de 3-sfeer een triviale fundamenteaalgroep heeft. Door gebruik te maken van deze fundamenteaalgroep kon hij vaststellen dat het daadwerkelijk om twee verschillende ruimten gaat.

In hetzelfde artikel vroeg Poincaré zich af of een 3-variëteit met de homologie van een 3-sfeer en een triviale fundamenteaalgroep een 3-sfeer moest zijn. Poincaré's nieuwe voorwaarde - dat wil zeggen de "triviale fundamenteaalgroep" - kan worden hergeformuleerd als dat "elke lus tot een punt kan worden ingekrompen."

De oorspronkelijke formulering was als volgt:

Beschouw een compacte 3-dimensionale variëteit V zonder begrenzing. Is het mogelijk dat de fundamenteaalgroep van V triviaal kan zijn, ook al is V niet homeomorf met de 3-dimensionale sfeer?

Poincaré heeft nooit verklaard of hij geloofde dat deze extra voorwaarde de 3-sfeer zou karakteriseren, maar toch staat de verklaring dat dit wel het geval is, bekend als het **vermoeden van Poincaré**. Hieronder de standaard vorm van het vermoeden:

Elke enkelvoudig samenhangende, gesloten 3-variëteit is homeomorf met de 3-sfeer.

Pogingen tot oplossing

Dit probleem lijkt enige decennia weinig aandacht te hebben getrokken. Dit veranderde in de jaren dertig van de twintigste eeuw toen J.H.C. Whitehead eerst claimde een bewijs te hebben gevonden, maar dit vervolgens moest intrekken. Gedurende dit proces ontdekte Whitehead een aantal interessante voorbeelden van enkelvoudig samenhangende niet-compacte 3-variëteiten niet homeomorf met \mathbf{R}^3 . Het prototype van deze voorbeelden wordt nu de Whitehead-variëteit genoemd.

In de jaren vijftig en zestig van de twintigste eeuw meenden andere wiskundigen een bewijs te hebben gevonden, maar elke keer bleek het bewijs niet sluitend te zijn. Invloedrijke wiskundigen zoals Bing, Haken, Moise en Papakyriakopoulos vielen het vermoeden aan. In 1958 bewees Bing een zwakke versie van het vermoeden van Poincaré: als elke enkelvoudige gesloten kromme van een compacte 3-variëteit is vervat in een 3-bal, dan is de variëteit homeomorf met de 3-sfeer.^[1] Bing beschreef ook een aantal van de valkuilen, waarin men gemakkelijk in kon trappen, bij pogingen het vermoeden van Poincaré te bewijzen.^[2]

Na verloop van tijd kreeg het vermoeden van Poincaré de reputatie lastig aan te pakken te zijn. John Milnor becommentarieerde dat de fouten in de ongeldige bewijzen soms "nogal subtiel en moeilijk opspoorbaar" kunnen zijn^[3]. Het werk aan het vermoeden van Poincaré leidde tot een beter begrip van 3-variëteiten. Deskundigen waren vaak terughoudend om bewijzen aan te kondigen, en neigden ernaar dergelijke aankondiging met scepticisme te bekijken. De jaren tachtig en negentig van de twintigste eeuw zagen een aantal veelbesproken misleidende bewijzen (die niet daadwerkelijk in collegiaal getoetste vorm werden gepubliceerd).^[4]

Een uiteenzetting van de diverse pogingen om het vermoeden van Poincaré te bewijzen vindt men in het ook voor niet-wiskundigen bedoelde boek, "Poincare's Prize" van George Szpiro.

In andere dimensies

De classificatie van gesloten oppervlakken geeft een bevestigend antwoord op de analoge vraag in twee dimensies. Voor dimensies groter dan drie, kan men het **veralgemeende vermoeden van Poincaré** opstellen: is een homotopische n -sfeer homeomorf met de n -sfeer? De sterkere veronderstelling is noodzakelijk, in dimensies vier en hoger zijn er enkelvoudig samenhangende variëteiten die niet homeomorf zijn met een n -sfeer.

Terwijl het vermoeden in dimensie drie plausibel leek, dacht men in het algemeen dat het veralgemeende vermoeden niet waar zou zijn. In 1961 schokte Stephen Smale de wiskundige wereld door het veralgemeende vermoeden van Poincaré voor dimensies groter dan vier te bewijzen. Smale gebruikte zijn bij dit bewijs ontwikkelde technieken om de fundamentele h-cobordisme stelling te bewijzen. In 1982 bewees Michael Freedman het vermoeden van Poincaré in dimensie vier. Het werk van Freedman liet de mogelijkheid open dat er een gladde vier-variëteit bestaat die homeomorf, maar niet diffeomorf is met de vier-sfeer. Dit zogenaamde **gladde vermoeden van Poincaré**, in dimensie vier, blijft open en wordt als zeer moeilijk beschouwd. Milnor 's exotische sferen laten bijvoorbeeld zien dat het gladde vermoeden van Poincaré onwaar is in dimensie zeven.

Deze eerdere successen in hogere dimensies lieten het vermoeden van Poincaré voor drie dimensies nog in het ongewisse. Om verschillende redenen was het vermoeden van Poincaré in wezen waar voor zowel dimensie vier als alle hogere dimensies. In dimensie drie had het vermoeden van Poincaré echter een onzekere reputatie totdat de vermeetkundigingsprogramma van Thurston het vermoeden van Poincaré in een raamwerk voor alle 3-variëteiten plaatste. John Morgan schreef:^[5]

"Het is mijn mening dat, voor Thurston's werk over hyperbolische 3-variëteiten en... het vermeetkundigingsvermoeden van Thurston er tussen de deskundigen geen consensus bestond over de vraag of het vermoeden van Poincaré waar of onwaar was. Na het werk Thurston's, ondanks het feit dat dit werk niet van directe invloed was op het vermoeden van Poincaré, ontwikkelde zich een consensus dat het vermoeden van Poincaré (en het vermeetkundigingsvermoeden) waar waren."

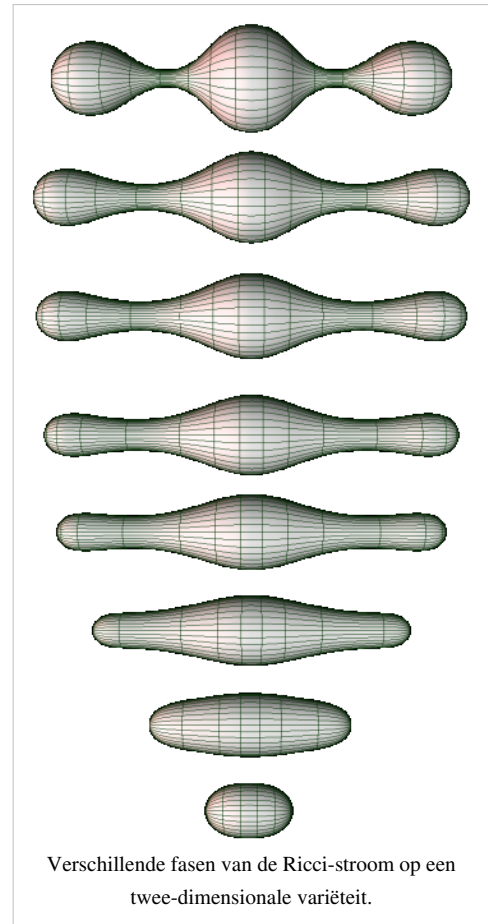
Het programma van Hamilton en de oplossing door Perelman

Het programma van Hamilton startte met een artikel van Richard Hamilton uit 1982, waarin deze de Ricci-stroom op een variëteit introduceerde en liet zien hoe men deze variëteit kon gebruiken om in enkele bijzondere gevallen het vermoeden van Poincaré te bewijzen.^[6] In de volgende jaren breidde hij dit werk uit, maar hij was niet in staat om het vermoeden van Poincaré te bewijzen. De werkelijke oplossing werd niet gevonden totdat Grigori Perelman van het Steklov-instituut voor wiskunde in Sint-Petersburg zijn artikelen publiceerde, waarbij hij gebruik maakte van ideeën uit het werk van Hamilton.

Eind 2002 en in 2003 plaatste Perelman drie artikelen op de arXiv site^{[7][8] [9]}. In deze artikelen schetste hij een bewijs van het vermoeden van Poincaré en een meer algemeen vermoeden, het vermeetkundingsvermoeden van Thurston. Hiermee completeerde hij het Ricci-stroom-programma, waarvan de contouren eerder door Richard Hamilton waren geschetst.

Van mei tot juli 2006 hebben diverse groepen artikelen gepresenteerd, die details van het bewijs van Perelman van het vermoeden van Poincaré als volgt invulden:

- Bruce Kleiner en John W. Lott plaatsten in mei 2006 een artikel op de arXiv site, die de details van het bewijs van Perelman van het vermeetkundingsvermoeden invulden.^[10]
- Huai-Dong Cao en Xi-Ping Zhu publiceerden in juni 2006 een artikel in de Asian Journal of Mathematics, waarin zij een volledig bewijs van het vermoeden van Poincaré en het vermeetkundingsvermoeden gaven. Hierin maakten zij gebruik van eerder werk door Kleiner en Lott.^[11]
- John Morgan en Gang Tian plaatsten in juli 2006 een artikel op de arXiv site. Daarin gaven zij een gedetailleerd bewijs van alleen het vermoeden van Poincaré (wat iets makkelijker is dan het bewijs van het volledige vermeetkundingsvermoeden)^[12] en werkten dit uit tot een boek.^[13]



Voetnoten

- [1] R.H. Bing, Necessary and sufficient conditions that a 3-manifold be S^3 , The Annals of Mathematics, 2nd Ser. Vol 68, issue 1, pag 17-37, 1958 zie hier ([http://links.jstor.org/sici?sici=0003-486X\(195807\)2:68:1<17:NASCTA>2.0.CO;2-1](http://links.jstor.org/sici?sici=0003-486X(195807)2:68:1<17:NASCTA>2.0.CO;2-1))
- [2] R.H. Bing, Some aspects of the topology of 3-manifolds related to the Poincaré conjecture, Lectures on Modern Mathematics, Vol. II, pag 93-128, Wiley, 1964, New York
- [3] "The Poincaré Conjecture 99 Years Later: A Progress Report" (Het vermoeden van Poincaré 99 jaar later: een voortgangsrapport) (<http://www.math.sunysb.edu/~jack/PREPRINTS/poiproof.pdf>), Milnor, John, 2004
- [4] Robert, Matthews, \$1 million mathematical mystery "solved", zie hier (<http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn2143>), NewScientist.com ,9 april 2002
- [5] Morgan, John W., Recent progress on the Poincaré conjecture and the classification of 3-manifolds (Recente vooruitgang bij het vermoeden van Poincaré en de classificatie van 3-variëteiten). Bull. Amer. Math. Soc. (N.S.) 42 (2005), nr. 1, 57-78
- [6] Hamilton, Richard, Drie-variëteiten met positieve Ricci-kromming, Journal of Differential Geometry, vol 17, pag 255-306, 1982, herdrukt in: Cao, H.D. coauteurs = et al., Collected Papers on Ricci Flow, International Press, 2003, ISBN 978-1571461100
- [7] Perelman, G, The entropy formula for the Ricci flow and its geometric applications (De entropieformule voor de Ricci-stroom en haar meetkundige toepassingen), arXiv DG 0211159, 2002
- [8] Perelman, G, Ricci flow with surgery on three-manifolds (Ricci-stroom met chirurgie op drie-variëteiten), arXiv DG 0303109, 2003
- [9] Perelman, G, Finite extinction time for the solutions to the Ricci flow on certain three-manifolds (Eindige uitdovings tijd voor de oplossingen van de Ricci-stroom op bepaalde drie-variëteiten), arXiv DG 0307245, 2003))

- [10] Bruce Kleiner, John W. Lott, Notes on Perelman's Papers (Opmerkingen bij de artikelen van Perelman), arXiv DG 060566, 2006
- [11] Huai-Dong Cao en Xi-Ping Zhu, A Complete Proof of the Poincaré and Geometrization Conjectures - application of the Hamilton-Perelman theory of the Ricci flow (Een volledig bewijs van het vermoeden van Poincaré en het vermeetskundigingsvermoeden - toepassing van de Hamilton-Perelman-theorie van de Ricci-stroom, zie hier (http://www.intlpress.com/AJM/p/2006/10_2/AJM-10-2-165-492.pdf), Asian Journal of Mathematics, vol 10, nr 2, juni 2006, Erratum.pdf zie hier (http://www.intlpress.com/AJM/p/2006/10_2/AJM-10-2-Erratum). Herziene versie (december 2006): Huai-Dong Cao, Xi-Ping Zhu, Perelman's Proof of the Poincaré Conjecture and the Geometrization Conjecture , arXiv, DG 0612069, 2006
- [12] John Morgan, coauteur Gang Tian, Ricci Flow en de Poincare Vermoeden, arXiv, DG 0607607, 2006
- [13] John Morgan en Gang Tian, Ricci-stroom en het vermoeden van Poincaré, Clay Mathematics Institute, ISBN 0821843281, 2007

Externe link

- (en) Vermoeden van Poincaré op [[MathWorld (<http://mathworld.wolfram.com/PoincareConjecture.html>)]]

Regulier priemgetal

In de getaltheorie is een **regulier priemgetal** een priemgetal p dat het klassegetal van het p -de cyclotomische veld niet deelt. Met het cyclotomische veld wordt het algebraïsch getallenlichaam bedoeld dat wordt verkregen door de p -eenheidswortel (de verzameling complexe getallen die de vergelijking $z^p=1$ oplost) naar de rationale getallen. Ernst Kummer toonde aan dat het equivalentie criteria voor regulariteit eruit bestaat dat p niet de teller van enige van de Bernoulligetallen deelt B_k voor $k = 2, 4, 6, \dots, p - 3$.

De eerste reguliere priemgetallen zijn:

3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 41, ... ^[1].

Er is een vermoeden geuit dat er oneindig veel reguliere priemgetallen zijn. Om precies te zijn heeft Siegel in 1964 gesteld dat $e^{-1/2}$, of ongeveer 61% van alle priemgetallen, regulier zijn, dit in de asymptotische analyse zin van een natuurlijke dichtheid. Geen van deze twee vermoedens is anno 2008 bewezen.

De eerste die reguliere priemgetallen in beschouwing nam was Kummer. Hij slaagde er in om te bewijzen dat de laatste Stelling van Fermat waar is voor alle reguliere priemgetallen en de veelvouden daarvan.

Een oneven priemgetal dat niet regulier is wordt een **irregulier priemgetal** genoemd. Het aantal van de Bernoulligetallen B_k met een teller deelbaar door p wordt de **irregulariteits index** van p genoemd. K L Jensen heeft in 1915 bewezen dat er een oneindig aantal irreguliere priemgetallen bestaat. De eersten daarvan zijn:

37, 59, 67, 101, 103, 131, 149, ... ^[2].

Referenties

- (en) Richard K. Guy, *Unsolved Problems in Number Theory* (Ned: Onopgeloste problemen in de getaltheorie) (3de editie), Springer Verlag, 2004 ISBN 0-387-20860-7; section D2.
- (de) Carl Ludwig Siegel, *Zu zwei Bemerkungen Kummers*. (Ned: Over twee opmerkingen van Kummer) Nachr. Akad. d. Wiss. Goettingen, Math. Phys. K1., II, 1964, 51-62.

Externe links

- (en) Chris Caldwell, The Prime Glossary: regular prime ^[3] (Ned: Het Priemglossarium: regulier priemgetal) op de Priemgetal pagina's.

Bronnen, noten en/of referenties

Riemann-hypothese

De **Riemann-hypothese** (RH) of het **Riemann-vermoeden** is het vermoeden dat het reële deel van alle niet-triviale nulpunten (de triviale nulpunten zijn $-2, -4, -6, \dots$) van de Riemann-zèta-functie gelijk is aan $1/2$. Het vermoeden werd in 1859 door Bernhard Riemann geformuleerd en geldt als een van de belangrijkste onopgeloste problemen in de wiskunde ^[1].

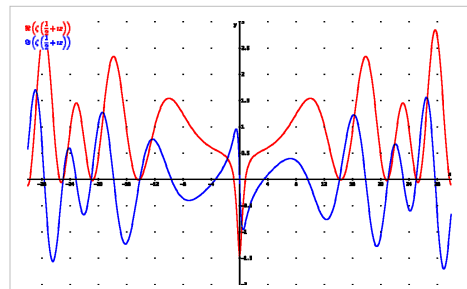
Op de Riemann-hypothese (en haar generalisaties) steunen vele andere belangrijke resultaten ^[2]. De meeste wiskundigen beschouwen de Riemann-hypothese als waar. ^[3] Dit is een van zeven wiskundige vraagstukken waarvoor het Clay Mathematics Institute een *Millennium Prize* van \$1.000.000 uitgelooft heeft in 2000, voor het eerste juiste bewijs van de hypothese. ^[4]

Relatie met priemgetallen

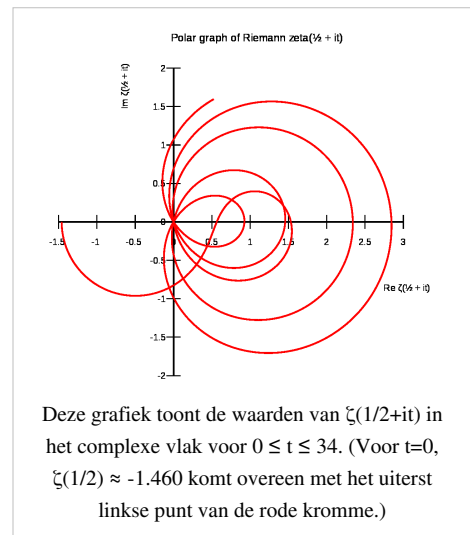
De Riemann-hypothese kan worden gezien als een verfijning van de priemgetalstelling. De priemgetalstelling geeft een nauwkeurige schatting voor het aantal priemgetallen en de Riemann-hypothese vertelt ons hoever de priemgetalstelling ernaast zit. Dit kunnen we preciezer schetsen aan de hand van de Tschebychev psi-functie $\psi(x)$ die sterk verwant is aan de zeta-functie. Voor deze functie geldt de formule: ^[5]

$$\psi(x) = x - \ln(2\pi) - \sum_r \frac{x^r}{r}$$

In deze formule loopt de som over alle niet triviale nulpunten r van de zeta-functie en moet gelden dat $x > 1$. Er is een vergelijkbare formule voor de zeta-functie maar die is wat ingewikkelder. De priemgetallenstelling is equivalent met de opmerking dat de term x in de formule domineert, dus dat ongeveer $\psi(x) = x$. We zien dat dit alleen het geval is wanneer de niet-triviale nulpunten r allemaal reël deel kleiner dan 1 hebben. Hoe kleiner het reële deel van de nulpunten r , hoe beter de priemgetallen zich houden aan de schatting gegeven in de priemgetalstelling. De symmetrie van de zeta-functie rond reël deel $1/2$ laat zien dat er voor elke r met reël deel $< 1/2$ ook een nulpunt met reël deel $> 1/2$ moet zijn. Daarom is de situatie optimaal als alle nulpunten r reël deel $1/2$ hadden. En dat is precies Riemanns hypothese. De best mogelijke situatie.



Het reële (rood) en imaginaire deel (blauw) van de Riemann zèta-functie langs de kritieke lijn $\text{Re}(s) = 1/2$. De eerste niet-triviale nulpunten zijn zichtbaar bij $\text{Im}(s) = \pm 14.135, \pm 21.022$ en ± 25.011 .



Deze grafiek toont de waarden van $\zeta(1/2+it)$ in het complexe vlak voor $0 \leq t \leq 34$. (Voor $t=0$, $\zeta(1/2) \approx -1.460$ komt overeen met het uiterst linkse punt van de rode kromme.)

Voetnoten

- [1] (en) Enrico Bombieri, The Riemann Hypothesis - official problem description (http://www.claymath.org/millennium/Riemann_Hypothesis/riemann.pdf), Clay Mathematics Institute
- [2] (en) Jason Wojciechowski, The Extended Riemann Hypothesis and its Application to Computation (http://wonka.hampshire.edu/~jason/math/comp2/final_paper.pdf), 22nd January 2003: "... were the ERH to fall, a lot of mathematics would go with it."
- [3] (en) J. E. Littlewood en Atle Selberg zouden sceptisch zijn. Maar Selberg suggereerde in een artikel uit 1989 dat een analogon moet gelden voor een grotere klasse van functies, de Selberg-klasse.)
- [4] (en) Keith J. Devlin, The Millennium Problems: The Seven Greatest Unsolved Mathematical Puzzles of Our Time, Basic Books, 2002, isbn=0-465-01729-0.
- [5] (nl) R. van der Veen, J. van de Craats, De Riemann-hypothese, Epsilon, 2011.

Inleidende boeken

- (en) John Derbyshire, *Prime Obsession, Bernhard Riemann and the Greatest Unsolved Problem in Mathematics*, London, 2003, ISBN 0-452-28525-9
- (en) Marcus du Sautoy, *The Music of the Primes, why an unsolved problem in mathematics matters*, London, 2003, ISBN 1-84115-580-2
- (nl) Roland van der Veen, Jan van de Craats, *De Riemann-hypothese: een miljoenenprobleem*, Epsilon, 2011, ISBN 978-90-5041-126-4

Historische artikelen

- (de) Bernhard Riemann, *Ueber die Anzahl der Primzahlen unter einer gegebenen Grösse* (http://www.claymath.org/millennium/Riemann_Hypothesis/1859_manuscript/), (1859) Monatsberichte der Berliner Akademie. (*This site provides both a facsimile of the original manuscripts, as well as English translations.*)
- (fr) Jacques Hadamard, *Sur la distribution des zéros de la fonction $\zeta(s)$ et ses conséquences arithmétiques*, Bulletin Société Mathématique de France **14** (1896) pp 199-220.

Moderne technische referenties

- (en) H.M. Edwards, *Riemann's Zeta Function*, Academic Press, 1974. (Reprinted by Dover Publications, 2001 ISBN 0-486-41740-9)
- (de) Knauf, Andreas, *Number theory, dynamical systems and statistical mechanics*, MathSciNet, 1714352, 1999, Reviews in Mathematical Physics. A Journal for Both Review and Original Research Papers in the Field of Mathematical Physics, issn 0129-055X, volume 11, issue 8, pages 1027–1060, doi= 10.1142/S0129055X99000325
- (en) E.C. Titchmarsh, *The Theory of the Riemann Zeta Function*, second revised (Heath-Brown) edition, Oxford University Press, 1986
- (en) Jeffrey Lagarias (2002). *An Elementary Problem Equivalent to the Riemann Hypothesis*. *American Mathematical Monthly* **109**: 534–543. DOI: 10.2307/2695443 (<http://dx.doi.org/10.2307/2695443>). (*A relationship in terms of Harmonic numbers.*)
- (en) (no author credited), *Computation of zeros of the Zeta function* (<http://numbers.computation.free.fr/Constants/Miscellaneous/zetazeroscompute.html>) (2004). (*Reviews the GUE hypothesis, provides an extensive bibliography as well.*)
- (en) Schoenfeld, Lowell, *Sharper bounds for the Chebyshev functions $\theta(x)$ and $\psi(x)$. II. Mathematics of Computation* **30** (1976), no. 134, 337--360.
- (en) Conrey, J. Brian, *The Riemann Hypothesis*, Notices of the American Mathematical Society, March 2003, 341-353. Available free <http://www.ams.org/notices/200303/fea-conrey-web.pdf>

Externe links

Inleiding

- (nl) Bewijzen van de RH op Wiskundemeisjes (<http://www.wiskundemeisjes.nl/20070220/bewijzen-van-de-riemann-hypothese/>)
- (nl) Op weg naar de Riemann-hypothese Doctoraalscriptie R.C. Pollé, Universiteit Leiden 2006 (<http://www.math.leidenuniv.nl/scripts/poll.pdf>)
- (en) Website met pogingen om de RH te bewijzen (<http://www.secamlcal.ex.ac.uk/~mwatkins/zeta/RHproofs.htm>)
- (en) Zetagrid (<http://www.zetagrid.net/zeta/index.html>) een geëindigd distributed computing-project dat de hypothese empirisch verifieerde.

Mislukte bewijzen

- Aron Palmer (<http://www.aronpalmer.com/rproofv2.pdf>)
- Louis de Branges (http://www.math.purdue.edu/ftp_pub/branges/apology.pdf)
- Xian-Jin Li (<http://www.math.columbia.edu/~woit/wordpress/?p=707>), preprint teruggetrokken 2008 (<http://arxiv.org/abs/0807.0090>)

Stelling van Fermat

De **stelling van Fermat**, ook wel de **grote of laatste stelling van Fermat** genoemd en niet te verwarren met de zogenaamde kleine stelling van Fermat, is een beroemde wiskundige stelling opgesteld door Pierre de Fermat die luidt dat het onmogelijk is een macht hoger dan de tweede op te delen in twee machten met diezelfde graad. In wiskundige notatie: voor $n > 2$ heeft de vergelijking

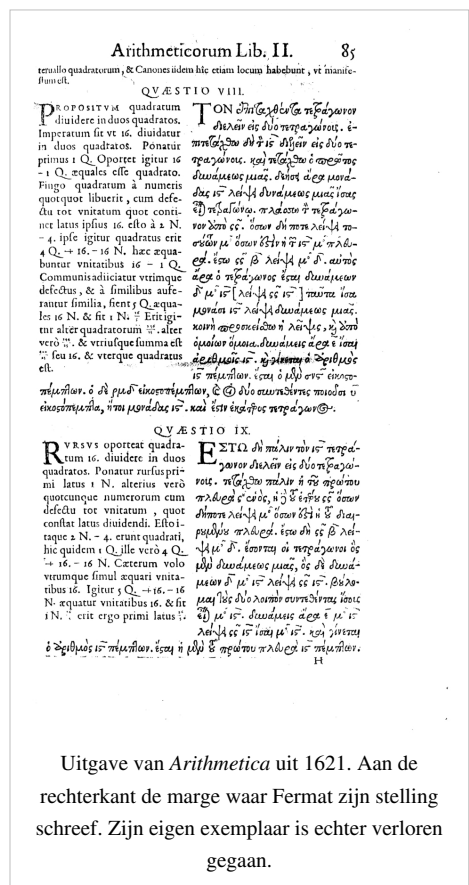
$$x^n + y^n = z^n$$

geen oplossing met natuurlijke getallen x , y en z ongelijk aan 0.

Van het van de stelling van Pythagoras bekende geval $n = 2$ met oneindig veel oplossingen, de zogenaamde *Pythagoreïsch drietallen* maakte hij een vergelijking die, zo stelde hij, voor $n > 2$ geen enkele oplossing verschillend van nul heeft. De stelling werd door Fermat in 1637 opgeschreven in de marge van zijn exemplaar van Claude-Gaspard Bachet's vertaling van Diophantus' klassieke werk *Arithmetica*. Hij schreef in het Latijn:

Cubum autem in duos cubos, aut quadratoquadratum in duos quadratoquadratos, et generaliter nullam in infinitum ultra quadratum potestatem in duas eiusdem nominis fas est dividere cuius rei demonstrationem mirabilem sane detexi. Hanc marginis exiguitas non caperet.

Het is onmogelijk een derde macht op te splitsen in twee derde machten, of een vierde macht in twee vierde machten, of in het



Uitgave van *Arithmetica* uit 1621. Aan de rechterkant de marge waar Fermat zijn stelling schreef. Zijn eigen exemplaar is echter verloren gegaan.

algemeen elke macht hoger dan de tweede in twee machten met diezelfde graad: voor welke stelling ik waarlijk een spectaculair bewijs heb gevonden. Deze marge is te smal om het te bevatten.

Men is nooit zeker geweest over het bestaan van dit bewijs, laat staan van de juistheid ervan. Tegenwoordig wordt wel algemeen aangenomen dat, als Fermat al dacht het bewezen te hebben, zijn bewijs onjuist was.

In 1670 verscheen een nieuwe editie van *Arithmetica* met aantekeningen van Fermat, na zijn dood verzameld door zijn zoon. Deze aantekeningen bestonden uit heel wat 'stellingen', die beter vermoedens genoemd kunnen worden zolang ze niet bewezen zijn, maar de meeste ervan zonder het bewijs erbij. De wiskundige gemeenschap probeerde de ontbrekende bewijzen te vinden, maar dat lukte niet in alle gevallen. In één geval, over zogenaamde Fermat-priemgetallen, bleek het vermoeden van Fermat zelfs onjuist.



Pierre de Fermat

Geschiedenis van het bewijs

De moeilijkste van Fermats *vermoedens* bleek de **laatste stelling van Fermat** te zijn. Over een tijdsspanne van meer dan driehonderd jaar probeerden ook de grootste wiskundigen tevergeefs dit vermoeden te bewijzen. Euler gaf wel een onvolledig bewijs voor $n = 3$, en Legendre verbeterde dat. Johann Dirichlet en Legendre bewezen in 1825 het geval $n = 5$. Gabriel Lamé bewees in 1839 het geval $n = 7$. Kummer bewees in 1844 de stelling voor alle reguliere priemgetallen n . Jensen bewees in 1915 dat er oneindig veel niet-reguliere priemgetallen zijn.

357 jaar na de formulering van de stelling werd het bewijs geleverd voor alle $n > 2$ door de Britse wiskundige Andrew Wiles in november 1994, één jaar nadat het eerder door hem gepresenteerde bewijs een fout bleek te bevatten. Het bewijs maakt gebruik van de eigenschappen van elliptische krommen.

Fermats bewijs voor $n=4$

Over het algemeen wordt aangenomen dat Fermat zijn stelling heeft aangetoond voor $n=4$. Weliswaar heeft men dat bewijs niet op schrift, maar hij gaf wel een bewijs voor de volgende stelling:

De oppervlakte van een rechthoekige driehoek kan geen kwadraat zijn (voor rationale getallen).

De bewijsvoering voor deze stelling kan hem ook in staat gesteld hebben zijn beroemde stelling voor $n=4$ te bewijzen.^[1] Hij beschreef dit bewijs als volgt:

- Als het oppervlak van een rechthoekige driehoek een kwadraat zou zijn, zouden er twee vierde machten bestaan, waarvan het verschil een kwadraat is.
- Daaruit volgt dat er twee kwadraten zouden bestaan waarvan de som en het verschil beiden kwadraten zouden zijn.
- Dan zou er een kwadraat bestaan dat de som zou zijn van een kwadraat en het dubbele van een ander kwadraat, omdat de kwadraten, waarvan deze som wordt berekend, zelf een som zouden hebben dat een kwadraat is.
- Maar als een kwadraat de som is van een kwadraat en het dubbele van een ander kwadraat, dan is zijn zijde, zoals ik eenvoudig kan bewijzen, op de zelfde manier ook de som van een kwadraat en het dubbele van een ander kwadraat.
- Hieruit concluderen we dat de genoemde zijde de som is van de zijdes aan de rechte hoek in een rechthoekige driehoek, en dat het enkele kwadraat in de som de basis is en het dubbele van het andere kwadraat de loodrechte zijde is.

- Deze rechthoekige driehoek wordt aldus gevormd door twee kwadraten, waarvan de som en het verschil ook kwadraten zijn.
- Maar het kan worden aangetoond dat allebei de kwadraten kleiner zullen zijn dan de oorspronkelijke kwadraten, waarvan aangenomen werd dat zowel hun som als hun verschil kwadraten zijn.
- Dus als er twee kwadraten bestaan, zodanig dat hun som en verschil ook kwadraten zijn, dan bestaan er tevens twee andere kwadraten die de zelfde eigenschap hebben maar met een kleinere som.
- Door deze redenering vinden we een som die telkens kleiner is dan de vorige, en we kunnen zo tot in het oneindige doorgaan met het vinden van steeds kleinere kwadraten met deze eigenschap.
- Dit is echter onmogelijk omdat er geen oneindige reeks van natuurlijke getallen kan zijn, kleiner dan een gegeven natuurlijk getal.

De stap naar het bewijs voor alle $n > 2$

Voor $n = 4$ is het bewijs door Fermat geleverd.

Het geval $n = 4$ is belangrijk omdat de stelling van Fermat waar is voor alle $n > 2$ als ze waar is voor n gelijk aan 4 én voor n gelijk aan een oneven priemgetal.

Dat kan men als volgt inzien:

Stel dat er een gehele x , y en z (niet nul) bestaan zodat $x^n + y^n = z^n$ met $n > 2$. In dat geval schrijven we:

$$n = pq$$

n is een macht van 2 of n is geen macht van 2. Als n een macht van 2 is, dan is het ook een 4-voud omdat $n > 2$. Definieer in dat geval $p = 4$. Als n dat niet is, dan is n deelbaar door een oneven priemgetal. Definieer in dat geval p als dat oneven priemgetal.

We herschrijven de oorspronkelijke formule als volgt:

$$x^n + y^n = z^n \text{ met } n > 2 \text{ en } n = pq$$

$$x^{pq} + y^{pq} = z^{pq}$$

$$(x^q)^p + (y^q)^p = (z^q)^p$$

$$a^p + b^p = c^p$$

Men ziet nu eenvoudig dat als er een oplossing bestaat voor $n = pq$ dat er dan ook een (andere) oplossing is voor $n = p$ waarbij zoals gezegd n dus een viervoud is of een oneven priemgetal.

Merk op dat 2 het enige even priemgetal is. Voor de vergelijking $x^2 + y^2 = z^2$ zijn er oneindig veel oplossingen. Bijvoorbeeld $3^2 + 4^2 = 5^2$. Vandaar het belang om p een oneven priemgetal te stellen indien n geen macht van twee is.

Daar Fermat het bewijs voor $n=4$ zelf al heeft gegeven was het enkel nog nodig om de stelling te bewijzen voor n als oneven priemgetal. Dit is Andrew Wiles eeuwen later in tweede instantie gelukt.

Externe links

- Fermat's Last Theorem op MathWorld ^[2]
- (en) Paper over De Laatste Stelling van Fermat ^[3]

Bronnen, noten en/of referenties

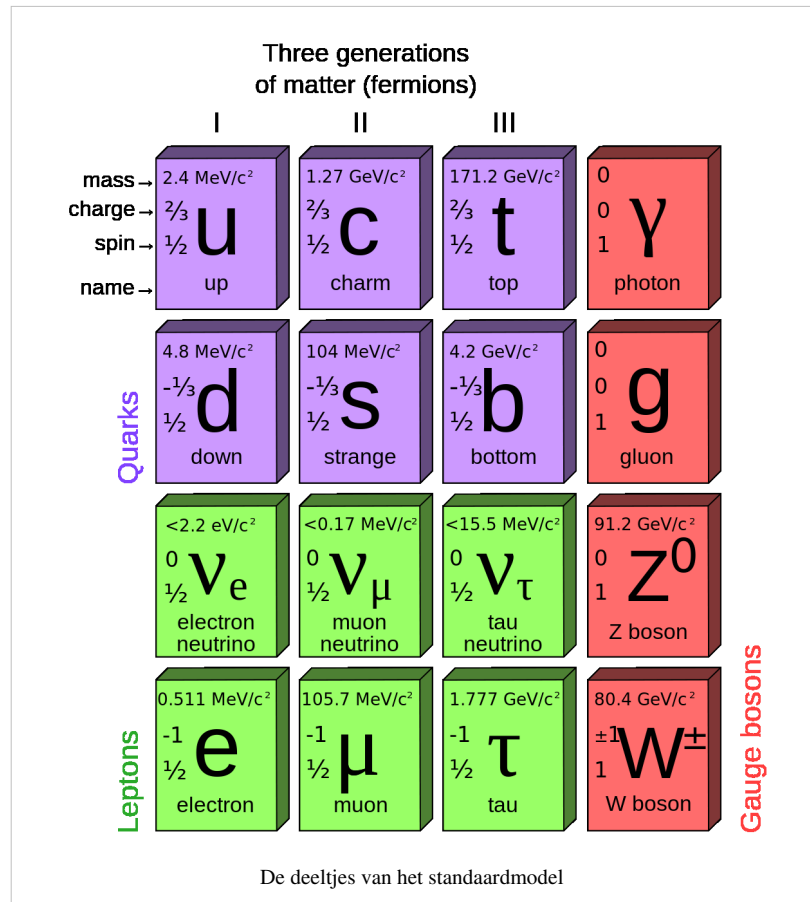
- Singh, Simon (1997). *Het laatste raadsel van Fermat*. Uitgeverij Arbeiderspers. ISBN 90-295-3728-0
- Wiles, Andrew John. *Modular elliptic curves and Fermat's Last Theorem* (<http://modular.fas.harvard.edu/edu/Spring2004/129/references/flt/flt.pdf>) (PDF). *Annals of Mathematics* **141** (1995): 443-551.

Noten:

Standaardmodel van de deeltjesfysica

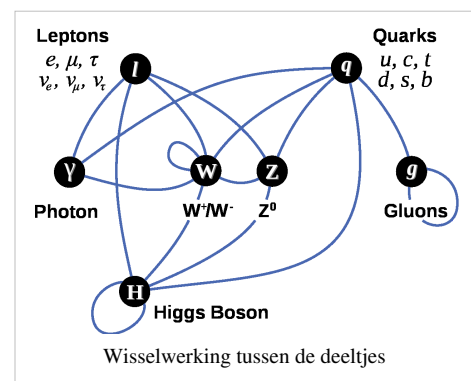
Standaardmodel van de deeltjesfysica

Het **standaardmodel van de deeltjesfysica** is een theorie uit de deeltjesfysica waarin de krachten en deeltjes die alle materie vormen, worden beschreven. Experimenten hebben aangetoond dat deze theorie met de kwantummechanica en de speciale relativiteitstheorie in overeenstemming is. Het is echter geen allesbeschrijvende theorie van fundamentele interacties, hoofdzakelijk omdat het de zwaartekracht buiten beschouwing laat. In de jaren '70 is het standaardmodel opgezet en men heeft hiermee veelvuldig de uitkomst van experimenten succesvol kunnen voorspellen. Vandaag is het standaardmodel een breed aanvaarde theorie die in veel gebieden toepasbaar is. Het standaardmodel voorspelde tot voor kort dat neutrino's massaloos zijn. De ontdekking van neutrino-oscillaties (het fenomeen waarbij neutrino's van de ene generatie in de ander omgezet worden) vereist echter dat deze een massa hebben.



Materiedeeltjes en krachtvoerende deeltjes

Alle delen van het atoom bestaan uit fundamentele *materiedeeltjes* en *krachtvoerende deeltjes*. Materiedeeltjes hebben een halfvallige spin, voldoen dus aan de Fermi-Diracverdeling en heten daarom fermionen. Ze zijn te onderscheiden in leptonen en de uit quarks opgebouwde hadronen. De krachtvoerende deeltjes hebben een gehele spin, voldoen dus aan de Bose-Einsteinstatistiek en heten daarom (intermediaire vector) bosonen. Ze zijn de overbrengers van de vier fundamentele natuurkrachten. De zwaartekracht met het voorspelde maar nog niet aangetoonde graviton en het voorspelde en mogelijk in 2012 experimenteel gevonden Higgsboson vallen voorlopig buiten het standaardmodel.



Er zijn ongeveer 200 subatomaire deeltjes bekend. Die worden aangeduid met een letter uit het Latijnse of Griekse alfabet, aangevuld met een andere letter, '+', '-', '0', '/' of een streep. Een vereenvoudigd overzicht zou er als volgt uit kunnen zien:

- Subatomair deeltje
 - Elementair deeltje
 - fermion
 - lepton (bv elektron en muon en tau en neutrino's en hun antideeltjes dus $3 + 3 + 3 + 3 = 12$)
 - quark (namelijk up, down, strange, charm, bottom en top en hun antideeltjes, dus $6 + 6 = 12$)
 - boson (bv foton en gluon)
 - hadron
 - baryon (bv proton en neutron) bestaande uit 3 quarks, dus fermion
 - meson (bv pion en kaon) bestaande uit 2 quarks, dus boson

Leptonen en quarks kunnen in drie generaties voorkomen. Zichtbare materie in het heelal bestaat vrijwel uitsluitend uit deeltjes van de eerste generatie: up- en down-quarks en elektronen. Deeltjes van de tweede en derde generatie zijn instabiel: ze vervallen in een fractie van een seconde in deeltjes van de eerste generatie, maar kunnen wel gegenereerd worden door botsingen van (hoogenergetische) deeltjes van de eerste generatie.

Soort		Eerste generatie			Tweede generatie			Derde generatie		
Soort baryon	Lading (e)	Deeltje	Symbol	Massa (GeV)	Deeltje	Symbol	Massa (GeV)	Deeltje	Symbol	Massa (GeV)
Quarks	+2/3	Up	u	0,003	Charm	c	1,3	Top (truth)	t	174
	-1/3	Down	d	0,006	Strange	s	0,14	Bottom (beauty)	b	4,3
Leptonen	-1	Elektron	e^-	0,00051	Muon	μ^-	0,106	Tau	τ^-	1,784
	0	Elektron-neutrino	ν_e	$< 15 \times 10^{-8}$	Muon-neutrino	ν_μ	$< 2,5 \times 10^{-4}$	Tau-neutrino	ν_τ	$< 3,5 \times 10^{-2}$

Zie ook de lijst van elementaire deeltjes voor meer eigenschappen van de deeltjes uit het standaardmodel.

Externe links

- standaardmodel (met tekeningen) ^[1]
- Particle Chart ^[2] - een kaart met een overzicht van de deeltjes en interacties in het standaardmodel
- Particle Adventure ^[3] - Een zeer duidelijke en leerzame site over elementaire deeltjes. Engelstalig.
- First Encounter ^[4] - Een Nederlandse introductie

Referenties

[1] <http://users.pandora.be/lode.stevens/fysica.htm>

[2] http://www.cpepweb.org/cpep_sm_large.html

[3] <http://particleadventure.org>

[4] http://www.cwi.nl/~haverkort/documents/FE3_Standaardmodel_Deeltjesfysica.pdf

Algemene relativiteitstheorie

Algemene relativiteitstheorie

Algemene relativiteitstheorie
$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$
(de Einstein-vergelijking)
Achtergrond
Speciale relativiteit Equivalentieprincipe · Wereldlijn Coördinaat-onafhankelijkheid Wiskundige achtergrond: tensoren
Vergelijkingen
Einstein-vergelijking Friedmann-vergelijking ADM-formalisme
Oplossingen
Schwarzschildmetriek Reissner-Nordströmmetriek Kermetriek
Experimentele verificatie
Gravitationeel lenseffect Zwarte gaten Perihelium-precessie
Gevorderde onderwerpen
Kaluza-Klein-theorie Kwantumgravitatie
Wetenschappers
Einstein · Minkowski · Eddington Lemaître · Schwarzschild Friedmann · Chandrasekhar Hawking

De **algemene relativiteitstheorie** is een meetkundige theorie van de zwaartekracht, die in 1916 door Albert Einstein werd gepubliceerd.^{[1][2]} Het is de huidige beschrijving van de zwaartekracht in de moderne theoretische natuurkunde. De algemene relativiteitstheorie veralgemeent de speciale relativiteitstheorie en de gravitatiewet van Newton. Zij geeft een verenigde beschrijving van de zwaartekracht als een meetkundige eigenschap van ruimte en tijd (ook wel ruimtetijd). In het bijzonder houdt de kromming van de ruimtetijd direct verband met de vier-impuls (massa-energie en lineaire impuls) van de aanwezige materie en straling. De relatie wordt gespecificeerd door de Einstein-veldvergelijkingen, een systeem van partiële differentiaalvergelijkingen.

Veel voorspellingen van de algemene relativiteitstheorie verschillen aanzienlijk van die van de klassieke natuurkunde, met name die met betrekking tot de passage van tijd, de meetkunde van de ruimte, de beweging van lichamen in vrije val en de voortplanting van het licht. Voorbeelden van dergelijke verschillen zijn onder andere de gravitationele tijdsdilatatie, de gravitationele roodverschuiving van het licht en de gravitationele tijdsvertraging. De voorspellingen van de algemene relativiteitstheorie zijn tot op heden in alle waarnemingen en experimenten bevestigd. Hoewel de algemene relativiteitstheorie niet de enige relativistische theorie van de zwaartekracht is, is het de eenvoudigste theorie die consistent met de experimentele data is. Er blijven echter onbeantwoorde vragen, de meest fundamentele zijn hoe de algemene relativiteitstheorie kan worden verzoend met de wetten van de kwantummechanica om zo een volledige en zelfconsistente theorie van de kwantumzwaartekracht te produceren.

Einstein voorspelde correct dat licht van verre sterren dat langs de zon scheert in het zwaartekrachtsveld van de zon wordt afgebogen. Na de vele kwantitatieve experimentele bevestigingen van de theorie, werd de relativiteitstheorie beroemd als een elegante opvolger (verfijning) van de voorheen bekende zwaartekrachtstheorie van Newton.

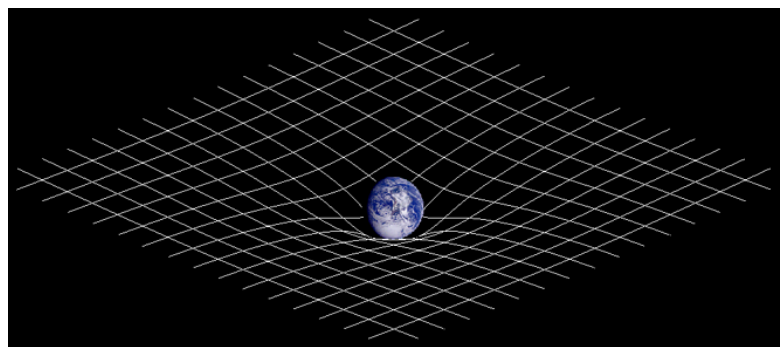
Equivalentieprincipe

Uitgangspunt is het equivalentieprincipe. Waarnemers die uniform versneld worden zijn "equivalent" dus gelijkwaardig met andere waarnemers die stilstaan in een homogeen zwaartekrachtsveld. Dat wil zeggen dat de mechanica en andere natuurkundige wetten voor beide waarnemers dezelfde zijn. In de algemene relativiteitstheorie wordt de zwaartekracht niet als een kracht gezien die voldoet aan de Wetten van Newton, maar als een "schijnkracht" die het gevolg is van de kromming van de ruimte-tijd. Dit moet ook, want de wetten van Newton zouden een werking van de zwaartekracht toelaten sneller dan het licht, wat niet mogelijk is volgens de speciale relativiteitstheorie.

Ruimtekromming en zwaartekracht

De algemene relativiteitstheorie is een geometrische theorie, waarin wordt aangenomen dat zowel massa als energie de ruimtetijd doen krommen, en dat deze kromming de beweging van vrije deeltjes, waaronder ook het licht, beïnvloedt.

In zijn algemene relativiteitstheorie (1915) kwam Einstein met een nieuwe opvatting van de zwaartekracht. Hij stelde dat er geen verschil bestaat tussen een constante versnelling (trage massa) en een constante zwaartekracht



Tweedimensionale weergave van een ruimte-tijd-verborming. De aanwezigheid van een zwaar voorwerp verandert de geometrie van de ruimte, waarna we de "gekromde ruimte" ervaren als zwaartekracht. De witte lijnen stellen niet de ruimte zelf voor maar een rechthoekig coördinatenstelsel dat op de gekromde ruimte geprojecteerd wordt.

(zware massa) (ga maar na: in een lift $9,8 \text{ m/s}^2$ naar boven versnellen (ergens op een afgelegen plekje zonder zwaartekracht in de ruimte) geeft hetzelfde gevoel als op aarde te staan en met $9,8 \text{ N/kg}$ (of ook m/s^2) naar beneden te worden getrokken). Hij stelde ook dat materie (en elke andere vorm van energie) de ruimte vervormt. We vallen dus naar de aarde toe vanwege een kromming van de ruimte ten gevolge van de massa van de aarde. Dit is een grote wijziging ten opzichte van de ideeën van Newton. Deze theorie voorspelde afbuiging van sterrenlicht die tijdens een zonsverduistering in 1919 ook inderdaad waargenomen werden door Arthur Eddington. Ook biedt deze theorie een verklaring voor de precessie van de baan van Mercurius om de zon: dit is geen ellips zoals uit de Wetten van Kepler blijkt, maar wel een rozet.

Uitbreiding van de speciale relativiteitstheorie

De algemene relativiteitstheorie breidt de speciale relativiteitstheorie uit, door aan inertiaalstelsels een lokale betekenis te geven: een coördinatenstelsel geassocieerd met een waarnemer in vrije val. Een bijzonder geval hiervan is dat een algemene eenparige versnelling van massa's niet van een constant gravitatieveld onderscheiden kan worden. Meer algemeen kan gravitatie, als de versnelling van waarnemers in vrije val t.o.v. elkaar, worden geïnterpreteerd als een gevolg van kromming van de ruimte.

Differentiaalmeetkunde

► *Zie Differentiaalmeetkunde voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Wiskundig betekent het bestaan van lokale inertiaalstelsels dat de ruimtetijd een 4-dimensionale differentieerbare variëteit is, ongeveer zoals beschreven in de differentiaalmeetkunde van Bernhard Riemann. Bijgevolg maakt de algemene relativiteitstheorie gebruik van tensoren, omdat hiermee beweringen gedaan kunnen worden die onafhankelijk van coördinaten zijn. Eigenlijk zijn de gebruikte ruimten geen Riemann-variëteiten, maar Lorentz-variëteiten, omdat de metrische tensor niet positief definitief is, maar daarentegen signatuur 2 heeft (de enkelvoudige eigenwaarde in de tijd-richting is tegengesteld aan de drievoudige eigenwaarde in de ruimte-richtingen).

De theorie is gebaseerd op slechts een kleine groep formules en dit maakt de theorie erg elegant. Deze formules gebruiken echter ingewikkelde wiskundige concepten. Het belangrijkste resultaat van de algemene relativiteitstheorie vormt een stelsel partiële differentiaalvergelijkingen, de zogenaamde Einstein-vergelijkingen:

$$G_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ab}$$

met:

- G_{ab} is de Einstein-tensor
- T_{ab} is de energie-momentum-tensor

Deze vergelijking stelt ruwweg dat de kromming van de ruimtetijd (het object links in bovenstaande vergelijking) gelijk is aan de energiedichtheid (het object rechts). Dat betekent dus dat massieve voorwerpen de ruimte krommen, en dat de banen van nabije voorwerpen afbuigen als gevolg van die kromming. Vaak wordt de vergelijking gemaakt met een trampoline. Stel je voor dat daarop een zwaar object ligt. Dat object vervormt het oppervlak van de trampoline. Als je dan een knikker over de trampoline laat rollen, wordt deze afgebogen (rolt niet meer rechtdoor) als gevolg van die kromming. Zwaartekracht werkt dus op precies dezelfde manier.

Het geometrische karakter van deze vergelijkingen, en de wiskundige eenvoud maakt van de relativiteitstheorie een uitzonderlijk elegante theorie .

Ruimtekromming

Meer eenvoudig gesteld is de kromming van de ruimte als volgt te vatten als uitbreiding van het bekende begrip kromming van een oppervlak. Stel we meten van een cirkel de omtrek en de doormeter (diameter) en we stellen vast dat hun verhouding niet pi is. Dan weten we, dat onze cirkel niet in een plat vlak ligt, maar bijvoorbeeld op een gekromd oppervlak zoals een bol en uit de afwijking kunnen we de kromtestraal van die bol bepalen. Stel we meten nu van een bol de oppervlakte A en de straal r . In een ruimte die geen massa bevat en dus niet gekromd is, geldt $A = 4\pi r^2$. Een ruimte die een massa m bevat is gekromd zodat

$$\sqrt{\frac{A}{4\pi}} - r = \frac{Gm}{3c^2}$$

waarin G de gravitatieconstante en c de lichtsnelheid is. Die betrekking vervangt en verbetert de zwaartekrachtwet van Newton. Voor de aarde bedraagt het verschil 1,5 mm, voor de zon 500 m.

Tijdsdilatie

Een gevolg van de algemene relativiteitstheorie is, dat een klok die hoger staat in een zwaartekrachtveld met valversnelling g sneller loopt, namelijk met een factor:

$$1 + \frac{gh}{c^2}$$

Dit is aangetoond met behulp van een atoomklok. De algemene relativiteitstheorie geeft ook een elegant en juist alternatief voor de Wetten van Newton: als een voorwerp beweegt, dan zal de tijd ervoor trager lopen. Tijd en ruimte zijn dus complementair, hetgeen wil zeggen dat de som van de bewegingen van een voorwerp door tijd en ruimte altijd hetzelfde is en tevens gelijk aan de lichtsnelheid. Wikipedia:Bronvermelding De weg die het voorwerp echt volgt is die weg die de tijd op de eigen klok zo groot mogelijk maakt. Aldus ontstaat een nieuwe dimensie, de ruimtetijd.

Experimentele toetsing

De volgende experimenten toonden direct of indirect de juistheid van relativiteitstheorie aan, in tegenstelling tot andere zwaartekrachtstheorieën zoals de voorheen gangbare Gravitatiewet van Newton:

- periheliumverschuiving van Mercurius
- Pound-Rebka-experiment (gravitationele roodverschuiving)
- tijdsverschil reizende en achterblijvende atoomklokken
- Radarreflectie aan planeten en ruimtesondes: tijdsdilatie
- effect van Nordvedt
- pulsar in dubbelstersysteem (*binary pulsar* van Hulse en Taylor): zwaartekrachtsgolven

Ontwikkelingen

Tot nog toe zijn alle experimenten in overeenstemming met de theorie, maar niet alle aspecten van de theorie zijn experimenteel getoetst. In het bijzonder wordt er wereldwijd met miniGrail gepoogd een zwaartekrachtsgolf waar te nemen, die als belangrijk dynamisch fenomeen door de theorie voorspeld wordt. Voorts is er een probleem met de kwantummechanica, daar er nog geen theorie is die gravitatie kwantumtheoretisch consistent beschrijft (zie Higgsboson en Graviton). In de meeste gevallen kunnen natuurkundigen met twee theorieën leven, de kwantummechanica op subatomaire schaal, de relativiteitstheorie op kosmische schaal, en 'simpele' Newtoniaanse mechanica op tussenliggende schalen, maar in enkele gevallen is de combinatie tussen sterke gravitatie en kleine schaal dusdanig dat beide theorieën invloed hebben, in het bijzonder bij zwarte gaten en in de eerste korte tijd na de oerknal.

Mogelijke oplossingen voor dit probleem zijn de Snaartheorie, de loop-kwantumzwaartekracht en als hypothese de allesomvattende theorie van alles.

Voetnoten

- [1] Nobel Prize Biography (http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1921/einstein-bio.html). *Nobel Prize Biography*. Nobel Prize. Geraadpleegd op 25 February 2011.
- [2] Einstein gaf in 1915 een serie lezingen over de algemene relativiteitstheorie voor de Pruisische Academie van Wetenschappen.

Externe link

- (en) (<http://www.alberteinstein.info/gallery/gtext3.html>) Einstein, Albert (1916). "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie" (PDF). *Annalen der Physik* vierde Folge. Band 49, p. 769-822 en Engelse vertaling.
- (nl) (http://www.cwi.nl/~haverkort/documents/FE1_Algemene_Relativiteits_Theorie.pdf) Een Nederlandse introductie - First Encounter

Verder lezen

- Thorne, Kip S.: *Black holes and time warps. Einstein's outrageous legacy*, Norton, New York 1994 en latere uitgaven
- Will, Clifford M. : *Was Einstein right? Putting General Relativity to the test*, Oxford University Press 1988



Bronnen die bij dit onderwerp horen, zijn te vinden op de pagina *Relativity: The Special and General Theory* op Wikisource



Bronnen die bij dit onderwerp horen, zijn te vinden op de pagina *The Foundation of the Generalised Theory of Relativity* op Wikisource



Wikibooks heeft een studieboek over dit onderwerp: *Algemene relativiteitstheorie*.

Externe links

- Relativity: The special and general theory* (<http://publicliterature.org/books/relativity/xaa.php>) (PDF (<http://publicliterature.org/pdf/relat10.pdf>))
- Einstein Online (<http://www.einstein-online.info>) – Artikelen over verschillende aspecten van relativistische natuurkunde voor een breed publiek (Max Planck Institute for Gravitational Physics)
- NCSA Spacetime Wrinkles (<http://archive.ncsa.uiuc.edu/Cyberia/NumRel/NumRelHome.html>) – van de numerieke relativiteitsgroep van het National Center for Supercomputing Applications, met inleiding tot de algemene relativiteit

Collegedictaten/video's van colleges

- Video Lectures on General Relativity (<http://video.google.ca/videosearch?q=General+Relativity+MIT+Physics+Lecture>) door hoogleraar natuurkunde Edmund Bertschinger, MIT
- Series of lectures on General Relativity (<http://www.luth.obspm.fr/IHP06/>) gegeven in 2006 op het Institut Henri Poincaré (inleidende en gevorderde colleges).
- Relativity, Gravity and Cosmology (http://web.mit.edu/professional/short-programs/courses_topic.html)
- General Relativity Tutorials (<http://www.math.ucr.edu/home/baez/gr/>) van John Baez
- Brown, Kevin. Reflections on relativity (<http://www.mathpages.com/rr/rrtoc.htm>). *Mathpages.com*. Geraadpleegd op May 29, 2005.
- Carroll, Sean M.. Lecture Notes on General Relativity (<http://preposterousuniverse.com/grnotes/>). Geraadpleegd op November 26, 2006.

- Moor, Rafi. Understanding General Relativity (<http://www.rafi Moor.com/english/GRE.htm>). Geraadpleegd op July 11, 2006.
- Waner, Stefan. Introduction to Differential Geometry and General Relativity (http://people.hofstra.edu/faculty/Stefan_Waner/RealWorld/pdfs/DiffGeom.pdf) (PDF). Geraadpleegd op 2006-01-31.

Anti-de Sitter-metriek

De **Anti-de Sitter-metriek** of **Anti-de Sitter-ruimte** beschrijft op wiskundige manier hoe het universum er uit zou zien indien er een negatieve kosmologische constante zou zijn. Meer bepaald, het geeft de metriek van de ruimtetijd waarvoor het vacuüm een negatieve energiedichtheid heeft. Hoe de metriek van zo een ruimte er uitziet, wordt opgelegd door de algemene relativiteitstheorie, dat wil zeggen de Einstein-vergelijkingen. De naam van deze ruimte verwijst naar zijn tegenpool: de de Sitter-metriek, welke een ruimte met *positieve* kosmologische constante beschrijft. Deze laatste is op zijn beurt genoemd naar de Nederlandse natuurkundige Willem de Sitter.

Wiskundige eigenschappen en motivatie

De Anti-de Sitter-metriek wordt genoteerd als AdS_n . Hierbij staat n voor het aantal ruimtetijd-dimensies, dat wil dus zeggen $n - 1$ ruimtelijke richtingen en één tijdrichting. Als het universum waarin wij leven een negatieve kosmologische constante zou hebben, zou deze allicht lijken op AdS_4 . De wetenschappelijke wereld is er echter van overtuigd dat ons universum een (kleine) *positieve* kosmologische constante heeft, en dus veeleer lijkt op een vierdimensionale de Sitter-ruimte. Desondanks wordt de Anti-de Sitter-metriek bestudeerd in de theoretische natuurkunde, omwille van zijn interessante eigenschappen, zijn rol in de AdS/CFT-dualiteit, en het feit dat deze ruimte in zekere zin eenvoudiger is dan de Sitter-metriek.

In wiskundige termen is het de maximaal symmetrische, negatief gekromde ruimte met Lorentzianse signatuur.

Definitie

De meest courante definitie van AdS_n , is de deelruimte van $R^{2,n-1}$ (de vlakke ruimte met twee tijd- en $(n-1)$ ruimtecoördinaten),

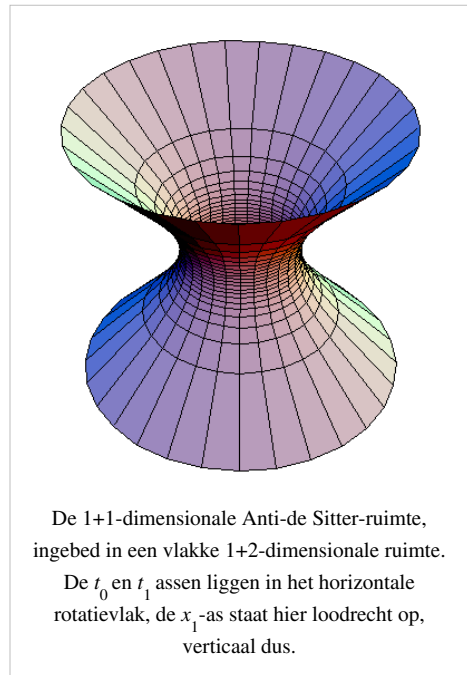
$$ds^2 = -dt_0^2 - dt_1^2 + \sum_{i=2}^n dx_i^2,$$

bepaald door de vergelijking

$$-t_0^2 - t_1^2 + \sum_{i=2}^n x_i^2 = -L^2$$

Hierin is L een grootte met de eenheid van lengte, de *Anti-de Sitter-lengte*. Ruwweg bepaalt deze constante de lengteschaal geassocieerd aan de kromming. Voor een waarnemer in een Anti-de Sitter-universum, zou het verschil met een gewone vlakke ruimte *voelbaar* zijn op lengteschalen van de orde van L . De vorm van de bovenstaande deelruimte is een hyperboloïde. Deze heeft één tijddimensie minder dan $R^{2,n-1}$, en dus een gewone Lorentzianse signatuur heeft.

Op de afbeelding rechts is een weergave geschetst van de ruimte AdS_2 , ingebed in $R^{2,1}$. De drie assen van $R^{2,1}$ zijn als volgt: verticaal staat de ruimtelijke richting, en de twee 'horizontale' richtingen (lichtjes gekanteld op de tekening) zijn de twee tijdrichtingen. Binnen deze ruimte is dan AdS_2 dan gegeven door de tweedimensionale hyperboloïde. De metrick wordt geïnduceerd door die van $R^{2,1}$. Men kan zich voorstellen dat bewegen op de hyperbool, in verticale richting, een positief lijnelement oplevert, zodat de verticale richting van de hyperbool een ruimtelijke coördinaat is. Als men daarentegen beweegt rondom de hyperbool (langsheen de taille van de hyperbool bijvoorbeeld), verplaatst men zich in de horizontale richting van de achterliggende ruimte $R^{2,1}$. Dit is dus een tijdrichting van AdS_2 . Zo ziet men dat AdS_2 dus een lorentziaanse signatuur heeft (precies één tijdrichting).



De 1+1-dimensionale Anti-de Sitter-ruimte, ingebed in een vlakke 1+2-dimensionale ruimte. De t_0 en t_1 assen liggen in het horizontale rotatievlak, de x_1 -as staat hier loodrecht op, verticaal dus.

De Anti-de Sitter-metrick kan ook gedefinieerd worden als het quotiënt van twee orthogonale groepen: $O(2, n - 1)/O(1, n - 1)$. De ruimte heeft de n -dimensionale groep $O(n - 1, 2)$ als isometriegroep. Deze is niet enkelvoudig samenhangend, er zijn dus paden te vinden welke gesloten zijn, maar niet samen te trekken tot een punt. Vanuit fysisch standpunt: er zijn gesloten tijdachtige krommen. Dit is ook te zien op de Bestand: bewegen rondom de 'taille' van de hyperbool is een verplaatsing in de tijd, maar na een omwenteling komt men weer op hetzelfde punt in de tijd terecht. Dit wil zeggen dat de tijd periodisch is: als men op dezelfde plaats blijft, en de tijd laat lopen, komt men na een zekere tijd weer uit op hetzelfde punt in ruimte en tijd. Dat is uiteraard wat problematisch en wordt opgelost door deze identificatie op te heffen. De tijd krijgt dan weer de betekenis van gewone tijd, en is niet meer periodisch. Wiskundig gezien gaat men over naar de universele bedekking (in het Engels: *universal cover*) van de ruimte, welke wél enkelvoudig samenhangend is.

Andere coördinatensystemen en de conforme rand

Er zijn ook andere coördinatensystemen waarmee men de Anti-de Sitter-ruimte kan beschrijven. Men kan bijvoorbeeld coördinaten kiezen waarin de metrick van AdS_4 er uitziet als

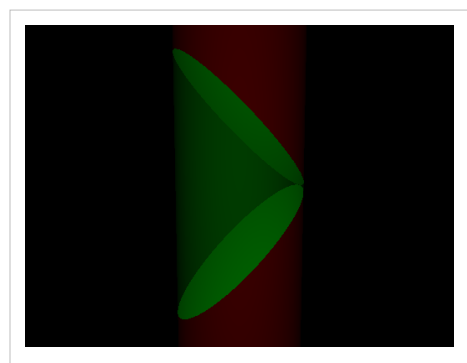
$$ds^2 = - (r^2 k^2 + 1) dt^2 + \frac{1}{k^2 r^2 + 1} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$

waarbij k gerelateerd is aan de Anti-de Sitter lengte L , en $d\Omega^2$ de metrick is van de eenheidssfeer. Lokaal (zeg, bijvoorbeeld, in een kleine regio rond $r \approx 0$) is deze metrick van dezelfde vorm als de vlakke metrick $ds^2 = -dt^2 + dr^2 + r^2 d\Omega^2$. Ook kan men zogeheten Poincaré-coördinaten kiezen, genoemd naar Henri Poincaré, welke slechts een *deel* van de AdS-ruimte bedekken. Met Poincaré-coördinaten kan de metrick bijvoorbeeld in de vorm

$$ds^2 = - \frac{r^2}{L^2} dt^2 + \frac{L^2}{r^2} dr^2 + r^2 d\Omega^2$$

gebracht worden.

Een bijzondere eigenschap van de Anti-de Sitter-metrick is het feit dat de set van punten die op het ruimtelijke oneindig liggen, door lichtstralen bereikt kunnen worden. In andere woorden, men zou een lichtstraal kunnen uitzenden, en deze een eindige tijd later terug zien komen van op oneindig. Dit is natuurlijk een gevolg van de zeer



bijzondere (en deels tegenintuïtieve) eigenschappen van deze ruimte.

Dit feit hangt samen dat de set van punten op oneindig een welbepaalde structuur heeft. De metrick van een ruimte induceert immers een conforme metrick op zijn *rand* (punten op oneindig). Voor Anti-de Sitter blijkt deze rand conform te zijn aan de vlakke Minkowski-ruimte. Op de afbeelding rechts is AdS_3 getekend (een gevulde cilinder, waarvan de verticale richting de tijdrichting is), en ook zijn rand (groen), welke conform is aan de (vlakke) tweedimensionale Minkowski ruimte. Deze eigenschap van AdS-ruimtes is een cruciaal feit voor de zogeheten AdS/CFT-dualiteit.

Referenties en externe links

- (en) Bengtsson, Ingemar: Anti-de Sitter-ruimte: ^[1] Nota's met veel uitleg en verschillende veelgebruikte coördinatenstelsels.
- (en) AdS ^[2] in de Encyclopedie voor Wiskunde (Springer Link)
- (en) Ellis en Hawking: *The large scale structure of space-time*. Cambridge university press (1973). (pagina's 131-134).
- (en) Frances C. ^[3] over de conforme rand van Anti-de Sitter-ruimtes en de AdS/CFT-dualiteit.
- (nl) de Nederlandse Natuurkundige Vereniging ^[4] over Anti-de Sitter en zijn rol in de *Randall-Sundrum*-kosmologische modellen.

Referenties

[1] <http://www.physto.se/~ingemar/Kurs.ps>

[2] <http://eom.springer.de/A/a110620.htm>

[3] <http://mahery.math.u-psud.fr/~frances/ads-cft2.pdf>

[4] <http://www.nnv.nl/NNV/CORE/00/4B/00.HTML>

Causale structuur

In de differentiaalmeetkunde, een deelgebied van de wiskunde, en de relativiteitstheorie beschrijft de **causale structuur** van een Lorentz-variëteit de causale relaties tussen punten in deze variëteit.

Inleiding

In de moderne theoretische natuurkunde (met name de algemene relativiteitstheorie) wordt de ruimtetijd weergegeven als een Lorentz-variëteit. De causale relaties tussen punten in de variëteit worden geïnterpreteerd als een beschrijving van welke gebeurtenissen in de ruimtetijd welke andere gebeurtenissen kunnen beïnvloeden

De Minkowski-ruimtetijd is een relatief eenvoudig voorbeeld van een Lorentz-variëteit. De causale relaties tussen punten in de Minkowski-ruimtetijd zijn van een relatief eenvoudige vorm, aangezien de ruimte er plat is. Zie de causale structuur van de Minkowski-ruimtetijd voor meer informatie.

De causale structuur van een willekeurige (eventueel gekromd) Lorentz-variëteit wordt gecompliceerd door de aanwezigheid van kromming. Discussies over de causale structuur van dergelijke variëteiten moeten worden geformuleerd in termen van gladde krommen die puntenparen met elkaar verbinden. De condities op de raakvectoren van de krommen definiëren dan de causale verbanden.

De Sitter-metrick

De **de Sitter-metrick** of de **Sitter-ruimte** beschrijft op wiskundige manier hoe het universum er uit ziet volgens het de Sitter-model. Meer bepaald, het geeft de metrick van de ruimtetijd met een positieve kosmologische constante. Hoe de metrick van zo een ruimte er uitziet, wordt opgelegd door de algemene relativiteitstheorie, meer bepaald de Einstein-vergelijkingen. De metrick is genoemd naar zijn ontdekker, de Nederlandse natuurkundige Willem de Sitter.

Wiskundige eigenschappen

De de Sitter-metrick wordt genoteerd als dS_n . Hierbij staat n voor het aantal ruimtetijdsdimensies, dat wil dus zeggen $n - 1$ ruimtelijke richtingen en één tijdsrichting. Het de Sitter-model, wat een vereenvoudigd model is voor het universum waarin we leven, benadert ons universum dus door de ruimte dS_4 . Men kan dS_n zien als de Lorentziaanse versie van een n -sfeer. In wiskundige termen is het de maximaal symmetrische, positief gekromde ruimte met Lorentziaanse signatuur.

Definitie

De meest courante definitie van dS_n , is de deelruimte van een $(d + 1)$ -dimensionale Minkowski-ruimte

$$ds^2 = -dx_0^2 + \sum_{i=1}^n dx_i^2,$$

bepaald door de vergelijking

$$-x_0^2 + \sum_{i=1}^n x_i^2 = L^2.$$

Hierin is L een grootte met de eenheid van lengte, de *de Sitter-lengte*. Ruwweg bepaalt deze constante de lengteschaal geassocieerd aan de kromming. Voor een waarnemer in een de Sitter-universum, zou het verschil met een gewone vlakke ruimte *voelbaar* zijn op lengteschalen van de orde van L .

De metrick op de bovenbeschreven deelruimte wordt overgeërfd van de achterliggende Minkowski-metrick. De bovenstaande vergelijking beschrijft een hyperboloïde, uitgestrekt in de tijdsrichting van de Minkowski-ruimte, en heeft dus zelf ook een tijdsrichting. Dat verklaart dus dat dS_n , net als zijn achterliggende ruimte, Lorentz-signatuur heeft. Meer concreet, we kunnen de deelruimte $-x_0^2 + \sum_{i=1}^n x_i^2 = L^2$ beschrijven met de coördinaten (t, y_i) , als volgt:

$$x_0 = L \sinh(t/L)$$

$$x_i = L \cosh(t/L) y_i$$

met $\sum_{i=1}^{n-1} y_i^2 = 1$. Dit toont aan dat dS_n topologisch gegeven is door een tijdsrichting maal een $(n-1)$ -sfeer:

$$\mathbb{R} \times S^{n-1}.$$

Als men de bovenbeschreven relaties in de oorspronkelijke Minkowski-metrick invult, krijgt men expliciet de metrick van de Sitter-metrick:

$$ds^2 = -dt^2 + L^2 \cosh^2(t/L) d\Omega_{n-1}^2.$$

Hierin is $d\Omega_{n-1}^2$ de metrick op de $(n-1)$ -sfeer bepaald door de y_i 's.

Eigenschappen

De isometriegroep van dS_n is de Lorentz-groep $O(1,n)$. De Riemann-tensor is gegeven door

$$R_{\rho\sigma\mu\nu} = \frac{1}{L^2}(g_{\rho\mu}g_{\sigma\nu} - g_{\rho\nu}g_{\sigma\mu})$$

Aangezien de Ricci-tensor een veelvoud is van de metrick,

$$R_{\mu\nu} = \frac{n-1}{L^2}g_{\mu\nu}$$

is dS_n een *Einstein-ruimte*, en dus een oplossing van de Einstein-vergelijkingen met een kosmologische constante Λ :

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 0$$

met $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu}$ de Einstein-tensor en g de metrick. Bijgevolg is de overeenkomstige kosmologische constante gegeven door

$$\Lambda = \frac{(n-1)(n-2)}{2L^2}.$$

The scalaire kromming van de ruimte is

$$R = \frac{n(n-1)}{L^2} = \frac{2n}{n-2}\Lambda.$$

Beiden zijn inderdaad positief.

Statische coördinaten

De kunnen de Sitter-ruimte ook uitrusten met statische coördinaten (t, r, \dots) , met de volgende coördinaatovergang:

$$x_0 = \sqrt{L^2 - r^2} \sinh(t/L)$$

$$x_1 = \sqrt{L^2 - r^2} \cosh(t/L)$$

$$x_i = rz_i \quad 2 \leq i \leq n.$$

met z_i coördinaten op een $(n-2)$ -sfeer. In deze coördinaten krijgt de Sitter-metrick de vorm:

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{r^2}{L^2}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{r^2}{L^2}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega_{n-2}^2.$$

In deze vorm ziet men goed dat voor $L \rightarrow \infty$ (wat fysisch overeenkomt met een limiet waarin de kromming nul wordt) inderdaad de metrick lokaal die van de gewone (vlakke) Minkowski-ruimte aanneemt.

Opmerkingen

Dit artikel gebruikt zogeheten *mostly-plus* conventies. Dat wil zeggen dat de tijdscoördinaat in de metrick een negatief teken heeft, en ook de plaats van de kosmologische term in de Einstein-vergelijking is hiervan afhankelijk. (voor *mostly-plus* conventies staat deze term links, aan de kant van de Einstein-tensor.)

Referenties

- Het Engelstalige artikel ^[1]

Referenties

[1] http://en.wikipedia.org/wiki/De_Sitter_space

Einstein-vergelijking

Algemene relativiteitstheorie
$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$
(de Einstein-vergelijking)
Achtergrond
Speciale relativiteit Equivalentieprincipe · Wereldlijn Coördinaat-onafhankelijkheid Wiskundige achtergrond: tensoren
Vergelijkingen
Einstein-vergelijking Friedmann-vergelijking ADM-formalisme
Oplossingen
Schwarzschildmetriek Reissner-Nordströmmetriek Kerrmetriek
Experimentele verificatie
Gravitationeel lenseffect Zwarte gaten Perihelium-precessie
Gevorderde onderwerpen
Kaluza-Klein-theorie Kwantumgravitatie
Wetenschappers
Einstein · Minkowski · Eddington Lemaître · Schwarzschild Friedmann · Chandrasekhar Hawking

De **Einstein-vergelijking** of uitgebreider **Einstein-vergelijkingen** vatten de algemene relativiteitstheorie van Einstein samen. Net zoals Newton zijn zwaartekrachtstheorie samenvatte in één formule, de Gravitatiewet van Newton, zijn de Einstein-vergelijkingen een wiskundige uitdrukking van Einsteins gehele relativiteitstheorie.

Achtergrond

Hoewel de gravitatiewet van Newton eenvoudig is, en voor de meeste praktische doeleinden nauwkeurig genoeg, geven de Einstein-vergelijkingen een meer precieze beschrijving van zwaartekracht. In extreme situaties (bijvoorbeeld de gravitatie rond zeer massieve objecten zoals zwarte gaten, of voor precisieberekeningen van satelliet- en planeetbanen in ons zonnestelsel) geeft de wet van Newton niet meer het juiste antwoord, en komen de observaties veel beter overeen met de resultaten die men krijgt met de Einstein-vergelijkingen. De relativiteitstheorie geeft dus een betere en meer precieze beschrijving van zwaartekracht dan de theorie van Newton. Het is omdat de laatste veel eenvoudiger is, en in de meeste 'normale' situaties het juiste antwoord geeft, dat deze nog steeds veel gebruikt wordt. Voor dat soort situaties geven de gravitatiewetten van Einstein en van Newton ongeveer dezelfde voorspellingen, met als verschil dat de wet van Newton veel gemakkelijker rekenwerk vraagt.

De vergelijking

De Einstein-vergelijking luidt:

$$R_{ab} - \frac{1}{2}g_{ab}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ab}$$

hierbij is:

- R_{ab} de Ricci-tensor
- g_{ab} de metrische tensor
- R de scalaire kromming
- T_{ab} de energie-momentum-tensor (momentum = impuls)
- c de lichtsnelheid, en G de gravitatieconstante.

De objecten links en rechts zijn tensoren. De indices a en b kunnen dus allebei de waarden 1 tot en met 4 aannemen. Dat wil zeggen dat de bovenstaande vergelijking eigenlijk verschillende vergelijkingen op een bondige manier samenvat in één formule. (Net zoals een matrixvergelijking een heel lineair stelsel op eenvoudige manier uitdrukt.)

Hoewel relativiteitstheorie een moeilijke theorie is, heeft deze vergelijking eigenlijk een eenvoudige interpretatie. De grootte die rechts staat, T , is de energie-momentum-tensor, en is een object dat ruwweg zegt hoeveel massa en energie er op een bepaalde plaats in de ruimte is. Het object links wordt ook wel genoteerd als volgt:

$$G_{ab} = R_{ab} - \frac{1}{2}g_{ab}R$$

en noemt men de Einstein-tensor. Dit zegt hoezeer de ruimte gekromd is. De Einstein-vergelijkingen zeggen dus eigenlijk: kromming = materie. Dit betekent het volgende. Als ergens op een bepaalde plaats in de ruimte een zwaar object staat (bijvoorbeeld een ster, zoals onze zon), zit op die plaats veel massa en energie. De Einstein-vergelijking zegt dan dat op die plaats (en in de nabijheid ervan) de kromming ook groot moet zijn. Die kromming zorgt ervoor dat de baan van objecten (zoals bijvoorbeeld de Aarde) niet meer rechtdoor is, maar wordt afgebogen. (Net zoals een knikker op een kromme tafel een afgebogen pad vormt.) De vergelijking zegt dus eigenlijk dat materie de intrinsieke geometrie van de ruimtetijd verandert, en daardoor indirect de baan van objecten beïnvloedt.

Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-metrick

De **Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-metrick** (FLRW) is een exacte oplossing van Einstein-vergelijkingen van de algemene relativiteitstheorie; het beschrijft een enkelvoudig samenhangende, homogeen, isotropisch uitdijend of inkrimpend heelal.

Gravitationele tijdsdilatactie

Gravitationele tijdsdilatactie is de vertraging van de tijd in een zwaartekrachtsveld. Het is een gevolg van de algemene relativiteitstheorie.

Verklaring

Volgens de algemene relativiteitstheorie is zwaartekracht eigenlijk de kromming van de vierdimensionale ruimtetijd. Je zou dit in drie dimensies kunnen voorstellen als een bol die in een te kleine ruimte zit. De ruimte om hem heen kromt, en alle punten komen dichterbij elkaar. Dat effect is het sterkst merkbaar dichtbij de bol. In deze voorstelling is het alleen de ruimte die kromt, maar in het echt is het de ruimtetijd die kromt. Dus ook de 'tijdpunten' komen dichterbij elkaar te liggen. Die punten definiëren de tijd-eenheden. Daardoor duurt het langer om een reis te maken naar zo'n voorwerp, en dus verloopt de tijd er trager.

Formule voor tijdsdilatactie

Als een voorwerp, dat geplaatst is in een (uniform) zwaartekrachtsveld met valversnelling g , h meter 'lager' staat dan een ander voorwerp, verloopt de tijd daar een factor $(1+gh/c^2)$ trager.

Kerrmetriek

Algemene relativiteitstheorie
$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$
(de Einstein-vergelijking)
Achtergrond
Speciale relativiteit Equivalentieprincipe · Wereldlijn Coördinaat-onafhankelijkheid Wiskundige achtergrond: tensoren
Vergelijkingen
Einstein-vergelijking Friedmann-vergelijking ADM-formalisme
Oplossingen
Schwarzschildmetriek Reissner-Nordströmmetriek Kerrmetriek
Experimentele verificatie
Gravitationeel lenseffect Zwarte gaten Perihelium-precessie
Gevorderde onderwerpen
Kaluza-Klein-theorie Kwantumgravitatie
Wetenschappers
Einstein · Minkowski · Eddington Lemaître · Schwarzschild Friedmann · Chandrasekhar Hawking

Kerr-metriek (of **Kerr-oplossing**) is een exacte, asymptotisch vlakke, roterende oplossing van de Einstein-vergelijkingen. Zij beschrijft hoe een roterend zwart gat eruit zou zien volgens de algemene relativiteitstheorie. Omdat een zwart gat gevormd wordt bij de ineenstorting van materie (zoals een ster op het einde van de kernfusie-fase) naar een zeer compacte ruimte, voorspelt het behoud van impulsmoment dat het eindproduct een grote rotatiesnelheid moet hebben. Men verwacht bijgevolg dat de meeste zwarte gaten in ons heelal sterk

roteren, en dus van het Kerr-type zijn. Vanuit theoretisch standpunt zijn deze objecten (net als alle andere types van zwarte gaten) zeer interessant, en zijn het onderwerp van intense studie binnen het domein van de theoretische fysica. De oplossing is genoemd naar de wiskundige Roy Kerr, die deze oplossing in 1963 ontdekte.^[1]

Metriek

De metriek van een roterend zwart gat is (in zogeheten Boyer-Lindquistcoördinaten en -eenheden waarvoor de gravitatieconstante G en de lichtsnelheid c waarde één hebben) gegeven door:

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2Mr}{\rho^2} \right) dt^2 - \frac{4aMr \sin^2 \theta}{\rho^2} dt d\phi + \frac{\rho^2}{\Delta} dr^2 + \rho^2 d\theta^2 + \left(r^2 + a^2 + \frac{2a^2 Mr \sin^2 \theta}{\rho^2} \right) \sin^2 \theta d\phi^2$$

Met:

$$\Delta \equiv r^2 - 2Mr + a^2,$$

$$\rho^2 \equiv r^2 + a^2 \cos^2 \theta,$$

$$a \equiv J/M.$$

Verder is $t \in \mathbb{R}$ de tijd, $r \in \mathbb{R}^+$ de radiële richting, en zijn $\theta \in [0, \pi]$ en $\phi \in [0, 2\pi]$ bolcoördinaten op de sfeer.

De parameters M en J komen overeen met de massa en het impulsmoment van het zwart gat.

Eigenschappen

Net als alle zwarte gaten, hebben roterende zwarte gaten een waarnemingshorizon. Een voorwerp dat te dicht bij het zwart gat komt, en daarbij de waarnemingshorizon overschrijdt, verdwijnt onherroepelijk. Voor de Kerr-oplossing is de horizon gelegen op de sfeer $r = r_h$, met

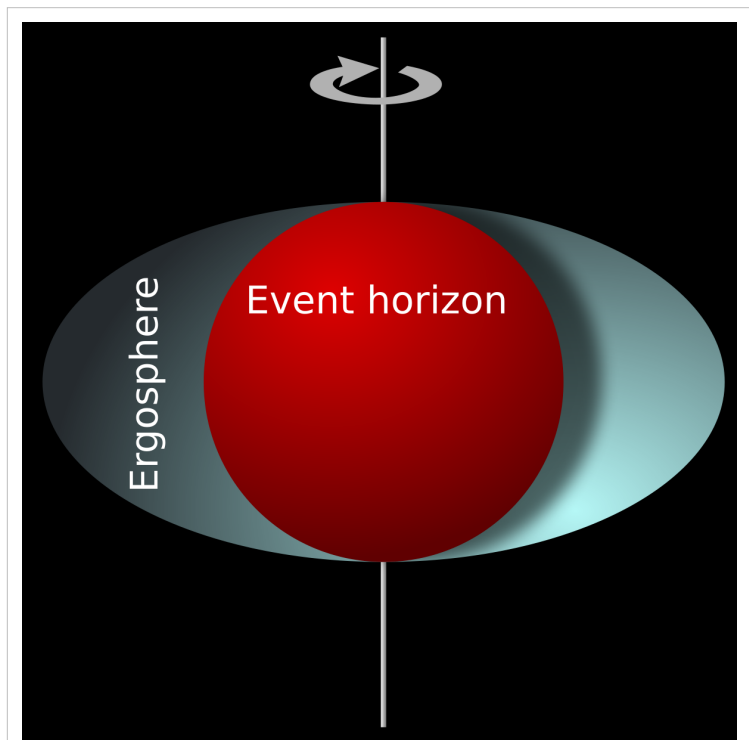
$$r_h = M^2 + \sqrt{M^2 - J^2},$$

wederom in eenheden met $G = C = 1$. Voor $J = 0$, herleidt de bovenstaande uitdrukking tot de Schwarzschildstraal

Daarnaast heeft het roterende zwart gat ook een speciale regio, de ergosfeer. Deze wordt begrensd door het oppervlak

$$r_h = M^2 + \sqrt{M^2 - (J \cos \theta)^2}$$

Binnen deze regio moeten een deeltje/object noodzakelijk de rotatie van het zwart gat volgen. Dit proces draagt dus rotatie-energie van het zwart gat over naar kinetische energie van het deeltje. Dit noemt men het Penrose-proces en laat toe rotatie-energie aan het zwart gat te onttrekken. Indien dit ooit technisch haalbaar zou zijn, zou men grote hoeveelheden energie kunnen extraheren uit roterende zwarte gaten.



Schematische weergave van een roterend zwart gat. De binnenste (rode) sfeer is de waarnemingshorizon ("event horizon"). Hierrond bevindt zich een afgeplatte ellipsoïde: de ergosfeer ("ergosphere"). De begrensende oppervlakken raken elkaar aan de polen. De rotatieas ligt hier verticaal.

Bronnen


- [1] Discovering the Kerr and Kerr-Schild metrics (<http://www.arxiv.org/abs/0706.1109>). In *"The Kerr Spacetime"*, Eds D.L. Wiltshire, M. Visser and S.M. Scott, Cambridge Univ. Press. Roy P. Kerr.
- Kerr, R. P. (1963). *Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics*. *Phys. Rev. Lett.* **11**: 237. DOI: 10.1103/PhysRevLett.11.237 (<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.11.237>).
 - Kerr, R. P.; & Schild, A. (1965). *Some algebraically degenerate solutions of Einstein's gravitational field equations*. *Proc. Symp. Appl. Math.* **17**: 119.

Metrische uitdijing van de ruimte

De **metrische uitdijing van het heelal** is een sleuteldeel van het huidige beeld van de wetenschap van het heelal, waarin ruimte-tijd zelf beschreven wordt door een Metrische tensor die door de tijd heen zo verandert dat de ruimtelijke dimensies groeien of uitrekken als het heelal groter wordt. Het verklaart hoe het heelal uitdijt in het Big Bang model.

Externe links

- [\(en\) Antwoord op een vraag over het uidijende universum](#) ^[1]
- [\(en\) Het uitbreidende universum](#) ^[2]
- [\(en\) Het WMAP team van de NASA biedt een elementaire uitleg over de ruimtelijke uitdijing Verklaring](#) ^[3]

<p><small>Geplaatst op:</small> 18-03-2011</p>	<p>Dit artikel is een beginnetje over astronomie. U wordt uitgenodigd op uitdijing van de ruimte bewerken ^[4] te klikken om uw kennis aan dit artikel toe te voegen.</p>	
--	--	---

Referenties

- [1] <http://www.newton.dep.anl.gov/askasci/phy00/phy00812.htm>
- [2] <http://www.ncsu.edu/felder-public/kenny/papers/cosmo.html>
- [3] http://map.gsfc.nasa.gov/m_uni/uni_101bbtest1.html
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki:Metrische>

Naakte singulariteit

Een **naakte singulariteit** is in de kosmologie de benaming voor een hypothetische gravitationele singulariteit, waarbij een zware ster die zich onder invloed van zijn eigen zwaartekracht samentrekt en tot een heel klein punt met een oneindig grote dichtheid verwordt, dat alles wat zich in de buurt bevindt aantrekt en vervolgens weer kan uitwerpen.

Verskil met een zwart gat

Het belangrijkste verschil met een zwart gat is dat bij dat laatste niets dat eenmaal is aangezogen weer kan ontsnappen, inclusief licht. Hierdoor kun je het zwarte gat zelf dus ook niet zien, vanwege de waarnemingshorizon. Hooguit is de hawkingstraling waarneembaar. Een naakte singulariteit heeft daarentegen geen waarnemingshorizon en zou dus nog wel gewoon zichtbaar moeten zijn, aangezien datgene wat aanvankelijk door de zwaartekracht werd aangetrokken - dat wil zeggen, licht en andere materiaal -, ook weer gewoon wordt teruggegeven.

Zoektocht naar naakte singulariteiten

Het bestaan van naakte singulariteiten werd aannemelijk gemaakt in de jaren zeventig van de twintigste eeuw. De Duitse natuurkundige Hans Jürgen Scheifert ontdekte samen met een paar collega's door middel van experimenten dat verschillende lagen samenvallend materiaal op bepaalde momenten singulariteiten vormden die zichtbaar bleven. De dichtheid werd wel oneindig groot, maar de zwaartekracht niet. Hierdoor verdween het aangetrokken materiaal niet in één punt, zoals bij zwarte gaten.

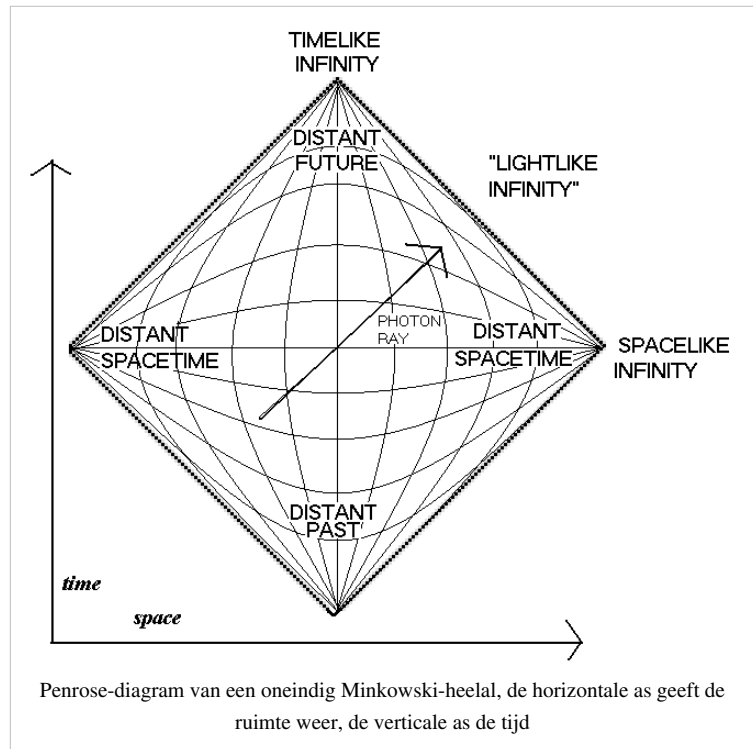
Ontstaan van naakte singulariteiten

Naakte singulariteiten ontstaan vermoedelijk doordat in het binnenste van een zich aan het eind van zijn leven samentrekkende ster voldoende gasdruk aanwezig is die de zeer sterk wordende zwaartekracht enigszins tegenwerkt, zodat de ster uiteindelijk niet tot een zwart gat verwordt maar eerder de vorm van een langwerpige spoel heeft met aan de uiteinden - waar de dichtheid het grootst is - twee singulariteiten. Dit komt doordat de ster aanvankelijk aan weerszijden van zijn as samentrekt.

Penrose-diagram

In theoretische natuurkunde is een **Penrose-diagram** (genoemd naar de Britse wis- en natuurkundige Roger Penrose) een twee-dimensionaal diagram dat de causale relaties legt tussen verschillende punten in de ruimtetijd. Het is een uitbreiding van een Minkowski-diagram, waar de verticale dimensie de tijd weergeeft en de horizontale dimensie de ruimte weergeeft. Schuine lijnen met een hoek van 45° komen met lichtstralen overeen.

Het grootste verschil is dat de metriek van een Penrose-diagram lokaal hoekgetrouw equivalent is aan de werkelijke metriek in de ruimtetijd. De hoekgetrouwe factor wordt zodanig gekozen dat de gehele oneindige ruimtetijd wordt getransformeerd in en op een Penrose diagram van eindige grootte. Voor sfeersymmetrische ruimtetijden correspondeert elk punt in het diagram met een 2-sfeer.



Scalaire kromming

In de differentiaalmeetkunde, en relativiteitstheorie, verwijst de term **scalaire kromming** naar de kromming van een Riemannse variëteit. Het is een scalaire functie, die aangeeft in welke mate een oppervlak verschilt van de vlakke ruimte. De scalaire kromming zegt wel minder over een variëteit dan de Ricci-kromming: het kan immers dat een niet-triviaal oppervlak scalaire kromming gelijk aan nul heeft, omdat het oppervlak in bepaalde richtingen positief gekromd is, en in andere richtingen negatief, zodat de totale kromming nul is. In zo een geval is de Ricci-kromming *niet* nul. Enkel in twee dimensies geeft de scalaire kromming evenveel informatie als de Ricci-kromming. In de algemene relativiteitstheorie is de kromming van een ruimte (op plaatsen waar er geen materie is) gerelateerd aan de kosmologische constante. Aangezien deze verschilt van nul, heeft ons universum een (positieve) kromming. In eerste benadering (als men de materie in ons heelal zou uitsmeren) is ons universum dus een homogene, isotrope, positief gekromde ruimte, welke beschreven kan worden met een de Sitter-metrick.

Definitie

Gegeven een Riemann-variëteit, met metrick g en Ricci-tensor

$$\text{Ric} = R_{ij} dx^i \otimes dx^j.$$

Men definieert dan de scalaire kromming R als het spoor van de Ricci-tensor:

$$R = \text{tr}_g \text{Ric}.$$

Deze definitie geldt ongeacht de signatuur van de ruimte, en is dus ook geldig voor ruimtes met Lorentz-signatuur, die het centrale object in de relativiteitstheorie zijn. Als men de Einstein-sommatieconventie gebruikt, kan men dit ook schrijven als

$$R = g^{ij} R_{ij}$$

Men kan dit zien als het omhoog halen van een covariante index, en vervolgens het nemen van het spoor van de bekomen tensor, om zo een scalar te bekomen. (Van een rank-(2,0) tensor, naar een rank-(1,1) tensor naar een scalar)

Men kan de kromming ook rechtstreeks uitdrukken in termen van de Christoffel-symbolen Γ_{bc}^a :

$$R = g^{ab} (\Gamma_{ab,c}^c - \Gamma_{ac,b}^c + \Gamma_{ab}^d \Gamma_{cd}^c - \Gamma_{ac}^d \Gamma_{bd}^c)$$

In tegenstelling tot de Riemann-kromming en de Ricci-kromming, kan de scalaire kromming alleen voor een Riemannse variëteit gedefinieerd worden, aangezien deze steunt op de expliciete vorm van de metrick.

Toepassingen en geometrische betekenis

- De scalaire kromming komt voor in de definitie van de Einstein-tensor, en bijgevolg ook in het linkerlid van de Einstein-vergelijkingen. Het is dus een belangrijk begrip in de algemene relativiteitstheorie.
- In twee dimensies, is de scalaire kromming het dubbel van de Gaussiaanse kromming.

Dit laatste suggereert dat de scalaire kromming een eenvoudige meetkundige betekenis heeft. Inderdaad, indien een ruimte positief gekromd is, is het volume van een bal kleiner dan een bal met dezelfde straal in de Euclidische ruimte. Als een ruimte daarentegen negatief gekromd is, heeft een bal relatief een groter volume dan in het Euclidische geval.

Er zijn veel voorbeelden van ruimtes met een constante kromming. (Wat een minder strikte eis is dan het opleggen van een constante Ricci-kromming.) Voor ruimtes met Euclidische signatuur zijn dit onder andere de sfeer, de vlakke- en de hyperbolische ruimte. In een ruimte met Lorentziaanse signatuur, zijn ook de Minkowski-metrick, de de Sitter-metrick en de Anti-de Sitter-metrick ruimtes met een constante kromming. In de laatste twee gevallen is de scalaire kromming constant, maar de Ricci-kromming niet.

Susskind-Hawking battle

De **Susskind-Hawking battle**, ook wel **The Black Hole War** genoemd, is het debat tussen Leonard Susskind en Stephen Hawking over de vraag of informatie die in een zwart gat valt voor altijd is verdwenen of in de een of andere vorm blijft bestaan, zelfs als het zwarte gat na miljarden jaren verdampt is.

De strijd begon in 1981 tijdens een bijeenkomst in San Francisco van vooraanstaande theoretische fysici. Naast Susskind waren ook Gerard 't Hooft, Stephen Hawking en een aantal andere grote wetenschappers aanwezig. De bijeenkomst was belegd om enkele fundamentele eigenschappen van elementaire deeltjes te ontrafelen. Bij die gelegenheid stelde Stephen Hawking dat de informatie van een deeltje dat door een zwart gat wordt opgeslokt voor altijd verloren is als het zwarte gat verdampt.

Susskind is het daar niet mee eens, omdat het indruist tegen een zeer fundamenteel principe: behoud van informatie. Informatie kan veranderen, vervormd worden of in kleine bits uiteenvallen, maar kan nooit verdwijnen. In zijn boek *The Black Hole War*^[1] doet Susskind verslag van het debat dat meer dan 20 jaar duurt en dat uiteindelijk door Susskind wordt gewonnen.

Als informatie zou verdwijnen zou dit vergaande consequenties hebben: dit zou betekenen dat de kwantummechanica geen recht van bestaan meer had. De stelling van Hawking is een paradox: of de kwantummechanica of de relativiteitstheorie is onjuist. Tijdens de bijeenkomst in San Francisco kreeg Susskind weinig bijval, alleen 't Hooft was het met hem eens.

Begrippen

In *The Black Hole War* komen diverse fundamentele begrippen uit de relativiteitstheorie en de kwantummechanica aan de orde zoals bijvoorbeeld:

- het Equivalentieprincipe: dat zwaartekracht hetzelfde is als versnelling, het centrale thema in de algemene relativiteitstheorie.
- De Bekenstein-Hawking straling. Het verschijnsel dat de temperatuur van een zwart gat omgekeerd evenredig is aan zijn massa^[2]. Normale zwarte gaten hebben een temperatuur van 10^{-8} K, de massa van de zwarte gaten in de centra van melkwegstelsels is een miljard keer groter en deze hebben een temperatuur van 10^{-17} K, oftewel een miljard keer lager. Zwarte gaten ter grootte van de maan hebben een temperatuur van 1 K en die ter grootte van de planckmassa (10^{-8} kg) hebben een temperatuur van 10^{32} K. Dus gigantisch heet! Omdat zwarte gaten temperatuur hebben geven ze warmtestraling af en verdampen ze.
- D-Branen een oppervlakte in de ruimte waar strings aan vast kunnen zitten. Hiermee kunnen gluonen, die quarks met elkaar verbinden beschreven worden.
- Anti De Sitter ruimte (ADS). Dit is een ruimte-tijd continuüm dat negatief is gekromd: de som van de hoeken van een driehoek zijn kleiner dan 180 graden.
- Het holografisch principe. Dit principe stelt dat alle informatie in een ruimte vastligt in de grens van die ruimte.
- Eigenschappen van zwarte gaten en wat er gebeurt als iets de waarnemingshorizon van een zwart gat passeert.

Dat laatste is de opmaat van de eerste stap in zijn betoog: wat gebeurt er bij het passeren van de waarnemingshorizon van een zwart gat? "Dat hangt af van de positie van de waarnemer", stelt Susskind. Of je bent ver buiten het zwarte gat en dan zie je de astronaut in een vuurzee die horizon passeren of je bent de astronaut zelf, die de waarnemingshorizon probleemloos passeert op weg naar de singulariteit, het middelpunt van het zwarte gat. Hij illustreert dit aan de hand van een sprookje dat ruim 8 miljard jaar in de toekomst speelt. Daarin wordt ene Steve, die niet in de anti-zwaartekrachtpillen van de koning gelooft, veroordeeld tot een reis naar het binnenste van een zwart gat. De koning en zijn onderdanen zien Steve aan de waarnemingshorizon in de hitte ten onder gaan. Steve zelf merkt er weinig van en passeert ongehinderd het punt vanwaar niemand kan terugkeren.

Black Hole Complementariteit

Afhankelijk van de waarnemingspositie kan de gebeurtenis dus verschillend worden beschreven: de astronaut die de waarnemingshorizon passeert merkt weinig, de buitenstaander ziet dat heftige processen plaatsvinden en zeer hoge temperaturen ontstaan. Susskind noemt dit verschil in beschrijven van de gebeurtenis de Black Hole Complementariteit. Het begrip complementariteit speelt ook bij Niels Bohr en bij het onzekerheidsprincipe van Werner Heisenberg een belangrijke rol. Bij het onzekerheidsprincipe van Heisenberg kun je òf de snelheid van een deeltje meten, òf zijn positie, maar niet beide. Ook licht kun je beschouwen als een golfverschijnsel òf als een verzameling van deeltjes, maar niet allebei tegelijkertijd. Het is of het een of het ander, maar niet beide tegelijkertijd.

Holografisch Principe

Naast Black Hole Complementariteit introduceert Susskind het begrip Holografisch Principe, om te beschrijven waar de informatie in het zwarte gat zich bevindt en hoe deze is opgeslagen. Hij komt op dit idee tijdens een bezoek aan 't Hooft in Utrecht. De rand van het zwarte gat kan mathematisch beschreven worden als een hologram, waar alle informatie van dat zwarte gat in is opgeslagen. Behalve zwarte gaten, kan zelfs de rand van het hele universum als hologram worden opgevat. De hoeveelheid informatie die het kan bevatten is één bit per Planck oppervlakte (een Planck eenheid is 10^{-35} m.).

Voortbordurend op een artikel van 't Hooft ^[3] schrijft Susskind een artikel onder de titel "The World as a Hologram"^[4], waarin hij de mathematische grondslagen van zijn idee uiteenzet.

In de jaren 90 lukte het Cumrun Vafa om met behulp van de wiskunde van de snaartheorie een model te construeren om een zwart gat te beschrijven, waarin de informatie niet verdwijnt, maar aan de waarnemingshorizon blijft bestaan. Daarbij wordt gebruikgemaakt van begrippen als D-Branes en de Anti De Sitter (ADS) ruimte. De beschrijving van een zwart gat met behulp van een Anti De Sitter ruimte geeft een beschrijving van een zwart gat met één uitzondering: het zwarte gat verdampt niet. De fotonen aan de waarnemingshorizon vallen terug naar het zwarte gat, waardoor dit soort zwart gat niet verdampt.

Ontknoping

De ontknoping van het debat begint met een artikel^[5] van Juan Maldacena. Hij beschrijft hierin, met behulp van D-branen en strings de werking van gluonen. Het opmerkelijke is dat hij deze fysische verschijnselen beschrijft in een 4+1 dimensionale Anti De Sitter ruimte (4 ruimtelijke plus 1 tijdsdimensie). Terwijl de gewone kwantummechanica (kwantumchromodynamica) ze in een 3 dimensionale ruimte beschrijft zonder zwaartekracht. Het op twee manieren beschrijven van dezelfde fysische verschijnselen wordt in de natuurkunde dualiteit genoemd. Zoals bijvoorbeeld het feit dat licht als golfverschijnsel of als fotonen kan worden beschreven. Het bijzondere aan het artikel van Maldacena is dat dezelfde verschijnselen in een verschillend aantal dimensies beschreven kunnen worden.

Een paar maanden na het verschijnen van het artikel van Maldacena volgt een artikel van Edward Witten onder de titel "Anti De Sitter Space and Holography"^[6]. Hierin wordt een zwart gat in tweedimensionale wiskundige termen beschreven als de grens van een drie dimensionale ADS. De inhoud, en dus de informatie, van deze ruimte kan beschreven worden als een hologram aan de rand van die ruimte. Een zwart gat komt in feite neer op een hete soep van elementaire deeltjes, voornamelijk gluonen.

Met het verschijnen van deze artikelen kwam na ruim twintig jaar een eind aan de Black Hole War. Susskind schrijft in zijn boek dat Maldacena en Witten zonder enige spoor van twijfel aantonen dat informatie achter de waarnemingshorizon nooit verloren gaat.

In 2005 verscheen een artikel van Hawking waarin hij stelde dat informatie die in een zwart gat terecht kwam, niet verdween als het zwarte gat was verdampt.^[7]

Externe links

- Interview met Susskind in LA Times ^[8]
- Lezing Susskind op Fora TV, over de Black Hole War ^[9]

Bronnen, noten en/of referenties

Tensoren in de algemene relativiteitstheorie

Algemene relativiteitstheorie
$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$
(de Einstein-vergelijking)
Achtergrond
Speciale relativiteit Equivalentieprincipe · Wereldlijn Coördinaat-onafhankelijkheid Wiskundige achtergrond: tensoren
Vergelijkingen
Einstein-vergelijking Friedmann-vergelijking ADM-formalisme
Oplossingen
Schwarzschildmetriek Reissner-Nordströmmetriek Kerrmetriek
Experimentele verificatie
Gravitationeel lenseffect Zwarte gaten Perihelium-precessie
Gevorderde onderwerpen
Kaluza-Klein-theorie Kwantumgravitatie
Wetenschappers
Einstein · Minkowski · Eddington Lemaître · Schwarzschild Friedmann · Chandrasekhar Hawking

Tensoren zijn de centrale objecten in de algemene relativiteitstheorie. De wiskundige definitie van het begrip tensor is uiteraard belangrijk, maar niet strikt nodig voor het concrete gebruik in de relativiteitstheorie. Dit artikel beschrijft dus de meer natuurkundige (minder exacte) benadering van het begrip.

Algemene relativiteitstheorie

Het doel van de algemene relativiteitstheorie is gravitatie te beschrijven op een manier die niet afhangt van het gekozen assenstelsel. Meer precies: deze theorie is diffeomorfisme-invariant: de dynamica verandert niet indien men nieuwe coördinaten kiest. Deze eis legt eigenlijk al heel veel beperkingen op aan de theorie. Elk object dat men wil beschrijven moet immers op een gezonde manier transformeren indien men overgaat naar een nieuw coördinatensysteem. Het is precies die eigenschap die **tensoren** speciaal maakt. De grootheden die optreden in de basisvergelijking van de relativiteitstheorie (de Einstein-vergelijking) zijn allemaal tensoren. Dit garandeert dus vanzelf dat de dynamica die volgt uit de vergelijking niet afhangt van het assenstelsel waarin men werkt.

Tensoren

Laten we nu meer precies maken wat een tensor is. De meest elementaire tensoren zijn viervectoren. Dit zijn objecten met vier componenten. Stel dat men zo een vector A^μ heeft, waar μ dus van nul tot drie gaat $A^\mu = (A^0, A^1, A^2, A^3)$. Gegeven dat men de vier componenten kent in een bepaald assenstelsel met coördinaten x^μ , hoe ziet hetzelfde object A er dan uit in een ander stelsel met nieuwe coördinaten x'^ν (x^μ)?

Indien A transformeert als

$$A'^\mu = \sum_{\nu=0}^3 \frac{dx'^\mu(x^\nu)}{dx^\nu} A^\nu$$

zeggen we dat A een *contravariante* vector is. Het linkerlid in bovenstaande vergelijking stelt de componenten van A voor, zoals waargenomen in het x'^μ -assenstelsel. Met de Einstein-sommatieconventie kunnen we bovenstaande vergelijking bondiger schrijven als

$$A'^\mu = \frac{dx'^\mu}{dx^\nu} A^\nu.$$

Er bestaan ook *covariante* tensoren. Deze worden met een lage index (zoals bvb A_μ) genoteerd, en transformeren als

$$A'_\mu = \frac{dx^\nu}{dx'^\mu} A_\nu.$$

Men kan ook tensoren maken met meerdere indices. Een tensor $T^{\mu\nu}$ met twee indices kan men bijvoorbeeld voorstellen als een matrix, waarvan één index de rijen, en de andere de kolommen labelt. Een tensor met meer dan twee indices is dus een soort veralgemening van een matrix: een set getallen welke geordend zijn op basis van verscheidene indices. De transformatie-regels van een algemene tensor is als volgt. Elke index is of co- of contravariant, en transformeert dus op één van de twee bovenstaande manieren. Neem bijvoorbeeld een tensor met n covariante en m contravariante indices: $T_{a_1, \dots, a_n}^{b_1, \dots, b_m}$. Indien men overgaat naar een ander assenstelsel, transformeert deze tensor als volgt:

$$T'_{c_1, \dots, c_n}{}^{d_1, \dots, d_m} = \frac{dx^{a_1}}{dx'^{c_1}} \dots \frac{dx^{a_n}}{dx'^{c_n}} \dots \frac{dx^{b_1}}{dx'^{d_1}} \frac{dx^{b_m}}{dx'^{d_m}} T_{a_1, \dots, a_n}{}^{b_1, \dots, b_m}$$

Bewerkingen met indices

Een belangrijke tensor in relativiteitstheorie is de metriek $g_{\mu\nu}$. Deze heeft twee covariante indices, de definieert een notie van afstand, net zoals de Minkowski-metriek in speciale relativiteitstheorie:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu.$$

Er is ook een contravariante versie van de metriek: $g^{\mu\nu}$, welke gedefinieerd is als de inverse van de metriek, indien men deze beschouwt als matrix. Meer precies:

$$g^{\mu\nu} g_{\nu\alpha} = \delta_\alpha^\mu$$

Hierin is het matrixproduct impliciet verwezenlijkt door de sommatie over ν , en het rechterlid is de eenheidsmatrix, vermomd als kroneckerdelta

Deze twee versies van de metriek laten toe een covariante vector om te zetten naar een contravariante, en andersom. Voor een contravariante vector A^ν is zijn covariante versie A_μ gedefinieerd als volgt:

$$A_\mu = g_{\mu\nu} A^\nu$$

Indien men de metriek als matrix beschouwt, kan men het rechterlid van deze vergelijking zien als het loslaten van een matrix op een kolomvector. Geheel analoog kan men van een covariante vector B_ν zijn contravariante wederhelft B^μ construeren, als volgt:

$$B^\mu = g^{\mu\nu} B_\nu$$

Voor tensoren met meer dan een index kan men precies hetzelfde doen: elke index kan omhoog/omlaag gebracht worden met behulp van de gepaste versie van de metriek. We kunnen bijvoorbeeld van de tensor T hoger omzetten naar een object met $n + 1$ covariante en $m - 1$ contravariante indices, als volgt:

$$T_{a_1, \dots, a_n, a_{n+1}}^{b_1, \dots, b_m} = g_{a_{n+1} b_1} T_{a_1, \dots, a_n}^{b_1, \dots, b_m}$$

Een andere veel gebruikte bewerking op tensoren is de zogeheten contractie. Dit wil zeggen dat men bij een tensor het spoor neemt ten opzichte van een co- en een contravariante index. Concreet sommeert men over de diagonale componenten van twee indices:

$$\tilde{T}_{a_1, \dots, a_{n-1}}^{b_1, \dots, b_m} = T_{a_1, \dots, a_{n-1}, \nu}^{\nu, b_1, \dots, b_m}$$

In het rechterlid is (wederom) sommatie over ν verondersteld. Men kan nagaan dat deze bewerking wel degelijk een tensor (\tilde{T}) oplevert, zij het dan met twee indices minder. Buiten de drie bovenstaande voorbeelden, zijn er nog bewerkingen die men kan uitvoeren om nieuwe tensoren te bouwen uit anderen. Het is eenvoudig om de volgende eigenschappen na te gaan:

- Het product van twee tensoren is weer een tensor.
- De som van twee tensoren van hetzelfde type is weer een tensor.
- Een veelvoud van een tensor is weer een tensor.
- Het symmetrische deel van een tensor is weer een tensor.
- Het antisymmetrische deel van een tensor is weer een tensor.

Afgeleide

Ook de afgeleide-operator is een tensor. Inderdaad, omdat

$$\frac{\partial}{\partial x'^\mu} = \frac{\partial x'^\nu}{\partial x^\mu} \frac{\partial}{\partial x'^\nu}$$

is het duidelijk dat de partiële afgeleide een covariante vector is. Het loslaten van zo een object op een tensor is echter niet hetzelfde als ordinare vermenigvuldiging van tensoren. Het object dat men zo bekomt is dus typisch *geen* tensor meer. Indien men dus de afgeleide van een tensor wil nemen, op een manier dat het resultaat dat men verkrijgt wederom een tensor is, moet men de covariante afgeleide invoeren. Deze is gedefinieerd als

$$\nabla_\mu A^\nu = \partial_\mu A^\nu + \Gamma_{\mu\rho}^\nu A^\rho$$

voor een contravariante index, en als

$$\nabla_{\mu} A_{\nu} = \partial_{\mu} A_{\nu} - \Gamma_{\mu\nu}^{\rho} A_{\rho}$$

voor een covariante index. In deze uitdrukkingen, zijn Γ de Christoffel-symbolen, gedefinieerd in termen van de metriek als volgt:

$$\Gamma_{\beta\gamma}^{\alpha} = \frac{1}{2} g^{\alpha\epsilon} (\partial_{\gamma} g_{\beta\epsilon} + \partial_{\beta} g_{\gamma\epsilon} - \partial_{\epsilon} g_{\beta\gamma}).$$

Indien men de covariante afgeleide wenst te nemen van een tensor met meerdere indices, neemt men de gewone afgeleide, plus een extra term co- of contravariante index, met het teken zoals in de twee uitdrukkingen hoger. Uitgeschreven:

$$\begin{aligned} (\nabla_c T)^{a_1 \dots a_r}_{b_1 \dots b_s} &= \frac{\partial}{\partial x^c} T^{a_1 \dots a_r}_{b_1 \dots b_s} + \Gamma^{a_1}_{dc} T^{d \dots a_r}_{b_1 \dots b_s} + \dots + \Gamma^{a_r}_{dc} T^{a_1 \dots a_{r-1} d}_{b_1 \dots b_s} \\ &- \Gamma^d_{b_1 c} T^{a_1 \dots a_r}_{d \dots b_s} - \dots - \Gamma^d_{b_s c} T^{a_1 \dots a_r}_{b_1 \dots b_{s-1} d}. \end{aligned}$$

Belangrijke tensoren

We geven bondig een overzicht van de relevante tensoren die in de relativiteitstheorie optreden. Zoals uitgelegd in de voorgaande paragraaf, is de afgeleide $\partial/\partial x^{\mu} = \partial_{\mu}$ een covariante tensor. Hiernaast is ook de coördinaat-vector x^{μ} een contravariante tensor:

$$x'^{\mu} = \frac{\partial x'^{\mu}}{\partial x^{\nu}} x^{\nu}.$$

Ook de kroneckerdelta δ_{μ}^{ν} is een tensor zien. Tot slot is er een hele reeks relevante tensoren, die men definieert aan de hand van afgeleiden van de metriek. Al deze grootheden drukken op een bepaalde manier uit hoezeer de ruimte gekromd is. (Of: afwijkt van de vlakke metriek in de Minkowski-ruimte.) Zoals hoger vermeld, definieert men eerst de Christoffelsymbolen, als volgt:

$$\Gamma_{\beta\gamma}^{\alpha} = \frac{1}{2} g^{\alpha\epsilon} (\partial_{\gamma} g_{\beta\epsilon} + \partial_{\beta} g_{\gamma\epsilon} - \partial_{\epsilon} g_{\beta\gamma}).$$

Deze objecten zijn géén tensoren, aangezien de voorkomende afgeleiden niet covariant zijn. Vervolgens, definieert men de Riemann-tensor (wel weer een tensor dus) als volgt:

$$R^i_{jkl} = \frac{\partial \Gamma^i_{jl}}{\partial x^k} - \frac{\partial \Gamma^i_{jk}}{\partial x^l} + \Gamma^{\mu}_{jl} \Gamma^i_{\mu k} - \Gamma^{\mu}_{jk} \Gamma^i_{\mu l}$$

Deze heeft dus één contravariante en drie covariante indices. Uiteraard kan men naar gewoonte indices naar boven of beneden halen. Als men in de bovenstaande uitdrukking twee indices contraheert, krijgt men de Ricci-tensor:

$$R_{ij} = R^k_{ikj}.$$

Tot slot kan men hiervan het spoor nemen, wat de Ricci-scalar oplevert:

$$R = g^{ij} R_{ij}$$

En uiteindelijk definieert men met al het voorgaande dan de Einstein-tensor, als volgt:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R.$$

Ook deze tensor geeft dus aan in welke mate de ruimte gekromd is. Volgens de Einstein-vergelijkingen (zie ook lager) is deze kromming gelijk aan de materie-inhoud van de ruimte. Dit laatste wordt uitgedrukt met de energie-momentum-tensor $T_{\mu\nu}$. Deze bevat ruwweg de energie-dichtheid van alle aanwezige materie en energie, zoals bijvoorbeeld elektromagnetische velden. De bijdrage van deze laatste is bijvoorbeeld gegeven door

$$T^{\mu\nu}_{EM}(x) = F^{\mu}_{\alpha} F^{\nu\alpha} - \frac{1}{4} g^{\mu\nu} F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta}$$

met $F_{\mu\nu}$ de elektromagnetische veldtensor. Deze is te bekomen uit de vierpotential A_{μ} :

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Deze is dus antisymmetrisch.

Einstein-vergelijkingen

De Einstein-vergelijkingen zijn (in natuurlijke eenheden) gegeven door

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

Beide leden zijn tensoren van covariante rank twee. Dat wil zeggen dat ze op dezelfde manier transformeren. Bijgevolg: als de bovenstaande gelijkheid opgaat in één assenstelsel, gaat ze ook op in een ander. Dit betekent dus dat verschillende waarnemers (ongeacht hun assenstelsel) het altijd eens kunnen zijn over de voorspellingen die algemene relativiteitstheorie doet. De theorie is dus echt diffeomorfisme-invariant, waarin de grote kracht van de relativiteitstheorie schuilt.

Zwaartekrachtsgolf

In de algemene relativiteitstheorie, een deelgebied van de natuurkunde, is een **zwaartekrachtsgolf** een fluctuatie in de kromming van de ruimtetijd, die zich van de bron af naar buiten voortplant als een golf. In 1916 stelde Albert Einstein op basis van zijn theorie van de algemene relativiteitstheorie het bestaan van zwaartekrachtsgolven voor.

Zwaartekrachtsgolven vervoeren energie als **zwaartekrachtstraling**. Bronnen van zwaartekrachtsgolven zijn onder andere dubbelstersystemen, bestaande uit witte dwergen, neutronensterren of zwarte gaten.

Definitie

De algemene relativiteitstheorie voorspelt dat er ook zwaartekrachtsgolven bestaan. Deze kunnen bijvoorbeeld optreden bij een grote explosie in het heelal. Zwaartekrachtsgolven zijn naar verwachting transversaal, al voorspellen sommige theorieën daarnaast ook longitudinale golven.

Indien zwaartekrachtsgolven kunnen optreden bij grote explosies in het heelal dan vertaalt zich dat in een tijdelijke ruimtevermeerdering, die waargenomen kan worden door tijdelijke grotere spectrale roodverschuivingen. Omgekeerd krijg je bij implosies ruimtevermindering, wat zich vertaalt in spectrale blauwverschuiving.

Aan de universiteit van Leiden wordt in het Kamerlingh Onnes Laboratorium gewerkt aan een uiterst gevoelige bolvormige antenne die zwaartekrachtsgolven kan waarnemen. De naam van het project is MiniGrail. Deze antenne is zo gevoelig, dat trillingen met een uitwijking van ongeveer 10^{-20} meter kunnen worden gedetecteerd.

Tensoren in de relativiteitstheorie

Christoffelsymbolen

Christoffelsymbolen zijn wiskundige functies die optreden bij de studie van gekromde ruimten. Ze geven informatie over de mate en wijze van kromming, en kunnen in het bijzonder aangeven of een ruimte lokaal *vlak*, is, t.t.z. isometrisch met een deel van de Euclidische ruimte. Bovendien laten ze toe de notie van covariante afgeleide te definiëren.

Ze zijn genoemd naar Elwin Bruno Christoffel, die hen voor het eerst expliciet bestudeerde. Ze zijn echter ook aanwezig in het oorspronkelijke werk van Bernhard Riemann.

Definitie

Zij (M, g) een n -dimensionale Riemann-variëteit. Beschouw een kaart $k : U \subset \mathbb{R}^n \rightarrow M$ waarvan de inverse in een omgeving V van een punt p weergegeven wordt door de *coördinaatfuncties* $x^i : V \mapsto \mathbb{R}$. Noteer g_{ij} voor de componenten van de metrische tensor g ten opzichte van de duale basis $\{dx^i \otimes dx^j \mid i, j = 1, \dots, n\}$, en g^{kl} voor de omgekeerde matrix. De *Christoffelsymbolen van de eerste soort* zijn de volgende n^3 functies van V naar \mathbb{R} (voor $i, j, k = 1, \dots, n$):

$$[ij, k] = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial g_{ik}}{\partial x^j} + \frac{\partial g_{jk}}{\partial x^i} - \frac{\partial g_{ij}}{\partial x^k} \right)$$

De *Christoffelsymbolen van de tweede soort* ontstaan door combinatie met de duale van de metrische tensor:

$$\Gamma_{ij}^l = \sum_{k=1}^n g^{kl} [ij, k]$$

Het somteken $\sum_{k=1}^n$ mag weggelaten worden als we de Einstein-sommatieconventie hanteren. In componenten is dus

$$\Gamma_{\beta\gamma}^{\alpha} = \frac{1}{2} g^{\alpha\epsilon} (\partial_{\gamma} g_{\beta\epsilon} + \partial_{\beta} g_{\gamma\epsilon} - \partial_{\epsilon} g_{\beta\gamma}).$$

Elementaire eigenschappen

Beide soorten Christoffelsymbolen zijn symmetrisch in de indices i en j .

Als de componenten van de metrische tensor constant zijn (in een omgeving van p), dan zijn de Christoffelsymbolen nul.

Coördinatentransformatie

De precieze waarde van deze functies hangt sterk af van de gegeven kaart. Als we beschikken over een tweede kaart rond p , en we drukken g uit ten opzichte van de basisvectoren die bij de nieuwe coördinaten y^{α} horen, dan verkrijgen we nieuwe functies $[\alpha\beta, \delta]'$ en $\Gamma'^{\gamma}_{\alpha\beta}$. Het verband, bijvoorbeeld tussen de symbolen van de tweede soort, luidt (met sommatieconventie):

$$\Gamma'^{\gamma}_{\alpha\beta} = \Gamma_{ij}^k \frac{\partial x^i}{\partial y^{\alpha}} \frac{\partial x^j}{\partial y^{\beta}} \frac{\partial y^{\gamma}}{\partial x^k} + \frac{\partial^2 x^m}{\partial y^{\alpha} \partial y^{\beta}} \frac{\partial y^{\gamma}}{\partial x^m}$$

De aanwezigheid van de tweede term, die zeker niet altijd nul is, betekent dat de Christoffelsymbolen *niet tensorieel* zijn: hun componenten transformeren niet als de componenten van een derde-rang-tensor. De Riemann-tensor is een echte vierde-rang-tensor die de kromming van de variëteit uitdrukt. Zijn componenten kunnen worden uitgedrukt in termen van de Christoffelsymbolen en hun afgeleiden.

Einstein-tensor

De **Einstein-tensor** is een tensor die de kromming van een ruimte uitdrukt. Het is een centraal object in de Einstein-vergelijkingen van de algemene relativiteitstheorie.

Meer precies is de Einstein-tensor een object dat uitgedrukt kan worden in termen van tweede afgeleides van de metriek van een gegeven ruimte. In wiskundige context kan dat elke ruimte zijn, in natuurkunde heeft de ruimte de betekenis van de vierdimensionale ruimtetijd, en is de Einstein-tensor dan ook de kromming van de gegeven ruimtetijd.

Definitie

In wiskundige context wordt de Einstein-tensor \mathbf{G} gedefinieerd als een tensor van rang 2 op een Riemannse variëteit als:

$$\mathbf{G} = \mathbf{R} - \frac{1}{2}\mathbf{g}R,$$

met \mathbf{R} de Ricci-tensor, \mathbf{g} de metrische tensor en R de scalaire kromming. In de taal van tensoren schrijft men dit als

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R.$$

Expliciete uitdrukking

De Ricci-tensor en scalaire kromming kunnen eenduidig bepaald worden gegeven de metrische tensor, dus de Einstein-tensor kan in principe expliciet uitgedrukt worden in termen van de metriek. Omdat deze uitdrukking er niet eenvoudig uitziet, verkiest men meestal de bovenstaande (impliciete) definitie van de Einstein-tensor. Deze kan berekend worden aan de hand van de uitdrukking voor de Ricci-tensor in termen van de Christoffel-connectie:

$$\begin{aligned} G_{\alpha\beta} &= R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}R \\ &= R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}g^{\gamma\zeta}R_{\gamma\zeta} \\ &= (\delta_{\alpha}^{\gamma}\delta_{\beta}^{\zeta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}g^{\gamma\zeta})R_{\gamma\zeta} \\ &= (\delta_{\alpha}^{\gamma}\delta_{\beta}^{\zeta} - \frac{1}{2}g_{\alpha\beta}g^{\gamma\zeta})(\Gamma_{\gamma\zeta,\epsilon}^{\epsilon} - \Gamma_{\gamma\epsilon,\zeta}^{\epsilon} + \Gamma_{\epsilon\sigma}^{\epsilon}\Gamma_{\gamma\zeta}^{\sigma} - \Gamma_{\zeta\sigma}^{\epsilon}\Gamma_{\epsilon\gamma}^{\sigma}), \end{aligned}$$

hierin is δ_{β}^{α} de Kronecker-tensor en zijn de Christoffel-symbolen $\Gamma_{\beta\gamma}^{\alpha}$ gedefinieerd als

$$\Gamma_{\beta\gamma}^{\alpha} = \frac{1}{2}g^{\alpha\epsilon}(g_{\beta\epsilon,\gamma} + g_{\gamma\epsilon,\beta} - g_{\beta\gamma,\epsilon}).$$

De concrete uitdrukking voor \mathbf{G} ziet er niet eenvoudig uit, en wordt meestal niet vermeld.

Voorkomen in algemene relativiteitstheorie

De Einstein-tensor komt voor in het linkerlid van de Einstein-vergelijkingen:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}.$$

In de natuurlijke eenheden, ziet dit er uit als

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}.$$

Daarnaast kunnen ook de Bianchi-identiteiten eenvoudig uitgedrukt worden met behulp van de Einstein-tensor:

$$\nabla_{\mu} G^{\mu\nu} = 0.$$

De eenvoud van deze vergelijkingen, uitgedrukt met de Einstein-tensor toont de diepe geometrische en fysische betekenis van het object aan.

Literatuur

- Ohanian, Hans C.; Remo Ruffini. *Gravitation and Spacetime*, Tweede editie, W. W. Norton & Company, 1994 ISBN 0-393-96501-5.
- Martin, John Legat. *General Relativity: A First Course for Physicists*, Revised edition, Prentice Hall, 1995 ISBN 0-13-291196-5.

Elektromagnetische veldtensor

De **elektromagnetische veldtensor**, kortweg de **veldtensor** of **veldsterkte**, is een object uit de relativiteitstheorie, die de elektrische- en magnetische velden van een fysisch systeem gezamenlijk beschrijft. Het is een antisymmetrische tensor, die toelaat de wetten van het elektromagnetisme op een bondige manier uit te drukken. Men noteert de tensor typisch als F , naar het Engelse *fieldstrength* (veldsterkte).

Definitie

De elektromagnetische veldtensor F is gedefinieerd als de afgeleide van de vierpotentiaal, als volgt:

$$F_{\mu\nu} = \partial_{\mu} A_{\nu} - \partial_{\nu} A_{\mu}$$

De indices μ en ν lopen van 0 tot 3, de afgeleides in het rechterlid zijn dus een viergradiënt. De veldtensor is duidelijk antisymmetrisch: het object in het rechterlid wisselt immers van teken indien men μ en ν omwisselt.

Indien men in de bovenstaande uitdrukking de uitdrukking voor de vierpotentiaal invult, krijgt men:

$$F_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 0 & E_x/c & E_y/c & E_z/c \\ -E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ -E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ -E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{bmatrix}$$

Waarbij (E_x, E_y, E_z) en (B_x, B_y, B_z) de componenten van het elektrisch- en magnetisch veld voorstellen.

Door contractie met de metriek kan men ook de veldsterkte met contravariante (boven-) indices verkrijgen:

$$F^{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 0 & -E_x/c & -E_y/c & -E_z/c \\ E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{bmatrix}$$

Hierbij werd de tekenconventie gebruikt waarin de Minkowski-metriek als diagonaal $(+1, -1, -1, -1)$ heeft, de *mostly-minus* conventie dus.

Vergelijkingen van Maxwell

Het is mogelijk om met de veldtensor de wetten van Maxwell op een bondige manier te beschrijven. Twee van de vier wetten beschrijven magnetisme :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

en

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{\nabla} \times \vec{E} = 0$$

Men kan nagaan dat deze twee vergelijkingen equivalent zijn met de volgende uitdrukking voor de magnetische veldtensor:

$$F_{\alpha\beta,\gamma} + F_{\beta\gamma,\alpha} + F_{\gamma\alpha,\beta} = 0$$

Hierin stellen de komma's afgeleides voor, bijvoorbeeld $F_{\alpha\beta,\gamma} = \partial_\gamma F_{\alpha\beta}$. Deze laatste uitdrukking kan men nog eenvoudiger schrijven, als volgt:

$$F_{[\alpha\beta,\gamma]} = 0$$

Waarbij de haakjes antisymmetrisatie van de indices voorstelt.

Ook de twee andere vergelijkingen van Maxwell kunnen geschreven worden in termen van de veldtensor. Inderdaad,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

en

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \vec{J}$$

laten zich bondig herschrijven als

$$\partial_\beta F^{\alpha\beta} = \mu_0 J^\alpha$$

waarbij $J^\alpha = (c\rho, \vec{J})$ de vierstroom voorstelt.

Alle wetten van het elektromagnetisme kunnen dus samen gevat worden door:

$$F_{[\alpha\beta,\gamma]} = 0 \text{ and } F^{\alpha\beta}{}_{,\beta} = \mu_0 J^\alpha$$

In zekere zin verantwoord de eenvoud van bovenstaande uitdrukkingen de oorspronkelijke definitie van de veldtensor.

Covariantie, Invarianten, Lagrangiaan

Veel objecten van het elektromagnetisme zijn *covariant*, dat wil zeggen dat ze er anders uitzien naargelang de snelheid van de waarnemer. Zo heeft bijvoorbeeld een stilstaande, geladen staaf wel een elektrisch veld rondom, maar geen elektrische stroom. Indien een waarnemer echter beweegt ten opzichte van deze staaf, hebben de aanwezige ladingen een relatieve snelheid ten opzichte van deze waarnemer. Voor deze observator is er dus wél een elektrische stroom aanwezig. Dit lijkt problematisch, maar de wetten van elektromagnetisme hebben de bijzondere eigenschap dat ondanks de verschillende beschrijvingen die waarnemers van dezelfde situatie zullen geven, de voorspellingen identiek zijn. De wetten zijn dus covariant.

Hoewel covariante grootheden perfect "gezond" zijn, is het interessant om te zoeken naar grootheden die niet afhangen van de waarnemer, zogeheten invarianten. In de relativiteitstheorie noemt men zulke invarianten scalaren. Dit zijn objecten die géén vrije indices hebben. De zoektocht naar invariante elektromagnetische grootheden is dus herleidbaar tot het zoeken naar index-vrije objecten, gebouwd uit de veldtensor. Men kan dit op twee wijzen doen. De eerste mogelijkheid is de veldtensor te contraheren met behulp van de metriek:

$$F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} = F_{\mu\nu}F_{\alpha\beta}\eta^{\mu\alpha}\eta^{\nu\beta} = 2\left(B^2 - \frac{E^2}{c^2}\right)$$

Deze laatste uitdrukking is dus een invariant. Men kan ook contraheren met het Levi-Civita-symbool $\epsilon_{\alpha\beta\gamma\delta}$, als volgt:

$$\frac{1}{2}\epsilon_{\alpha\beta\gamma\delta}F^{\alpha\beta}F^{\gamma\delta} = \frac{4}{c}(\vec{B} \cdot \vec{E})$$

Ook dit is een invariant.

Een van de toepassingen van deze invarianten is de volgende. Indien men een actie wilt opstellen voor het elektromagnetisme, wilt men een uitdrukking van de vorm

$$\mathcal{S} = \int \mathcal{L}d^4x$$

waarbij de integraal loopt over de gehele ruimtetijd, en \mathcal{L} een invariante scalar is (de Lagrangiaan). Omwille van het bovenstaande blijven er slechts weinig kandidaten over voor deze Lagrangiaan. Deze moet immers een uitdrukking zijn in functie van de vorige twee invarianten. Het blijkt dat de actie

$$\mathcal{S} = \int \left(-\frac{1}{4\mu_0}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}\right) d^4x$$

de correcte is, waarvan de Maxwell-vergelijkingen en het klassiek elektromagnetisme afgeleid kunnen worden. Indien men ook bronnen (een vierstroom) wilt toevoegen, dient men de overeenkomstige termen aan de Lagrangiaan toe te voegen, om de correcte bewegingsvergelijkingen te bekomen. Zo bekomt men onder andere de Lagrangiaan voor kwantumelektrodynamica ("QED"), de kwantummechanische theorie van elektromagnetisme.

Algemene Relativiteitstheorie

Veel uitdrukkingen en vergelijkingen in de algemene relativiteitstheorie kunnen worden verkregen door in de speciaal relativistische uitdrukkingen de partiële afgeleiden (viergradiënt) te vervangen door de covariante afgeleide. Ook voor de elektromagnetische veldtensor is dit waar: de veldtensor in algemene relativiteitstheorie is gegeven door $F_{\mu\nu} = \nabla_\mu A_\nu - \nabla_\nu A_\mu$. Omdat deze uitdrukking antisymmetrisch is, vallen de termen afkomstig van de connectie echter weg, en krijgt men wederom $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$. Hoewel niet manifest, is de oorspronkelijke definitie dus meteen ook covariant. De Maxwell-vergelijkingen zien er in het algemeen relativistische geval uit als:

$$F_{[\alpha\beta;\gamma]} = 0 \text{ and } F^{\alpha\beta}{}_{;\beta} = \mu_0 J^\alpha$$

waarbij ; voor een covariante afgeleide staat.

Conventies en notatie

Er zijn een aantal verschillende conventies in de omloop in relativiteitstheorie. Een aantal opmerkingen:

- In dit artikel hebben we SI-eenheden gebruikt. Indien men natuurlijke eenheden gebruikt, is de lichtsnelheid $c = 1$, dus valt deze weg uit alle bovenstaande uitdrukkingen.
- Bij het omhoog/omlaag halen van de indices, gebruikt men de metriek. Afhankelijk van de tekenconventies, verschijnen hier dus al dan niet een aantal mintekens hierbij.
- Sommige auteurs definiëren de veldsterkte als de antisymmetrische versie van de afgeleide van de vierpotentiaal. In symbolen: $F_{\mu\nu} = \partial_{[\mu}A_{\nu]} = \frac{1}{2}(\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu)$. Dat is dus een factor $1/2$ kleiner dan de definitie die hier gehanteerd werd.

Energie-impuls-tensor

De **energie-impuls-tensor** is een grootte in de fysica, die de dichtheid en flux van energie en impuls in ruimte en tijd weergeeft. Het is een veralgemening van de spanning uit de materiaalkunde. Het is een natuurlijk object in de relativiteitstheorie, waar energie en momentum op gelijke voet behandeld worden.

Definitie

(In de volgende vergelijkingen, wordt de Einstein-sommatieconventie gebruikt.) De energie-impuls-tensor is gedefinieerd als een tensor

$T^{\alpha\beta}$ met twee indices, waarvan de $\alpha\beta$ -component overeenkomt met de α^{de} component van impuls flux, doorheen een oppervlakte met constante x^β coördinaat. Voor relativiteitstheorie zijn de coördinaten vier getallen, de tijd en drie ruimtelijke dimensies, en worden samengevat in de positievector. Ook de impuls bestaat uit vier getallen, het viermomentum, waarvan de componenten ruwweg de energie en impuls zijn.

De energie-impuls-tensor heeft de eigenschap symmetrisch te zijn,

$$T^{\alpha\beta} = T^{\beta\alpha}.$$

hoewel men exotische situaties kan bedenken, waarin dit niet het geval is. In dat geval noemt men het antisymmetrische stuk de spintensor, gedefinieerd als:

$$\partial_\alpha S^{\mu\nu\alpha} = T^{\mu\nu} - T^{\nu\mu}.$$

Verder, als de Lagrangiaan \mathcal{L} van een theorie gekend is, kan men de energie-impuls-tensor definiëren als

$$T^{\mu\nu} = \frac{2}{\sqrt{-g}} \frac{\delta(\mathcal{L}\sqrt{-g})}{\delta g_{\mu\nu}} = 2 \frac{\delta\mathcal{L}}{\delta g_{\mu\nu}} + g^{\mu\nu} \mathcal{L}.$$

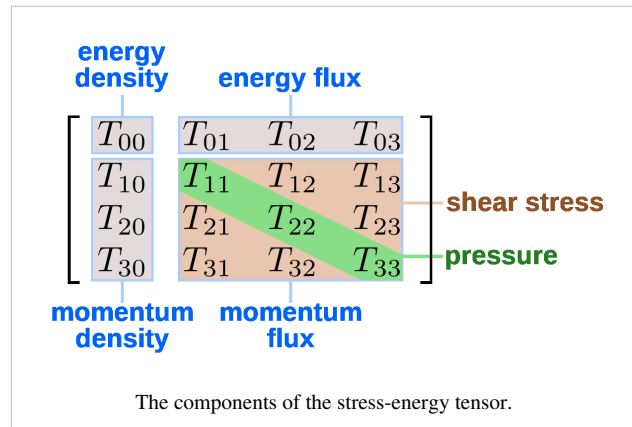
Hierbij is \mathcal{L} de Lagrangiaan van alleen de materie die in de theorie voorkomt, en dus niet de gravitationele bijdrage (Einstein-Hilbertterm) aan de totale Lagrangiaan.

Componenten van de energie-impuls-tensor

Als we numerieke voorfactoren c even buiten beschouwing laten, zijn de componenten van de energie-impuls-tensor als volgt te interpreteren:

- De T^{00} -component is de totale energiedichtheid van de ruimte. Dit is dus de totale energie per volume-eenheid. Vaak wordt deze grootte genoteerd met ρ .
- De componenten T^{0i} (met $i = 1, 2, 3$) geven de energieflex, dat is dus de stroom van energie in de i -de richting.
- De componenten T^{ik} tot slot, geven de flux van i -impuls doorheen het oppervlak van constanten x^k . Meer bepaald zijn de diagonale termen T^{ik} de druk (vaak genoteerd met p), en de overige zes componenten geven de schuifspanning.

In de puntjes hierboven, en ook verder in het artikel, wordt verschillende malen gesproken over energie. Daarmee wordt telkens de totale energie bedoeld, namelijk zowel de rustmassa-energie als alle andere vormen van energie.



Voorkomen in natuurwetten

Behoudswetten

De stelling van Noether geeft een verband tussen symmetrieën van een systeem en behouden grootheden. Een gevolg van de translatie- en rotatie-invariantie van zowel speciale als algemene relativiteitstheorie, is het behoud van de energie-impuls-tensor. Meer precies geldt in speciale relativiteitstheorie dat:

$$0 = T^{\mu\nu}{}_{,\nu} = \partial_\nu T^{\mu\nu}.$$

In algemene relativiteitstheorie is dezelfde uitdrukking waar, mits men de partiële afgeleide vervangt door een covariante afgeleide:

$$0 = \nabla_\nu T^{\mu\nu}.$$

In algemene relativiteitstheorie

In algemene relativiteitstheorie is de energie-impuls-tensor de oorzaak voor het krommen van de ruimtetijd. Men noemt de energie- en impuls-dichtheid dus de bron voor een gekromde ruimte. Meer precies, de Einstein-vergelijkingen stellen dat

$$R_{\alpha\beta} - \frac{1}{2}R g_{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\alpha\beta}.$$

De tensor links is de Einstein-tensor. Deze zegt in welke mate de ruimte verschilt van de gewone vlakke ruimtetijd. De Einstein-vergelijkingen zeggen dus letterlijk dat de kromming van de ruimtetijd bepaald wordt door de dichtheid en flux van energie en impuls, die bondig weergegeven worden met $T_{\alpha\beta}$.

Voorbeelden

Ideale vloeistof

Voor een vloeistof in thermodynamisch evenwicht, heeft de energie-impuls-tensor de vorm

$$T^{\alpha\beta} = \left(\rho + \frac{p}{c^2}\right) u^\alpha u^\beta + p g^{\alpha\beta}$$

waarin ρ de energiedichtheid is, en p de hydrostatische druk, en u^α de viersnelheid. De tensor $g^{\alpha\beta}$ tot slot, staat voor de inverse metriek.

Elektromagnetisme

De energie-impuls-tensor voor een elektromagnetisch veld (zonder ladingsdragers) is gegeven door

$$T^{\mu\nu}(x) = \frac{1}{\mu_0} \left(F^{\mu\alpha} g_{\alpha\beta} F^{\nu\beta} - \frac{1}{4} g^{\mu\nu} F_{\delta\gamma} F^{\delta\gamma} \right)$$

waarbij $F_{\mu\nu}$ de elektromagnetische veldtensor voorstelt.

Scalair veld

De energie-impuls-tensor voor een scalair veld ϕ dat aan de Klein-Gordonvergelijking voldoet, is gegeven door

$$T^{\mu\nu} = \frac{\hbar^2}{m} (g^{\mu\alpha} g^{\nu\beta} + g^{\mu\beta} g^{\nu\alpha} - g^{\mu\nu} g^{\alpha\beta}) \partial_\alpha \bar{\phi} \partial_\beta \phi - g^{\mu\nu} m c^2 \bar{\phi} \phi.$$

Metriek

In de wiskunde is binnen het begrip metrische ruimte een **metriek** de functie die de afstand tussen elk tweetal elementen van een verzameling definieert. Een verzameling met een **metriek** wordt een metrische ruimte genoemd. Een metriek legt een topologie op aan een verzameling, maar niet alle topologieën kunnen een metriek produceren. Wanneer een topologische ruimte een topologie heeft die als een metriek kan worden beschreven, zegt men dat deze topologische ruimte metriseerbaar is.

In de differentiaalmeetkunde, wordt het woord "metriek" gebruikt om te refereren aan een structuur die alleen op een vectorruimte is gedefinieerd, een juistere terminologie is een metrische tensor (of een Riemann- of *pseudo*-Riemann-metriek).

Ricci-tensor

De **Ricci-tensor** is een wiskundig object uit de differentiaalmeetkunde, genoemd naar Gregorio Ricci-Curbastro. Het is een object dat uitdrukt in welke mate een ruimte verschilt van de gewone Euclidische ruimte. Er kan ook een meetkundige interpretatie worden gegeven aan de Ricci-tensor, namelijk de verstoring van een eenheidsvolume in de gegeven ruimte.

Formele definitie

Net als de metriek, is de Ricci-tensor een symmetrische bilineaire vorm op de raakruimte van een Riemann-variëteit. De Ricci-tensor kan bekomen worden als het spoor van de Riemann-tensor.

Meer precies, stel dat (M, g) een n -dimensionale Riemann-variëteit is. Noteer met $T_p M$ de raakbundel van M ter hoogte van p . Voor elk paar

$$\xi, \eta \in T_p M$$

vectoren in de rakende ruimte, wordt the Ricci-tensor $\text{Ric}(\xi, \eta)$ geëvalueerd met (ξ, η) gedefinieerd als het spoor van de lineaire afbeelding van

$$T_p M \rightarrow T_p M$$

gegeven door

$$\zeta \mapsto R(\zeta, \eta)\xi$$

met R de Riemann-tensor.

Concreter, gegeven een bepaald coördinatensysteem, kunnen we dit in componenten uitschrijven als

$$\text{Ric} = R_{ij} dx^i \otimes dx^j.$$

De coëfficiënten R_{ij} zijn dan gegeven door

$$R_{ij} = R^k{}_{ikj}.$$

in woorden: de Ricci-tensor is dus het spoor van de Riemann-tensor. In bovenstaande uitdrukking werd de sommatieconventie verondersteld. In termen van de Christoffelsymbolen wordt de Ricci-tensor gegeven door:

$$R_{\sigma\nu} = R^\rho{}_{\sigma\rho\nu} = \Gamma_{\nu\sigma,\rho}^\rho - \Gamma_{\rho\sigma,\nu}^\rho + \Gamma_{\rho\lambda}^\rho \Gamma_{\nu\sigma}^\lambda - \Gamma_{\nu\lambda}^\rho \Gamma_{\rho\sigma}^\lambda.$$

De Ricci-tensor heeft verder de eigenschap symmetrisch te zijn:

$$R_{ij} = R_{ji}.$$

Een variëteit met $R_{ij} = 0$ noemen we ook wel Ricci-vlak. In relativiteitstheorie zijn Ricci-vlakke ruimtes de vacuüm-oplossingen van de ruimtetijd.

Viergradiënt

Het begrip **viergradiënt** komt voor in de speciale relativiteitstheorie, en is de veralgemening van de gewoonlijke notie van gradiënt naar een viervector. Het is een natuurlijk object indien men afgeleides neemt van functies of tensoren die gedefinieerd zijn op de Minkowski-ruimte. In algemene relativiteitstheorie, waar het domein van functies een meer algemene, gekromde ruimte kan zijn, kan de viergradiënt verder veralgemeend worden naar de covariante- of Lie-afgeleide.

Definitie

Het viergradiënt is gedefinieerd als

$$\partial_\mu \stackrel{\text{def}}{=} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t}, \nabla \right),$$

en is een covariante tensor. Op de gebruikelijke manier (door met de metriek de index omhoog te halen) kan men een contravariante versie van de viergradiënt definiëren. Indien men werkt met de mostly plus-conventie, is deze gegeven door

$$\partial^\mu = \left(-\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t}, \nabla \right),$$

Soms wordt de viergradiënt genoteerd als D . Het *kwadraat* van deze operator wordt gedefinieerd als

$$D \cdot D = \partial_\mu \partial^\mu = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2.$$

en is gelijk aan de d'Alembertiaan. Indien men werkt in natuurlijke eenheden, is de numerieke waarde van de lichtsnelheid gelijk aan 1, en is de viergradiënt dus gewoon $\partial_\mu = \left(\frac{\partial}{\partial t}, \nabla \right)$.

Referenties en externe links

- (en) R. d'Inverno, *Introducing Einstein's Relativity*, Oxford University Press, ISBN 0198596863, pagina's 64-65 gaan over de viergradiënt en vectorvelden.
- (en) J.D. Jackson, "Classical Electrodynamics" Hoofdstuk 11, Wiley ISBN 0-471-30932-X
- (nl) Transformatieregels ^[1] van de viergradiënt (en covariante vectoren in het algemeen), zie pagina 54 onder.

Referenties

[1] <http://www.nikhef.nl/~t32/fed.pdf>

Vierpotentiaal

De **vierpotentiaal** is een object uit de relativiteitstheorie, dat op een bondige manier het elektrisch- en magnetisch veld samenvat in één enkel object. Meer precies is het de viervector die tegelijk de elektrische potentiaal en vectorpotentiaal omschrijft.

Definitie

De vierpotentiaal is gedefinieerd als een object met vier componenten, gegeven door

$$A^\mu = \left(\frac{\varphi}{c}, \vec{A} \right)$$

met φ de elektrische potentiaal en \vec{A} de vectorpotentiaal (de "magnetische potentiaal"). Alle componenten hebben dezelfde eenheid: volt·seconde/meter. Het elektrisch- en magnetisch veld dat hiermee overeenkomen, zijn gegeven door:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$$

Het nut van de definitie van vierpotentiaal is als volgt. In de speciale en algemene relativiteitstheorie, wenst men objecten te beschrijven die op een "goede" manieren transformeren onder coördinaat-overgangen. Het blijkt dat de bovenstaande definitie van vierpotentiaal een contravariante vector oplevert. Zulke objecten transformeren op een eenduidige manier.

Uit de wiskunde van de relativiteitstheorie volgt dat men aan elke contravariante vector ook een covariante vector kan associëren, door contractie met de Minkowski-metrick $\eta_{\mu\nu}$. Dus kan men ook een covariante versie van de vierstroom definiëren, als volgt:

$$A_\mu = A^\nu \eta_{\mu\nu} = \left(\frac{\varphi}{c}, -\vec{A} \right)$$

IJKtransformatie

Een belangrijke eigenschap van de vierpotentiaal is zogeheten ijk-invariantie. Twee *verschillende* vierpotentialen kunnen namelijk *dezelfde* fysische situatie (dat wil zeggen dezelfde waarde voor het elektrisch en magnetisch veld) beschrijven. Uit de definitie volgt dat de vierpotentialen

$$A_\mu \quad \text{en} \quad A_\mu + \partial_\mu \Lambda$$

(met Λ een *willekeurige* functie, en ∂_μ de viergradiënt) hetzelfde elektrisch- en magnetisch veld beschrijven. De vierpotentiaal overeenkomstig met een bepaalde fysische situatie is dus niet uniek; er is een zekere vrijheid. Vaak gebruikt men de zogeheten Lorenz-ijk. Dit wil zeggen dat men de ijk-vrijheid gebruikt om te realiseren dat

$$\partial_\alpha A^\alpha = 0$$

Dit kan altijd bekomen worden door $\partial_\mu \Lambda$ bij de vierpotentiaal op te tellen, voor een gepaste functie Λ . Deze ijk-keuze is handig, omdat deze toelaat de Maxwell-vergelijkingen te schrijven als

$$\square A^\mu = \mu_0 J^\mu$$

met J^μ de vierstroom, en \square de d'Alembertiaan. Deze bondige vorm is een typisch voorbeeld van de elegantie van relativistische formuleringen van bepaalde vergelijkingen. Uitgeschreven in componenten, geeft de bovenstaande vergelijking dat

$$\square \varphi = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\square \vec{A} = \mu_0 \vec{j}$$

Eenheden en conventies

Dit artikel gebruik standaard-eenheden: het SI-stelsel. Sommige teksten in de literatuur van relativiteitstheorie gebruiken een ander eenhedenstelsel, zoals natuurlijke eenheden. In dat geval is de getalwaarde van de lichtsnelheid gelijk aan één. Op die manier valt het getal c weg uit alle formules. Veel van de bovenstaande uitdrukkingen zien er dan een beetje eenvoudiger uit. Indien men terug wilt gaan naar SI-eenheden, laat dimensie-analyse vaak toe te bepalen waar factoren c verzwegen zijn.

Ook werd (voor het bekomen van de contravariante versie van de vierpotentiaal) een Minkowski-metrik gebruikt met diagonaal $(1, -1, -1, -1)$, dat is dus de mostly-minus tekenconventie.

Referenties

- Rindler, Wolfgang. *Introduction to Special Relativity (2nd)*, Oxford University Press, Oxford, 1991 ISBN 0-19-853952-5.
- Jackson, J D. *Classical Electrodynamics (3rd)*, Wiley, New York. ISBN ISBN 0-471-30932-X, 1999

Viervector

Speciale relativiteitstheorie
$E = m c^2$
(de massa-energie relatie)
Achtergrond
Lichtsnelheid · Lorentzinvariantie Inertiaalstelsel Wetten van Maxwell
Fundamentele begrippen
Lorentztransformatie · Ruimtetijd Viervector · Minkowski-ruimte Lengtecontractie · Tijddilatatie Gelijktijdigheid
Gevorderde onderwerpen
Massa-energie relatie Tweelingparadox EPR-paradox
Experimenten
Michelson-Morley-experiment Fizeau-experiment energieproductie bij kernreacties
Wetenschappers
Einstein · Maxwell · Minkowski Lorentz · Poincaré

Een **viervector** is een elementair wiskundig object in de (speciale) relativiteitstheorie. Het is een veralgemening van het begrip vector in gewone mechanica. Het is een set van vier getallen, die tezamen een fysische grootheid voorstellen. De definiërende eigenschap van een viervector is de transformatie-eigenschap onder Lorentztransformaties (die in *algemene* relativiteitstheorie veralgemeend worden tot willekeurige diffeomorfismes.)

Inleiding

Positie-viervector

Het basisidee van speciale relativiteitstheorie is het op gelijke voet behandelen van ruimte en tijd. Dit volgt uit het inzicht dat ruimte en tijd geen afzonderlijke grootheden zijn, maar tezamen één geheel vormen, ruimte-tijd genaamd. Dit inzicht is een noodzakelijk gevolg van de experimentele waarneming dat de lichtsnelheid dezelfde waarde heeft, voor alle waarnemers die met constante snelheid ten opzichte van elkaar bewegen (*inertiaalstelsels*).

In klassieke mechanica treedt een soortgelijk fenomeen op. Het is duidelijk dat men een systeem kan beschrijven in verschillende assenstelsels. Er is dus geen absolute betekenis te geven aan wat men de x-, y- en z-coördinaat noemt. Daarom maakt men in de mechanica vaak gebruik van vectoren: veel grootheden, zoals snelheid, positie, kracht,... hebben immers op een natuurlijke wijze drie componenten. Afzonderlijk hebben de componenten geen fysische betekenis, aangezien een andere keuze van assenstelsel de waarden van de componenten van de vector zal vermengen. Als geheel is een vector dan weer wel zinvol, en is dus eigenlijk mede gedefinieerd door hoe de componenten veranderen onder een verandering van assenstelsel.

Het begrip viervector veralgemeent dit begrip, ruwweg door aan vectoren ook een tijds-component toe te voegen. Het eenvoudigste voorbeeld is de aanduiding van een positie. In klassieke mechanica gebeurt dit door drie coördinaten (x, y, z) op te geven. Dat beschrijft een bepaalde positie in de ruimte, zonder een tijdstip te specificeren.

Een *positie-viervector* (ruimtetijdpositie) ziet er echter uit als volgt:

$$(ct, x, y, z)$$

en bepaalt dus een welbepaalde positie (x, y, z) op een welbepaald tijdstip t . Anders uitgedrukt: deze vector beschrijft de positie van een gebeurtenis in de ruimtetijd. In de uitdrukking hierboven is c de lichtsnelheid, en garandeert dat de verschillende componenten van de viervector allemaal dezelfde eenheid hebben (lengte). Net zoals men een vector (x, y, z) ook wel bondig noteert als x^i , met $i = 1, 2, 3$, noteert men een positie-viervector als

$$\mathbf{X}^\mu := (X^0, X^1, X^2, X^3) = (ct, x, y, z)$$

met $\mu = 0, 1, 2, 3$. Op gelijkaardige wijze kan men het verschil tussen twee posities in de ruimtetijd weergeven als volgt:

$$\Delta \mathbf{X} := (\Delta ct, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$$

Net als gewone vectoren, zijn viervectoren uitgerust met een bilineaire vorm (maar die in dit geval geen inwendig product is maar een generalisatie daarvan), gedefinieerd als

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{V} = \eta_{\mu\nu} U^\mu V^\nu = (U^0 \ U^1 \ U^2 \ U^3) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V^0 \\ V^1 \\ V^2 \\ V^3 \end{pmatrix} = U^0 V^0 - U^1 V^1 - U^2 V^2 - U^3 V^3$$

In de tweede stap wordt de Einstein-sommatieconventie gehanteerd: over herhaalde indices moet gesommeerd worden. Ook gebruiken sommige handboeken een andere tekenconventie, waarbij de matrix $\eta_{\mu\nu}$ tegengestelde tekens op de diagonaal heeft: $(-1, 1, 1, 1)$.

Lorentztransformaties

In speciale relativiteitstheorie worden de Galileïsche coördinatentransformaties vervangen door Lorentztransformaties. Deze beschrijven hoe coördinaten eruitzien als men van assenstelsel verandert. (Meer precies, hoe het coördinaten-label van een gegeven punt verandert als men overstapt naar een systeem dat met een constante snelheid ten opzichte van het eerste beweegt.) Het blijkt dat onder een Lorentztransformatie de nieuwe coördinaten van een punt in de ruimtetijd er nu uitzien als:

$$\begin{cases} t' &= \gamma(t - vx/c^2) \\ x' &= \gamma(x - vt) \\ y' &= y \\ z' &= z \end{cases}$$

met $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ de Lorentzfactor. Men kan dit ook in matrixvorm schrijven:

$$\begin{bmatrix} ct' \\ x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix}.$$

met $\beta = \frac{v}{c} = \frac{\|\vec{v}\|}{c}$ en $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$.

Definitie

Nu is het eenvoudig om een meer precieze notie van het begrip *viervector* te geven. Een viervector is elke set van vier getallen die transformeert als de positievector onder Lorentztransformatie. Het blijkt immers dat er bijzonder veel vectoren uit de klassieke mechanica zijn, zoals snelheid, kracht, elektrische stroomdichtheid,... waaraan men op natuurlijke wijze een vierde component kan toevoegen, en zodoende een goede viervector krijgen.

Grootheden die aan bovenstaande definitie voldoen zijn eigenlijk *contravariante* viervectoren. De positievector zelf is dus ook een contravariante viervector. Men definieert voor elke contravariante viervector U^μ ook een geassocieerde *covariante* vector U_ν als volgt:

$$U_\nu = \eta_{\mu\nu} U^\mu$$

De omgekeerde weg is ook mogelijk:

$$U^\mu = \eta^{\mu\nu} U_\nu$$

hierbij is $\eta^{\mu\nu}$ de inverse matrix van $\eta_{\mu\nu}$, en heeft toevallig precies dezelfde componenten.

Voorbeelden

Viersnelheid

Een object dat beweegt doorheen de ruimte(tijd), kan men beschrijven met een parameterisatie van de positie-viervector van het object: $x^\mu(\tau)$. Men definieert dan de viersnelheid ruw gesproken als de afgeleide van deze ruimtetijds-positie. Meer precies is:

$$u^\mu = \frac{dx^\mu}{d\tau}$$

Deze uitdrukking is wel alleen waar indien men de parameter τ langs het pad gelijk neemt aan de eigentijd. In termen van de snelheid van het object is

$$u^\mu = \gamma(c, \vec{v})$$

Hierbij is \vec{v} de gewone snelheidsvector van het object (met drie componenten dus), c de lichtsnelheid en γ de Lorentz-factor. Het is duidelijk dat dit een veralgemening is van het gewone begrip van snelheid in mechanica.

Vier-kracht

Gegeven de bovenstaande uitdrukking voor de vier-snelheid kan men eenvoudig het viermomentum definiëren als volgt:

$$P^\mu = m_0 u^\mu$$

met m de rustmassa. Vervolgens is het vrij natuurlijk om de kracht inwerkend op een voorwerp te definiëren als de tijdsafgeleide van het momentum. Wederom is de tijdsafgeleide een afgeleide naar de eigentijd. (Wat, gegeven een bewegend object de enige natuurlijke notie van tijd is.) In symbolen:

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{P}}{d\tau}.$$

Wederom kan men dit uitdrukken in termen van de beter bekende krachtvector \mathbf{f} met drie componenten: We kunnen nu de veralgemening van de tweede wet van Newton opschrijven in de vorm van vier-vectoren:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{A} = \left(\gamma \frac{d\gamma}{dt} mc, \gamma \mathbf{f} \right).$$

Met $\mathbf{f} = m \left(\frac{d\gamma}{dt} \mathbf{u} + \gamma \frac{d\mathbf{u}}{dt} \right).$

Referenties

- Charles W. Misner, Kip S. Thorne & John A. Wheeler, *Gravitation*, ISBN 0716703440
- Rindler, W. *Introduction to Special Relativity (2nd edn.)* (1991) Clarendon Press Oxford ISBN 0-19-853952-5
- R. d'Inverno, *Introducing Einstein's Relativity*, Oxford University Press, ISBN 0198596863

Kwantummechanica

Kwantummechanica

Kwantummechanica
$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
Onzekerheidsrelatie
Algemene inleiding... ^[1]
Achtergrond
<ul style="list-style-type: none"> Klassieke mechanica Interferentie Hamiltonformalisme
Fundamentele begrippen
<ul style="list-style-type: none"> Kwantumtoestand · Golffunctie · Postulaten Superpositie · Onzekerheidsprincipe Schrödingervergelijking · Tunneleffect Uitsluitingsprincipe Diracnotatie
Gevorderde onderwerpen
<ul style="list-style-type: none"> Interpretatie Klein-Gordonvergelijking Dirac-vergelijking Kwantumveldentheorie Kwantumgravitatie

Experimenten

Schrödingers kat
 Tweespletenexperiment
 Tunneleffect
 Stern-Gerlach-experiment

Wetenschappers

Planck · Einstein · Bohr
 · Sommerfeld · Bose ·
 Kramers · Heisenberg ·
 Born · Jordan · Pauli ·
 Dirac · de Broglie ·
 Schrödinger · von
 Neumann · Wigner ·
 Feynman · Bohm ·
 Everett · Bell

Kwantummechanica is een natuurkundige theorie^[2] die het gedrag van materie en energie met interacties van kwanta op atomaire en subatomaire schaal beschrijft. De ontwikkeling ervan sinds het begin van de 20e eeuw kan, samen met die van de relativiteitstheorie, beschouwd worden als de overgang van de klassieke natuurkunde naar de moderne natuurkunde.

Algemeen overzicht

In de kwantumtheorie wordt de werkelijkheid op een fundamenteel andere manier benaderd dan in de klassieke natuurkunde, waarin ervan wordt uitgegaan dat er een waarnemer-onafhankelijke werkelijkheid is en natuurkundige grootheden continue variabelen zijn, die in elke gewenste combinatie gemeten kunnen worden. Meetonauwkeurigheden zijn in de klassieke natuurkunde een praktisch probleem. In de kwantumtheorie (althans in de breed aangehangen Kopenhaagse interpretatie van Niels Bohr en Werner Heisenberg) variëren natuurkundige grootheden stapsgewijs (met 1 kwantum tegelijk) en is er geen waarnemer-onafhankelijke werkelijkheid. Door dit tweede fundamentele verschil met de klassieke natuurkunde is het principieel uitgesloten om het effect van de waarneming uit te schakelen: de keuze die de waarnemer maakt bij het opzetten van zijn experiment bepaalt in belangrijke mate de uitkomst daarvan. Het product van de onnauwkeurigheden van de gelijktijdige metingen van twee grootheden (bijvoorbeeld plaats en impuls) heeft volgens de onzekerheidsrelatie van Heisenberg een minimale waarde. Is de ene grootheid met de grootst mogelijke nauwkeurigheid gemeten, dan is de andere onvermijdelijk geheel onbepaald en onbepaalbaar. Deze relatie is zelf echter wel nauwkeurig en objectief geformuleerd. Op macroscopische schaal is de invloed van kwantummechanische beperkingen op de nauwkeurigheid meestal niet meetbaar en gaat de kwantummechanica over in de klassieke natuurkunde: dat heet het correspondentieprincipe.

De kwantummechanica doet bovendien slechts statistische uitspraken over een reeks van waarnemingen. Dat heeft tot gevolg dat het gedrag van een individueel elementair deeltje slechts in termen van waarschijnlijkheid kan worden beschreven. Die waarschijnlijkheden worden beschreven door het modulus in het kwadraat van de complexwaardige golf functies, die de kansdichtheid geven van het meten van een waarde van een fysische grootheid zoals bv. plaats, snelheid en spin, zoals de kwantummechanische versie van het impulsmoment genoemd wordt.

De beschrijving van systemen door middel van een golf functie betekent dat deeltjes zich, afhankelijk van de manier waarop ze worden waargenomen, soms als een deeltje in klassieke zin, maar soms als een golfverschijnsel gedragen. Zo kunnen bijvoorbeeld elektronenbundels, net als lichtbundels, brekingsverschijnselen en interferentie en diffractie vertonen. Andersom kan licht ook beschouwd worden als bestaande uit quanta, die in het geval van licht fotonen genoemd worden, met een energie E :

$$E = h\nu$$

waarin h de constante van Planck en ν (de Griekse letter nu) de frequentie van het licht.

Bij het formuleren van de kwantummechanica in termen van golffuncties blijkt dat bepaalde fysische grootheden uitsluitend waarden kunnen aannemen uit een bepaalde verzameling, die van de situatie en de te meten grootheid afhangt. Een bekend voorbeeld is het feit dat elektronen in een atoom slechts bepaalde energieniveaus kunnen bezetten, wat aanleiding geeft tot spectraallijnen in het licht dat door het atoom wordt uitgezonden. Een ander opmerkelijk feit in de kwantummechanica is dat fysische grootheden van een systeem in sommige combinaties niet tegelijkertijd met willekeurige nauwkeurigheid bekend kunnen zijn. De belangrijkste voorbeelden hiervan zijn plaats x en impuls p , en tijd t en energie E . Dit feit staat bekend als de onzekerheidsrelatie van Heisenberg. De onnauwkeurigheden Δ in deze grootheden zijn naar onder in grootte begrensd door de volgende ongelijkheden:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

Dit volgt rechtstreeks uit de aanname van golfeigenschappen en uit de wiskundige eigenschap van de Fouriertransformatie. Er zijn nog tal van andere onzekerheidsrelaties tussen paren van fysische grootheden, die daarom niet-commuterend worden genoemd. In jargon zegt men dat bij meten (waarnemen) van een willekeurige variabele de golffunctie wordt geprojecteerd op een eigentoestand. Dit betekent dat alle andere informatie (over alle andere observabelen) verloren gaat. De onzekerheidsrelatie tussen twee willekeurige niet-commuterende grootheden wordt gegeven door:

$$\Delta A \Delta B \geq \frac{1}{2i} |\langle [A, B] \rangle|$$

De kwantummechanica maakt onderscheid tussen bosonen en fermionen. Het onderscheid zit in de spin (losweg draaiing) van het deeltje, een fundamentele eigenschap die alleen van het type deeltje afhangt en de waarden $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots$ kan aannemen. De deeltjes met heeltallige spin heten bosonen, de andere worden fermionen genoemd. Een belangrijk resultaat met betrekking tot dit onderscheid is het uitsluitingsprincipe van Pauli, dat zegt dat er geen twee fermionen naast elkaar in dezelfde toestand kunnen bestaan. Voor de bosonen is dat wel mogelijk.

Geschiedenis

"Oude" kwantumtheorie

Een eerste aanzet tot de theorie van de kwantummechanica is de Wet van Planck gegeven door Max Planck in zijn studie gepubliceerd in 1900 *Zur Theorie des Gesetzes der Energie-Verteilung im Normal-Spektrum* over het probleem van de straling van een zwart lichaam. Planck kan de experimentele resultaten voor deze straling verklaren door aan te nemen dat licht korrelig is en in standaardpakketjes (kwanta) komt. De kwantummechanica is een intuïtief moeilijk te doorgronden theorie, die in de beginperiode op veel weerstand stuitte. Albert Einstein had later bezwaar tegen de kansverdeling van deeltjes: "God dobbelt niet". Hij geloofde dat de onzekerheden van de kwantumtheorie niet reëel waren, maar dat er 'verborgen variabelen' waren, die we nog niet kennen, die alsnog de theorie deterministisch zouden maken. Later is dit in de stelling van Bell ontkracht. Ook Max Planck zelf meende dat 'zijn' kwantumtheorie later vervangen zou worden door een meer deterministische theorie zonder 'vage' statistische eigenschappen. Latere experimenten hebben die positie echter onhoudbaar gemaakt. Maar Einstein zelf gaf in 1905 Plancks methode een nieuwe toepassing. Hij kon er het foto-elektrisch effect mee verklaren. Planck had hier weer bezwaar tegen.

Niels Bohr kwam met zijn baanmodel voor de elektronen rond een atoom. Louis-Victor de Broglie kwam met het idee dat deeltjes als golven gezien kunnen worden (golf-deeltje dualiteit). Arnold Sommerfeld verfijnde het

baanmodel van Niels Bohr.

Latere ontwikkelingen

Later kwamen Heisenberg en Schrödinger elk apart met een benaderingswijze voor de kwantummechanica. De benadering van Heisenberg is gebaseerd op het gebruik van matrices en staat dan ook bekend als *matrixmechanica*, terwijl die van Schrödinger gebruik maakt van een golfvergelijking en daarom bekend staat als golfmechanica. Later vatten Paul Dirac en John von Neumann de twee benaderingen axiomatisch samen en breidden ze uit.

De theorie is echter nog geen goede beschrijving van *alle* natuurkundige verschijnselen. Het belangrijkste probleem is dat er nog geen kwantumtheorie van de zwaartekracht bestaat - een combinatie van de kwantummechanica met de algemene relativiteitstheorie wordt al ettelijke decennia gezocht, maar er is nog geen bevredigende oplossing. In de jaren 90 werden supersnaren als de meest veelbelovende theorie beschouwd; tegenwoordig lijkt de snaartheorie onderdeel te zijn van een algemenere M-theorie, waarover echter nog weinig bekend is. Een theorie die tracht kwantumtheorie en zwaartekracht te verenigen, staat in de natuurkunde bekend als theorie van alles.

Praktische toepassingen

Hoe controversieel de theorie in het begin ook was, veel experimenten hebben inmiddels aangetoond dat de kwantummechanica de werkelijkheid zeer nauwkeurig beschrijft. De kwantummechanica is zo een van de succesvolste natuurkundige theorieën aller tijden geworden. Ze heeft dan ook veel toepassingen; de werking van veel technologieën berust op eigenschappen van de materie die niet op klassieke wijze te beschrijven zijn: de kernenergie, radioactiviteit, alle halfgeleidertechnologie en dus de transistor, de MRI-scan, supergeleiding en de laser. Voorts is geen enkele chemische reactie verklaarbaar zonder kwantummechanica.

Filosofische consequenties

De gevolgen die de onzekerheidsrelatie van Heisenberg met zich mee brengt, zijn niet alleen natuurkundig maar ook filosofisch enorm. Als eerste de natuurkundige gevolgen: in de kwantummechanica beschrijven we het deeltje, zoals gezegd, met een golf functie en die functie hangt af van de omgeving waarin het zich bevindt. Zowel de positie als impuls (snelheid) van het elektron worden bepaald via de golf functie. De onzekerheidsrelatie stelt dat de onzekerheid in de bepaling van de plaats, vermenigvuldigd met de onzekerheid in bepaling van de impuls nooit kleiner kan zijn dan een bepaalde waarde. Wordt de onzekerheid van de een kleiner, dan wordt de onzekerheid van de ander per definitie evenredig groter. Dit is een enorme natuurkundige consequentie. Waar de klassieke natuurkunde, die van voor de kwantummechanica, stelde dat we alles in het universum *exact* kunnen weten als we maar genoeg metingen doen en de metingen nauwkeurig genoeg zijn, daar stelt de kwantummechanica dat we alleen de waarschijnlijkheid kunnen bepalen en dat de onzekerheid in het bepalen van die waarschijnlijkheid gekoppeld is aan andere onzekerheden. Als de een kleiner wordt gemaakt, dan wordt de ander groter. Deze onzekerheid ontstaat niet door onnauwkeurigheid van de gebruikte apparatuur, maar is fundamenteel.

Er zijn verschijnselen die tot nu toe alleen verklaard kunnen worden als we de onzekerheidsrelatie gebruiken. De filosofische implicatie daarvan zou zijn dat processen in de natuur plaatsvinden niet *ondanks*, maar *dankzij* de onzekerheidsrelatie van Heisenberg. De filosofische implicatie die de kwantummechanica met zich meebrengt is dat we moeten spreken over 'de waarschijnlijkheid van de positie van een elektron', in plaats van 'de positie van een elektron'. De Heisenberg-relatie stelt bovendien dat er een minimum onzekerheid is in de bepaling. Een filosofische interpretatie van die onzekerheid is 'willekeur' en in die interpretatie zou dus de kwantummechanica dicteren dat er een fundamentele willekeur in de natuur om ons heen is. Dit in contrast met de klassieke, deterministische natuurkunde voordien, die *wel* een fundamentele willekeur uitsloot. Dit stoorde dan ook ten eerste de natuurkundigen die hun denkbeelden in de 19e eeuw hadden opgedaan zoals Einstein en Planck. De meesten van deze 'oudere' natuurkundigen hebben de kwantummechanica daarom ook nooit volledig aanvaard.

Volgens een bepaalde zienswijze binnen de kwantummechanica bestaan ten gevolge van het onzekerheidsprincipe deeltjes niet eens totdat er een waarneming plaatsvindt. Schrödinger was door deze zienswijze dermate ontstemd dat hij het beroemde voorbeeld van de kat beschreef, die door dit effect tegelijkertijd zowel dood als levend was. Schrödinger hoopte met dit onmogelijke voorbeeld te laten zien dat deze filosofie belachelijk was en dat men dit denkbeeld maar snel moest laten vallen. Tot zijn verdriet is bijna het tegenovergestelde gebeurd en is Schrödingers kat een geheel eigen leven gaan leiden.

Een ander curieus gevolg van het onzekerheidsprincipe is dat elk deeltje dat zich van A naar B verplaatst elk mogelijk pad tussen A en B daarvoor gebruikt. Voor iedere waarnemer is het echter duidelijk dat dit zeker op het niveau van de klassieke natuurkunde niet is waar te nemen. Theoretici hebben hiermee geworsteld totdat Richard Feynman aantoonde dat alle paden tegen elkaar wegvallen op één na; Feynman won met deze ontdekking een Nobelprijs.

Dirac-formalisme

De kwantummechanica is door de Britse fysicus Paul Dirac van een abstracte, naar hem genoemde bra-ket-notatie voorzien:

1. De toestand van een fysisch systeem wordt gegeven door een vector $|\psi\rangle$ in een ruimte die geen Hilbertruimte is (wat wel, bleef bij Dirac onduidelijk).
2. Voor elke willekeurige toestandsvector $|\psi\rangle$ geldt: $\langle\psi|\psi\rangle = 1$, waarbij $\langle\psi|$ de hermitisch geconjugeerde is van $|\psi\rangle$.
3. De kans dat een systeem met toestandsvector $|\Psi\rangle$ zich in toestand $|\alpha\rangle$ bevindt wordt gegeven door $P(\alpha, \Psi) = |\langle\alpha|\Psi\rangle|^2$
4. Meetbare grootheden corresponderen met hermitische operatoren die de toestandsvector als argument hebben; deze bezitten reële eigenwaarden die de numerieke waarde van die meetbare grootheden aangeven.
5. Elementaire deeltjes blijken een spin S te hebben. Dit is de kwantummechanische versie van het klassieke impulsmoment. Voor de drie componenten van deze vectorgrootheid (S_x, S_y, S_z) gelden de commutatierelaties:
 1. $[S_x, S_y] = i\hbar S_z$
 2. $[S_z, S_x] = i\hbar S_y$
 3. $[S_y, S_z] = i\hbar S_x$
6. Elementaire deeltjes kunnen worden onderverdeeld in bosonen en fermionen. Bosonen hebben een golf functie die 'even' is (symmetrisch in plaats en tijd); fermionen hebben een golf functie die 'oneven' is (anti-symmetrisch in plaats en tijd). Dit verklaart waarom fermionen aan het Pauli-verbod onderworpen zijn en bosonen niet.

Schrödingervergelijking

In de meest simpele vorm worden deeltjes in de kwantummechanica beschreven als oplossing van de Schrödingervergelijking. In de plaats-representatie is deze golf functie $\Psi(\vec{x}, t)$ een oplossing van deze vorm van de Schrödingervergelijking:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V(\vec{x}) \Psi$$

Die vergelijking heeft de wiskundige vorm van een golfvergelijking, dus volgen hieruit de golfeigenschappen. Hierin is i de imaginaire eenheid (met $i^2 = -1$), $\partial/\partial t$ de partiële afgeleide naar de tijd, \hbar de constante van Dirac, m de massa, ∇^2 de Laplaceoperator, V de potentiaal en \vec{x} de plaatsvector.

In een meer algemene vorm kan de tijdsafhankelijke Schrödingervergelijking geschreven worden als:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H \Psi$$

Hierbij is H de hamiltoniaan, een operator die de totale energie weergeeft. Vaak wordt er voor gekozen om de tijdonafhankelijke Schrödingervergelijking op te lossen voor $\psi(\vec{x})$.

$$E\psi(\vec{x}) = H\psi(\vec{x})$$

De tijdsafhankelijke golf functie wordt dan gegeven door: $\Psi(\vec{x}, t) = e^{-i\frac{E}{\hbar}t}\psi(\vec{x})$.

Kwantumchemie

In de kwantumchemie wordt de kwantumtheorie toegepast op chemische verschijnselen. Hiermee kan verklaard worden waarom sommige chemische elementen zich kunnen verbinden met bepaalde andere chemische elementen, hoeveel energie daarbij vrijkomt of juist geabsorbeerd wordt.

Externe link

- Reciprocal System of Physical Theory (RST) ^[3]

Noten

[1] http://nl.wikibooks.org/wiki/In_mensentaal/Kwantummechanica

[2] De termen *kwantummechanica* en *kwantumfysica* worden soms verward. In het algemeen kan men zeggen dat *kwantummechanica* de onderliggende theorie is, en *kwantumfysica* de toepassing in de natuurkunde, net zoals *kwantumchemie* de toepassing in de scheikunde is. In de praktijk worden de beide termen nogal eens door elkaar gebruikt, echter met een vooral onder natuurwetenschappers sterke voorkeur voor *kwantummechanica*. De kwantummechanica is nauwelijks goed uit te leggen zonder uitgebreide voorbeelden. Die voorbeelden worden gewoonlijk aan de natuurkunde ontleend, waardoor het verschil tussen *kwantummechanica* en *kwantumfysica* in de (onderwijs)praktijk soms wat vervaagt.

[3] <http://www.lrcphysics.com>

Natuurkunde

Akoestiek · Astrofysica · Astronomie · Atoomfysica · Biofysica · Deeltjesfysica · Elektromagnetisme · Fysische chemie · Geofysica · Kernfysica · Kwantummechanica · Mathematische fysica · Mechanica · Medische fysica · Meteorologie · Metrologie · Molecuulfysica · Optica · Plasmafysica · Relativiteitstheorie · Statistische thermodynamica · Stromingsleer · Thermodynamica · Vastestoffysica



Zie de categorie [\[/wiki/Commons:Category:Quantum mechanics?uselang=nl#mw-subcategories Quantum mechanics\]](#) van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.



Wikibooks heeft een studieboek over dit onderwerp: *In mensentaal: Kwantummechanica*.

Aharonov-Bohm-effect

Het **Aharonov-Bohm-effect**, ook wel **Ehrenberg-Siday-Aharonov-Bohm-effect** genoemd, is een kwantummechanisch fenomeen waarbij een geladen deeltje wordt beïnvloed door elektromagnetische velden in gebieden die voor het deeltje onbereikbaar zijn. De eerste vermelding van een dergelijk effect werd voorspeld door Werner Ehrenberg en R.E. Siday in 1949, en gelijkaardige effecten werden bestudeerd door Yakir Aharonov en David Bohm in 1959. Men heeft voorspeld dat deze effecten optreden bij zowel magnetische als elektrische velden, maar ze zijn eenvoudiger te onderzoeken in het magnetische geval. De belangrijkste consequentie van Aharonov-Bohm-effecten is dat kennis van het elektromagnetische veld dat *lokaal* op een deeltje inwerkt niet volstaat om correct het kwantummechanisch gedrag ervan te voorspellen.

Na de publicatie van hun paper in 1959 kwam het Bohm ter ore dat het effect tien jaar eerder reeds was voorspeld door Siday en Ehrenberg. Bohm en Aharonov vermeldten dit in hun tweede paper (Peat, 1997, p. 192).

Het geval dat het vaakst wordt aangehaald, soms ook wel het **Aharonov-Bohm solenoïde effect** genoemd, doet zich voor wanneer een geladen deeltje dat over een lange spoel beweegt een faseverschuiving ondergaat onder invloed van een magnetisch veld binnenin de spoel, hoewel het veld nul is in de zone waarin het deeltje zich voortbeweegt. Deze faseverschuiving is experimenteel vastgesteld door het ontstaan van interferentiefranjes. Een elektrisch Aharonov-Bohm-effect werd eveneens voorspeld en experimenteel waargenomen, waarbij een deeltje wordt beïnvloed door zones met verschillende elektrische potentialen maar zonder een elektrisch veld.

Een algemeen overzicht kan gevonden worden in Murry Peshkin en Akira Tonomura (1989).

Magnetisch Aharonov-Bohm-effect

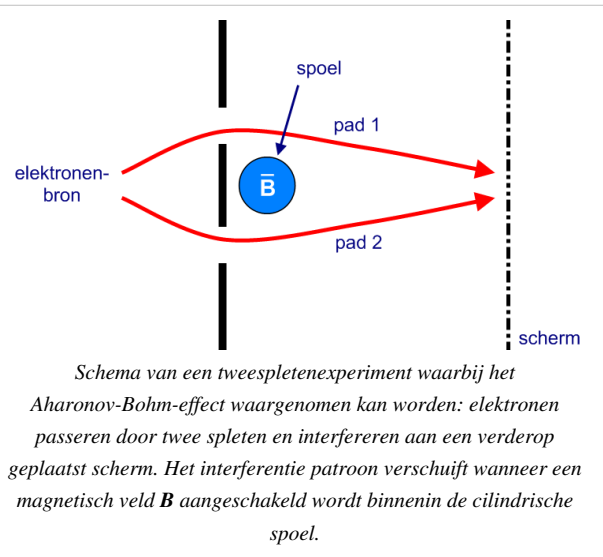
Het magnetisch Aharonov-Bohm-effect kan opgevat worden als een gevolg van de vereiste van kwantummechanische invariantie ten opzichte van de gekozen ijk voor de vectorpotentiaal \mathbf{A} . Daaruit volgt dat een deeltje met elektrische lading q dat zich voortbeweegt over een pad P in een zone zonder magnetisch veld ($\mathbf{B} = 0 = \nabla \times \mathbf{A}$) een faseverandering φ ondergaat, in SI-eenheden gegeven door

$$\varphi = \frac{q}{\hbar} \int_P \mathbf{A} \cdot d\mathbf{x},$$

Tussen twee willekeurige paden met dezelfde begin- en eindpunten treedt dan een faseverschil $\Delta\varphi$ op bepaald door de magnetische flux Φ doorheen het gebied tussen de twee paden (met behulp van de Stelling van Stokes en $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}$), gegeven door

$$\Delta\varphi = \frac{q\Phi}{\hbar}.$$

Dit faseverschil kan waargenomen worden door een spoel te plaatsen tussen de spleten van een tweespletenexperiment. Een ideale spoel omvat een magnetisch veld \mathbf{B} , maar produceert geen magnetisch veld aan de buitenkant van de cilinder, en bijgevolg ondervinden geladen deeltjes (zoals bijvoorbeeld elektronen) die aan de buitenkant van de spoel passeren, geen invloed van de spoel (in de klassieke visie). Er is echter wel een vectorpotentiaal aanwezig buiten de spoel, en bijgevolg is de relatieve fase van de deeltjes die door één van de spleten passeren verschoven ten opzichte van de deeltjes door de andere spleet (wanneer de stroom door de spoel wordt ingeschakeld). Dit veroorzaakt een meetbare verschuiving van de interferentiefransen op het verderop geplaatste scherm.



Hetzelfde fase-effect is verantwoordelijk voor de gekwantiseerde magnetische flux in supergeleidende ringen. Deze kwantisatie treedt op omdat de golffuncties in de ring éénduidig bepaald moeten zijn: het faseverschil $\Delta\varphi$ bij het éénmaal doorlopen van de ring moet een geheel veelvoud zijn van 2π , en de flux doorheen de ring moet dus een veelvoud zijn van $h/2e$ (de lading q is hier $2e$ aangezien we Cooperparen beschouwen). Deze kwantisatie van de magnetische flux was al voorspeld vóór Aharonov en Bohm, door London (1948) die een fenomenologisch model gebruikte om dit resultaat af te leiden.

Het magnetisch Aharonov-Bohm-effect werd experimenteel bevestigd door Osakabe et al. (1986), na eerder werk samengevat in Olariu en Popèscu (1984). De toepassingen ervan blijven uitbreiden. Webb et al. (1985) demonstreerden Aharonov-Bohm-oscillaties in gewone, niet-supergeleidende ringen. Voor een bespreking hiervan verwijzen we naar Schwarzschild (1986) en Imry & Webb (1989). Bachtold et al. (1999) namen het effect waar in koolstof-nanobuizen, zie ook Kong et al. (2004).

Elektrisch Aharonov-Bohm-effect

De fase van de golffunctie hangt niet enkel af van de magnetische vectorpotentiaal, maar eveneens van de scalaire elektrische potentiaal. Als we een situatie ontwerpen waarbij de elektrostatiche potentiaal verschilt voor twee paden van een deeltje, in een gebied waarin het elektrische veld nul is, verwachten we opnieuw een meetbaar Aharonov-Bohm interferentiefenomeen omwille van de faseverschuiving. We merken nogmaals op dat we met een klassieke redenering geen enkel effect verwachten.

Uit de Schrödingervergelijking volgt dat de fase van een eigenfunctie met energie E varieert volgens $\exp(-iEt/\hbar)$. De energie zal echter afhangen van de elektrostatiche potentiaal V voor een deeltje met lading q . In het bijzonder voor een gebied met constante potentiaal V mogen we de elektrische potentiële energie qV eenvoudigweg optellen bij E . Dit resulteert in een faseverschuiving:

$$\Delta\phi = -\frac{qVt}{\hbar},$$

waarin t de tijd voorstelt die het deeltje doorbrengt in de invloed van de potentiaal.

De oorspronkelijke theoretische aanpak van dit effect veronderstelde een experiment waarbij ladingen via twee paden passeren door geleidende cilinders, die de deeltjes afschermen van externe elektrische velden in de gebieden waar ze doorheen bewegen, maar die toch het opwekken van een elektrische potentiaal toelaten door de cilinders op te laden. Het bleek echter dat dit praktisch moeilijk te realiseren was. Een ander experiment werd voorgesteld,

bestaande uit een ringvormige structuur onderbroken door tunnel barrières, waarbij beide helften van de ring op een andere potentiaal staan. Deze situatie resulteert op gelijkaardige wijze als hierboven in een Aharonov-Bohm-faseverschuiving, en werd experimenteel waargenomen in 1998.

Referenties

- Aharonov, Y., Bohm D. (1959). *Significance of electromagnetic potentials in quantum theory*. *Phys. Rev.* **115**: 485-491. DOI:10.1103/PhysRev.115.485 ^[1].
- Aharonov, Y., Bohm D. (1961). *Further Considerations on Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory*. *Phys. Rev.* **123**: 1511-1524. DOI:10.1103/PhysRev.123.1511 ^[2].
- Bachtold, A., C. Strunk, J. P. Salvetat, J. M. Bonard, L. Forro, T. Nussbaumer and C. Schonenberger ^[3], "Aharonov-Bohm oscillations in carbon nanotubes", *Nature* **397**, 673 (1999).
- Ehrenberg, W., Siday, R. E. (1949). *The Refractive Index in Electron Optics and the Principles of Dynamics*". *Proc. Phys. Soc.* **B62**: 8-21. DOI:10.1088/0370-1301/62/1/303 ^[4].
- Imry, Y. and R. A. Webb, "Quantum Interference and the Aharonov-Bohm Effect," *Scientific American*, **260**(4), April 1989.
- Kong, J., L. Kouwenhoven, and C. Dekker, "Quantum change for nanotubes", *Physics Web* ^[5] (July 2004).
- London, F. "On the problem of the molecular theory of superconductivity," *Phys. Rev.* **74**, 562–573 (1948).
- Murray, M. *Line Bundles* ^[6], (2002).
- Olariu, S. and I. Iovitzu Popèscu, "The quantum effects of electromagnetic fluxes," *Rev. Mod. Phys.* **57**, 339–436 (1985).
- Osakabe, N., T. Matsuda, T. Kawasaki, J. Endo, A. Tonomura, S. Yano, and H. Yamada, "Experimental confirmation of Aharonov-Bohm effect using a toroidal magnetic field confined by a superconductor." *Phys Rev A.* **34**(2): 815-822 (1986). Abstract and full text. ^[7]
- Peat, F. David ^[8], *Infinite Potential: The Life and Times of David Bohm* (Addison-Wesley: Reading, MA, 1997). ISBN 0-201-40635-7.
- Peshkin, M. ^[9] and Tonomura, A., *The Aharonov-Bohm effect* (Springer-Verlag: Berlin, 1989). ISBN 3-540-51567-4.
- Schwarzschild, B. "Currents in Normal-Metal Rings Exhibit Aharonov-Bohm Effect." *Phys. Today* **39**, 17–20, Jan. 1986.
- Sjöqvist, E. "Locality and topology in the molecular Aharonov-Bohm effect," *Phys. Rev. Lett.* **89** (21), 210401/1–3 (2002).
- van Oudenaarden, A., M. H. Devoret, Yu. V. Nazarov, and J. E. Mooij, "Magneto-electric Aharonov-Bohm effect in metal rings," *Nature* **391**, 768–770 (1998).
- Webb, R., S. Washburn, C. Umbach, and R. Laibowitz. *Phys. Rev. Lett.* **54**, 2696 (1985).

Referenties

- [1] <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.115.485>
- [2] <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.123.1511>
- [3] <http://pages.unibas.ch/phys-meso/>
- [4] <http://dx.doi.org/10.1088/0370-1301/62/1/303>
- [5] <http://physicsweb.org/articles/world/17/7/3/1>
- [6] http://www.maths.adelaide.edu.au/michael.murray/line_bundles.pdf
- [7] http://prola.aps.org/abstract/PRA/v34/i2/p815_1
- [8] <http://www.f davidpeat.com/>
- [9] <http://www.phy.anl.gov/theory/staff/mp.html>

Algemene bespreking van Bose-Einsteincondensatie

De **algemene bespreking van Bose-Einsteincondensatie**, de eigenschap van supervloeibaarheid, lijst van elementen waarin reeds een Bose-Einsteincondensaat is gecreëerd, en condensatie van fermionen en bosonen.

Bose-Einsteincondensatie nader beschouwd

Klassiek ideaal gas en ideaal kwantumgas

Een *ideaal gas* is een idealisering van de werkelijkheid waarbij de interacties tussen de moleculen in het gas verwaarloosd worden, zodanig dat enkel nog de kinetische energie van de moleculen in rekening gebracht moet worden. Om als goede benadering gebruikt te kunnen worden moeten de afstanden tussen de moleculen groot en de interacties (aantrekkende of afstotende krachten) zwak zijn. (Hoewel ze niet in rekening gebracht worden, zijn deze interacties wel noodzakelijk om een thermodynamisch evenwicht te kunnen verkrijgen.) Een dergelijk ideaal gas dat zich volgens de wetten van de klassieke fysica gedraagt wordt een klassiek ideaal gas genoemd.

In de statistische thermodynamica wordt de verdeling van deeltjes over energietoestanden onderzocht. Het aantal deeltjes dat zich in een bepaalde energietoestand bevindt, wordt het bezettingsgetal van die toestand genoemd.

Wanneer men een klassiek ideaal gas statistisch bekijkt, ziet men dat dit betekent dat het gemiddeld aantal deeltjes per energieniveau veel kleiner is dan één. De vraag die zich dan opdringt is: wanneer is dit precies het geval? De kwantummechanica leert ons dat de "de Broglie-golfenlengte" die wordt geassocieerd met een deeltje met impuls p als volgt beschreven wordt:

$$\lambda_{DB} = \frac{h}{p} \left(= \frac{h}{\sqrt{3mk_B T}} \right)$$

Wanneer deze de Broglie-golfenlengte veel kleiner is dan de intermoleculaire afstand bevinden we ons in het klassieke ideaalgasregime. Bij atmosferische druk en kamertemperatuur is de intermoleculaire afstand minstens duizend maal groter dan λ_{DB} , dus dan is er sprake van een klassiek ideaal gas. Wanneer echter de intermoleculaire afstand en λ_{DB} van dezelfde grootteorde worden, zullen de materiegolven van de deeltjes elkaar beginnen overlappen en zullen kwantumeffecten naar voren treden. We hebben dan te maken met een ideaal kwantumgas.

De klassieke Maxwell-Boltzmannstatistiek is echter niet in staat om de hiermee gepaard gaande kwantumeffecten naar voren te brengen. Hiervoor is er een ander soort statistiek nodig, namelijk Bose-Einsteinstatistiek voor bosonen en Fermi-Diracstatistiek voor fermionen. Bij Bose-Einsteinstatistiek is er geen enkele restrictie op de bezettingsgetallen voor de energieniveaus buiten het feit dat ze positieve gehele getallen moeten zijn. Bij Fermi-Dirac statistiek daarentegen mogen de bezettingsgetallen enkel 0 of 1 zijn, wat het gevolg is van het uitsluitingsprincipe van Pauli.

Einstein, die zich de volledige draagwijdte van de door Bose voor lichtdeeltjes gebruikte statistiek realiseerde, paste deze toe op een gas van massadeeltjes. De resultaten die hij verkreeg kwamen in zeer grote mate overeen met de resultaten die men met gewone Boltzmannstatistiek verkrijgt. Voor zeer lage temperaturen was er echter een duidelijk verschil tussen de twee statistieken. Voor T gaande naar nul bekomt men bij de Bose-Einsteinstatistiek iets heel vreemds. De chemische potentiaal μ gaat voor zeer kleine T naar $\mu_0 = \epsilon_0$ (de grondtoestandenergie). Het gevolg is:

- het gemiddelde bezettingsgetal voor alle energieniveaus boven het grondtoestandniveau wordt nul;
- het bezettingsgetal van het grondtoestandniveau zelf wordt oneindig.

Met andere woorden, alle deeltjes condenseren naar de grondtoestand. Deze situatie waarbij een macroscopisch aantal van de deeltjes zich in dezelfde kwantumtoestand bevindt noemt men Bose-Einsteincondensatie.

Voor het optreden van Bose-Einsteincondensatie is het behoud van het aantal deeltjes noodzakelijk. Dit is de reden waarom Einstein en niet Bose bij het condensaat terecht kwam. Bij fotonen (lichtdeeltjes) is er geen behoud van deeltjes; als in een fotonengas de temperatuur te laag wordt, verdwijnen de fotonen gewoon in het vacuüm, een optie die massadeeltjes niet hebben.

Ontaarde toestanden

Wanneer in de kwantummechanica de energie van verschillende kwantumtoestanden van een systeem of deeltje samenvallen dan zegt men dat deze toestanden ontaard zijn. Deze ontaarding (het samenvallen van de energie van deze toestandsniveaus) kan in bepaalde omstandigheden verdwijnen (bvb. het aanleggen van een elektrisch of magnetisch veld) waarbij de kwantumtoestanden verschillende energieën krijgen. Ook de grondtoestand kan ontaard zijn. In dit geval kan er een **non-simpel BEC** of een **gefragmenteerd BEC** (Ref. [4]) ontstaan als de ontaarding wordt opgeheven. We krijgen in dit geval dan een systeem waarbij de energieën van de verschillende *grondtoestandsniveaus* zeer dicht bij elkaar liggen zodat er in elk van deze niveaus zich een Bose-Einsteincondensaat kan vormen.

Bijvoorbeeld, een systeem met een combinatie van twee kwantumtoestanden met gelijk energieniveau als grondtoestand (een *doublet*), kan een Bose-Einsteincondensaat hebben in elk van beide kwantumtoestanden. Hierbij zijn deze Bose-Einsteincondensaten verschillende entiteiten die afzonderlijk kunnen beïnvloed en bekeken worden. Het is dan ook een situatie waar onder andere handig gebruik van gemaakt wordt bij het creëren en onderzoeken van vortices (wervelingen) in Bose-Einsteincondensaten (Ref. [5]) (zie volgende paragraaf).

Supervloeibaarheid

Niet-interagerende bosonen condenseren, zoals Einstein in zijn paper van 1925 beschreef, maar ze zijn niet supervloeibaar. Het was Bogoliubov die in 1947 aantoonde dat zwak interagerende bosonen de eigenschap van supervloeibaarheid bezitten. Dat betekent dat hun viscositeit, wat zoiets als 'stroperigheid' betekent, gelijk aan nul wordt.

Het supervloeibaar zijn van een Bose-Einsteincondensaat heeft enkele belangrijke gevolgen voor de dynamica ervan. Een van die gevolgen is dat een Bose-Einsteincondensaat niet gewoon kan roteren zoals een star lichaam maar zijn draaimoment moet verdelen onder een soort draaikolken, vortices genaamd. Deze draaikolken zijn gekwantiseerd, wat betekent dat deeltjes die om een vortexlijn bewegen enkel draaimomenten kunnen hebben die behoren tot een discreet spectrum van waarden. Het creëren en waarnemen van vortices in een Bose-Einsteincondensaat zou dus een direct experimenteel bewijs leveren voor het supervloeibaar zijn van een Bose-Einsteincondensaat. Dit is intussen reeds veelvuldig gebeurd.

Enkele voorbeelden van methoden om vortices te creëren zijn:

- Door het creëren van de gewenste golf functie in een 2-componentenscondensaat (Ref. [5]). De deeltjes die de ene component vormen bevinden zich in een toestand die we $|1\rangle$ noemen en deze die de andere component vormen bevinden zich in een toestand die we $|2\rangle$ noemen. Men start nu met een systeem waarbij alle deeltjes zich in dezelfde toestand bevinden, bijvoorbeeld $|1\rangle$. Met behulp van een laser worden nu in een deel van de deeltjes een overgang naar toestand $|2\rangle$ gestimuleerd. Dit kan op een zodanige wijze gebeuren dat de nieuw gecreëerde component meteen de gewenste vortexgolf functie heeft. De deeltjes die na de creatie van de tweede component overblijven in toestand $|1\rangle$ zullen het gat in het midden van de vortex gevormd door de tweede component opvullen en hierdoor de stabiliteit van de vortex vergroten.
- Door met een laser door het condensaat te "roeren" (Ref. [19]). Dit is te vergelijken met het roeren in een kopje koffie. Door met een lepeltje erin rond te roeren ontstaat een draaikolk in de koffie (In een Bose-Einsteincondensaat krijgt men dan een rooster van gekwantiseerde wervels). Er ontstaan eveneens draaikolken in de koffie door het lepeltje snel genoeg in rechte lijn van de ene zijde naar de andere zijde van het kopje te bewegen. Wanneer met een fijne laserstraal hetzelfde in een condensaat wordt gedaan ontstaat daar

eveneens een rooster van vortices.

- Door de thermische wolk van niet gecondenseerde atomen te laten roteren (Ref. [20]).
- Door topologische fase-inprenting. Dit is te vergelijken met de eerstgenoemde methode (daar gebeurt de inprenting dynamisch), maar in dit geval worden de vortices gecreëerd door het variëren van parameters van de Hamiltoniaan van het systeem. In Ref. [21] werd dit gedaan door het magnetisch veld langs de as van de val adiabatisch te inverteren.

Fermi-atomen en moleculaire condensaten

Om een Bose-Einsteincondensaat te kunnen creëren moeten de gebruikte deeltjes zeker aan één voorwaarde voldoen: het moeten bosonen zijn. Dit houdt in dat het mogelijk is om met moleculen opgebouwd uit bosonische atomen een Bose-Einsteincondensaat te verkrijgen. Voor fermionen is het wegens het uitsluitingsprincipe van Pauli onmogelijk om een Bose-Einsteincondensaat te vormen. Wanneer echter twee fermionische atomen zich aan elkaar binden, ofwel als een molecuul ofwel als een Cooper-paar, hebben we wél met bosonen te maken en kan er dus Bose-Einsteincondensatie optreden.

Moleculaire condensaten

Het is pas in 2003 dat experimentele creatie van moleculaire Bose-Einsteincondensaten mogelijk is geworden. Hierbij start men echter niet met een gas van moleculen, maar met een gewoon mono-atomair gas dat men tot kwantumdegeneratie afgekoeld heeft (voor bosonen betekent dit dat men eerst een atomair Bose-Einsteincondensaat creëert (Ref. [13]), terwijl voor fermionen een toestand wordt gecreëerd waarbij alle deeltjes zich in de Fermizee bevinden (Ref. [14])). Uit dit atomair systeem worden dan moleculen gevormd door het magnetisch veld zodanig te variëren dat de atomen de Feshbach-resonantie doorlopen.

De moleculen die op deze manier gevormd worden bevinden zich in een hoge vibrationele energietoestand, van waaruit ze zeer snel ($< 100 \mu\text{s}$ Ref. [13]) vervallen naar lagere vibrationele toestanden. Op dit punt wordt het opnieuw belangrijk wat de onderliggende statistiek van de individuele atomen is. Een molecuul opgebouwd uit fermionen die zich in een Fermizee bevindt zal moeilijker vervallen naar twee aparte fermionen vanwege het Pauli-uitsluitingsprincipe. Dit verklaart enerzijds waarom de gemiddelde levensduur van een molecuul opgebouwd uit fermionen zoveel langer is dan deze van een molecuul opgebouwd uit bosonen en anderzijds waarom de conversie efficiëntie voor bosonen beperkt is tot ongeveer 5% terwijl deze voor fermionen $> 50\%$ kan zijn (Ref. [13]).

Wanneer het gemengde systeem zich dicht bij de Feshbachresonantie bevindt, interageren de atomen en de moleculen sterk met elkaar via een repulsieve (afstotende) interactie. Deze interactie zorgt voor een (meestal ongewenste) opwarming van het systeem.

Condensaten van Fermionen

Voor fermionen bestaan er twee mogelijkheden om een 'paar' te vormen.

- De ene mogelijkheid is als molecule wat hierboven beschreven is.
- De andere mogelijkheid is als Cooperpaar (te vergelijken met elektronen in een supergeleider).

De correlatie tussen de twee atomen is in dit geval niet in de plaatsruimte maar wel in de momentumruimte. Bose-Einsteincondensatie bij op dergelijke wijze gebonden fermionische atomen is voor het eerst waargenomen december 2003 door de JILA groep (Ref. [16] en [17]).

De Feshbachresonantie wordt in verband hiermee gezien als de scheidingslijn tussen het creatiegebied voor moleculaire Bose-Einsteincondensaten en fermionische condensaten (waarmee verwezen wordt naar Bose-Einsteincondensaten van fermionen die als Cooperparen gepaard zijn). Het gebied waar de verstrooiingslengte repulsief is wordt de BEC kant genoemd en het gebied waar de verstrooiingslengte attractief is wordt de BCS kant

genoemd.

Wanneer een moleculair Bose-Einsteincondensaat zich in een Fermizee bevindt, zal de Feshbach-resonantie echter niet het punt zijn waar de BCS-BEC overgang plaats vindt. Het BCS-BEC overgangsgedrag bevindt zich in dit geval op de plaats waar de moleculaire energie twee keer de fermi-energie van het systeem is. Pauli-blocking zorgt er immers voor dat de moleculen veel moeilijker in individuele atomen kunnen opbreken zodat er ook aan de BCS-kant van de Feshbachresonantie gewone moleculaire Bose-Einsteincondensaten kunnen bestaan (Ref. [18]).

Elementen waarbij Bose-Einsteincondensatie reeds geobserveerd werd

Bij de volgende elementen is reeds Bose-Einsteincondensatie waargenomen:

- alkalimetalen:
 - waterstof (H)
 - lithium (Li)
 - natrium (Na)
 - kalium (K)
 - rubidium (Rb)
 - cesium (Cs)
- Overige elementen:
 - helium (He)

De ontdekking van Bose-Einsteincondensatie in lithium, natrium en rubidium is beschreven in het historisch overzicht. Het lijstje van atoomsoorten bleef niet tot deze elementen beperkt.

Waterstof (H)

In 1998 slaagde men er aan MIT als eerste in een Bose-Einsteincondensaat van waterstofatomen te creëren (Ref. [7]), wat later dat jaar ook aan de Rice universiteit lukt (Ref. [8]). Dit was voordien nog niet mogelijk geweest door de uiterst zwakke interactie van waterstof. Deze zorgt er namelijk voor dat energie tussen de waterstofatomen trager wordt uitgewisseld dan bij de andere alkaligassen het geval is, zodat het langer duurt voor een condensaat kan gevormd worden en er dus meer kans is dat andere fenomenen het ontstaan van een Bose-Einsteincondensaat verhinderen.

Kalium (K)

De volgende in het lijstje van alkaliën is kalium. Kalium heeft drie stabiele isotopen, twee hiervan zijn bosonisch, de derde is fermionisch van aard. De hyperfijnstructuur van de bosonische isotopen is echter zo fijn dat laserkoeling niet in staat is de gewenste condities te creëren voor een efficiënte evaporatieve koeling. Verder wordt de situatie nog meer bemoeilijkt door de kleine botsingsdoorsnede van zowel ^{39}K als ^{41}K . Om deze problemen te omzeilen maakte men aan LENS (European Laboratory for Nonlinear Spectroscopy te Firenze, Italië), in 2001, gebruik van *sympathetic cooling* (solidaire koeling). Dit gebeurde door ^{41}K te mengen met ^{87}Rb (rubidium). Het ^{87}Rb werd evaporatief gekoeld en door thermaliserende botsingen tussen de twee atoomsoorten werd het ^{41}K eveneens afgekoeld. Op deze indirecte wijze was het mogelijk het kalium tot de gewenste temperatuur af te koelen en zo voor het eerst een Bose-Einsteincondensaat van kaliumatomen te creëren (Ref. [9]).

Cesium (Cs)

De laatste in het lijstje van alkaliatomen is cesium waarvan eind 2002 aan de universiteit van Innsbruck voor het eerst een Bose-Einsteincondensaat werd gecreëerd (Ref. [10]). De mogelijkheid om een cesium-BEC te creëren kan een grote bijdrage leveren tot het verhogen van de precisie van de huidige cesiumatoomklokken. Verder maakt de grote massa van cesium het ook zeer geschikt voor ultraprecieze metingen van, onder andere, het zwaartekrachtsveld.

Francium

Het alkalimetaal francium is enerzijds zo zeldzaam en anderzijds zo instabiel dat men hier nooit de creatie van een Bose-Einsteincondensaat in zal nastreven.

Helium (He)

Bose-Einsteincondensaten zijn niet beperkt gebleven tot de alkali-atomen. Begin 2001 is men er aan het Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique in Orsay in geslaagd een Bose-Einsteincondensaat in metastabiel helium te creëren (Ref. [11]). Meer dan 60 jaar nadat London de overgang naar supervloeibare fase in vloeibaar helium karakteriseerde als Bose-Einsteincondensatie is men er dus in geslaagd een echt Bose-Einsteincondensaat in heliumgas te creëren.

Chroom, strontium en neon

Het succesvolle werk bij de alkaligassen stimuleert ook onderzoek naar Bose-Einsteincondensaten in chroom, strontium en metastabiel neon (Ref. [12]). De verdere ontwikkelingen op het vlak van zuiver optische Bose-Einsteincondensaten zou hierbij een belangrijke rol kunnen spelen omdat zuiver optische vallen kunnen gebruikt worden voor atomen waarvan het magnetisch moment het gebruik van gewone magnetische vallen niet toelaat.

Referenties

- [1] **B. Cohen**, *Revolution in science*, 1985, the Belknap Press of Harvard university press.
- [2] **F. Dalfovo & S. Giorgini**, *Theory of Bose-Einstein condensation in trapped gases*, 1999, Rev. Mod. Phys. 71,463.
- [3] **K. van Druten**, *BEC FAQ*, http://nnvaq.tue.nl/atoq/1997_1/druten.pdf .
- [4] **A.J. Leggett**, *Bose-Einstein condensation in the alkali gases: Some fundamental concepts*, 2001, Rev. Mod. Phys. 73,307.
- [5] **M.R. Matthews et al.**, *Vortices in a Bose-Einstein Condensate*, 1999, Phys. Rev. Lett. 83, 2498.
- [6] **W. Ketterle**, *Nobel lecture: When atoms behave as waves: Bose-Einstein condensation and the atom laser*, 2002, Rev. Mod. Phys. 74, 1131.
- [7] **D.G. Fried et al.**, 1998, Phys. Rev. Lett. 81, 3811.
- [8] **D.G. Fried et al.**, *Bose-Einstein Condensation of Atomic Hydrogen*, 1998, Phys. Rev. Lett., 81, 3811.
- [9] **G. Modugno et al.**, *Bose-Einstein Condensation of Potassium Atoms by Sympathetic Cooling*, 2001, Science, 294, 1320.
- [10] **T. Weber et al.**, *Bose-Einstein Condensation of Cesium*, 2002, Scienceexpress/www.scienceexpress.org / 5 december 2002 / Page 1/ 10.1126/science.1079699
- [11] **A. Robert et al.**, *Observation of Bose-Einstein condensation in metastable helium*, 2001
- [12] **W. Ketterle**, *Experimental studies of Bose-Einstein condensation in a gas*, 1999, Physics Today, p.30-35.
- [13] **K. Xu et al.**, *Formation of Quantum-Degenerate Sodium Molecules*, 2003, Phys. Rev. Lett. 91,210402.
- [14] **M. Greiner.**, *A molecular Bose-Einstein condensate emerges from a Fermi sea*, 2003, cond-mat/0311172.
- [15] **C.A. Regal et al.**, *Creation of ultracold molecules from a Fermi gas of atoms*, 2003, Nature, 424.
- [16] **C.A. Regal et al.**, *Observation of resonance condensation of fermionic atom pairs*, 2004, cond-mat/0401554.
- [17] *NIST/University of Colorado Scientists Create New form of Matter: A Fermionic Condensate*, <http://www.colorado.edu/news/releases/2004/21.html>
- [18] **M.W. Zwierlein et al.**, *Condensation of Fermionic Atom Pairs Near a Feshbach Resonance*, 2004
- [19] **J.R. Abo-Shaeer et al.**, *Observation of Vortex Lattices in Bose-Einstein Condensates*, 2001, Science, 292, 476.
- [20] **P.C. Haljan et al.**, *Driving Bose-Einstein condensate vorticity with a rotating normal cloud*, 2001, cond-mat/0106362 v1.
- [21] **A.E. Leanhardt et al.**, *Imprinting Vortices in a Bose-Einstein Condensate using Topological Phases*, 2002, Phys. Rev. Lett., 89, 190403.
- [22] **S. Inouye et al.**, *Phase-coherent amplification of atomic matter waves*
- [23] **K. Helmerson**, *Giving a boost to atoms*, 1999, Nature, 402, 587.
- [24] *MIT researchers create rudimentary atom laser*

- [25] **T.L. Gustavson et al.**, *Transport of Bose-Einstein Condensates with Optical Tweezers*, 2002, Phys. Rev. Lett., 020401.
- [26] **A.P. Chikkatur et al.**, *A Continuous Source of Bose-Einstein Condensed Atoms*, 2002, Science, 296, 2193.
- [27] **T. Phillips**, *My Pet Neutron Star*, 2002.
- [28] **J. Thomson**, *Researchers have the bosonova blues*, 2001, <http://www.nature.com/nsu/010322/010322-3.html>.
- [29] **J.N. Milstein, C. Menotti and M.J. Holland**, *Feshbach resonances and collapsing Bose-Einstein condensates*, 2003, New Journal of Physics, 5, 52, <http://www.iop.org/EJ/article/1367-2630/5/1/352/nj3152.html>.
- [30] **S. Banik en D. Bandyopadhyay**, *Bose-Einstein condensation of anti-kaons and neutron star twins*, 2003, J. Phys. Vol.60 N5, 1001.
- [31] **L. Pitaevskii & S. Stringari**, *Bose Einstein condensation*, 2003, Clarendon Press Oxford.
- [32] **M. Snoek, M. Haque, S. Vandoren, and H. T. C. Stoof**, *Ultracold Superstrings*, 2005, cond-mat/0505055 v2.

Annihilatie

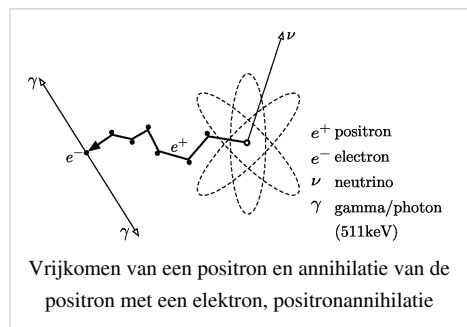
Annihilatie is het proces waarbij een deeltje en zijn antideeltje bij elkaar komen en elkaar wederzijds vernietigen. Dit levert zeer veel energie op, want de volledige massa van beide deeltjes wordt in energie omgezet (volgens $E=mc^2$).

In sommige gevallen resteert alleen de inwendige energie van de deeltjes, die manifest was als hun massa (men zegt wel dat "de volledige massa in energie wordt omgezet"). Die energie ontsnapt dan in de vorm van elektromagnetische straling. Zo vervalt een elektron-positronpaar in twee fotonen. Een gram materie met een gram antimaterie levert bij volledige annihilatie $1,8 \times 10^{14}$ joule energie op, 43 kiloton TNT, of de verbrandingsenergie van ongeveer 30.000 vaten ruwe olie.

In andere gevallen levert de annihilatie allerlei deeltjes op, zoals pionen en neutrino's, waarvan een deel zelf na korte tijd weer vervalt. Bij de annihilatie van een proton-antiprotonpaar dat elkaar met lage snelheid raakt, is het resultaat in 20% van de gevallen:

De annihilatieproducten zijn in dit geval pionen (π), die op hun beurt na korte tijd uiteenvallen in (anti)muonen (μ), (anti)neutrino's (ν) en fotonen (γ). De muonen vallen daarna ook weer snel uiteen.

Omgekeerd kan, als er voldoende energie op een plaats beschikbaar is, deze gebruikt worden om een deeltje-antideeltjepaar te vormen. Ook ontstaan dit soort paren kortstondig door energiefluctuaties.

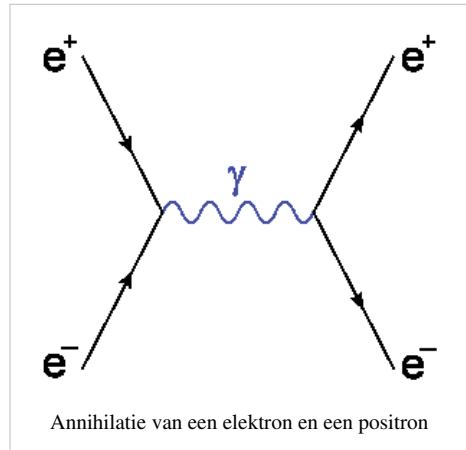


Antimaterie

Volgens de natuurkunde bestaat er van elk soort deeltje een **antideeltje**, waarvan een aantal fysische eigenschappen hetzelfde zijn, maar andere eigenschappen (waaronder de elektrische lading) precies tegengesteld.

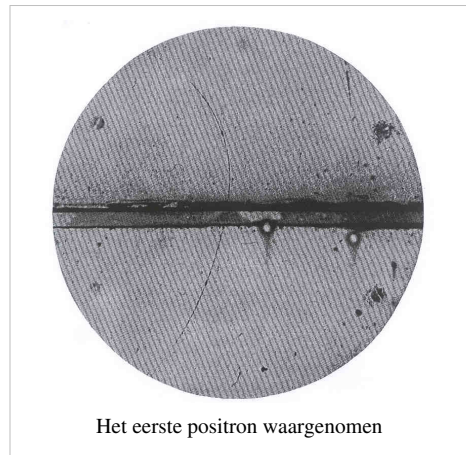
Materie die uit antideeltjes is samengesteld, heet **antimaterie**. Men spreekt vaak van *materie en antimaterie*, en in deze context is antimaterie dus geen materie.

Als een deeltje met zijn antideeltje botst, annihileren ze elkaar.



Geschiedenis

In 1930 beschreef Paul Dirac in wiskundige termen het elektron zodanig dat het in overeenstemming was met de speciale relativiteitstheorie en de kwantummechanica. Zijn beschrijving voorspelde dat het antideeltje van het elektron ook zou moeten bestaan. In 1932 werd het deeltje ontdekt door Carl Anderson. Die zag de sporen van een deeltje in een nevelvat, dat overeenkwam met een elektron, maar positief geladen bleek te zijn. Hij noemde dit deeltje dat het antideeltje van het elektron was, positron.



Eigenschappen

Een antideeltje heeft dezelfde massa en spin als het corresponderende deeltje. De overige eigenschappen (namelijk de *behouden* grootheden) zijn precies omgekeerd. Zo heeft het *anti-elektron* (ook positron genoemd) net als het elektron massa 0,511 MeV en spin 1/2, maar in afwijking daarvan leptongetal -1 en elektrische lading +1.

De bekendste deeltjes vormen de volgende paren:

Deeltje	Symbool	Behouden grootheden			Overige	
		Lading Q	Leptongetal L	Baryongetal B	Spin J	Massa (MeV)
proton	p	+ 1	0	+ 1	1/2	938,3
antiproton	\bar{p}	- 1	0	- 1	1/2	938,3
neutron	n	0	0	+ 1	1/2	939,6
antineutron	\bar{n}	0	0	- 1	1/2	939,6
elektron	e^-	- 1	+ 1	0	1/2	0,511
positron (anti-elektron)	e^+	+ 1	- 1	0	1/2	0,511
foton, gelijk aan antifoton	γ	0	0	0	0	0

In deze tabel zijn de massa's uitgedrukt in mega-elektronvolt (MeV), de ladingen in de elementaire lading e , en de spin in het elementaire impulsmoment \hbar . Er bestaan nog meer behouden grootheden naast de hier genoemde elektrische lading (Q), leptongetal (L) en baryongetal (B):

- Charm (C) (is +1 voor onder meer het c -quark)
- Strangeness (S) (is -1 voor onder meer het s -quark)
- Top (is +1 voor onder meer het t -quark)
- Bottom (is -1 voor onder meer het b -quark).

Als een deeltje instabiel is, is zijn antideeltje dat ook, met dezelfde gemiddelde levensduur. De vervalproducten van het antideeltje zijn dan de antideeltjes van de vervalproducten van het deeltje.

Bovenstaande voorbeelden zijn fermionen, waaruit de materie is opgebouwd. Bij bosonen ligt het anders: die horen niet tot de materie of antimaterie. Zo zijn het positieve pion π^+ en het negatieve π^- elkaars antideeltje, maar ze komen onder dezelfde omstandigheden voor en er is geen enkele reden om het ene een deeltje en het andere een antideeltje te noemen. Het neutrale pion π^0 , het foton en vele andere neutrale bosonen zijn hun eigen antideeltje; ook daar heeft de term antimaterie weinig of geen betekenis.

Onder normale omstandigheden komt antimaterie niet voor. Het wordt gemaakt in het laboratorium of een deeltjesversneller, of het ontstaat bij kernreacties. Bijvoorbeeld een PET-scan wordt gemaakt met radio-actieve stoffen die een positron (anti-elektron) uitzenden ten gevolge van een kernreactie. Meestal maakt men één soort antideeltjes, maar in 2002 is het CERN gelukt antiprotonen en positronen te combineren tot antiwaterstofatomen en hun eigenschappen te bestuderen. Ze bleken zich net zoals gewone waterstof te gedragen. Eind 2010 slaagde men erin 38 antiwaterstofatomen te creëren en in te sluiten gedurende een tiende seconde.^[1] Op 6 juni 2011 werd door het CERN een nieuw record gevestigd: het slaagde erin gedurende ruim 15 minuten een 300-tal antiwaterstofdeeltjes vast te houden.

Annihilatie

Als een deeltje en het bijbehorende antideeltje elkaar tegenkomen, kan annihilatie optreden, een proces waarbij beide deeltjes vernietigd worden en waarbij veel energie vrijkomt. Er wordt gebruikgemaakt met $E=mc^2$

In sommige gevallen resteert alleen de inwendige energie van de deeltjes, die manifest was als hun massa (men zegt wel dat "de volledige massa in energie wordt omgezet"). Die energie ontsnapt dan in de vorm van elektromagnetische straling. Zo vervalt een elektron-positronpaar in twee fotonen. Een gram materie met een gram antimaterie levert bij volledige annihilatie $1,8 \times 10^{14}$ joule energie op, 43 kiloton TNT, of de verbrandingsenergie van ongeveer 30.000 vaten ruwe olie.

In andere gevallen levert de annihilatie allerlei deeltjes op, zoals pionen en neutrino's, waarvan een deel zelf na korte tijd weer vervalt. Bij de annihilatie van een proton-antiprotonpaar dat elkaar met lage snelheid raakt, is het resultaat in 20% van de gevallen:

$$p\bar{p} \rightarrow 2\pi^+ 2\pi^- \pi^0 \rightarrow 2\mu^+ 2\mu^- 2\nu_\mu 2\bar{\nu}_\mu 2\gamma.$$

De annihilatieproducten zijn in dit geval pionen (π), die op hun beurt na korte tijd uiteenvallen in (anti)muonen (μ), (anti)neutrino's (ν) en fotonen (γ). De muonen vallen daarna ook weer snel uiteen.

Omgekeerd kan, als er voldoende energie op een plaats beschikbaar is, deze gebruikt worden om een deeltje-antideeltjepaar te vormen. Ook ontstaan dit soort paren kortstondig door energiefluctuaties.

Antimaterie in het heelal

In het door de mens bestudeerde deel van het heelal bevindt zich bijna alleen gewone materie. Dat is opmerkelijk gezien het bovenstaande: uit het "niets" zouden materie en antimaterie in gelijke hoeveelheden ontstaan. Er zijn verschillende hypothesen over de oorzaak.

- Tijdens de oerknal werd *ongeveer* evenveel materie als antimaterie gevormd. Er was echter iets meer materie dan antimaterie en na een grootschalig annihilatieproces bleef er alleen wat materie over. Dat is de reden dat het tegenwoordige heelal vrijwel geheel uit materie bestaat en dat er zo veel straling in het heelal is (straling afkomstig van de annihilaties).
- Een andere hypothese is dat een groot, ver verwijderd (en nog niet waargenomen) deel van het heelal volledig opgebouwd is uit antimaterie. Bij het ontstaan zou alle materie in één deel en de antimaterie in een ander deel terecht zijn gekomen. Hierbij moet worden opgemerkt dat wij hemellichamen voornamelijk waarnemen door de uitgezonden fotonen, en een foton is gelijk aan zijn antideeltje (een foton is hetzelfde als een antifoton) zodat er geen verschil te zien is.

In april 1997 werd ontdekt dat in het centrum van onze melkweg positronen werden gevormd. De Compton Gamma Ray Observatory van NASA ontdekte wolken van positronen.

In juli 2003 werd door een team van onderzoekers van de NASA ontdekt dat er bij gigantische explosies op de zon, de zogeheten zonnevlammen, antimaterie wordt gevormd. De onderzoekers maakten gebruik van NASA's Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) om de hoogenergetische röntgen- en gammastralen te bestuderen.


Op enkele honderden kilometers hoogte wordt de Aarde omgeven door een gordel waarin relatief veel antiprotonen voorkomen^[2]. Deze worden door het aardmagnetisch veld ingevangen en blijven bestaan omdat op deze hoogte weinig normale materie aanwezig is, zodat annihilatie uitblijft. Met name in de Zuid-Atlantische Anomalie, worden hoge concentraties gemeten die niet door normaal verval verklaard kunnen worden. Tot deze conclusie kwam een internationaal team van natuurkundigen in 2011 op basis van metingen van het PAMELA-experiment (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics). Dit is een Europees satellietexperiment dat vijf jaar geleden werd gelanceerd. Men speculeert dat deze antimaterie in de toekomst gebruikt zou kunnen worden in een antimaterie-aandrijving^[3].

Trivia

- In het boek *Het Bernini Mysterie* van Dan Brown slagen vader en dochter Vetra erin antimaterie te produceren en op te slaan in een speciaal ontwikkelde cilinder. Deze cilinder wordt gestolen en in Vaticaanstad geplaatst als een soort bom. Het laboratorium CERN heeft een speciale webpagina^[4] geopend om uit te leggen dat dat niet kan.

Referenties

- [1] (en) Antimatter atoms produced and trapped at CERN (<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2010/PR22.10E.html>)
- [2] The discovery of geomagnetically trapped cosmic ray antiprotons, *The Astrophysical Journal*, arXiv.org (<http://arxiv.org/abs/1107.4882>)
- [3] Extraction of antiparticles concentrated in planetary magnetic fields, NIAC, 2006 (http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/1071Bickford.pdf)
- [4] <http://web.archive.org/web/20090403085132/http://press.web.cern.ch/public/en/Spotlight/SpotlightAandD-en.html>

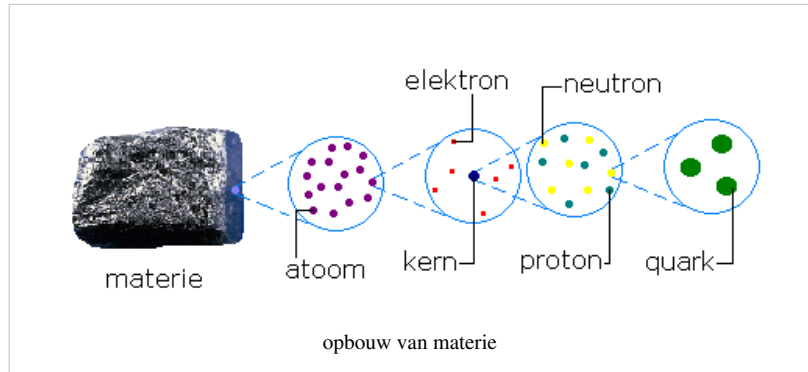
 Zoek **deeltje** op in het WikiWoordenboek.



Zie de categorie *[/wiki/Commons:Category:Antimatter?uselang=nl#mw-subcategories Antimatter]* van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.

Atoomkern

Een atoom bestaat uit een **atoomkern**, ook wel nuclide genoemd, met daarom heen een wolk elektronen. Dit elementaire inzicht in de opbouw van de materie werd in 1911 door Ernest Rutherford gepubliceerd. De kern is, zelfs ten opzichte van de grootte van het atoom, bijzonder klein maar positief geladen en de drager van vrijwel de gehele massa van het atoom.



De kern, zo werd later ontdekt, bestaat uit twee soorten subatomaire deeltjes of nucleonen: protonen en neutronen.

De positieve lading en daarmee het atoomnummer van het element wordt bepaald door het aantal protonen in de kern. De massa wordt bepaald door de som van het aantal protonen en neutronen. Deze twee deeltjes hebben bijna dezelfde massa. Er zijn meestal wat meer neutronen dan protonen in de kern.

Een voorbeeld: een atoom van element 92 (uranium) heeft 92 protonen in de kern. Er komen in de natuur twee soorten kernen (isotopen) van uranium voor: ^{235}U en ^{238}U . Het eerste isotoop heeft 235 nucleonen in totaal, dat wil zeggen $235 - 92 = 143$ neutronen. Het andere isotoop heeft drie neutronen meer. Een mol ^{235}U zou ongeveer 235 gram massa bevatten. Het getal 235 is een voorbeeld van een massagetal.

Positieve ladingen stoten elkaar af en de gravitatiekracht waarmee protonen elkaar aantrekken is zeer veel (een factor 10^{36}) kleiner. Het is dan ook een andere kracht die de atoomkern bij elkaar houdt. Deze wordt de kernkracht genoemd, een restkracht van de sterke wisselwerking die de quarks binnen de protonen en neutronen bij elkaar houdt. Alleen op afstanden in de grootteorde van enkele kerndeeltjes van de atoomkern is deze kracht werkzaam. Over deze korte afstanden is deze kracht sterker dan de afstotende elektromagnetische kracht. De kernkracht kan vergeleken worden met de Van der Waalskracht, een elektrische restkracht tussen neutrale atomen.

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Biofoton

Onder een **biofoton** (van het Griekse βίος dat *leven* betekent en φως, *licht*) wordt in algemene zin een foton verstaan dat zou worden uitgezonden door levend weefsel, maar anders [Wikipedia:Bronvermelding](#) dan de bekende fotonen die worden opgewekt door de 'gewone' lichtgevende organismen als glimwormen of sommige lichtgevende paddenstoelen die dat met het pigment luciferine en het enzym luciferase doen met adenosinetriposfaat als energiebron. Het betreft in elk geval fotonen van kortere golflengte dan die welke het lichaam in het diepe infrarood uitstraalt volgens de Wet van Planck vanwege zijn temperatuur.

Geschiedenis

De Russische embryoloog Alexander Gurwitsch ontdekte in de jaren twintig een zwakke fotonenstraling (licht) afkomstig uit levend weefsel. Hij noemde dit indertijd^[1] *mitogenetische straling*, omdat hij een stimulerend effect op de celdeling van nabijgelegen levend weefsel vermoedde.

In de jaren zeventig met Fritz-Albert Popp met zijn onderzoeksgroep van de Universiteit van Marburg (Duitsland) aan cellen een zeer zwakke straling die hij biofotonen noemde en waarvan de golflengte varieerde van 200 tot 800 nm [Wikipedia:Bronvermelding](#), ongeveer het bereik van nabij ultraviolet licht tot het nabije infrarood. Hij verloor zijn leerstoel^[2] en richtte het IIB te Neuss op^[3]

Stand van zaken

Uitgegaan wordt van een extreem zwakke lichtproductie in de vorm van biofotonen, in een hoeveelheid van ongeveer 1 foton per cel per maand. [Wikipedia:Bronvermelding](#) Andere bronnen gewagen van 10.000 fotonen per cm² en per seconde^[4] in een meetbereik tussen 200 en 630 nanometer. Biofotonen zouden een toevallig bijproduct kunnen zijn van normaal celmetabolisme. [Wikipedia:Bronvermelding](#) Groepen rond Popp, die met de term 'biofotonen' kwam, schrijven,^[5] dat ze betrokken zijn bij verschillende celfuncties, zoals mitose, maar een testbare hypothese heeft dat tot op heden niet opgeleverd. [Wikipedia:Bronvermelding](#) De heersende mening is dat deze uiterst zwakke lichtproductie van levende weefsels geen fysiologische betekenis heeft. [Wikipedia:Bronvermelding](#) Er wordt nog altijd gepubliceerd over dit onderwerp.^{[6][7]}

Referenties

Bronnen, noten en/of referenties

Bloch-vector

In de kwantummechanica is een **Bloch-vector** een meetkundige representatie van een pure kwantumtoestand van een 2-toestanden systeem.

Wanneer de toestandsvector

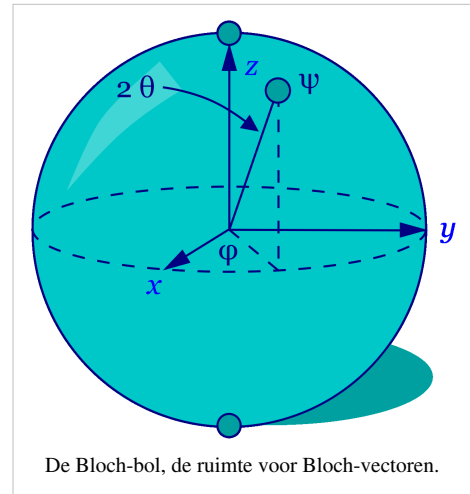
$$|\psi\rangle = \cos\theta |0\rangle + e^{i\phi} \sin\theta |1\rangle$$

is, dan is een R^3 Bloch-vector $[x, y, z]$

$$x = \sin 2\theta \times \cos \phi$$

$$y = \sin 2\theta \times \sin \phi$$

$$z = \cos 2\theta$$



Born-Oppenheimerbenadering

De **Born-Oppenheimerbenadering**, ook wel verkort tot de **Born-Oppenheimer**, is een vereenvoudigingsmethode in de molecuulfysica en de kwantumchemie, waarmee de berekening van de energie en golf functie van grotere systemen, zoals moleculen, vergemakkelijkt wordt.

Probleem

Bij moleculen kan het aantal vrijheidsgraden, manieren waarop (delen van) het molecuul zich kan (kunnen) bewegen, snel oplopen. In het geval van water is bijvoorbeeld sprake van drie kernen en tien elektronen. Deze hebben, in de tijdsonafhankelijke Schrödingervergelijking, allemaal drie vrijheidsgraden (x , y en z), wat neerkomt op 39 variabelen, aangezien deze allemaal onafhankelijk van, maar beïnvloed door elkaar kunnen bewegen. Met zoveel vrijheidsgraden wordt het al snel onmogelijk om de Schrödingervergelijking op te lossen, zelfs als men numerieke benaderingen zoekt. Alleen aan het allerkleinste atoom, het waterstofatoom, kunnen berekeningen gedaan worden zonder enige benadering te doen en dus met exacte uitkomst. Maar zelfs numerieke benaderingen zijn vrijwel ondoenlijk voor moleculen die gecompliceerder zijn dan het kleinst mogelijke molecuul, het waterstofmolecuul H_2 .

Benadering

In 1927 stelden Max Born en Robert Oppenheimer een benadering voor om toch berekeningen te kunnen doen aan grotere systemen: de Born-Oppenheimerbenadering. Hierbij wordt er een onderscheid gemaakt in de coördinaten en de golf functie van de kernen en van de elektronen. Hierbij is de redenering dat de atoomkernen vele malen zwaarder zijn dan de elektronen. Hierdoor is het aannemelijk dat de atoomkernen, vergeleken met de elektronen, praktisch stilstaan (dikwijls wordt hiervoor de evenwichtstoestand genomen). De Born-Oppenheimerbenadering gaat er dan ook van uit dat binnen een redelijk kort tijdsbestek de kernen stilstaan ten opzichte van de elektronen. Dit komt er uiteindelijk op neer dat bij de Born-Oppenheimer ervan wordt uitgegaan dat de golf functie te splitsen valt:

$$\Psi_{\text{total}} = \psi_{\text{electronic}} \times \psi_{\text{nuclear}}$$

In de praktijk benadert men dan de kernen als stilstaande puntladingen, die een elektrostatiche potentiaal genereren waarin zich de elektronen bevinden. Op deze manier kan men dan het simpelste molecuul, het eenwaardig positief

geladen waterstofion H_2^+ , "exact" oplossen.

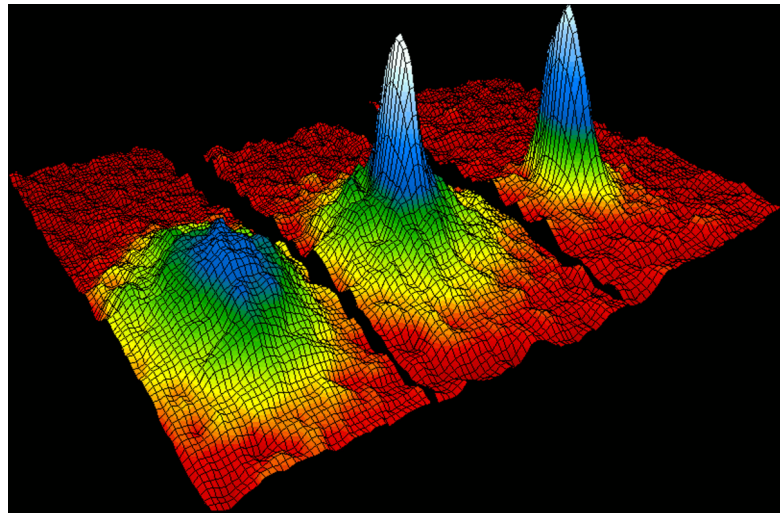
In de praktijk zal voor berekeningen nog verdere benadering noodzakelijk zijn, zoals bijvoorbeeld de Hartree-Fock-methode en post-Hartree-Fockmethoden, of met dichtheidsfunctionaaltheorie.

Bose-Einsteincondensaat

Een **Bose-Einsteincondensaat** is een laag-energetische aggregatietoestand, die slechts voorkomt bij temperaturen nabij het absolute nulpunt. In deze toestand overlappen de de Broglie-golven (materiegolven) van de deeltjes zodanig dat ze niet meer van elkaar onderscheiden kunnen worden en er één grote materiegolf, ook wel superatoom genoemd, waarneembaar is.

Deze toestand wordt ook wel de vijfde aggregatietoestand genoemd, naast vast, vloeibaar, gas en plasma.

Een Bose-Einsteincondensaat van interagerende deeltjes is supervloeibaar, hetgeen door Nikolaj Bogoljoebov theoretisch werd voorspeld en door de experimentele observatie van gekwantiseerde wervelingen (vortices) werd bewezen.



De snelheidsdistributie van een wolk bestaande uit een tweeduizendtal rubidiumatomen bij temperaturen van respectievelijk 400nK, 200nK en 50nK. Bij 400nK is er nog geen sprake van een condensaat en is er een grote spreiding in de snelheden van de deeltjes. Bij de middelste figuur is de aanzet van het condensaat te herkennen in de piek die zich in het midden van het eiland bevindt. De piek wordt veroorzaakt door deeltjes die zich in de grondtoestand bevinden. In de laatste figuur bevindt zich het overgrote deel van de deeltjes in de grondtoestand wat resulteert in een scherpe piek in de hier getoonde snelheidsdistributie. Deze afbeelding luidde de experimentele bevestiging van een nieuwe fase van de materie in.

Deze kwantumfaseovergang was het eerst voorspeld in 1924 door Albert Einstein gebaseerd op het werk van Satyendra Nath Bose. Het verschijnsel werd voor het eerst waargenomen in 1995 door de groep van Eric Cornell en Carl Wieman van JILA. In 2001 kregen zij daarvoor, samen met Wolfgang Ketterle van het MIT de Nobelprijs voor de Natuurkunde.

Van klassieke (mechanica) natuurkunde naar kwantummechanica

In de klassieke mechanica beschouwt men de objecten waarvan men de plaats en snelheid wil weten als heel kleine bolletjes. Bijvoorbeeld om te beschrijven hoe biljartballen over een biljarttafel bewegen. Als men de bewegingen, of de plaats van heel kleine deeltjes zoals atomen of nog kleiner wil beschrijven, of in geval van extreem lage temperaturen, dan lukt dat niet goed met deze klassieke mechanica. Men zou zich de atomen dan beter als een vage vlek kunnen voorstellen. De vlek is eigenlijk een golf-pakketje, dat wil zeggen de plaats in de ruimte waarvan men verwacht het atoom/deeltje aan te treffen. Deze benadering is afkomstig van de kwantummechanica. Als een groep atomen steeds kouder wordt gemaakt, dan nemen de afmetingen van hun golf-pakketje steeds toe. Zolang de golf-pakketjes bij elkaar uit de buurt blijven, is het mogelijk de verschillende atomen waar te nemen. Als de temperatuur maar laag genoeg wordt gemaakt, dan gaan de golf-pakketjes van de atomen overlappen met die van de buur-atomen. Tijdens dit proces zijn de atomen aan het "Bose-Einsteincondenseren", waarbij ze in een situatie met een zo laag mogelijke energie komen. De golf-pakketjes overlappen op een gegeven moment dusdanig, dat ze

overgaan in 1 golf-pakket. De atomen bevinden zich dan in een kwantum identiteitscrisis: de verschillende atomen zijn dan namelijk niet meer van elkaar te onderscheiden.

Toelichting bij de figuur

Bij dit experiment werden de snelheden van de atomen gemeten met behulp van laserlicht. Het plaatje geeft de snelheidsverdeling weer, bij 3 verschillende temperaturen. De atomen van het condensaat hebben de laagst mogelijke snelheid, en bevinden zich in het midden (rechter plaatje). En hieruit valt iets bijzonders af te leiden. Een eigenschap van het condensaat is, dat het een zo laag mogelijke energie heeft. Volgens de klassieke mechanica zou dat betekenen dat de atomen zich bewegingsloos in het centrum van proefopstelling zouden bevinden, in de afbeelding zou dat zichtbaar zijn als een oneindig dunne en zeer grote piek. Maar de piek die men heeft gemeten wijkt af van het klassieke (mechanica) idee, vanwege kwantumeffecten. Dat heeft te maken met de onzekerheidsrelatie van Heisenberg. Dat houdt ongeveer het volgende in: Hoe preciezer je de locatie van een atoom weet, des te minder nauwkeurig weet je de snelheid ervan. Dat is de reden dat de condensaat-piek niet oneindig smal is. Als dat het geval zou zijn, dan zouden de atomen zich exact in het midden van de proefopstelling bevinden en hun energie (snelheid) zou nul zijn. Maar op basis van de onzekerheidsrelatie kunnen we beide zaken niet tegelijk (exact) weten.

De theorie van Bose en Einstein gaat ervan uit dat de atomen zich in een zo laag mogelijke energietoestand bevinden en dus zo laag mogelijke snelheid hebben. Het onzekerheidsprincipe van Heisenberg echter staat niet toe dat deze grondtoestand een energie gelijk aan nul heeft, waardoor de atomen zich (tegelijkertijd) exact in het midden van de proefopstelling zouden bevinden. De kwantummechanica biedt hier uitkomst. Zij stelt dat atomen in een dergelijke situatie een bepaalde hoeveelheid energie bezitten, de nulpuntsenergie, en de laagste hoeveelheid energie die een atoom kan hebben is net geen nul. Dit verschilt dus wezenlijk van de klassieke mechanica en geldt ook als de temperatuur van de atomen het absolute nulpunt hebben bereikt. Het bijzondere aan een Bose-Einsteincondensaat is dat het de kwantummechanica en het principe van Heisenberg letterlijk zichtbaar maakt. Normaal gesproken bestudeert de kwantummechanica systemen ter grootte van enkele atomen of kleiner, aan een condensaat van duizenden of miljoenen atomen kan men zien dat kwantummechanica ook nog op macroscopische schaal effectief "werkelijkheid" is.

Bose-Einsteincondensatie meer uitgebreid

Gezien de uitgebreidheid van het artikel is het opgesplitst in verschillende subpagina's waar specifiekere informatie gevonden kan worden:

- Historisch overzicht: korte beschrijving van de historische ontwikkelingen sinds de voorspelling van het fenomeen door Albert Einstein.
- Algemene informatie en eigenschappen: algemene bespreking van het fenomeen, de eigenschap van supervloeibaarheid, lijst van elementen waarin reeds een Bose-Einsteincondensaat is gecreëerd, condensatie van fermionen en bosonen en een lijst van de in dit artikel gebruikte referenties.
- Toepassingen: toepassingen van Bose-Einsteincondensatie zoals atoomlasers, vertraging van licht en simulatiemogelijkheden voor astrofysische fenomenen.
- Formele kant en thermodynamische eigenschappen: thermodynamische eigenschappen (in formulevorm) van interagerende en niet-interagerende Bose-Einsteincondensaten.

Externe links

- Bose-Einsteincondensatie voor dummies ^[1]
- BEC @ JILA ^[2]
- BEC @ Rice University ^[3]
- BEC @ NIST ^[4]

Aggregatietoestanden
Klassiek: Vaste stof · Vloeistof · Gas Niet-klassiek: Bose-Einsteincondensaat · Plasma

Referenties

- [1] <http://www.colorado.edu/physics/2000/bec/>
 [2] <http://jilawww.colorado.edu/bec/CornellGroup/index.html>
 [3] <http://atomcool.rice.edu/>
 [4] <http://bec.nist.gov/>

Bose-Einsteinstatistiek

De **Bose-Einsteinstatistiek** beschrijft de gemiddelde bezetting voor de energieniveaus van ononderscheidbare bosonen in thermisch evenwicht. Een boson is een deeltje met een spin die een gehele waarde heeft, en dat daarom niet aan het uitsluitingsprincipe van Pauli voldoet.

De Bose-Einsteinstatistiek werd ontwikkeld door Satyendra Nath Bose voor fotonen en gegeneraliseerd tot atomen door Albert Einstein.

Volgens de Bose-Einsteinverdeling is het aantal deeltjes in een bepaalde energietoestand gelijk aan

$$\langle n \rangle = \frac{1}{e^{\beta(E-\mu)} - 1}$$

waar E de energie van die toestand is, μ de chemische potentiaal is, en $\beta = 1/(k_B T)$, waarin k_B de Boltzmannconstante en T de temperatuur in kelvin.

De chemische potentiaal in deze vergelijking is altijd negatief of nul. Bij hogere temperaturen ($E - \mu \gg k_B T$) kan de term '-1' verwaarloosd worden, waardoor de vergelijking gelijk wordt aan de Maxwell-Boltzmann-verdeling uit de klassieke fysica.

$$\langle n \rangle = e^{-\beta(E-\mu)}$$

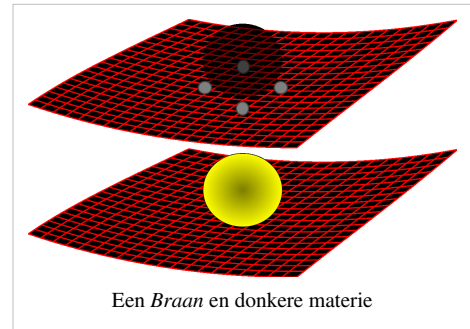
Aangezien fotonen spin 1 hebben, en dus bosonen zijn, voldoen zij aan de Bose-Einsteinstatistiek. Toegepast op licht staat deze vergelijking ook bekend als de Wet van Planck.

Deze vergelijking verklaart het gedrag van zwarte lichamen. De afleiding van deze vergelijking door Max Planck vormde de start van het wetenschapsgebied van de kwantummechanica.

Het feit dat het uitsluitingsprincipe van Pauli niet opgaat voor bosonen leidt tot de mogelijkheid van het vormen van een Bose-Einsteincondensaat, waarbij een aanzienlijke fractie van de deeltjes zich in de grondtoestand bevindt.

Braan

De term **braan** is een concept uit de snaartheorie, en heeft de betekenis van een ruimtelijk uitgestrekt object. Het zijn belangrijke bouwstenen (fundamentele objecten) in snaartheorie. Als deze theorie ooit empirisch bevestigd wordt, bestaan branen allicht *echt*. Voorlopig is snaartheorie echter een hypothetische theorie. (Een kandidaat voor de Theorie van alles.) Branen worden dus vandaag de dag alleen theoretisch onderzocht. In de theoretische fysica worden ze beschouwd als bijzonder interessante objecten, en worden dan ook intens bestudeerd.



Dimensie van een braan

Elk ruimtelijk uitgestrekt object heeft een bepaalde dimensie. Voor branen duidt men typisch het aantal dimensies aan door te spreken van een *p-braan*. Zo is bijvoorbeeld een 0-braan een nul-dimensionaal object, dat is dus een puntdeeltje. Een 1-braan heeft één dimensie, en is dus een snaar-achtig object. De snaren die de fundamentele bouwstenen zijn van snaartheorieën, zijn dus een voorbeeld van 1-branen (hoewel men ze liever *Fundamentele Snaren* noemt.) Een vlies is dan een 2-braan. Branen zijn dynamische objecten, en kunnen bewegen doorheen de ruimte. In snaartheorie wordt er verondersteld dat er 9 ruimtelijke dimensies zijn. Men bestudeert dus typisch 0-branen tot en met 9-branen. Omdat de laatste soort evenveel dimensies heeft als er beschikbaar zijn in de ruimte, is deze noodzakelijk een zogeheten *Ruimte-vullend Braan*.

Soorten branen

- **p-branen.** Branen werden oorspronkelijk ontdekt in supergravitatie, wat een samenvoeging van relativiteitstheorie (zwaartekrachtstheorie) en supersymmetrie is. Daar vond men dat er bepaalde configuraties kunnen bestaan welke een massief object beschrijven (en ook geladen), van een hogere dimensie. Een 2-braan in een drie dimensionale ruimte kan je je voorstellen als volgt: denk aan een zwaar object, dat een muur vormt, en oneindig ver doorloopt (en dus een drie-dimensionale ruimte in twee deelt). Maar in supergravitatie bestaan typisch ook hoger-dimensionale branen, welke zitten in een hoger-dimensionale ruimte. In deze betekenis spreekt men van p-branen.
- **D-branen.** Naar aanleiding van het werk van Joseph Polchinski, heeft men zich gerealiseerd dat er niet alleen in supergravitatie, maar ook in snaartheorie zulke objecten bestaan. In tegenstelling tot supergravitatie -waar branen macroscopische objecten beschrijven-, zijn in snaartheorie branen fundamentele objecten (en dus microscopisch). Ze zijn dus even fundamenteel als de één dimensionale snaren die in deze theorie voorkomen. De branen van snaartheorie hebben een belangrijke rol in de dynamica van open snaren: een open snaar heeft noodzakelijk zijn eindpunten op een braan. Dit soort vasthechting noemt men in de wiskunde *Dirichlet*-randvoorwaarden. In deze context is men daarom van D-branen gaan spreken. Hoewel ze op het eerste zicht iets anders zijn, zijn D-branen wel intiem verwant aan het begrip p-branen uit de supergravitatie. Ook voor D-branen duidt men de dimensie soms aan, men spreekt dan van een D_p -braan, met p de dimensie van het braan.
- **Membranen.** Tot slot zijn er ook in M-theorie objecten die ruimtelijk uitgestrekt zijn. Deze hebben twee of vijf dimensies. Men spreekt daar van membranen. Deze zijn (net zoals M-theorie zelf) nog niet helemaal goed begrepen. Er zijn twee soorten membranen: M2- en M5-branen.

Atomaire deeltjes: Molecuul · Atoom · Ion

Subatomaire deeltjes: Nucleon · Atoomkern

Bosonen: Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson

Fermionen: Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Clebsch-Gordan-coëfficiënten

In de natuurkunde zijn de **Clebsch-Gordan-coëfficiënten (CG-coëfficiënten)** verzamelingen van getallen die onder de wetten van de kwantummechanica te voorschijn komen bij het koppelen van twee impulsmomenten.

In meer wiskundige termen worden de CG-coëfficiënten gebruikt in de representatietheorie, met name die van compacte Lie-groepen. De CG-coëfficiënten geven de expliciete directe som decompositie van het tensorproduct van twee onherleidbare representaties (irreps) van de rotatiegroep in gevallen, waarin de getallen en typen onherleidbare representaties op abstract niveau al bekend zijn. De CG-coëfficiënten danken hun naam aan de Duitse wiskundigen Alfred Clebsch (1833-1872) en Paul Albert Gordan (1837-1912) die in de negentiende eeuw met een soortgelijk probleem in de invariantentheorie werden geconfronteerd.

In termen van de klassieke wiskunde kunnen CG-coëfficiënten, of althans degenen, die gekoppeld zijn aan de groep $SO(3)$, directer worden gedefinieerd door middel van formules voor het vermenigvuldigen van sferische harmonischen. De toevoeging van spins in kwantummechanische termen kan rechtstreeks worden afgelezen uit deze aanpak. De onderstaande formules maken gebruik van de bra-ketnotatie van de Britse natuurkundige Paul Dirac.

Clebsch-Gordan-coëfficiënten

Clebsch-Gordan-coëfficiënten zijn de expansiecoëfficiënten van de eigentoestanden van het totale impulsmoment in een ongekoppelde tensorproductbasis.

Hieronder worden deze CG-coëfficiënten precies gedefinieerd door de definitie van impulsmomentoperatoren, impulsmomenteigentoestanden en het tensorproduct van deze impulseigentoestanden.

Uit deze formele definitie van het impulsmoment kunnen recursierelaties voor de CG-coëfficiënten worden gevonden. Om numerieke waarden voor de CG-coëfficiënten te vinden moet er een faseconventie worden gekozen. In de rest van dit artikel wordt de faseconventie van Condon en Shortley gebruikt.

Impulsmomentoperatoren

Impulsmomentoperatoren zijn Hermitische operatoren \hat{j}_x , \hat{j}_y , and \hat{j}_z die voldoen aan de commutatierelaties

$$[\hat{j}_k, \hat{j}_l] = \hat{j}_k \hat{j}_l - \hat{j}_l \hat{j}_k = i\hbar \sum_m \varepsilon_{klm} \hat{j}_m, \quad \text{waarbij } k, l, m \in (x, y, z)$$

Met ε_{klm} de antisymmetrische tensor. Samen vormen deze drie operatoren een vectoroperator:

$$\mathbf{j} = [\hat{j}_x, \hat{j}_y, \hat{j}_z]$$

Zo kan men het inproduct van \mathbf{j} met zichzelf definiëren:

$$\mathbf{j}^2 = \hat{j}_x^2 + \hat{j}_y^2 + \hat{j}_z^2.$$

En definiëren we de ladder operatoren:

$$\hat{j}_{\pm} = \hat{j}_x \pm i\hat{j}_y.$$

Eigentoestanden van impulsmomentoperatoren

Uit bovenstaande definities volgt dat \mathbf{j}^2 commuteert met j_x , j_y en j_z

$$[\mathbf{j}^2, j_k] = 0 \text{ for } k = x, y, z.$$

Hieruit volgt dat \mathbf{j}^2 en j_z een simultane set eigenfuncties hebben. Uit de definities volgt dat de enige mogelijke eigenwaarden worden gegeven door

$$\mathbf{j}^2 |j m\rangle = \hbar^2 j(j+1) |j m\rangle \quad j = 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \dots$$

$$j_z |j m\rangle = \hbar m |j m\rangle \quad m = -j, -j+1, \dots, j.$$

De ladder operatoren verhogen en verlagen de waarde van m

$$j_{\pm} |j m\rangle = C_{\pm}(j, m) |j m \pm 1\rangle$$

met

$$C_{\pm}(j, m) = \sqrt{j(j+1) - m(m \pm 1)} = \sqrt{(j \mp m)(j \pm m + 1)}.$$

De factor $C_{\pm}(j, m)$ ligt op een fasefactor na vast. De keuze die hier aangehouden wordt is in overeenstemming met faseconventie van Condon en Shortley. De eigentoestanden zijn orthogonaal en kunnen genormeerd worden gekozen:

$$\langle j_1 m_1 | j_2 m_2 \rangle = \delta_{j_1, j_2} \delta_{m_1, m_2}.$$

Tensorproductruimte

Zij V_1 de $2j_1 + 1$ dimensionale vectorruimte opgespannen door

$$|j_1 m_1\rangle, \quad m_1 = -j_1, -j_1 + 1, \dots, j_1$$

en V_2 de $2j_2 + 1$ dimensionale vectorruimte opgespannen door

$$|j_2 m_2\rangle, \quad m_2 = -j_2, -j_2 + 1, \dots, j_2.$$

Het tensorproduct van de ruimten, $V_{12} \equiv V_1 \otimes V_2$, heeft een $(2j_1 + 1)(2j_2 + 1)$ dimensionale *ongekoppelde* basis

$$|j_1 m_1\rangle |j_2 m_2\rangle \equiv |j_1 m_1\rangle \otimes |j_2 m_2\rangle, \quad m_1 = -j_1, \dots, j_1, \quad m_2 = -j_2, \dots, j_2.$$

Impulsmomentoperatoren werkend op V_{12} zijn gedefinieerd door

$$(j_i \otimes 1) |j_1 m_1\rangle |j_2 m_2\rangle \equiv (j_i |j_1 m_1\rangle) \otimes |j_2 m_2\rangle$$

en

$$(1 \otimes j_i) |j_1 m_1\rangle |j_2 m_2\rangle \equiv |j_1 m_1\rangle \otimes j_i |j_2 m_2\rangle \quad \text{voor } i = x, y, z.$$

De totaal impulsmomentoperator is gedefinieerd door

$$J_i = j_i \otimes 1 + 1 \otimes j_i \quad \text{voor } i = x, y, z.$$

De componenten van de totaal impulsmoment operator voldoen aan de commutatierelaties

$$[J_k, J_l] = i\hbar \epsilon_{klm} J_m, \quad \text{waar } k, l, m \in (x, y, z).$$

Hieruit volgt dus dat de totaal impulsmoment operator daadwerkelijk een impulsmoment operator is, en dat zijn mogelijke eigenwaarden en eigentoestanden gegeven worden door

$$\mathbf{J}^2 |JM\rangle = \hbar^2 J(J+1) |JM\rangle$$

$$J_z |JM\rangle = \hbar M |JM\rangle, \quad \text{voor } M = -J, \dots, J.$$

Het aantal van totaal impulsmomenteigentoestanden is gelijk aan de dimensie van V_{12}

$$\sum_{J=|j_1-j_2|}^{j_1+j_2} (2J+1) = (2j_1+1)(2j_2+1).$$

De totaal impulsmomenttoestanden vormen een orthonormale basis van V_{12}

$$\langle J_1 M_1 | J_2 M_2 \rangle = \delta_{J_1 J_2} \delta_{M_1 M_2}.$$

Formele definitie van Clebsch-Gordan-coëfficiënten

De totale impulsmomenttoestanden kunnen worden geëxpandeerd door gebruik te maken van de volledighedsrelatie in de ongekoppelde basis

$$|JM\rangle = \sum_{m_1=-j_1}^{j_1} \sum_{m_2=-j_2}^{j_2} |j_1 m_1 j_2 m_2\rangle \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | JM\rangle$$

De expansiecoëfficiënten $\langle j_1 m_1 j_2 m_2 | JM\rangle$ worden **Clebsch-Gordan-coëfficiënten** genoemd.

Door het toepassen van de operator

$$J_z = j_z \otimes 1 + 1 \otimes j_z$$

aan beide kanten van de vergelijking kan men laten zien dat de Clebsch-Gordan-coëfficiënten kunnen alleen ongelijk aan nul zijn als

$$M = m_1 + m_2.$$

Aangezien de maximale projectie gegeven wordt door $M = j_1 + j_2$ volgt uit de kwantisatie van impulsmoment dat $J \leq j_1 + j_2$. Naast alle $2J + 1$ toestanden met $J = j_1 + j_2$ kan men dit argument herhalen voor $J = j_1 + j_2 - 1$. Dit gaat echter niet eeuwig door, en met een beetje boekhouden vinden we dat moet gelden

$$|j_1 - j_2| \leq J \leq j_1 + j_2.$$

Dit zijn de zogenaamde driehoeks relaties.

Recursierelaties

De recursierelaties werden ontdekt door de natuurkundige Giulio Racah. Toepassen van de totale impulsmomentladderoperatoren

$$J_{\pm} = j_{\pm} \otimes 1 + 1 \otimes j_{\pm}$$

aan de linker kant van de vergelijking levert

$$J_{\pm} |(j_1 j_2) JM\rangle = C_{\pm}(J, M) |(j_1 j_2) JM \pm 1\rangle = C_{\pm}(J, M) \sum_{m_1 m_2} |j_1 m_1\rangle |j_2 m_2\rangle \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | JM \pm 1\rangle.$$

Als men dezelfde operatoren aan de rechter kant toepast levert dit

$$\begin{aligned} J_{\pm} \sum_{m_1 m_2} |j_1 m_1\rangle |j_2 m_2\rangle \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | JM\rangle \\ = \sum_{m_1 m_2} [C_{\pm}(j_1, m_1) |j_1 m_1 \pm 1\rangle |j_2 m_2\rangle + C_{\pm}(j_2, m_2) |j_1 m_1\rangle |j_2 m_2 \pm 1\rangle] \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | JM\rangle \\ = \sum_{m_1 m_2} |j_1 m_1\rangle |j_2 m_2\rangle [C_{\pm}(j_1, m_1 \mp 1) \langle j_1 m_1 \mp 1 j_2 m_2 | JM\rangle + C_{\pm}(j_2, m_2 \mp 1) \langle j_1 m_1 j_2 m_2 \mp 1 | JM\rangle]. \end{aligned}$$

op, waarbij

$$C_{\pm}(j, m) = \sqrt{j(j+1) - m(m \pm 1)}.$$

Combinieert men deze resultaten met elkaar, levert dit de recursierelaties op voor de Clebsch-Gordan-coëfficiënten

$$C_{\pm}(J, M) \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | JM \pm 1\rangle = C_{\pm}(j_1, m_1 \mp 1) \langle j_1 m_1 \mp 1 j_2 m_2 | JM\rangle + C_{\pm}(j_2, m_2 \mp 1) \langle j_1 m_1 j_2 m_2 \mp 1 | JM\rangle.$$

Neemt men de C_+ en $M = J$ krijgt men

$$0 = C_+(j_1, m_1 - 1) \langle j_1 m_1 - 1 j_2 m_2 | JJ\rangle + C_+(j_2, m_2 - 1) \langle j_1 m_1 j_2 m_2 - 1 | JJ\rangle.$$

In de Condon en Shortley faseconventie is de coëfficiënt $\langle j_1 j_1 j_2 J - j_1 | JJ\rangle$ reëel en posotief. Door gebruik maken van de laatste vergelijking kan men alle andere CGC $\langle j_1 m_1 j_2 m_2 | JJ\rangle$ bepalen. De normalisatie is

bepaald door de eis dat de som van de kwadraten, die met de norm van de toestand correspondeert state $|(j_1 j_2) J J\rangle$, gelijk aan een moet zijn.

De andere coëfficiënt (C_-) in de recursierelatie kan worden gebruikt om alle CGC te vinden met $M = J - 1$.

Door iteratief gebruik van deze vergelijking kan men alle coëfficiënten bepalen.

Deze manier om de CGC te vinden, wijst erop dat ze allemaal reëel zijn (in de Condon en Shortley conventie).

Expliciete uitdrukking

Voor een expliciete uitdrukking van de Clebsch-Gordan-coëfficiënten en tabellen met numerieke waarden, zie Tabel van de Clebsch-Gordan-coëfficiënten.

Orthogonaliteit

Door de faseconventie van Condon en Shortley zijn de CGC reëel en dus

$$\langle JM | j_1 m_1 j_2 m_2 \rangle \equiv \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | JM \rangle$$

Dan vinden we, met de resolutie van de identiteit $1 \equiv \sum_x |x\rangle \langle x|$, de relaties

$$\sum_{J=|j_1-j_2|}^{j_1+j_2} \sum_{M=-J}^J \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | JM \rangle \langle JM | j_1 m'_1 j_2 m'_2 \rangle = \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | j_1 m'_1 j_2 m'_2 \rangle = \delta_{m_1, m'_1} \delta_{m_2, m'_2}$$

en

$$\sum_{m_1 m_2} \langle JM | j_1 m_1 j_2 m_2 \rangle \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | J' M' \rangle = \langle JM | J' M' \rangle = \delta_{J, J'} \delta_{M, M'}.$$

Dit heeft tot gevolg dat de relatie

$$|(j_1 j_2) JM\rangle = \sum_{m_1=-j_1}^{j_1} \sum_{m_2=-j_2}^{j_2} |j_1 m_1 j_2 m_2\rangle \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | JM \rangle$$

kan worden geïnverteerd. Dit geeft

$$|j_1 m_1 j_2 m_2\rangle = \sum_{J=|j_1-j_2|}^{j_1+j_2} \sum_{M=-J}^J |(j_1 j_2) JM\rangle \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | JM \rangle.$$

Speciale gevallen

Voor $J = 0$ worden de CGC gegeven door

$$\langle j_1 m_1 j_2 m_2 | 00 \rangle = \delta_{j_1, j_2} \delta_{m_1, -m_2} \frac{(-1)^{j_1 - m_1}}{\sqrt{2j_2 + 1}}.$$

Voor $J = j_1 + j_2$ en $M = J$ hebben we

$$\langle j_1 j_1 j_2 j_2 | (j_1 + j_2)(j_1 + j_2) \rangle = 1.$$

Voor $j_1 = j_2 = J/2$ en $m_2 = -m_1$ hebben we

$$\langle j_1 m_1 j_1 - m_1 | 2j_1 0 \rangle = \frac{(2j_1)!^2}{(j_1 - m_1)!(j_1 + m_1)! \sqrt{(4j_1)!}}.$$

Voor $j_1 = j_2 = m_1 = -m_2$ hebben we

$$\langle j_1 j_1 j_1 - j_1 | J0 \rangle = (2j_1)! \sqrt{\frac{2J + 1}{(J + 2j_1 + 1)!(2j_1 - J)!}}.$$

Symmetrie-eigenschappen

$$\begin{aligned}
 \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | JM \rangle &= (-1)^{j_1+j_2-J} \langle j_1 -m_1 j_2 -m_2 | J -M \rangle \\
 &= (-1)^{j_1+j_2-J} \langle j_2 m_2 j_1 m_1 | JM \rangle \\
 &= (-1)^{j_1-m_1} \sqrt{\frac{2J+1}{2j_2+1}} \langle j_1 m_1 J -M | j_2 -m_2 \rangle \\
 &= (-1)^{j_2+m_2} \sqrt{\frac{2J+1}{2j_1+1}} \langle J -M j_2 m_2 | j_1 -m_1 \rangle \\
 &= (-1)^{j_1-m_1} \sqrt{\frac{2J+1}{2j_2+1}} \langle JM j_1 -m_1 | j_2 m_2 \rangle \\
 &= (-1)^{j_2+m_2} \sqrt{\frac{2J+1}{2j_1+1}} \langle j_2 -m_2 JM | j_1 m_1 \rangle
 \end{aligned}$$

Relatie met 3-jm-symbolen

CGC zijn uit te drukken in 3-jm-symbolen

$$\langle j_1 m_1 j_2 m_2 | j_3 m_3 \rangle = (-1)^{j_1-j_2+m_3} \sqrt{2j_3+1} \begin{pmatrix} j_1 & j_2 & j_3 \\ m_1 & m_2 & -m_3 \end{pmatrix},$$

en de inverse relatie

$$\begin{pmatrix} j_1 & j_2 & j_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \end{pmatrix} \equiv \frac{(-1)^{j_1-j_2-m_3}}{\sqrt{2j_3+1}} \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | j_3 -m_3 \rangle.$$

De 3-jm-symbolen hebben een hogere symmetrie.

Relatie met Wigner-D-matrices

$$\int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^\pi \sin \beta d\beta \int_0^{2\pi} d\gamma D_{MK}^J(\alpha, \beta, \gamma)^* D_{m_1 k_1}^{j_1}(\alpha, \beta, \gamma) D_{m_2 k_2}^{j_2}(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{8\pi^2}{2J+1} \langle j_1 m_1 j_2 m_2 | JM \rangle \langle j_1 k_1 j_2 k_2 | JK \rangle.$$

Andere eigenschappen

$$\sum_m (-1)^{j-m} \langle j m j -m | J0 \rangle = \sqrt{2j+1} \delta_{J0}$$

Referenties

Externe links

- PDF tabel met Clebsch–Gordan Coëfficiënten, Spherische Harmonischen, en d-functies (<http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/rpp2011-rev-clebsch-gordan-coefs.pdf>)
- Clebsch–Gordan, 3-jm and 6-j coefficients web calculator (<http://www.volya.net/vc>)
- Downloadable Clebsch–Gordan Coefficient Calculator voor Mac en Windows (<http://phys.csuchico.edu/C-G/>)
- Web interface voor tabulating SU(N) Clebsch–Gordan coefficients (<http://homepages.physik.uni-muenchen.de/~vondelft/Papers/ClebschGordan/>)

Lees ook

- Quantum mechanics, E. Zaarur, Y. Peleg, R. Pnini, Schaum's Easy Oulines Crash Course, Mc Graw Hill (USA), 2006, ISBN (10-)007-145533-7 ISBN (13-)978-007-145533-6
- Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles (2nd Edition), R. Eisberg, R. Resnick, John Wiley & Sons, 1985, ISBN 978-0-471-873730
- Quantum Mechanics, E. Abers, Pearson Ed., Addison Wesley, Prentice Hall Inc, 2004, ISBN 9780131461000
- Physics of Atoms and Molecules, B.H. Bransden, C.J.Joachain, Longman, 1983, ISBN 0-582-44401-2
- The Cambridge Handbook of Physics Formulas, G. Woan, Cambridge University Press, 2010, ISBN 978-0-521-57507-2.
- Encyclopaedia of Physics (2nd Edition), R.G. Lerner, G.L. Trigg, VHC publishers, 1991, ISBN (Verlagsgesellschaft) 3-527-26954-1, ISBN (VHC Inc.) 0-89573-752-3
- McGraw Hill Encyclopaedia of Physics (2nd Edition), C.B. Parker, 1994, ISBN 0-07-051400-3
- Biedenharn, L. C.; Louck, J. D.. *Angular Momentum in Quantum Physics*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1981 ISBN 0201135078.
- Brink, D. M.; Satchler, G. R.. *Angular Momentum*, 3rd, Clarendon Press, Oxford, 1993, "Ch. 2" ISBN 0-19-851759-9.
- Condon, Edward U.; Shortley, G. H.. *The Theory of Atomic Spectra*, Cambridge University Press, Cambridge, 1970, "Ch. 3" ISBN 0-521-09209-4.
- Edmonds, A. R.. *Angular Momentum in Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1957 ISBN 0-691-07912-9.
- Messiah, Albert. *Quantum Mechanics (Volume II)*, North Holland Publishing, New York, 1981, "Ch. XIII" ISBN 0-7204-0045-7.
- Zare, Richard N.. *Angular Momentum*, John Wiley & Sons, New York, 1988, "Ch. 2" ISBN 0-471-85892-7.

Complete verzameling van commuterende observabelen

In de kwantummechanica verwijst een **complete verzameling van commuterende observabelen** (in het Engels kortweg CSCO) naar een verzameling commuterende operatoren, waarvan de gemeenschappelijke eigenvectoren een basis vormen van de ruimte van toestanden. Anders gezegd: de ruimte van toestanden heeft een basis, waarvan de elementen volledig bepaald zijn door hun eigenwaardes onder de operatoren in de CSCO.

Een CSCO doet dus voor een kwantummechanisch systeem wat een volledige verzameling coördinaten doet voor de klassieke mechanica: het is de minimale informatie waarover men moet beschikken om de toestand van het systeem eenduidig te kunnen benoemen. Een subtiel verschil is dat in de kwantummechanica de ruimte van toestanden een projectieve vectorruimte is - een CSCO labelt alle basisvectoren, en een algemene toestand is hier een lineaire combinatie van.

Voorbeeld

Een klassiek voorbeeld is het waterstofatoom. De toestanden van het elektron zijn hier bepaald door hun energie, impulsmoment en de z-component van dit impulsmoment. Om een toestand van het elektron te beschrijven, volstaat het dus zijn eigenwaarde onder de Hamiltoniaan 'H', de operator 'L' (impulsmoment) en de operator 'L_z' te kennen. Een CSCO voor dit systeem is dus de verzameling

$$\{H, L, L_z\}$$

De eigenwaardes onder deze operatoren worden de kwantumgetallen (n,m,l) van het elektron genoemd, en de toestand van het elektron in een waterstofatoom kan dus in Diracnotatie geschreven worden als

$$|n, l, m\rangle.$$

De CSCO is in het algemeen niet uniek. Men kan bijvoorbeeld een basis van toestanden vinden die eigenvectoren zijn onder de operatoren $\{H, L, L_x\}$. Dit levert een andere basis, maar spant dezelfde vectorruimte van toestandsfuncties op.

Constante van Dirac

De **constante van Dirac**, ook wel genoemd de **gereduceerde constante van Planck**, is een aangepaste versie van de constante van Planck, h . Hij wordt geschreven als \hbar . De constante, die wordt uitgesproken als 'h-streep' (Engels: 'h-bar'), is genoemd naar Paul Dirac en wordt gebruikt om de Planckeenheden te definiëren.

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

De waarde van de constante van Dirac is:

$$\hbar = 1,054\,571\,628(53) \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 6,582\,118\,99(16) \cdot 10^{-16} \text{ eV}\cdot\text{s}.$$

\hbar is een kwantum van impulsmoment, waaronder spin. Het hoekmomentum van gelijk welk systeem is altijd een geheel veelvoud van deze waarde. \hbar komt ook voor in het onzekerheidsprincipe van Heisenberg. Dit wordt gebruikt om te beargumenteren dat \hbar een meer fundamentele eenheid is dan h , de constante van Planck.

Constante van Planck

De **constante van Planck**, aangeduid met h , is een natuurkundige constante die voorkomt in alle vergelijkingen van de kwantummechanica. De constante is later vernoemd naar de natuurkundige Max Planck, die deze constante in 1900 invoerde bij zijn verklaring van de straling van zwarte stralers. De constante heeft de waarde:^[1]

$$h = (6,626\ 069\ 57 \pm 0,000\ 000\ 29) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

De constante van Planck h is ingevoerd voor het verband tussen frequentie ν (Griekse nu) en energie E voor een lichtkwantum (foton) volgens:

$$E = h \nu$$

In veel gevallen wordt een variant hiervan gebruikt, die soms de constante van Dirac genoemd. Deze wordt geschreven als \hbar en is genoemd naar de Britse fysicus Paul Dirac. Deze wordt gebruikt om de Planckeenheden te definiëren. Het wordt uitgesproken als 'h-streep' of, in het Engels, als 'h-bar'.

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

\hbar is een kwantum van impulsmoment, waaronder spin. Het impulsmoment van een willekeurig systeem is altijd een geheel veelvoud van deze waarde. \hbar komt ook voor in de onzekerheidsrelatie van Heisenberg. Dit wordt gebruikt om te beargumenteren dat \hbar een meer fundamentele eenheid is dan h , de constante van Planck.

Voor h en \hbar kunnen de unicodetekens U+8462 en U+8463 gebruikt worden.

Toekomst

Volgens de voorgestelde herdefinitie van de basiseenheden, waaronder ook een herdefinitie van de kilogram, zal de constante van Planck exact $6,626\ 06X \times 10^{-34}$ Js gaan bedragen, met X een of meer nader te bepalen cijfers.

Referenties

[1] (en) Fundamental Physical Constants - Planck constant (http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?hlsearch_for=universal_in!), NIST

Correspondentieprincipe

Het **correspondentieprincipe** van Bohr is vanaf 1923 deel van de oude kwantummechanica.

Bohr heeft met het correspondentieprincipe aangeduid dat bij grote kwantumgetallen de klassieke mechanica geldig is. Het eist dus in zekere zin dat voor macroscopische systemen de kwantumeffecten veel minder goed zichtbaar zijn, en dat de fysica van zulke systemen zich herleidt tot de gewone mechanica die we in het dagelijks leven in werking zien. De tweede pijler van de kwantummechanica, de adiabatische invariantentheorie van Paul Ehrenfest is daarentegen geheel uit de kwantummechanica verdwenen.

Externe link

- wur.nl (Universiteit Wageningen) ^[1]

Referenties

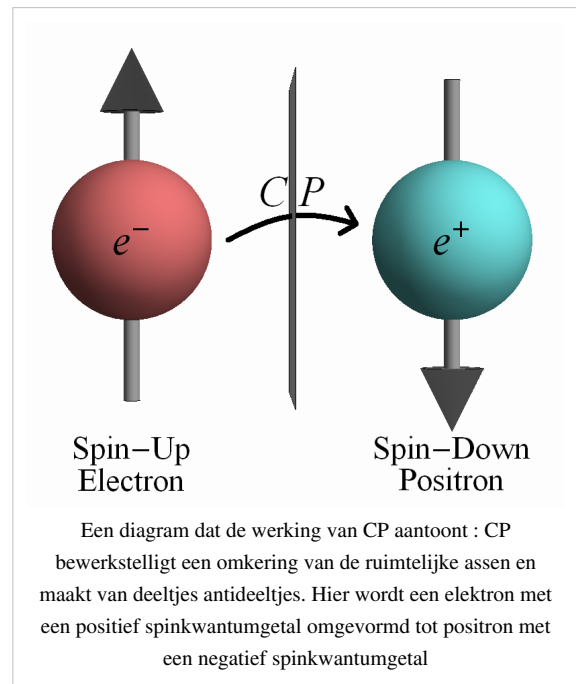
[1] <http://www.bip.wur.nl/NL/Quantumpagina/Interpretaties+van+de+quantum+theorie/De+Kopenhaagse+interpretatie/>

CP-symmetrie

In deeltjesfysica is de **CP-symmetrie** de symmetrie onder zowel een pariteit- als ladingtransformatie. De C komt van *charge* (lading), de P van pariteit.

Men dacht dat de combinatie van de twee afzonderlijke symmetrieën een behouden symmetrie zou opleveren, de CP-symmetrie. Echter er zijn ook schendingen van deze symmetrie gevonden in de zwakke wisselwerking. Als men CP-symmetrie met T-symmetrie, oftewel tijdsomdraaiing, combineert, krijgt men CPT-symmetrie, waarvan tot op heden geen schending is geobserveerd. Indien deze symmetrie daadwerkelijk niet wordt geschonden, moet T-symmetrie geschonden worden, omdat CP-symmetrie geschonden wordt.

In 1964 werd er een experiment uitgevoerd om het bestaan van CP-symmetrie te bevestigen, de uitkomst was echter dat deze symmetrie niet bestaat en er dus sprake is van CP-schending. Dit ontdekten Christenson, Cronin, Fitch en Turlay in een onderzoek van het vervalproces van kaonen. James Cronin en Val Fitch kregen hiervoor in 1980 de Nobelprijs.



CP-schending B-mesonen

Het verval van B-mesonen is een transformatie naar andere quarks, door de zwakke wisselwerking. De B-mesonen zouden stabiel zijn ware het niet dat de b-quark en antiquark een lading van de zwakke wisselwerking bevatten. Aangezien dat het geval is en B-mesonen zwaarder zijn dan vele andere mesonen, zijn er veel manieren hoe het B-meson kan vervallen. Al deze manieren bestaan er uit dat de b-quark zich transformeert in een andere quark, een t-, c- of u-quark, waarbij een t-quark zelf ook weer moet transformeren aangezien deze zwaarder is dan de b-quark.

Veel van deze transformaties kunnen experimenteel worden waargenomen en de lading van de zwakke wisselwerking kan worden gemeten.

Volgens het standaardmodel komt CP-schending voor in de zwakke wisselwerking. Specifieker, wanneer quarks transformeren door de zwakke wisselwerking in quarks met een andere elektrische lading. Alle interacties van dit type worden beschreven door de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix, kortweg CKM matrix. Deze matrix bestaat uit de negen verschillende koppelingsconstanten van de zwakke wisselwerking. Om de relaties die worden voorspeld door het standaardmodel te testen, moeten alle elementen, zowel het reële als imaginaire deel, bekend zijn. Om de imaginaire groottes van de elementen te bepalen, moet de CP-schending in veel mesonvervalprocessen worden gemeten. Kaonvervalprocessen geven informatie over de elementen van de eerste en tweede kolom van de matrix. Met vervalprocessen van B-mesonen kunnen elementen uit de derde rij en kolom worden bepaald. Dit betekent dat met de combinatie van gegevens afkomstig uit onderzoek naar het verval van K- en B-mesonen bijna de gehele matrix kan worden bepaald.

Met behulp van het standaardmodel en de CKM matrix kan er een ruwe schatting worden gemaakt over het voorkomen van CP-schending in vervalprocessen van B-mesonen. Dit biedt dus tevens een mogelijkheid om een experiment te bedenken, waarmee het standaardmodel gecontroleerd kan worden. B-mesonen kunnen vervallen in veel verschillende combinaties van lichtere deeltjes, daarom moet men als eerst bepalen welke combinaties de grootste waarschijnlijkheid hebben om CP-symmetrie te schenden. Als CP-symmetrie niet geschonden wordt moet het verval van het B-meson en zijn antideeltje gelijk verlopen, een verschil in vervalratio's duidt op CP-schending. Echter deze verschillen kunnen klein zijn en daardoor moeilijk te observeren. De meeste veelbelovende onderzoeken hebben betrekking op kleine verschillen en hangen waarschijnlijk af van het moment waarop het deeltje of antideeltje verval. Echter het verval vindt dusdanig snel plaats, dat deze tijd niet te meten is. Men baseert zich daarom op de afstand die een deeltje aflegt tussen ontstaan en verval. Hiervoor zijn echter zeer geavanceerde deeltjesversnellers en detectoren nodig.

Men verricht op twee plaatsen onderzoek naar CP-schending bij vervalprocessen van B-mesonen. Dit zijn het experiment BaBar in het Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) in de Verenigde Staten en Belle in het High Energy Accelerator Research Organization (KEK) in Japan.

Het BaBar experiment heeft aangetoond dat de ratio's van de vervalprocessen van het B-meson en zijn antideeltje niet gelijk zijn, oftewel er is sprake van CP-schending. De resultaten hiervan werden in de zomer van 2002 bekendgemaakt na analyse van 87 miljoen B/B-bar mesonparen gebeurtenissen. Consistente resultaten werden ook behaald in het Belle experiment. De resultaten van de experimenten zijn in overeenstemming met het standaardmodel.

CP-probleem in sterke wisselwerking

Het CP-probleem in de sterke wisselwerking is een probleem in de deeltjesfysica en is de vraag waarom kwantumchromodynamica de CP-symmetrie niet lijkt te schenden. De Lagrangiaan wordt gegeven door:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} \text{tr} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \frac{n_f g^2 \theta}{32\pi^2} \text{tr} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} + \bar{\psi} (i\gamma^\mu D_\mu - m e^{i\theta' \gamma_5}) \psi$$

Indien de QCD-hoek θ ongelijk aan nul is, moet er sprake zijn van CP-schending. Daarnaast bestaat de mogelijkheid dat de hoek θ' CP-schending veroorzaakt. Er is echter geen experimentele waarneming van CP-schending in de sterke wisselwerking. Deze tegenstrijdigheid wordt de *strong CP problem* genoemd. Men kan eventueel een onderscheid maken tussen het eerste probleem, waarom er geen waarneembaar effect van θ is, en het tweede probleem, waarom er geen waarneembaar effect van θ' gecombineerd met θ is. Onder bepaalde aannames kan de een in de ander converteren en vice versa. Er zijn meerdere pogingen gedaan om aan te tonen dat θ niet leidt tot een CP-schending in QCD. In ieder geval kan het eerste probleem worden opgelost door aan te nemen dat θ gelijk is aan nul. Hoewel dit een speciale waarde is, vergroot dit de symmetrie van de actie en is het natuurlijk volgens 't Hooft's eisen van natuurlijkheid. Het gelijkstellen van θ aan θ' is echter onnatuurlijk, de symmetrie van een effectieve actie

wordt vergroot, maar niet van de klassieke actie. Het tweede probleem kan dus niet op die manier worden opgelost.

De bekendste oplossing van het probleem is de Peccei-Quinn theorie. Dit is een oplossing gesuggereerd door R. D. Peccei en H. R. Quinn in 1977. Zij postuleerden dat de volledige Lagrangiaan van het standaardmodel invariant zou zijn onder een extra symmetrie, tegenwoordig de Peccei-Quinn symmetrie genoemd. Deze axiale symmetrie is een symmetrie van de klassieke theorie, onderhevig aan axiale anomalie en het kan spontaan worden gebroken. Als gevolg van het spontaan verbreken van de symmetrie moeten er Golstone bosonen worden ingevoerd, axionen genaamd. Hierdoor verandert de parameter $\bar{\theta} = \theta - \theta'$ in een dynamische grootte, afhankelijk van het axionveld. In het model zal $\bar{\theta}$ dynamisch een waarde krijgen gelijk aan nul. Dit betekent dat er wel sprake is van CP-symmetrie.

Baryongetal en de asymmetrie van materie en antimaterie

Eén van de onopgeloste theoretische vraagstukken is waarom het heelal hoofdzakelijk bestaat uit materie, in plaats van gelijke hoeveelheden materie en antimaterie. In het standaardmodel zou de oerknal gelijke hoeveelheden van materie en antimaterie moeten hebben gecreëerd als er sprake is van CP-symmetrie. Dit betekent dat protonen zouden annihilieren met antiprotonen, elektronen met positronen en neutronen met antineutronen etc., dit zou als gevolg hebben dat er enkel fotonen zouden bestaan in het heelal. Aangezien dit overduidelijk niet het geval is, moeten de fysische wetten anders zijn voor materie dan voor antimaterie, oftewel er moet sprake zijn van CP-schending.

Hierom heeft men gepostuleerd dat er een kracht is waarbij het baryongetal en leptongetal niet behouden blijft. Het baryongetal is gedefinieerd als

$$\Delta n_{bar} = n_{bar} - n_{anti-bar}$$

Hierbij is n_{bar} het aantal baryonen en $n_{anti-bar}$ het aantal antibaryonen. Als n_{γ} het aantal fotonen in de kosmische achtergrondstraling is, is er een gerelateerde grootte:

$$r_{bar} = \frac{\Delta n_{bar}}{n_{\gamma}}$$

In ons deel van het universum zijn er vrijwel geen anti-baryonen:

$$n_{anti-bar} \ll n_{bar} \ll n_{\gamma}$$

Het is mogelijk dat er in andere delen juist veel meer anti-baryonen dan baryonen zijn en dat het universum uit delen bestaat waar het één dan wel het ander overheerst, waarbij het universum als geheel wel een symmetrie vertoont tussen materie en antimaterie. Echter dit wordt over het algemeen beschouwd als onwaarschijnlijk, vooral omdat er geen mechanisme is gevonden die het zou verklaren. Het materie-antimaterie symmetrische heelal na de Big Bang zou dan namelijk grote regio's moeten ontwikkelen met een baryongetal ongelijk aan nul. Dit is niet te verklaren door statistische fluctuaties noch door dynamische effecten.

Observatie heeft een waarde voor r_{bar} geleverd. r_{bar} is ongeveer gelijk aan 10^{10} , namelijk $2,6 < r_{bar} < 6,2$. Dit betekent dat voor elke tien miljard jaar voor paren van deeltje en antideeltje er één extra deeltje was zonder antideeltje om te annihilieren tot de achtergrondstraling. Dit is een zeer klein getal.

De vraag is dus onder welke omstandigheden het baryongetal gelijk kan zijn aan nul in het begin, de Planck-tijd, en kan ontwikkelen tot een waarde ongelijk aan nul. De Russische theoretische fysicus Andrei Sacharov schreef in een paper dat er drie voorwaarden zijn om dit mogelijk te maken.

1. Aangezien het baryongetal in het begin anders is dan aan het eind, moet er een baryongetal schendende transformatie bestaan.
2. CP-symmetrie moet geschonden worden. Als dit niet het geval is, zou er voor elke transformatie waarbij het baryongetal verandert een CP geconjugeerde transformatie zijn en zou er geen baryonnummer ongelijk aan nul kunnen ontstaan.

3. Tenzij men wil aannemen dat de CPT-symmetrie ook geschonden wordt, moeten de transformaties waarbij CP-symmetrie wordt geschonden plaatsvinden buiten een thermisch evenwicht. In een thermisch evenwicht wordt de tijd irrelevant en reduceert CPT-symmetrie naar CP-symmetrie. Het schenden van CP-symmetrie zou dus betekenen dat CPT-symmetrie geschonden wordt.

Aan al deze drie condities moet tegelijkertijd worden voldaan. Echter de keerzijde hiervan is dat als er eenmaal een baryongetal ongelijk aan nul is, dat deze door bovengenoemde condities ook weer gelijk kan worden aan nul door dezelfde transformaties.

Er is op dit moment geen experimenteel bewijs van deeltjesinteracties waarbij het baryongetal wordt geschonden. Alle waargenomen reacties hebben hetzelfde baryongetal voor en na de reacties. Het is al bekend dat er sprake is van CP-schending in verschillende gebieden, dus aan voorwaarde twee kan worden voldaan. De laatste voorwaarde stelt dat de snelheid van de reactie die een baryon asymmetrie veroorzaakt lager is dan de snelheid van de expansie van het universum. In deze situatie bereiken deeltjes en hun antideeltjes geen thermisch evenwicht door de snelle expansie van het universum, waardoor annihilatie van paren minder vaak voorkomt.

Grand unified theories

Toen het concept van GUTs theorie van alles ontstond werd er pas aandacht geschonken aan de paper van Sacharov, omdat er standaard aan de drie benodigde voorwaarden worden voldaan in deze theorieën.

1. Reacties waarbij het baryongetal verandert, moeten bestaan. Aangezien quarks en leptonen in dezelfde 'Gauge group' worden geplaatst, moeten er gauge-interacties bestaan die baryon- en leptongetallen kunnen veranderen.
2. Deze modellen zijn dusdanig complex dat er meerdere bronnen zijn van CP-schending.
3. De 'grand unification' betekent dat er een energieschaal, M_{GUT} , is waarbij de fase verandert. Bij temperaturen rond M_{GUT} zijn er deeltjes, X-bosonen, die een massa van ongeveer M_{GUT} hebben. Het verval hiervan duurt daarom dusdanig lang dat ze geen thermisch evenwicht bereiken.

Het feit dat dit probleem opgelost kan worden door GUT modellen is een groot voordeel van deze modellen, aangezien ze niet zijn opgezet om de asymmetrie te verklaren. Aan de andere kant is het misleidend om te beweren dat baryogenesis hiermee verklaard is. Er zijn namelijk problemen bij baryogenesis op een GUT schaal. Ten eerste is er een grote kans dat een baryongetal dat in een heelal met zo'n hoge temperatuur is ontstaan zal verdwijnen tijdens de verdere ontwikkeling van het heelal en ten tweede is er zeer weinig bekend over de dynamica in een GUT fase. Het zou voorbarig zijn om hiermee direct baryogenesis op GUT schaal af te wijzen, maar het zou heel goed zo kunnen zijn dat het slechts een bewijs is dat het principe van een dynamisch gegeneerd baryongetal mogelijk is.

Elektrozwakke wisselwerking

Dit gebied is vrij goed bekend. Men heeft hier CP-schending waargenomen en daarnaast kunnen reacties buiten een thermisch evenwicht plaatsvinden. Echter dan blijft er nog de voorwaarde over dat het baryongetal geschonden moet worden. Dit is niet het geval op de klassieke schaal, maar op kwantummechanische schaal is hier wel sprake van. Het is dus mogelijk dat baryogenesis plaatsvindt door de elektrozwakke wisselwerking. Deze hypothese krijgt veel aandacht, omdat er relatief veel bekend is over de elektrozwakke wisselwerking en een baryongetal dat hierdoor zou ontstaan zou niet substantieel veranderen.

CPT-symmetrie

CPT-symmetrie is een combinatie van CP-symmetrie en T-symmetrie. Het komt er dus op neer, dat fysische wetten dezelfde blijven, als alle ladingen door tegengestelde vervangen worden (ladingconjugatie), alle dimensies gespiegeld worden (pariteitsymmetrie) en de tijd omgekeerd wordt.

Tot nu toe is geen schending van CPT-symmetrie gevonden. Er is wel schending van CP-symmetrie gevonden in de zwakke wisselwerking met name bètaverval. Als CP-symmetrie geschonden wordt en CPT-symmetrie niet, dan moet T-symmetrie ook geschonden worden. Als de T-symmetrie geschonden wordt, dan betekent dat, dat de fysica niet symmetrisch is in de tijd.

De Haas-van Alphen-effect

Het **de Haas-van Alphen-effect** (dHvA) werd in 1930 ontdekt door W.J. de Haas en P.M. van Alphen^[1].

Het dHvA-effect beschrijft kwantummechanische oscillaties als functie van een extern magnetisch veld, dit is een gevolg de splitsing van energie-niveaus in een magnetisch veld (Landau-kwantisatie).

De energieniveaus worden gegeven door een

$$\left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega_c, \text{ waarbij } \omega_c = \frac{eB}{m}$$

met de cyclotron-frequentie. Op het absolute nulpunt van temperatuur worden de elektronen opgevuld tot aan het Fermi-niveau, voor sommige waarden van het B-veld wordt daarmee precies een aantal energieniveaus geheel gevuld en is de energie gelijk aan die zonder het B-veld. Voor tussenliggende waarden voor B is het energieniveau hoger. Daarom oscilleert de Fermi-energie als functie van het magnetisch veld. Daarmee oscilleren ook alle fysische grootheden die van de Fermi-energie afhangen op dezelfde manier, zoals bijvoorbeeld de magnetische susceptibiliteit.

Het effect is alleen meetbaar bij zuivere kristallen (anders wordt het effect vervaagd door interacties) in sterk magnetische velden (anders is de splitsing te klein) en bij lage temperaturen (anders kunnen elektronen te makkelijk door thermische activatie van niveau wisselen).

Referenties

[1] W.J. de Haas, P.M. van Alphen; Communications from the Physical Laboratory of the University of Leiden 208d, 212a (1930)

Decoherentie

Met **decoherentie** wordt in de kwantummechanica het mechanisme bedoeld waardoor de coherentie-eigenschappen van bepaalde kwantumtoestanden geheel of gedeeltelijk worden onderdrukt.

In de kwantummechanica kan een systeem zich in een superpositie van eigentstanden bevinden: de te verwachten meetwaarde is dan niet alleen onbekend aan de waarnemer, maar ook onbepaald; het systeem bevindt zich dan letterlijk in meerdere toestanden gelijktijdig. Deze nog onbepaalde eigenschappen kunnen leiden tot kwantumverschijnselen die met klassieke natuurkunde niet te verklaren zijn (bijvoorbeeld interferentie van een deeltje met zichzelf). Anderzijds kan een kwantummechanisch systeem zich ook in een gemengde toestand bevinden: dit geeft onbekendheid over de toestand voor de waarnemer aan op dezelfde manier als de klassieke onbekendheid van een toevalsproces, zonder dat er daadwerkelijk sprake is van gelijktijdigheid van kwantumtoestanden.^[1]

Decoherentie treedt op wanneer een (microscopisch) gesloten systeem met zijn omgeving een wisselwerking aangaat die ervoor zorgt dat zowel het systeem als de (macroscopische) omgeving een onomkeerbare verandering doormaken en er onder meer kwantumverstremming optreedt. Bij een toestand van kwantummechanische superpositie treedt in dit geval geen interferentie op tussen de golffuncties van het systeem en zijn omgeving. Als de superpositie een golffunctie is, kunnen aan de hand van decoherentie verschijnselen als het ineenstorten van de golffunctie worden verklaard, maar daarover is nog debat. Decoherentie kan ook worden gezien als het verlies van informatie van een systeem aan de omgeving.

Decoherentie is van belang bij het koppelen van processen die zich binnen de klassieke natuurkunde afspelen aan processen op kwantummechanisch niveau. Anderzijds vormt het verschijnsel een probleem bij het fabriceren van de nog hypothetische kwantumcomputer, aangezien de nauwkeurigheid hiervan in hoge mate afhangt van een ongestoorde coherentie op kwantummechanisch niveau.

Bronnen, noten en/of referenties

Deuteron

Een **deuteron** is een atoomkern bestaande uit een proton en een neutron. Het is het éénwaardige kation van deuterium, een isotoop van waterstof.

Slechts een zeer kleine fractie van het waterstof in het heelal bestaat uit deuterium. Doordat een deuteron ongeveer twee keer zo zwaar is als een normale waterstofkern, zijn de twee isotopen gemakkelijk te scheiden. Deuteronen spelen een belangrijke rol bij kernfusie.

Dichtheidsfunctionaaltheorie

Dichtheidsfunctionaaltheorie (Engels: *Density Functional Theory*, DFT) is een kwantummechanische methode die wordt toegepast in de natuur- en scheikunde. De theorie wordt gebruikt bij het onderzoek naar de elektronenstructuur van grotere moleculen. Ook zijn er toepassingen voor het bestuderen van vaste stoffen en vloeistoffen.

Beschrijving van de theorie

Klassieke methoden voor het berekenen van de elektronenverdeling in moleculen, met name de Hartree-Fockmethode en latere varianten ervan, zijn gebaseerd op ingewikkelde veel-elektron golffuncties. Het voornaamste doel van DFT is het vervangen van deze complexe golffuncties door de elektronendichtheid als basisgrootte. Voor de golffuncties van N deeltjes zijn $3N$ variabelen nodig, drie ruimtecoördinaten voor elk van de deeltjes. De elektronendichtheid kan beschreven worden met drie variabelen en is daarmee een stuk simpeler te hanteren, zowel conceptueel als praktisch.

DFT is voor het eerst geformuleerd op basis van het Thomas-Fermi model. Met de Hohenberg-Kohntheorema's (HK) werd er een gedegen theoretische basis onder gelegd. Het eerste van deze theorema's legt de basis onder de één-op-één-relatie tussen de elektronenverdeling in de grondtoestand en de grondtoestand van de golffunctie van het veel-deeltjes-systeem. Het tweede theorema geeft aan dat de elektronenverdeling in de grondtoestand een energiminimum is voor de elektronische energie in het systeem. De eerste formulering van HK gold alleen voor de grondtoestand in afwezigheid van een magnetisch veld, maar later is de geldigheid algemener gemaakt.

HK stelt alleen dát een relatie bestaat, maar leidt niet tot concrete relaties. In de relaties worden aannames gemaakt en benaderingen uitgevoerd. Het blijkt dan ook mogelijk de theorema's uit te breiden tot het tijddomein, (TDDFT) waarmee ook aangeslagen toestanden beschreven kunnen worden.

De meest toegepaste vorm van DFT is via de Kohn-Sham-methode. Bij deze methode wordt het onoplosbare probleem van veel elektronen in interactie met elkaar en in een extern statisch potentiaalveld gereduceerd tot een aantal elektronen die geen interactie hebben met elkaar en die bewegen in een effectief potentiaalveld. In het effectieve potentiaalveld zijn de effecten van het externe veld én de Coulomb-interacties tussen de elektronen verwerkt. De onderlinge interacties tussen elektronen zijn voor een deel afhankelijk van het materiaal waarin de elektronen voorkomen. In het vinden van een goede beschrijving van deze effecten (direct en de materiaalcomponent) ligt een van de grootste uitdagingen (of moeilijkheden) van KS DFT.

De eenvoudigste benadering is gebaseerd op het Thomas-Fermi-model, de LDA (Local Density Approximation). De beschrijving van de interactie tussen een elektronengas en zijn omgeving levert de gegevens ervoor.

DFT is sinds de zeventiger jaren populair voor berekeningen in de vastestoffysica. DFT, in combinatie met LDA, geeft in veel gevallen resultaten die goed overeenkomen met de experimenteel gemeten waarden. Dit is zeker waar als de benodigde rekentijd in aanmerking wordt genomen. In de kwantumchemie werd deze nauwkeurigheid pas in de jaren 90 gehaald. Tegenwoordig (begin 21e eeuw) geldt DFT als dé rekenmethode in beide takken van wetenschap. Ondanks deze verbeteringen zijn er nog steeds problemen bij het gebruik van DFT in het correct

beschrijven van intermoleculaire interacties en dispersie. Gedacht moet dan worden aan bijvoorbeeld de Vanderwaalskracht of de bandgap in halfgeleiders. De problemen van DFT (als enige methode) met dispersie wreken zich vooral bij de beschrijving van systemen waar deze vorm van interactie domineert, zoals bij sommige edelgassen en in de beschrijving van biomoleculen. De ontwikkeling van nieuwe DFT-methoden door de functies aan te passen of extra termen mee te nemen is momenteel een onderwerp van studie.

Het Thomas-Fermi model

De voorganger van DFT was het *Thomas-Fermi* model, ontwikkeld door Thomas en Fermi in 1927. Zij berekenden de energie van een atoom door de kinetische energie als een functie van de elektronendichtheid te behandelen, gecombineerd met de klassieke beschrijving van de kern-elektron en de elektron-elektroninteractie.


Het was een eerste idee, hoewel de nauwkeurigheid nog niet groot was door het ontbreken van de "exchange energy" van een atoom, zoals deze door de Hartree-Fock theorie beschreven werd. Dirac voegde deze term in 1928 toe aan DFT.

De resultaten van de Thomas-Fermi-Dirac theorie waren nog steeds niet echt goed. Dit was aan verschillende zaken te wijten:

- de grootste foutenbron lag in de weergave van de kinetische energie.
- de fouten in de "exchange energie" waren kleiner maar droegen het hunne bij.
- het compleet achterwege laten van de elektroncorrelatie vormde de laatste bron van grote onnauwkeurigheid.

Dichtheidsmatrix

In de kwantummechanica is een **dichtheidsmatrix** een zelftoegevoegde (of hermitische) positief-semidefiniete matrix (mogelijk oneindig dimensionaal) van spoor een, die de statistische toestand van een kwantumsysteem beschrijft. Het formalisme werd in 1927 geïntroduceerd door John von Neumann, maar werd volgens andere bronnen onafhankelijk van von Neumann geformuleerd door Lev Landau en Felix Bloch).

<p><i>Geplaast op:</i> 05-08-2010</p>	<p><i>Dit artikel is een beginnetje over natuurkunde. U wordt uitgenodigd op bewerken^[1] te klikken om uw kennis aan dit artikel toe te voegen.</i></p>	
---	---	---

Referenties

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki:Dichtheidsmatrix>

Dirac-operator

In de wiskunde en kwantummechanica is een **Dirac-operator** een differentiaaloperator die een formele wortel van een tweede-orde operator, zoals een Laplaciaan, is. Men noemt dit ook wel een half-iteratieve wortel. Het oorspronkelijke geval, op basis waarvan Paul Dirac, wat nu de Dirac-operator wordt genoemd, ontwikkelde, was het formeel factoriseren van een operator voor de Minkowski-ruimte, om zo een vorm van de kwantumtheorie te verkrijgen, die verenigbaar was met de speciale relativiteitstheorie; om de relevante Laplaciaan als een product van eerste-orde operatoren te verkrijgen, introduceerde hij spinoren.

Laat in het algemeen D een eerste-orde differentiaaloperator te zijn die werkt op een vectorbundel V over een Riemann-variëteit M .

Als

$$D^2 = \Delta,$$

waar Δ de Laplaciaan van V is, wordt D een **Dirac-operator** genoemd.

In de deeltjesfysica wordt deze eis vaak versoepeld: alleen het tweede-orde deel van D^2 moet gelijk zijn aan de Laplaciaan.

Dirac-vergelijking

De **Dirac-vergelijking** is een relativistische kwantummechanische golfvergelijking, die in 1928 werd geformuleerd door de Britse natuurkundige Paul Dirac. De vergelijking biedt een beschrijving van de elementaire spin- $1/2$ -deeltjes, zoals elektronen, die zowel in overeenstemming is met de beginselen van de kwantummechanica als met die van de speciale relativiteitstheorie. Het was de eerste theorie die de relativiteit volledig in het kader van de kwantummechanica beschreef.

De Dirac-vergelijking beschrijft de fijne details van het waterstof-spectrum op een volledig wiskundig gestrengde manier.

De vergelijking duidde ook impliciet op het bestaan van een nieuwe vorm van materie, de zogenaamde antimaterie, tot dan toe onvermoed en niet opgemerkt. De Dirac-vergelijking ging dus vooraf aan de experimentele bevestiging van het bestaan van antimaterie.

Dirac-vergelijking

De vergelijking in haar originele vorm luidt: ^{[1][2]}

$$(c\boldsymbol{\alpha} \cdot \hat{\mathbf{p}} + \beta mc^2) \psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

met $\psi = \psi(\mathbf{r}, t)$ een veld voor fermionen (Dirac zag ψ als de golf functie van het elektron), \mathbf{r} en t zijn de ruimte- en tijd-coördinaten, m is de rustmassa van het elektron, $\hat{\mathbf{p}}$ is de impulsoperator, c is de lichtsnelheid, en \hbar is de gereduceerde constante van Planck ($\hbar/2\pi$). Verder is $\boldsymbol{\alpha}$ is een vectoroperator met als componenten 4×4 matrices: $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$, en β is ook een 4×4 matrix.

Bronnen, noten en/of referenties

Diracnotatie

Kwantummechanica
$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
Onzekerheidsrelatie
Algemene inleiding... [1]
Achtergrond
Klassieke mechanica Interferentie Hamiltonformalisme
Fundamentele begrippen
Kwantumtoestand · Golffunctie · Postulaten Superpositie · Onzekerheidsprincipe Schrödingervergelijking · Tunneffect Uitsluitingsprincipe Diracnotatie
Gevorderde onderwerpen
Interpretatie Klein-Gordonvergelijking Dirac-vergelijking Kwantumveldentheorie Kwantumgravitatie

Experimenten

Schrödingers kat
 Tweespletenexperiment
 Tunneleffect
 Stern-Gerlach-experiment

Wetenschappers

Planck · Einstein · Bohr
 · Sommerfeld · Bose ·
 Kramers · Heisenberg ·
 Born · Jordan · Pauli ·
 Dirac · de Broglie ·
 Schrödinger · von
 Neumann · Wigner ·
 Feynman · Bohm ·
 Everett · Bell

De **Diracnotatie**, ook wel **bra-ketnotatie**, is een bepaalde notatie voor de kwantumtoestanden van een systeem. Meer bepaald is het een notatie voor de vectoren en lineaire functionalen die in de kwantummechanica gebruikt worden. De notatie werd ontwikkeld door kwantumfysicus Paul Dirac.

In deze notatie wordt een vector of eigenfunctie (een *ket*) op de volgende manier genoteerd:

$$|\Psi\rangle$$

Een lineaire functionaal (een *bra*) wordt genoteerd als

$$\langle\Phi|$$

In deze notatie krijgt een inproduct de volgende overzichtelijke notatie:

$$\langle\Phi|\Psi\rangle$$

Een lineaire functionaal komt in dit geval dus neer op een complex geconjugeerde. Dit is alleen zo wanneer de duale ruimte van een ruimte isomorf is met de ruimte zelf, wat bij een Hilbertruimte (zoals de ruimte waarin alle kwantummechanische toestanden zitten) inderdaad zo is. Omdat een bra een lineaire functionaal is, is de uitkomst van deze uitdrukking een complex getal. In de kwantummechanica hangt deze uitdrukking samen met de kans dat de toestand ψ vervalt in de toestand φ .

Diraczee

De **Diraczee** is een theoretisch model van het vacuüm als een oneindige zee van deeltjes met negatieve energie. Ze is in 1930 ingevoerd door de Britse natuurkundige Paul Dirac als verklaring voor de anomale kwantumtoestanden met negatieve energie die worden voorspeld door de Dirac-vergelijking voor relativistische elektronen. Het positron, het antideeltje van het elektron, werd oorspronkelijk voorgesteld als een gat in de Diraczee, nog voor de eerste waarneming ervan in 1932.

Oorsprong

De oorsprong van de Diraczee ligt bij het energiespectrum van de Dirac-vergelijking, in 1928 door Dirac opgesteld als vereniging van de Schrödingervergelijking en de speciale relativiteitstheorie. Hoewel deze vergelijking heel succesvol was bij de beschrijving van de dynamica van elektronen, was er een vreemd kenmerk: voor iedere kwantumtoestand met positieve energie E was een bijbehorende toestand met energie $-E$. Dit stelt geen probleem als men geïsoleerde elektronen beschouwt, aangezien de energie daarvan behouden moet worden. Men kan dus elektronen beschouwen van om het even welke energie. Het wordt pas problematisch als men elektromagnetische velden begint in te voeren, aangezien elektronen hierdoor fotonen zullen kunnen uitzenden. Dit proces kan onbeperkt doorgaan terwijl het elektron steeds lager en lager in energie zakt. In werkelijkheid is het niet zo dat elektronen zich gedragen.

Diracs oplossing hiervoor was gebaseerd op het uitsluitingsprincipe van Pauli. Elektronen zijn fermionen en gehoorzamen dit principe, waardoor het onmogelijk is er twee van op eenzelfde energieniveau te hebben. Dirac stelde dat alle toestanden met negatieve energie bezet zijn en die met positieve energie nog vrij. Als we dus een elektron willen toevoegen, moet dat positieve energie hebben, aangezien er anders geen plaats is. Elektronen kunnen hun energie ook niet meer oneindig veel laten afnemen, aangezien ze niet onder nul kunnen zakken.

Dirac wees er eveneens op de mogelijkheid dat alle negatieve-energietoestanden bezet zouden zijn op een na. Dit "gat" in een zee van elektronen met negatieve energie zou zich gedragen alsof het een positief geladen deeltje was. Oorspronkelijk dacht Dirac dat het hier om een proton zou gaan, maar Robert Oppenheimer wees erop dat een elektron en een gat zouden kunnen annihilieren (het elektron valt in het gat), waarbij onder de vorm van fotonen een energie zou vrijkomen van de orde van de rustenergie van het elektron. Als de gaten werkelijk protonen waren, zouden onmogelijk stabiele atomen kunnen bestaan. Hermann Weyl merkte ook op dat een gat zich zou gedragen als had het dezelfde massa als een elektron, terwijl een proton zowat tweeduizend keer zwaarder is. Het probleem werd uiteindelijk opgelost toen in 1932 het positron was ontdekt door Carl Anderson. Dit deeltje had alle eigenschappen van zo'n gat.

Huidige zienswijze

Ondanks het succes ervan leek de idee van de Diraczee voor velen niet bijster elegant. Het bestaan van de zee impliceert een oneindige negatieve lading die de hele ruimte vult. Men zou dan moeten stellen dat alle elektronen in de zee samen geen netto elektrisch veld opwekken en geen netto energie of impuls hebben. Ze zouden ook niet met elkaar mogen interageren, aangezien de interacties oneindig sterk zouden zijn. Hierdoor zou men de Diracvergelijking niet meer mogen gebruiken, aangezien we niet meer kunnen spreken over verschillende zo goed als onafhankelijke deeltjes.

De ontwikkeling van de kwantumveldentheorie in de jaren '30 maakte het mogelijk de Diracvergelijking te herformuleren zodat positronen kunnen worden beschouwd als "echte" deeltjes in de plaats van als de afwezigheid van een deeltje. Hierdoor moet geen oneindige zee van deeltjes meer worden ingevoerd. Dit beeld is veel overtuigender, aangezien het alle geldige voorspellingen van de Diraczee mee heeft (elektron-positronannihilatie...). De veldformulering elimineert echter niet alle problemen van de Diraczee. In het bijzonder wordt het probleem van

vacuüm met oneindige energie niet opgelost, maar onder het tapijt geveegd.

Analogieën

Het is interessant op de merken dat het idee van Dirac succesvol kan worden toegepast in de vastestoffysica, waar de valentieband van een vaste stof kan worden beschouwd als een "zee" van elektronen. Hierin kunnen gaten voorkomen, dewelke zeer belangrijk zijn voor het begrijpen van halfgeleiders. Deze gaten worden echter niet "positron" genoemd. In de vastestoffysica is er de lading van de positieve ionen die de lading van de elektronencompenseert.

Dualiteit van golven en deeltjes

De **dualiteit van golven en deeltjes** is een beginsel van de kwantummechanica dat zegt dat alle deeltjes zich onder bepaalde omstandigheden als golven gedragen en alle golven zich onder bepaalde omstandigheden als een stroom deeltjes gedragen.

Het begon allemaal met de vraag of licht nu eigenlijk een golf of een stroom deeltjes is.

Christiaan Huygens is vooral bekend geworden met zijn golftheorie van het licht (1678) in zijn *Traité de la lumière* (1690) (zie ook Principe van Huygens). De latere theorie van Isaac Newton (°1643-1727) in zijn *Opticks* ging hier tegenin: hij verklaarde weerkaatsing en breking van licht juist met lichtdeeltjes. De experimenten van Thomas Young met interferentie in 1801 konden niet met deeltjes worden verklaard, maar wel met Huygens' golftheorie, zodat Newtons lichttheorie werd verworpen.

Een andere aanwijzing dat licht bestond uit golven kwam in 1873 vanuit Maxwells theorie over elektromagnetisme. In deze theorie opperde James Clerk Maxwell het bestaan van elektromagnetische golven. Later werd experimenteel aangetoond dat deze golven echt bestonden. Maxwell berekende wat de snelheid van deze elektromagnetische golven moest zijn. Deze bleek gelijk te zijn aan de snelheid van het licht. Wat deed vermoeden dat licht uit elektromagnetische golven bestond.

In navolging van Christiaan Huygens en Maxwell dachten de fysici daarom dat licht een golfverschijnsel was, maar in 1905 leek Albert Einsteins theorie voor het foto-elektrisch effect erop te wijzen, dat het toch deeltjes betrof.

Tegenwoordig weten we dat licht, en ook materiedeeltjes zoals elektronen, zich in sommige opzichten gedragen als deeltjes (in de zin van precies gelokaliseerde, afgemeten dingetjes) en in sommige opzichten als een golf. Elk deeltje voldoet immers aan de Schrödingervergelijking, die een golfvergelijking voorstelt.

Een deeltje met impuls \mathbf{p} en energie E gedraagt zich bij diffractie en interferentie als een golf met golfvector \mathbf{k} en pulsatie ω . Een golfverschijnsel met golfvector \mathbf{k} en pulsatie ω gedraagt zich bij wisselwerkingen als een stroom deeltjes met impuls \mathbf{p} en energie E .

$$p = \hbar k$$

$$E = \hbar \omega$$

waarin \hbar de constante van Dirac voorstelt. In het eendimensionale geval schrijven elementaire leerboeken dit meestal in functie van de golflengte λ en de frequentie ν

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

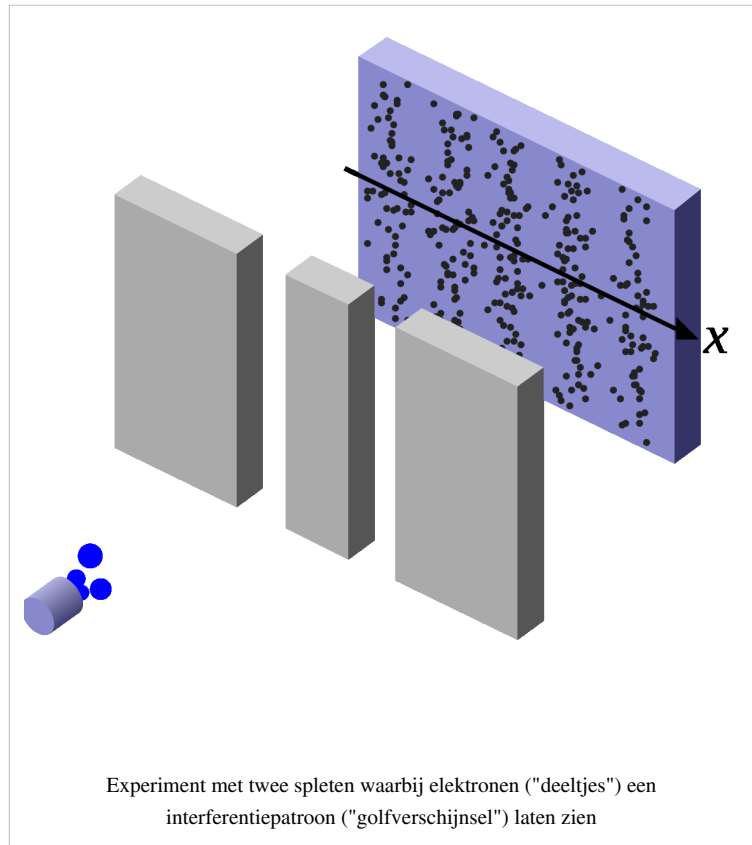
$$E = h\nu$$

waarin h de constante van Planck voorstelt.

- de *beweging* wordt het best beschreven met de golfmechanica, die voorspellingen doet van de kans om een deeltje op verschillende plaatsen aan te treffen
- *emissie en absorptie* gaat per afgemeten hoeveelheid kwantum – typisch voor deeltjes
- ook de *hoeveelheid* van iets vertoont een deeltjeskarakter: ladingen zijn altijd een geheel veelvoud van (een derde van de) de lading van een elektron; de energie van een monochrome lichtstraal is een geheel veelvoud van de energie van één foton van die golflengte.

Het golf-deeltje-dualisme is een van de eerste merkwaardige dingen die men tegenkomt in de kwantummechanica. Het betekent dat eenvoudige, alledaagse beelden zoals de biljartbal (voor een deeltje) of de watergolf (voor een golfverschijnsel) tekortschieten: wat er in werkelijkheid is, is noch zo een golf, noch zo een deeltje, maar iets waarvoor we beide beelden soms kunnen gebruiken. De volledige, wiskundige beschrijving uit de kwantummechanica laat in het midden wat er precies is.

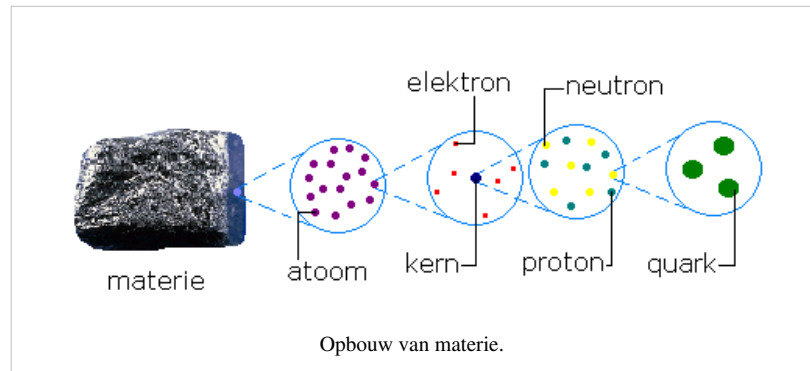
De snaartheorie heeft een alternatieve uitleg, waarbij het golf- dan wel deeltjesgedrag direct uit de theorie af te leiden is. De snaartheorie is eigenlijk nog een hypothese, hoewel mathematische modellen doen vermoeden dat ze goed te gebruiken is om kwantumfysische processen te beschrijven en voorspellen.



Elektron

Het **elektron** (Oud-Grieks ἤλεκτρον, Nieuwgrieks ἤλεκτρο, barnsteen dat door wrijving elektrisch geladen werd) is een negatief geladen elementair deeltje, dat gebonden kan zijn (bijvoorbeeld in een atoom) of zich vrij in de ruimte kan bevinden. Als het zich in de ruimte bevindt ondervindt het (net als een ion) invloed van een elektrisch veld en als het beweegt t.o.v.

een magnetisch veld ook invloed daarvan. Zie Lorentzkracht.



Historie en etymologie

De elektrische eigenschappen van barnsteen waren al bekend aan Thales van Miletos (ca 600 BC). De Engelse term "electric" werd voor het eerst gebruikt door Francis Bacon in de 1620er jaren; de term "electricity" werd vermoedelijk voor het eerst door Sir Thomas Browne gebruikt in zijn boek *Pseudodoxia Epidemica* (1646). Meer informatie in de Engelse Wikipedia-lemma's in "Externe links".

Barnsteen = ἤλεκτρον in het Oud-Grieks en ἤλεκτρο in het Nieuwgrieks.

Elektron = ηλεκτρόνιο in het Nieuwgrieks.

Structuur van het atoom

Atomen bestaan volgens Rutherfords atoommodel uit een positief geladen atoomkern, waaromheen evenveel negatief geladen elektronen draaien als er positief geladen protonen zijn in de kern. De protonen en neutronen in de kern van het atoom bevatten vrijwel de volledige massa van het atoom. Ze zijn ruim 1800 maal zo zwaar als een elektron, of specifiek: protonmassa = 1836,15 x elektronmassa, neutronmassa = 1838,68 x elektronmassa. (Bron: David Griffiths: *Introduction to Elementary Particles*. Harper and Row Publishers, 1987)

Kenmerken van het elektron

Het elektron is een elementair deeltje met spin 1/2, en is dus een fermion, zoals het proton, het neutron en het positron. Het antideeltje van het elektron heet positron. Voor zover men weet heeft het elektron geen verdere inwendige structuur. Volgens de snaartheorie is het elektron, evenals andere elementaire deeltjes, een bepaald trillingspatroon in een eendimensionale snaar. Maar over deze snaartheorie is nog veel discussie.

Het elektron heeft een negatieve lading gelijk aan het elementaire ladingskwantum e ($1,6022 \times 10^{-19}$ Coulomb), voor het eerst gemeten door Robert Andrews Millikan met zijn oliedruppelexperiment.

Elektrische ladingen komen alleen in veelvoud van 1 e voor. Opmerking: volgens het standaardmodel van de deeltjesfysica *kunnen* elektrische ladingen *alleen* voorkomen in veelvoud van 1 e .

De rustmassa van het elektron is $9,109534 \times 10^{-31}$ kg, wat 1/1836e is van de massa van een proton en overeenkomt met een rustenergie van 511,007 keV. Het elektron heeft overigens net als een foton ook golfeigenschappen en is onderhevig aan de dualiteit van golven en deeltjes volgens de hypothese van De Broglie. Deze golfeigenschap van elektronen wordt toegepast binnen de elektronenmicroscopie.

De elektronenconfiguratie bepaalt in hoge mate het chemisch gedrag van het atoom.

Classificatie van het elektron

Het elektron behoort tot de klasse der leptonen. Het elektron behoort tot de eerste generatie. Deze deeltjes zijn stabiel.

Elektronen in een atoom

In een atoom kunnen de elektronen alleen met welbepaalde energieën E_n rond de atoomkern bewegen (discrete energieniveaus), waar n een geheel getal > 0 is, het dusgenaamde hoofdkwantumgetal.

Voor waterstof (atoomgetal 1) en helium (atoomgetal 2) komt $n=1$ overeen met de grondtoestand en komen $n = 2, 3, \dots$ overeen met aangeslagen toestanden. Bij de elementen met atoomgetallen 3 t/m 10, lithium t/m neon, hebben we twee elektronen in de binnenste schil ($n = 1$, de K-schil) en één t/m acht elektronen in de daaropvolgende schil ($n = 2$, de L-schil), die voor deze elementen de buitenste elektronenschil is. De grondtoestanden komen voor deze elementen overeen met hoofdkwantumgetal $n = 2$, de aangeslagen toestanden met $n = 3, 4, \dots$

Zie Periodiek systeem voor de overige elementen en voor meer informatie.

Overige kenmerken

Spectraallijnen

Omdat een elektron in het atoom alleen bepaalde discrete energieniveaus kan hebben, zal bij overgang tussen deze energieniveaus emissie of absorptie van licht plaatsvinden, waarbij de energie rechtevenredig is met de frequentie. De evenredigheidsconstante energie/frequentie heet de constante van Planck. Zie ook spectraallijnen, materiegolven en het atoomspectrum.

Elektrische geleiding

Als door een externe invloed een elektron losraakt van de atoomkern en dus vrij kan bewegen, wordt het een dusgenaamd geleidingselektron of vrij elektron. Bewegende vrije elektronen dragen bij aan de elektrische geleiding. Deze geleidingselektronen zijn de ladingsdragers van de elektrische stroom. Zie vacuümbuizen

Energieband

Elektronen bevinden zich op bepaalde discrete energieniveaus binnen een atoom. Binnen moleculen of vaste stoffen kunnen deze energieniveaus zeer dicht tegen elkaar liggen en vormen dan gezamenlijk een energieband.

Valentieband

Het hoogste bezette energieniveau behorende bij een vaste stof noemt men de valentieband. Dit energieniveau wordt in moleculen ook de HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) genoemd.

Geleidingsband

Het laagste niet bezette energieniveau noemt men in een vaste stof de geleidingsband; in een molecuul spreekt men van de LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Omdat een elektron dat in deze band komt relatief ver van de kern verwijderd is, zal dat elektron gemakkelijk het atoom weer verlaten: deze elektronen zorgen voor de geleiding.

Verboden zone

De ruimte tussen de geleidingsband en de valentieband is een verboden zone (ook band gap genoemd). Bij geleiders is er geen band gap, of is die verboden zone zo klein dat elektronen van de valentieband kunnen overspringen naar de geleidingsband. Deze elektronen nemen dan deel aan de geleiding.

Isolator

Tegenovergestelde van geleider. Een isolator is een stof waarin geen elektrische stroom kan lopen. In een isolator zijn er dus geen vrije elektronen. De bewegingen van de elektronen zijn beperkt in hun atoom. Er zijn

evenveel elektronen als energieniveaus, waardoor de elektronen alleen maar van plaats kunnen verwisselen. Door een plaatsverwisseling van elektronen verandert niets aan het energieniveau, omdat alle elektronen dezelfde energiewaarde hebben. In een elektrisch veld verschuiven de positief geladen atoomkern en de banen van de negatief geladen elektronen zich ten opzichte van elkaar. (polarisatie).

Geleider

Tegenovergestelde van isolator. In geleiders komen zich vrij bewegende elektronen voor. Wanneer de elektronen in de geleider, bijvoorbeeld een koperen draad, gemiddeld gezien een bepaalde richting opgaan, spreekt men van elektrische stroom in die geleider.

Halfgeleider

Bij een halfgeleider is de grootte van de verboden zone van dezelfde orde als de thermische energie. Hierdoor is het voor elektronen soms mogelijk om over te springen van de valentieband naar de geleidingsband waardoor deze materialen in zuivere vorm een zeer kleine geleiding vertonen.

Statische elektriciteit

Statische elektriciteit ontstaat wanneer een voorwerp meer of minder elektronen bevat dan nodig zijn om de positieve lading van de protonen in de kern op te heffen.

Ionen

Als er in een atoom meer of minder elektronen zijn dan het aantal protonen in de kern, is het atoom geladen en heet dan een ion.

Externe links

- Carlo Beenakker: De ontdekking van het elektron ^[1]
- History of electricity (wikipedia) ^[2]
- Etymology of the term "electricity" (wikipedia) ^[3]

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon



Zie de categorie [\[/wiki/Commons:Category:Electron?uselang=nl#mw-subcategories Electron\]](#) van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.

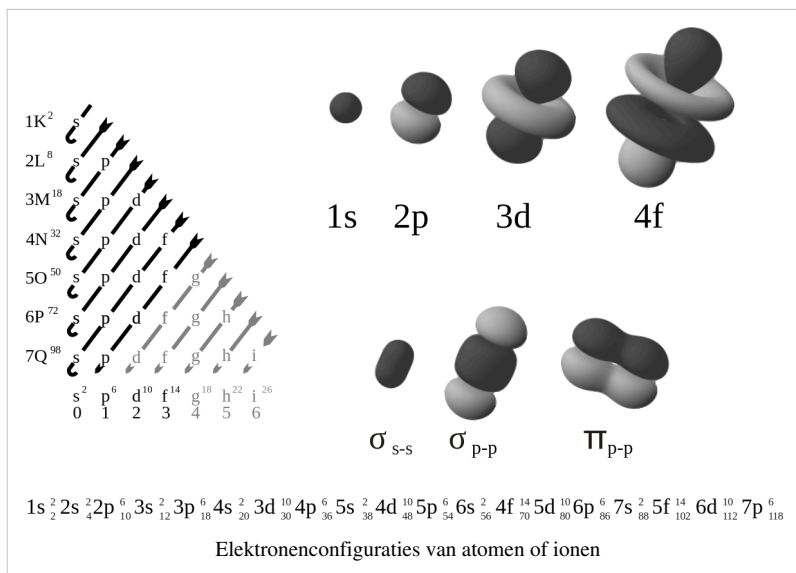
Referenties

- [1] <http://ilorentz.org/EM2/artikelen/thomson.html>
 [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Electricity#History>
 [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Etymology_of_electricity

Elektronenconfiguratie

De **elektronenconfiguratie** van een atoom of ion geeft aan hoe de elektronen verdeeld zijn in banen rondom de kern van het atoom. De elektronen vormen verschillende lagen ofwel schillen. Een laag is dus een elektronenschil. Elk element heeft zijn eigen typische elektronenconfiguratie.

De elektronenconfiguratie wordt besproken aan de hand van het periodiek systeem der elementen: de tabel van Mendelejev.



Elektronenschil

De elektronenconfiguratie van de elektronen rond de atoomkern beschrijft in welke banen de elektronen zich bevinden in het atoom; deze banen worden de **elektronenschil** genoemd.

Het woord "*baan*" moet hier echter met een korreltje zout genomen worden, omdat het elektron zich ook als een golfverschijnsel (orbitaaltheorie: de fysische interpretatie van het kwantummechanisch model) gedraagt. De baan is meer een staand golfpatroon met buiken en knopen. Voor iedere baan beschrijft een wiskundige vergelijking, de schrödingervergelijking, de waarschijnlijkheid om het elektron ergens aan te treffen. Elke baan heeft een bepaald energieniveau ten opzichte van de kern. In het algemeen geldt: hoe verder van de kern, hoe hoger het energieniveau, maar de elektronen beïnvloeden ook elkaar omdat zij geladen deeltjes zijn. Grofweg worden de binnenste banen het eerst opgevuld maar door de onderlinge afstoting zijn daar uitzonderingen op. De banen kunnen onderverdeeld worden in een aantal schillen en subschillen, die genummerd kunnen worden met hun kwantumgetallen.

De eerste drie kwantumgetallen zijn altijd gehele getallen.

Kwantumgetallen

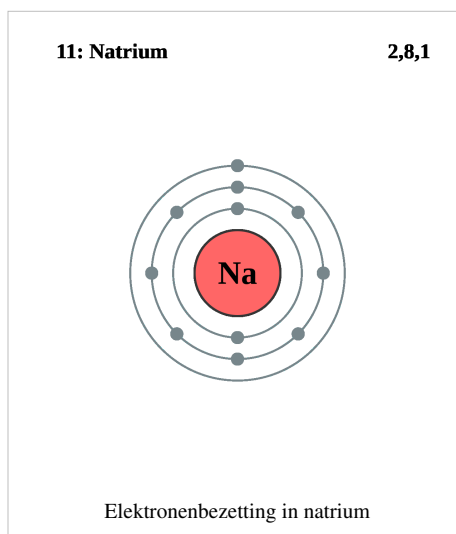
Het hoofdkwantumgetal n

Dit is een hoofdverdeling van de energieniveaus, de (hoofd)*schillen* genoemd. Deze hoofdschillen (schalen) worden genummerd van 1 tot 7, van de kern naar buiten toe. Deze hoofdschillen worden wel respectievelijk met de letters K, L, M, N, O, P, Q enz. aangeduid. Deze namen worden vooral nog veel gebruikt bij röntgenstraling, om aan te geven welke binnenschillen betrokken zijn bij de elektronische overgang die de straling veroorzaakt. In de scheikunde echter gebruikt men louter de nummers 1 tot 7. Hogere nummers dan 7 zijn in principe mogelijk, maar worden in praktijk niet gevonden, aangezien het aantal scheikundige elementen beperkt is.

Toen de eerste schillen ontdekt werden was hun onderling verband niet geheel duidelijk, en de eerste schil werd met de middelste letter van het alfabet voorzien (M), zodat men nog beide kanten op kon. Pas later vonden de wetenschappers dat er verder 'links' van de K geen andere schillen meer waren, ofschoon er voor enige tijd nog wel aan 'J-straling' werd gedacht.

Het nevenkwantumgetal l

Het impulsmoment, verdeelt de (hoofd)schillen in **subschillen** (onderschillen). Voor een hoofdkwantumgetal n kan l de waarden 0, 1, 2, ..., $n-1$ bezitten. De subschillen worden aangegeven door een letter uit de reeks s, p, d, f, g, h, i, j, k, ... (voor $l = 0, 1, \dots$) toe te voegen aan het hoofdkwantumgetal n . Anders dan de hoofdkwantum letters, worden deze letters nog steeds veelvuldig in natuur- en scheikunde gebruikt. De termen *s*, *p*, *d*, *f*, ... komen van de atoomspectra en staan voor *scherp*, *principaal*, *diffuus*, en *fundamenteel*, naar het uiterlijk van de spectraallijnen. Pas later werd hun onderling verband duidelijk en besloot men de volgende waarden alfabetisch voort te zetten vanaf de letter 'f'.



Het magnetische kwantumgetal, m

Dit verdeelt iedere subschil in $2 \times l + 1$ banen, m loopt van $-l$ tot $+l$. (In deze formule is l , het nevenkwantumgetal 0 tot $n-1$, een kleine letter L).

Het magnetisch spinkwantumgetal s

In tegenstelling tot de andere kwantumgetallen, beschijft dit getal niet zozeer de baan als de "draaiing" van het electron zelf. Dit getal heeft twee waarden: $s = -1/2$ en $+1/2$ (spin *up* en spin *down*).

De hier gegeven notatie voor de 4 kwantumgetallen: n, l, m, s wordt gebruikt in sommige boeken maar is niet geheel correct. De hier genoemde s heeft dezelfde eigenschappen voor de spin als m heeft voor de baan, namelijk het magnetisch kwantumgetal. Zorgvuldigere boeken gebruiken daarom n, l, m_l, m_s , en voegen een vijfde nummer toe: s . Deze s (spinkwantumgetal) heeft dezelfde eigenschappen als l . Maar aangezien, voor elektronen althans, deze $s = 1/2$ altijd, is het niet belangrijk voor verdere identificatie en kan het wel weggelaten worden. [Wikipedia:Bronvermelding](#).

Twee elektronen moeten altijd minstens in één van hun kwantumgetallen verschillen. Dit vanwege het uitsluitingsprincipe van Pauli. In iedere baan kunnen zich daardoor twee elektronen bevinden, met tegengestelde spin.

Er komt steeds een subschil bij naarmate n hoger wordt: voor $n = 1$ is er één subschil (1s), voor $n = 2$ zijn er twee (2s en 2p), voor $n = 3$ zijn er drie subschillen (3s, 3p, 3d) enzovoorts. Dit is gebaseerd op het atoommodel van Sommerfeld.

Tabel: geeft als het mogelijk is aantal elektronen in iedere baan:

n		$l = 0, 1, \dots, n-1$ (nummer subschil)	$2 \times l + 1 =$ aantal 'magnetische' schillen	aantal elektronen in baan = 2 per baan	aantal elektronen per subschil
1	K	0	1	2	2
2	L	0, 1	1, 3	2, 6	8
3	M	0, 1, 2	1, 3, 5	2, 6, 10	18
4	N	0, 1, 2, 3	1, 3, 5, 7	2, 6, 10, 14	32
5	O	0, 1, 2, 3, 4	1, 3, 5, 7, 9	2, 6, 10, 14, 18	50
6	P	0, 1, 2, 3, 4, 5	1, 3, 5, 7, 9, 11	2, 6, 10, 14, 18, 22	72
7	Q	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13	2, 6, 10, 14, 18, 22, 26	98
8	R		enzovoorts		

De elektronen in de schillen met lage n -waarde worden de binnenelektronen genoemd. De buitenste elektronen, de valentie-elektronen, bepalen de chemische eigenschappen van het atoom.

Golffunctie

Het beeld dat in dit artikel geschetst wordt, dat de elektronen zich in (sub)schillen rond de atoomkernen bevinden is een benadering die men zich maakt van de zeer moeilijk te begrijpen beschrijving op grond van de theorie van de kwantummechanica. De elektronen hebben elk een waarschijnlijkheidsverdeling van de plaats waar ze zich werkelijk bevinden. Deze verdeling wordt beschreven met een golffunctie. Die golffunctie is niet zozeer een **schil**, maar heeft wel een bepaalde vorm. Het elektron heeft in feite een uitgestrekt gebied waar het zich kan bevinden (zie het waarschijnlijkheidsprincipe van Heisenberg). De vorm van de golffunctie is verschillend voor de aanduiding s, p, d enz. Door het uitsluitingsprincipe van Pauli kunnen geen elektronen naast elkaar bestaan met exact dezelfde golffunctie. Door de eigenschap spin van het elektron kunnen er wel twee elektronen zich bevinden in de subschil s . Namelijk het elektron met spin **up** en het andere elektron met spin **down**. Dit geldt voor iedere schil op het laagste niveau: de 'magnetische' subschil.

De schillen worden opgevuld met elektronen, naarmate het atoom zwaarder (meer elektronen heeft) bevat. Hierbij wordt door de elektronen steeds de laagste energietoestand aangenomen. Hierdoor wordt meestal een dichter tegen de kern gelegen schil volledig opgevuld, voordat een elektron plaats neemt op een schil dat verder van de kern gelegen is.

Voor elke rij elementen worden alleen de nieuwe schillen vermeld, alle schillen uit de bovenliggende rijen zijn geheel gevuld (denk er de elektronenconfiguraties van de meest rechtse elementen - de edelgassen - uit alle bovenliggende rijen bij).

Voorbeeld: de volledige elektronenconfiguratie van broom (symbool Br) is $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^5$. Meestal worden de compleet gevulde schillen uit bovenliggende rijen van het systeem vervangen door het symbool van het edelgas uit de vorige rij. De elektronenconfiguratie van broom wordt dan aangegeven als $[Ar] 4s^2 3d^{10} 4p^5$.

In onderstaande tabel wordt het aantal elektronen per subschil, per schil, en voor het volledige atoom gegeven. Dit is slechts een theoretisch maximum aantal elektronen, want voor de bekende elementen zijn niet alle subschillen volledig bezet.

De eerste kolom is het kwantumgetal n : 1 tot 7.

De tweede kolom is de oude benaming van de schil: K to Q.

De vetgedrukte subschillen (7d, 7f, 7g, 7h, 7i en 6f, 6g, 6h en 5g) raken nooit vol in de grondtoestand omdat er maar 112 elementen zijn. Daardoor zullen de 5e, 6e en 7e schil nooit vol raken en zal het theoretisch maximum aantal elektronen voor het kwantumgetal $n = 5, 6$ en 7 nooit behaald worden. Daarom zijn deze waarden ook 'vetweergegeven'.

n		Totaal aantal elektronen van het atoom	Elektronen v/d schil	s	p	d	f	g	h	i
1	K	2 (1s)	2 (1s)	2 (1s)						
2	L	10 (1s2s2p)	8 (2s2p)	2 (2s)	6 (2p)					
3	M	28 (1s2s2p3s3p3d)	18 (3s3p3d)	2 (3s)	6 (3p)	10 (3d)				
4	N	60 (1s2s2p3s3p3d4s4p4d4f)	32 (4s4p4d4f)	2 (4s)	6 (4p)	10 (4d)	14(4f)			
5	O	110 (1s2s2p3s3p3d4s4p4d4f5s5p 5d5f5g)	50 (5s5p 5d5f5g)	2 (5s)	6 (5p)	10 (5d)	14(5f)	18(5g)		
6	P	182 (1s2s2p3s3p3d4s4p4d4f5s5p5d5f5g6s6p 6d6f6g6h)	72 (6s6p6d 6f6g6h)	2 (6s)	6 (6p)	10 (6d)	14(6f)	18(6g)	22(6h)	
7	Q	280 (1s2s2p3s3p3d4s4p4d4f5s5p5d5f5g6s6p6d 6f6g6h7s7p7d7f7g7h7i)	98 (7s7p 7d7f7g7h7i)	2 (7s)	6 (7p)	10 (7d)	14(7f)	18(7g)	22 (7h)	26(7i)

De volgorde waarin zij als functie van het atoomnummer opgevuld worden wijkt af, in die zin dat de 4s-elektronen eerder gevuld worden dan de 3d-elektronen. Hoewel de periodenummers van het periodiek systeem verband houden met het kwantumgetal n zijn ze daarom niet gelijk.

Dergelijke overkruisingen zijn het gevolg van steeds kleiner wordende energieverschillen tussen twee opeenvolgende hoofdschillen. Het laagste energieniveau van een bepaalde hoofdschil kan dus energetisch gunstiger liggen dan het hoogste energieniveau van een voorafgaande hoofdschil.

De correcte opvulling kan men terugvinden met de diagonaalregel.

1s			
2s	2p		
3s	3p	3d	
4s	4p	4d	4f
5s	5p	5d	5f
6s	6p	6d	
7s			

De tabel wordt gelezen beginnend met 1s, dan 2s, en daarna langs de diagonaal van rechtsboven naar linksonder beginnend bij 2s:

1s - 2s -

2p - 3s -

3p - 4s -

3d - 4p - 5s -

4d - 5p - 6s -

4f - 5d - 6p - 7s -

5f - 6d

En dan zijn er nog steeds hier en daar kleine onregelmatigheden.

Elementair deeltje

Een **elementair deeltje** is een deeltje dat niet te splitsen valt in andere deeltjes. Volgens de huidige modellen zijn elektronen, neutrino's en quarks elementaire deeltjes, evenals de zwaardere versies van het elektron en het neutrino, de krachtvoerende deeltjes, en hun antideeltjes.

In de natuurkunde wordt een elementair deeltje geacht geen inwendige structuur te hebben, aangezien het niet is samengesteld uit nog kleinere deeltjes. Het is een van de basisdeeltjes van het heelal, waar alle grotere deeltjes van zijn gemaakt. In de moderne theorie van deeltjesfysica, het standaardmodel, zijn quarks, leptonen en 'ijkbosonen' elementaire deeltjes.

In het verleden werden hadronen (mesonen en baryonen zoals het proton en het neutron) en zelfs gehele atomen op zeker moment beschouwd als elementaire deeltjes. Een centraal thema in de elementairedeeltjestheorie is het vroeg-20e-eeuwse idee van kwanta, dat het begrip van elektromagnetische straling hervormde en de kwantummechanica voortbracht.

Elementaire deeltjes kunnen in het algemeen niet in stilstaande toestand afzonderlijk waargenomen worden. Alleen bij snelheden dicht onder de lichtsnelheid kunnen zij waargenomen worden in een bellenvat, hetzij als radioactieve straling of als kosmische straling, hetzij kunstmatig versneld in een deeltjesversneller. Door bestudering van hun banen, al of niet afgebogen in een magnetisch veld (alleen elektrisch geladen deeltjes) en onderlinge botsingen, waarbij nieuwe deeltjes ontstaan, kunnen hun eigenschappen bestudeerd worden.

Overzicht

Alle elementaire deeltjes zijn bosonen of fermionen. Deeltjes met halftallige spin zijn fermionen, en deeltjes met heeltallige spin zijn bosonen. De twaalf fermionen worden in het algemeen met materie geassocieerd en de bosonen met de fundamentele krachten.^[1]

De elementaire deeltjes uit het standaardmodel zijn:

- Fermionen:**

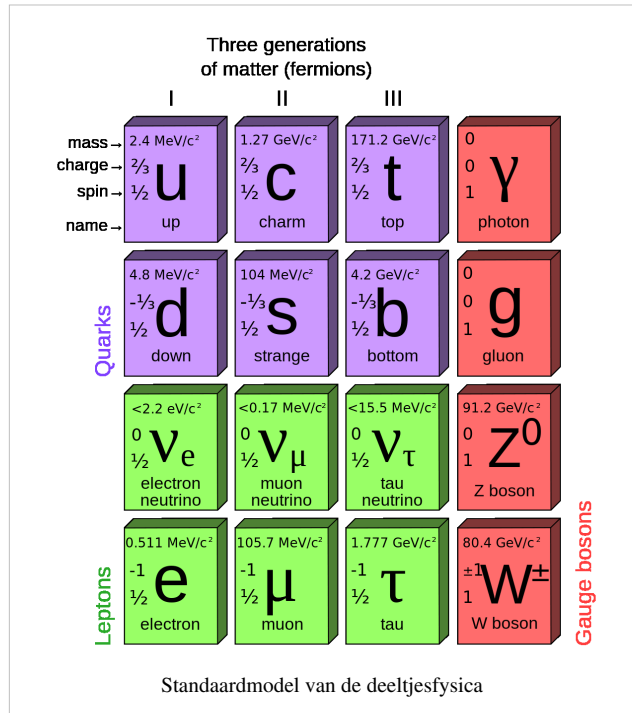
Quarks — up, down, strange, charm, bottom, top

Leptonen — elektron, muon, tau, elektron-neutrino, muon-neutrino, tau-neutrino

- Bosonen:**

IJkbosonen — gluon, W- en Z-boson, foton en, higgsboson

Andere bosonen — graviton



Het standaardmodel

➤ Zie Standaardmodel voor het hoofdartikel over dit onderwerp.

Het standaardmodel van de deeltjesfysica beschrijft 12 fermionen, plus hun bijbehorende antideeltjes, en daarnaast de bosonen die gepaard gaan met de krachten tussen de fermionen, en het gepostuleerde, recent waargenomen higgsboson. In beginsel wordt elke fysische theorie als voorlopig beschouwd en het standaardmodel is in dat opzicht zeker geen uitzondering. Eén onopgelost probleem is dat die onverenigbaar is met de algemene relativiteitstheorie van Einstein. Het vermoeden is dat er andere elementaire deeltjes zijn die door het standaardmodel niet worden beschreven zoals het graviton of 'sparticles', de supersymmetrische partners van de bekende deeltjes.

Fundamentele fermionen

De 12 fermionen zijn verdeeld in drie 'generaties' van vier deeltjes. Zes van de deeltjes zijn quarks. De resterende zes zijn leptonen, waarvan drie neutrino's zijn en de andere drie een elektrische lading van -1 hebben: het elektron en zijn twee 'neven', het muon en het tau-lepton.

Generaties van deeltjes

Eerste generatie

- elektron: e^-
- elektron-neutrino: ν_e
- up quark: u
- down quark: d

Tweede generatie

- muon: μ^-
- muon-neutrino: ν_μ
- charm quark: c
- strange quark: s

Derde generatie

- Tau (lepton): τ^-
- tau-neutrino: ν_τ
- top quark: t
- bottom quark: b

Antideeltjes

Voor elk van deze 12 fermionen zijn er ook corresponderende antideeltjes. Het positron e^+ komt in de meeste eigenschappen overeen met het elektron, maar heeft een elektrische lading van $+1$, enz.:

Antideeltjes

Eerste generatie

- positron: e^+
- elektron-antineutrino: $\bar{\nu}_e$
- up antiquark: \bar{u}
- down antiquark: \bar{d}

Tweede generatie

- antimuon: μ^+
- muon-antineutrino: $\bar{\nu}_\mu$
- charm antiquark: \bar{c}
- strange antiquark: \bar{s}

Derde generatie

- antitau: τ^+
- tau-antineutrino: $\bar{\nu}_\tau$
- top antiquark: \bar{t}
- bottom antiquark: \bar{b}

Quarks

Quarks en antiquarks zijn nooit individueel aangetoond, een feit dat door de 'kleurbeperving' van de kwantumchromodynamica wordt verklaard. Elk quark draagt één van drie kleurenladingen van de sterke interactie; antiquarks dragen zo ook antikleur.

Kleurgeladen deeltjes hebben met elkaar een wisselwerking via het uitwisselen van gluonen, op dezelfde manier als elektrisch geladen deeltjes fotonen kunnen uitwisselen. Een verschil is dat gluonen zelf die kleurlading bezitten, wat een versterking van de sterke kernkracht met zich meebrengt zodra deeltjes met een kleurlading gescheiden worden. In tegenstelling tot de elektromagnetische kracht, die snel kleiner wordt als geladen deeltjes uit elkaar bewegen, wordt de sterke kernkracht juist groter, met als gevolg dat kleurgeladen deeltjes nooit van elkaar kunnen scheiden.

De kleurgeladen deeltjes kunnen zich wel combineren om kleur-neutrale samengestelde deeltjes te vormen: de hadronen. Zo kan een quark zich combineren met een antiquark. De quark heeft een kleur en de antiquark heeft de corresponderende antikleur. De kleur en antikleur compenseren elkaar en er vormt zich een kleur-neutraal meson. Of drie quarks kunnen naast elkaar bestaan: één quark is 'rood', een ander 'blauw', een ander 'groen'. Deze drie gekleurde quarks vormen samen een kleur-neutraal baryon. Of drie antiquarks kunnen samen bestaan: één antiquark is 'antirood' een andere 'antiblauw' en een 'antigroen'. Deze drie anti-gekleurde antiquarks vormen een kleur-neutraal antibaryon.

Quarks hebben ook niet-gehele kleine elektrische ladingen, maar aangezien zij binnen hadronen voorkomen waarvan ladingen altijd gehele getallen zijn, zijn die niet-gehele ladingen nooit geïsoleerd of gemeten. Zo hebben quarks elektrische ladingen van of $+2/3$ of $-1/3$, terwijl antiquarks overeenkomstige elektrische ladingen van of $-2/3$ of $+1/3$ hebben.

Bewijs voor het bestaan van quarks komt voort uit proeven waarbij elektronen afgevuurd worden op atoomkernen. Hieruit kan de ladingsverdeling binnen nucleonen (die baryonen zijn) bepaald worden. Als de lading gelijkmatig verdeeld zou zijn, zou het elektrische veld rond het proton gelijkmatig moeten zijn en zou het elektron zich na een botsing elastisch moeten laten terugkaatsen. Laag-energetische elektronen verspreiden zich op deze wijze, maar boven een bepaalde energie worden sommige elektronen door protonen onder grote hoeken teruggekaatst. Het terugkaatsende elektron heeft veel minder energie en een 'jet' van deeltjes wordt uitgezonden. Dit niet-elastische terugkaatsen kan alleen verklaard worden als de lading in het proton niet gelijkmatig is verdeeld maar onderverdeeld in kleinere geladen deeltjes: de quarks.

Fundamentele bosonen

In het Standaardmodel zijn het deeltjes met een spinvector (-1), zoals gluonen, fotonen, en W- en Z-bosonen die zorgen voor het uitwisselen van krachten, terwijl het higgsboson (spin-0) de grondslag is van deeltjes die intrinsieke massa hebben.

Gluonen

Gluonen zijn de dragers van de "sterke interactie" en bezitten zowel kleur als antikleur. Hoewel gluonen zonder massa zijn, worden zij nooit waargenomen in detectoren vanwege de kleurenbeperking. Ze kunnen wel "jets" van hadronen produceren net zoals enkele quarks. Het eerste bewijsmateriaal voor gluonen kwam uit vernietiging van elektronen en positronen bij hoge energieën die soms drie producten gaven: een quark, een antiquark, en een gluon.

Elektrozwakke bosonen

Er zijn drie zwakke ijkbosonen: W^+ , W^- , en Z_0 ; deze zorgen voor de zwakke interactie. Het foton zonder massa zorgt voor de elektromagnetische interactie.

Higgsboson

Hoewel de zwakke kernkracht en de elektromagnetische krachten vrij verschillend lijken bij lage energieën, kunnen de twee krachten theoretisch als één 'elektrozwakke' kracht samengebracht worden bij hoge energieën. Deze voorspelling is duidelijk bevestigd door metingen aan elektron-proton-botsingen in de HERA-versneller van DESY. De verschillen bij lage energieën zijn het gevolg van de hoge massa's van W- en Z-bosonen, die weer een gevolg zijn van het higgsmechanisme. Hoewel het higgsmechanisme een geaccepteerd deel van het standaardmodel is geworden, is het higgsboson zelf nog niet waargenomen in detectoren. Het indirecte bewijsmateriaal voor het higgsboson stelt dat de massa onder de 200-250 GeV ligt.^[2] Als dit het geval is zullen de experimenten van de Large Hadron Collider dit laatste ontbrekende stuk van het standaardmodel moeten kunnen aantonen.

Voorbij het standaardmodel

Hoewel veel experimenteel bewijsmateriaal de voorspellingen van het Standaard model bevestigen, vinden veel fysici dit model onbevredigend vanwege de vele onbepaalde parameters, het grote aantal fundamentele deeltjes, het nog niet waargenomen higgsboson en theoretische overwegingen, zoals de reeds genoemde onverenigbaarheid met de relativiteitstheorie. Er zijn al theorieën ontwikkeld, zoals de snaartheorie, die beogen deze problemen op te lossen, maar die verkeren nog in een speculatief stadium. De experimentele testbaarheid van deze theorieën laat nog veel te wensen over.

Trivia

Elementaire deeltjes is ook de titel van een roman van de Franse schrijver Michel Houellebecq.

Externe links

- Greene, Brian, " *Elementary particles* ^[3]". The Elegant Universe, NOVA (PBS)
- particleadventure.org: The Standard Model ^[4], *Unsolved Mysteries. Beyond The Standard Model ^[5], *What is the World Made of? The Naming of Quarks ^[6]
- particleadventure.org: Particle chart ^[7]
- University of California: Particle Data Group ^[8]
- CERN Courier: Season of Higgs and melodrama ^[9]
- Pentaquark information page ^[10]

Bronnen, noten en/of referenties**Fysische deeltjes**

Atomaire deeltjes: Molecuul · Atoom · Ion

Subatomaire deeltjes: Nucleon · Atoomkern

Bosonen: Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson

Fermionen: Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

EPR-paradox

Speciale relativiteitstheorie
$E = m c^2$
(de massa-energie relatie)
Achtergrond
Lichtsnelheid · Lorentzinvariantie Inertiaalstelsel Wetten van Maxwell
Fundamentele begrippen
Lorentztransformatie · Ruimtetijd Viervector · Minkowski-ruimte Lengtecontractie · Tijddilatatie Gelijktijdigheid
Gevorderde onderwerpen
Massa-energie relatie Tweelingparadox EPR-paradox
Experimenten
Michelson-Morley-experiment Fizeau-experiment energieproductie bij kernreacties
Wetenschappers
Einstein · Maxwell · Minkowski Lorentz · Poincaré

De **EPR-paradox** is een gedachte-experiment dat een schijnbare tegenspraak tussen de kwantummechanica en speciale relativiteitstheorie oplevert. De schijnbare tegenspraak heeft veel fysici lang hoofdpijn bezorgd, maar kan begrepen en opgelost worden met de meer hedendaagse notie van kwantumverstrengeling. "EPR" staat voor Einstein, Podolsky en Rosen die het gedachte-experiment in 1935 introduceerden om te suggereren dat de kwantummechanica geen complete theorie is. Het wordt soms de EPRB-paradox genoemd naar Bohm, die het originele gedachte-experiment vertaalde naar een iets eenvoudiger experimenteel toetsbaar experiment.

Het experiment

De EPR-paradox bestaat uit een experiment, waarvan de uitkomst door kwantummechanica wordt voorgeschreven. Die uitkomst lijkt op het eerste gezicht in tegenspraak met de basisregels van de speciale relativiteitstheorie. Om de paradox te begrijpen moet men dus eerst het experiment kennen. Dat gaat als volgt:

We hebben een bron die een elektronenpaar uitzendt. Eén elektron gaat naar bestemming A waar de waarnemer Alice staat en een ander elektron naar bestemming B waar de waarnemer Bob is. Volgens de kwantummechanica kunnen we ervoor zorgen dat onze bron de elektronen zo uitzendt dat elk elektronenpaar een kwantumtoestand bezet die een spin singlet wordt genoemd. Dit kan gezien worden als een kwantumsuperpositie van twee toestanden die we I en II zullen noemen. In toestand I heeft elektron A een naar boven gerichte spin langs de z-as en elektron B een naar beneden gerichte spin langs de z-as. In toestand II is het andersom. Het is onmogelijk beide elektronen dezelfde spin te geven. Daarom zegt men dat ze verstrengeld zijn.

Alice meet nu de spin van het elektron. Zij kan één van de twee mogelijke uitkomsten verkrijgen: naar boven of naar beneden. Stel dat zij een naar boven gerichte spin langs de z-as vindt. Volgens de kwantummechanica stort de kwantumtoestand van het systeem dan ineen naar toestand I. (Verschillende interpretaties van de kwantummechanica hebben verschillende manieren om dit te beschrijven, maar het resultaat is overall hetzelfde.) De kwantumtoestand bepaalt de waarschijnlijkheid van de uitkomst van een meting die op het systeem wordt uitgevoerd. Als Bob vervolgens de spin van zijn elektron gaat meten, zal hij met 100% zekerheid vinden dat het een naar beneden gerichte spin heeft langs de z-as. En omgekeerd: als Alice een naar beneden gerichte spin langs de z-as meet, zal Bob een naar boven gerichte spin langs de z-as vinden.

Er is overigens niets speciaals aan de keuze van onze z-as. Stel dat Alice en Bob nu beslissen om de spin te meten langs de x-as. Volgens de kwantummechanica kan de spin-singlettoestand net zo goed uitgedrukt worden als een superpositie van spintoestanden die in de x-richting wijzen. We zullen deze toestanden Ia en IIa noemen. Alice meet spin naar boven en Bob naar beneden langs de x-as in Ia. Alice meet spin naar beneden en Bob naar boven langs de x-as in toestand IIa. Als Alice nu spin naar boven langs de x-as meet, stort de golf functie van het systeem in en zal Bob spin naar beneden krijgen en als Alice spin naar beneden meet, zal Bob spin naar boven langs de x-as meten.

In de kwantummechanica zijn de x-spin en de z-spin incompatibele observabelen. Dat betekent dat er een Heisenberg onzekerheidsrelatie tussen de twee observabelen is: een kwantumtoestand kan niet een welbepaalde waarde bezitten voor beide variabelen. Stel dat Alice de z-spin meet en een spin naar boven krijgt, zodat de kwantumtoestand ineenstort in toestand I. Nu meet Bob echter niet de z-spin maar de x-spin. Volgens de kwantummechanica heeft Bob een kans van 50% om een spin naar boven langs de x-as te meten en 50% kans om een spin naar beneden langs de x-as te meten. Het is onmogelijk te voorspellen welke uitkomst Bob zal krijgen, voordat hij het experiment daadwerkelijk uitvoert.

Dus hoe weet Bobs elektron, op hetzelfde moment, welke spin het moet hebben als Alice besluit (gebaseerd op informatie die voor Bob ontoegankelijk is) om x te meten en ook welke spin hij moet hebben als Alice de z-spin meet? Volgens de gebruikelijke Kopenhaagse interpretatieregels, die zeggen dat de golf functie instort op het moment van meten, moet er een werking op afstand zijn of het elektron moet meer weten dan dat men veronderstelt.

Hoewel de spin gebruikt is als voorbeeld, bestaan er veel fysische grootheden (die in de kwantumfysica "observabelen" worden genoemd) die gebruikt kunnen worden om kwantumverstrengeling te produceren. De originele publicatie van het EPR-experiment gebruikte impuls als observeerbare. Voor de experimentele uitvoering van het EPR-experiment wordt vaak gebruikgemaakt van de polarisatie van fotonen, omdat gepolariseerde fotonen gemakkelijk geprepareerd en gemeten kunnen worden.

De paradox

Het probleem van hierboven wordt nog scherper als men de speciale relativiteitstheorie erbij haalt. Die stelt dat niets sneller kan reizen dan het licht. (Omdat dit voor bepaalde waarnemers er uit zou zien als terugreizen in de tijd, wat logisch gezien niet kan.) Bijgevolg is elke reizende vorm van informatie of oorzakelijkheid begrensd door de lichtsnelheid. Stel nu dat de waarnemers Alice en Bob erg ver van elkaar zijn. Dan kan er onmogelijk een informatiesignaal reizen vanaf Alice, op het moment dat deze zijn meting doet, om het elektron van Bob te 'waarschuwen' welke spintoestand deze moet aannemen. Dat lijkt dus geheel in strijd met het feit dat volgens de kwantummechanica de metingen van Alice en Bob onlosmakelijk aan elkaar gerelateerd zijn.

Het EPR-experiment brengt dus een dichotomie naar voren. Ofwel:

1. Het resultaat van een meting uitgevoerd op deel A van een kwantumsysteem heeft een niet-lokaal effect op de fysische realiteit van een andere ver verwijderd deel B, in de zin dat de kwantummechanica de uitkomst van een meting in B kan voorspellen ofwel:
2. De kwantummechanica is incompleet in de zin dat sommige elementen van fysische realiteit corresponderend met B niet verklaard kunnen worden door de kwantummechanica. Dat betekent dat er een of andere extra variabele nodig is.

Dit gedachte-argument werd dus oorspronkelijk aangehaald als een weerspiegeling van de incompleetheid van de kwantummechanica. De huidige experimentele resultaten bevestigen echter de uitkomst die door kwantummechanica voorspeld wordt. Dit ontkracht ogenschijnlijk het principe van lokaliteit waar Einstein, Podolsky en Rosen zich op baseerden (d.i. de tegenspraak die speciale relativiteitstheorie oplevert). Het spookachtige beïnvloeden op afstand dat de auteurs van de EPR zo stoorde^[1], blijkt dus wel degelijk uit talrijke en diverse malen herhaalde experimenten^[2].

Oplossing van de paradox

Een hedendaagse oplossing van de paradox gaat als volgt. De EPR-paradox suggereert dat volgens de kwantummechanica er correlaties kunnen zijn tussen gebeurtenissen die plaatsgrijpen op niet-causaal-verbonden plaatsen in de ruimtetijd. (Eenvoudig gezegd: volgens de EPR-paradox kunnen de twee elektronen met elkaar 'praten' terwijl er onmogelijk informatie snel genoeg tussen beide kan reizen.) Dit lijkt in strijd met de speciale relativiteitstheorie die (onrechtstreeks) impliceert dat informatie niet sneller kan bewegen dan het licht. Echter, de bestaande correlatie tussen gebeurtenissen stelt in het geval van het EPR-experiment de waarnemers *niet* in staat informatie door te sturen. De uitkomsten van hun meet-experimenten zijn immers niet deterministisch bepaald. Ze kiezen dus niet zelf wat de uitkomst is (Alice kan niet kiezen of zij "up" of "down" meet), en kunnen dus niet communiceren met elkaar. De daad van de meting stuurt dus geen informatie door. Beide gebeurtenissen (Alice en Bobs meting) zijn dus aan elkaar gecorreleerd (het ene bepaalt het andere), maar dit betekent niet dat de ene de andere causaal beïnvloedt. (In het geval van causaliteit is er immers één vrije gebeurtenis, die een andere beïnvloedt.)

Eenvoudige vergelijking

Stel dat je twee knikkers hebt in een zakje: één witte en één zwarte. Je neemt (zonder te kijken welke) een knikker, en een andere persoon neemt (eveneens zonder te kijken) de andere. Als je nu elk aan de andere kant van een muur gaat staan, en elk naar de kleur van je knikker kijkt. Stel dat deze bijvoorbeeld wit is, dan weet je eigenlijk wat er aan de andere kant van de muur gebeurt. Daar ontdekt de andere persoon natuurlijk dat hij de zwarte knikker heeft. Het is echter niet zo dat je nu *gecommuniceerd* hebt met de andere persoon, maar je weet wel wat er gebeurd is, zonder iets onmogelijks te doen zoals door de muur kijken. De EPR paradox is erg gelijkaardig, en (hoewel een beetje subtiel) geen échte tegenspraak.

De EPR-paradox is een paradox in de volgende zin: als men de kwantummechanica neemt en hier enkele schijnbaar redelijke condities aan toevoegt (zoals lokaliteit, realisme, tegenstrijdige feitelijke bepaaldheid en compleetheid), dan verkrijgt men een tegenspraak. Maar de kwantummechanica lijkt op zichzelf niet inconsistent te zijn, noch spreekt

hij de relativiteit tegen. Als het gevolg van verdere theoretische en experimentele ontwikkelingen sinds de originele EPR-publicatie, zien de meeste fysici heden ten dage de EPR-paradox als een voorbeeld van hoe de kwantummechanica ingaat tegen klassieke intuïties en *niet* als een indicatie dat de kwantummechanica fundamenteel in gebreke blijft.

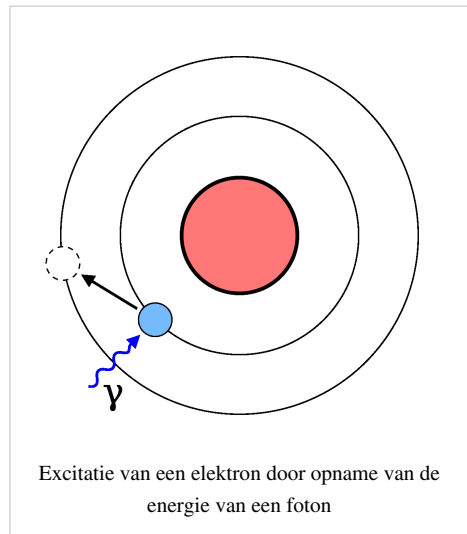
Noten

- [1] Einstein accepteerde de kwantummechanica nooit als een reële en complete theorie en zocht tot aan het einde van zijn leven naar een interpretatie die voldeed aan zijn relativiteit zonder te zeggen dat "God dobbelt".
- [2] Verslag (http://www-ece.rice.edu/~kono/ELEC565/Aspect_Nature.pdf) in Nature.

Excitatie (kwantummechanica)

Excitatie is een natuurkundige term voor het tijdelijk verhuizen van een elektron van een schil naar een andere schil, die hoger in het energiespectrum ligt, binnen hetzelfde atoom.

Een atoom bestaat uit een positief geladen kern (bestaande uit protonen en neutronen), met daar rond één of meerdere elektronenschillen die negatief geladen elektronen bevatten. Het atoom is elektrisch neutraal, er zijn dus evenveel protonen als elektronen. Als er elektromagnetische straling (zoals licht) van een bepaalde golflengte op een atoom wordt geschonden neemt het elektron de stralingsenergie op. De minimale hoeveelheid energie die nodig is om zich te verplaatsen naar een hogere schil is de excitatie-energie. Indien er voldoende energie opgenomen wordt, exciteert het elektron. Dit elektron is echter geen vrij elektron: het atoom als geheel blijft dus neutraal, maar bevindt zich dan in een zogenaamde aangeslagen toestand.



Excitatie van een atoom is niet met elke willekeurige energie mogelijk. Alleen energieniveaus die overeenkomen met bepaalde kwantumgetallen zijn mogelijk. Deze energieniveaus zijn dus kwantummechanisch bepaald.

Wanneer het elektron uit de aangeslagen toestand weer terugvalt, treedt emissie op van elektromagnetische straling. Deze geëmitteerde straling heeft^[1] dezelfde golflengte als de straling waarmee het elektron geëxciteerd is. Emissie is dus het omgekeerde proces van (stralings)excitatie.

Een elektron kan op een vergelijkbare manier geëxciteerd worden door botsingen met deeltjes met massa, zoals andere elektronen. Men spreekt dan van botsingsexcitatie. Het principe is hetzelfde. Botsingsexcitatie ligt ten grondslag aan de werking van een tl-buis.

Voetnoot

Fermi's gulden regel

Fermi's Gulden Regel is in de kwantummechanica een methode om de overgangswaarschijnlijkheid per tijdseenheid te berekenen van een energieniveau (eigentoestand) van een kwantumsysteem naar een continuüm van eigentoestanden. De Gulden Regel wordt gevonden met behulp van storingsrekening.

We gaan uit van een kwantumsysteem dat verkeert in een eigentoestand $|i\rangle$ van een gegeven Hamiltoniaan H_0 . We bekijken het effect van een (mogelijk tijdsafhankelijke) storende Hamiltoniaan H' . Als H' tijdonafhankelijk is, gaat het systeem alleen over naar toestanden in het continuüm met dezelfde energie als de begintoestand. Als H' oscilleert als een functie van de tijd met een hoekfrequentie ω , gaat de overgang naar toestanden met een energie die $\hbar\omega$ verschillen van de begintoestand. In beide gevallen wordt de overgangswaarschijnlijkheid per tijdseenheid van toestand $|i\rangle$ naar een stel eindtoestanden $|f\rangle$ gegeven (tot op eerste orde van de verstoring) als

$$T_{i \rightarrow f} = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle f | H' | i \rangle|^2 \rho,$$

met ρ de dichtheid van eindtoestanden (aantal toestanden per energie-eenheid) en $\langle f | H' | i \rangle$ het matrixelement (in bra-ket notatie) van de storing H' tussen de begin- en eindtoestanden. Deze overgangswaarschijnlijkheid heet ook wel *vervalkans* en houdt verband met de gemiddelde levensduur.

Fermi's Gulden Regel is geldig als de bevolking van de begintoestand niet is uitgedund door verstrooiing naar de eindtoestanden.

Meestal wordt de Regel afgeleid uit tijdsafhankelijke storingsrekening door de limiet te nemen voor absorptie als de meettijd veel groter is dan de tijd die nodig is voor de overgang.

Hoewel de regel naar Fermi vernoemd is, werd het meeste werk gedaan door Dirac^[1] die een bijna gelijke vergelijking opstelde, met de drie componenten van een constante, het matrixelement van de storing en een energieverschil. De regel heet naar Fermi omdat hij het een nuttig verband vond en de naam gaf van "Golden Rule No. 2."^[2] Fermi's Gulden Regel is daarmee een voorbeeld van de Wet van Stigler: *geen ontdekking heet naar zijn ontdekker*.

Alleen de absolute waarde van het matrixelement $\langle f | H' | i \rangle$ komt voor in Fermi's regel. Maar de fase van dit matrixelement bevat verdere informatie over de overgang. Deze komt voor in uitdrukkingen voor de semiklassieke Boltzmannvergelijking voor electronentransport.^[3]

Referenties

- [1] Dirac, P.A.M. (1 March 1927). *The Quantum Theory of Emission and Absorption of Radiation* ([http://links.jstor.org/sici?sici=0950-1207\(19270301\)114:767<243:TQTOTE>2.0.CO;2-L](http://links.jstor.org/sici?sici=0950-1207(19270301)114:767<243:TQTOTE>2.0.CO;2-L)). *Proc. Roy. Soc. (London) A* **114** (767): 243–265. DOI: 10.1098/rspa.1927.0039 (<http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1927.0039>). Geraadpleegd op 2007-05-12. Zie vergelijkingen (24) en (32).
- [2] Fermi, E.. *Nuclear Physics*, University of Chicago Press, 1950
- [3] N. A. Sinitsyn, Q. Niu and A. H. MacDonald (2006). *Coordinate Shift in Semiclassical Boltzmann Equation and Anomalous Hall Effect* (<http://arxiv.org/pdf/cond-mat/0511310v2>). *Phys. Rev. B* **73**: 075318. DOI: 10.1103/PhysRevB.73.075318 (<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.73.075318>).

Externe links

- (en) Overgangskansen en Fermi's Gulden Regel (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/fermi.html>)
- (en) Afleiding met tijdsafhankelijke storingsrekening (<http://www.ph.utexas.edu/~schwitte/PHY362L/QMnote.pdf>)

Fermi-Diracstatistiek

De **Fermi-Diracstatistiek** of **Fermi-Diracverdeling** is een model uit de kwantumfysica dan wel de statistische thermodynamica dat het te verwachten aantal fermionen beschrijft dat een bepaalde energie ϵ_i heeft. Dit model is genoemd naar de natuurkundigen Enrico Fermi en Paul Dirac.

Formule

De Fermi-Diracstatistiek is opgebouwd uit de volgende formule:

$$n_i = \frac{g_i}{e^{(\epsilon_i - \mu)/kT} + 1}$$

Hierin geldt:

n_i is het aantal deeltjes in toestand i ,

ϵ_i is de energie van toestand i ,

g_i is het aantal toestanden dat deze energie ϵ_i heeft

μ is de chemische potentiaal

k is de Boltzmannconstante

T is de absolute temperatuur.

Fermi-functie

Bij gangbare temperaturen kan de temperatuurafhankelijkheid van de chemische potentiaal μ verwaarloosd worden en kan in plaats hiervan een temperatuuronafhankelijk Fermi-niveau (genoteerd als E_F) gebruikt worden:

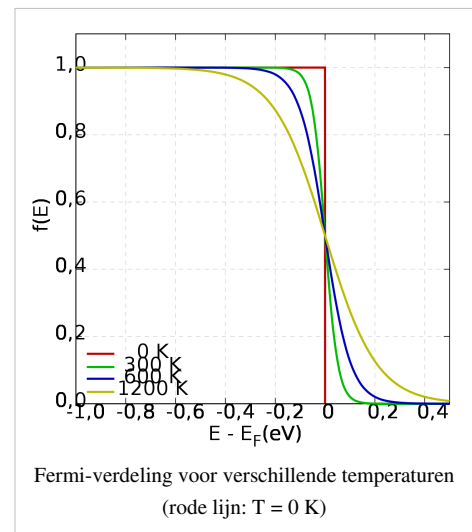
$$F(E) = \frac{1}{e^{(E - E_F)/kT} + 1}$$

Voor g_i is een waarde van 1 genomen (ofwel iedere energie kan één deeltje 'bevatten'), dus het gaat hier om de bezettingsgraad van energieniveau E . Deze functie wordt de "Fermi-functie" genoemd.

Zie ook boson, Bose-Einsteinstatistiek

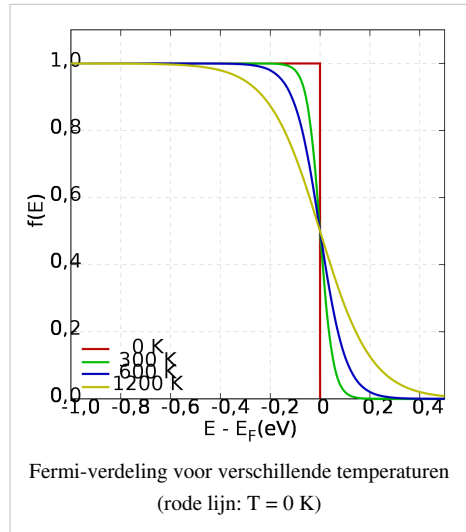
Literatuur

C. Kittel: Introduction to solid state Physics; Wiley, New York



Fermi-niveau

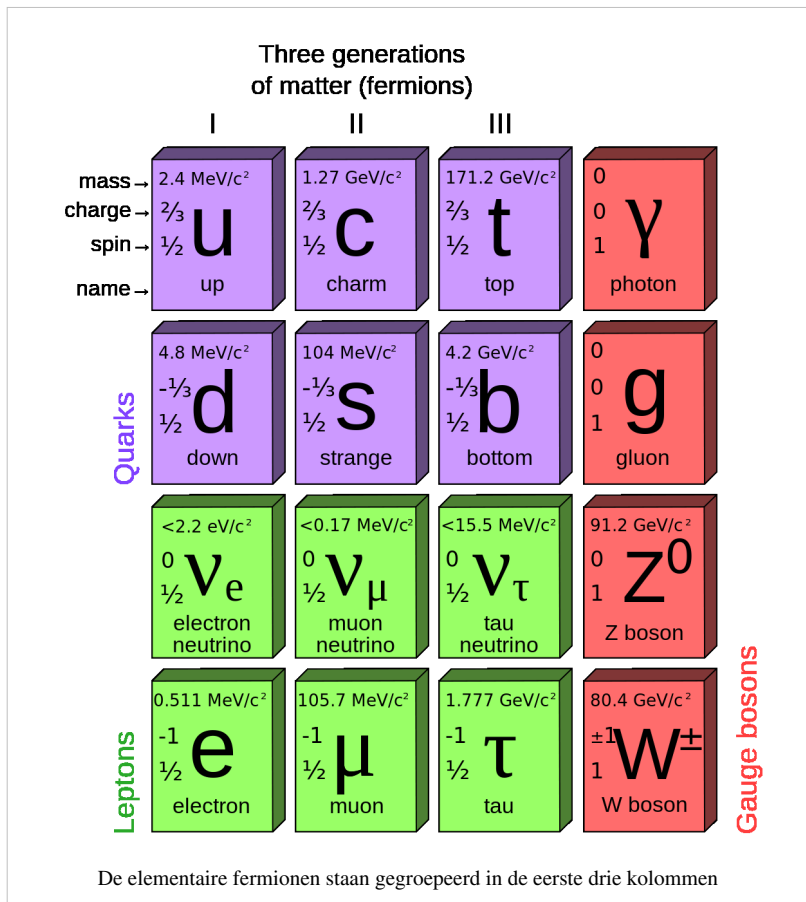
Het **Fermi-niveau** of de **Fermi-energie**, vernoemd naar Enrico Fermi, is een parameter die bepalend is voor de Fermi-functie. Deze functie is een bruikbare benadering van de Fermi-Diracverdeling. Het Fermi-niveau is het energieniveau met een bezettingskans van precies 50%. Bij het absolute nulpunt zijn alle energie-niveaus onder de Fermi-waarde geheel gevuld, daarboven zijn ze geheel onbezet. Hoe hoger de temperatuur, hoe gelijkmatiger de bezettingsgraad afneemt als functie van de temperatuur; deze nadert dan tot de exponentiële Maxwell-Boltzmann-verdeling, die als uitgangspunt de klassieke fysica in plaats van de kwantummechanica heeft.



Fermion

Een **fermion** (vernoemd naar Enrico Fermi) is een deeltje dat zich kenmerkt door een half-tallige spin ($s=1/2, s=3/2, s=5/2, \dots$). Dit in tegenstelling tot bosonen die altijd een heeltallige spin bezitten. Elk subatomair deeltje van het standaardmodel valt in te delen in één van deze twee soorten.

Elementaire fermionen (dat zijn fermionen die zelf niet meer uit andere subatomaire deeltjes bestaan, dus elementaire deeltjes) zijn zelf verder onder te verdelen in leptonen (bv elektron, muon) en quarks (de elementaire bouwstenen van hadronen). Omdat fermionen een half-tallige spin bezitten, voldoen ze aan het uitsluitingsprincipe van Pauli, wat wil zeggen dat twee fermionen niet precies dezelfde kwantumgetallen kunnen hebben. Dit principe zorgt voor onder andere de stabiliteit van elektronenschillen. Meer algemeen voldoen fermionen aan de Fermi-Diracverdeling.



Elementaire fermionen zijn de bouwstenen van materie. Elementaire bosonen brengen krachten over tussen de elementaire fermionen.

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Feynman-Kac-formalisme

Het **Feynman-Kac-formalisme** is een wiskundige formule die een bijzonder verband legt tussen een partiële differentiaalvergelijking en een stochastisch proces. Het is genoemd naar de theoretisch natuurkundige Richard Feynman en de wiskundige Mark Kac.

Ingrediënten

De formule vergelijkt enerzijds de werking van een Schrödinger-halfgroep op een gegeven meetbare functie f , met anderzijds een verwachtingswaarde ten opzichte van een stochastisch proces, meer bepaald de Brownse beweging.

De hierna volgende formulering heeft betrekking op een ééndimensionale beweging in een conservatief krachtveld met potentiële energiefunctie V die wordt opgevat als vermenigvuldigings-operator.

Zij f een kwadratisch integreerbare, complexwaardige functie op de reële getallen:

$$f \in L^2(\mathbb{R}, \mathbb{C})$$

Zij H de Hamiltoniaan (Schrödinger-operator) die de totale energie van het kwantummechanisch systeem voorstelt. Hij is dus de som van de kinetische energie, voorgesteld door min een halve keer de Laplace-operator, en de gegeven functie V , opgevat als vermenigvuldigings-operator

$$H = -\frac{1}{2}\Delta + V$$

Noteer $\exp(-tH)$ voor de halfgroep van operatoren met infinitesimale generator H :

$$\frac{d}{dt} (\exp(-tH)f) |_{t=0} = -Hf$$

Zij X_t de ééndimensionale Brownse beweging. Noteer $E^0[\dots]$ voor een verwachtingswaarde ten opzichte van dit proces. Noteer $E^x[\dots]$ voor een verwachtingswaarde ten opzichte van de Brownse beweging, verschoven over een lengte x .

Formulering

$$(\exp(-tH)f)(x) = E^x \left[\exp \left(- \int_{s=0}^t V(X_s) ds \right) f(X_t) \right]$$

In het linkerlid werkt de operator $\exp(-tH)$ op de functie f . Het resultaat daarvan is een nieuwe functie, gegarandeerd continu voor $t > 0$. Het linkerlid is de waarde van die continue functie in het punt x .

In het rechterlid evolueert de Brownse beweging gedurende tijd t vanaf het startpunt x . Voor elke mogelijke evolutie wordt de integraal van de potentiële energie uitgerekend. De negatieve exponentieel van die integraal wordt gewogen met de functiewaarde van f in het eindpunt van de Brownse beweging op tijdstip t . Het rechterlid is het gewogen gemiddelde.

Voorbeeld

Zelfs als V constant 0 is, levert dit een interessant resultaat. In het rechterlid staat dan het gemiddelde van $f(X)$ waarbij X een normale verdeling heeft met gemiddelde x en variantie t . Dit is een convolutie van f met een klokfunctie van Gauss. We krijgen dus een expliciete uitdrukking voor de halfgroep die wordt voortgebracht door de Laplace-operator.

Uitbreidingen

Om de integralen absoluut sommeerbaar te maken, wordt meestal verondersteld dat V lokaal integreerbaar en langs onder begrensd is. Er bestaan echter sterkere resultaten die onder meer de (negatieve) Coulomb-potentiaal van het waterstofatoom toelaten.

De formule kan zonder meer worden uitgebreid tot hogere dimensies. Ze blijft ook gelden op ruimere klassen van toestandsruimten, bijvoorbeeld gekromde Riemann-variëteiten, onder voorwaarde van een correcte definitie van de Hamiltoniaan en de Brownse beweging.

Ze kan ook worden uitgebreid tot systemen waarin een magnetische vectorpotentiaal \mathbf{A} optreedt. Naar die uitbreiding wordt soms verwezen met de naam Feynman-Kac-Ito-formalisme, omdat binnen de haken van de verwachtingswaarde een stochastische integraal (Ito-integraal) optreedt.

Alternatieve formulering

In de stochastische analyse kan het Feynman-Kac-Ito-formalisme elegant worden geformuleerd in termen van stochastische differentiaalvergelijkingen.

Referenties

- Michael Reed en Barry Simon, "Methods of Modern Mathematical Physics" deel 2: "Fourier Analysis and Self-Adjointness," Academic Press - 1975. ISBN 0125850026.
- Barry Simon, "Functional Integration and Quantum Physics", Academic Press - 1979. ISBN 01-26442509

Fijnstructuur

In de atoomfysica beschrijft de **fijnstructuur** de splitsing van spectraallijnen van atomen vanwege eerste-orde relativistische correcties.

In eerste benadering kunnen spectra berekend worden zonder rekening te houden met deze effecten: men gaat dan uit van non-relativistische elektronen zonder spin. Voor een waterstofachtig atoom hangen de energieniveaus dan alleen af van het hoofdkwantumgetal n . Het rekening houden met relativistische correcties en spin heft de ontanding van energieniveaus op en veroorzaakt de splitsing van spectraallijnen. Fijnstructuurcorrecties zijn van de orde van grootte $(Z\alpha)^2$, waar Z het atoomnummer is van het beschouwde element en α de fijnstructuurconstante voorstelt, een dimensieloos getal dat ongeveer gelijk is aan $1/137$.

De fijnstructuur kan onderverdeeld worden in drie termen: de kinetische energie, een spin-baankoppeling en een Darwinterm. De volledige Hamiltoniaan wordt gegeven door

$$H = H_0 + H_{\text{kinetisch}} + H_{\text{sb}} + H_{\text{Darwin}}$$

Correcties ten gevolge van kinetische energie

In de klassieke mechanica is de kinetische energie gelijk aan

$$T = \frac{p^2}{2m}$$

In de speciale relativiteitstheorie verandert het bovenstaande resultaat echter:

$$T = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} - mc^2$$

De eerste term is de totale relativistische energie, en de tweede term is gelijk aan de rustmassa van het elektron (met massa m). Een Taylorontwikkeling van de bovenstaande formule geeft

$$T = \frac{p^2}{2m} - \frac{p^4}{8m^3 c^2} + \dots$$

De eerste-orde correctie van de Hamiltoniaan is dus

$$H_{\text{kinetisch}} = -\frac{p^4}{8m^3 c^2}$$

In storingsrekening kan dus de eerste-orde correctie vanwege relativistische effecten als volgt berekend worden:

$$E_n^{(1)} = \langle \psi^0 | H' | \psi^0 \rangle = -\frac{1}{8m^3 c^2} \langle \psi^0 | p^4 | \psi^0 \rangle = -\frac{1}{8m^3 c^2} \langle \psi^0 | p^2 p^2 | \psi^0 \rangle$$

waar ψ^0 de onverstoorte golf functie is. Met onverstoorte Hamiltonian H^0 wordt duidelijk dat

$$\begin{aligned} H^0 | \psi^0 \rangle &= E_n | \psi^0 \rangle \\ \left(\frac{p^2}{2m} + V \right) | \psi^0 \rangle &= E_n | \psi^0 \rangle \\ p^2 | \psi^0 \rangle &= 2m(E_n - V) | \psi^0 \rangle \end{aligned}$$

Voor de relativistische correctie leidt dit geeft dit

$$\begin{aligned} E_n^{(1)} &= -\frac{1}{8m^3 c^2} \langle \psi^0 | p^2 p^2 | \psi^0 \rangle \\ E_n^{(1)} &= -\frac{1}{8m^3 c^2} \langle \psi^0 | (2m)^2 (E_n - V)^2 | \psi^0 \rangle \\ E_n^{(1)} &= -\frac{1}{2mc^2} (E_n^2 - 2E_n \langle V \rangle + \langle V^2 \rangle) \end{aligned}$$

Voor het waterstofatoom geldt dat, $V = \frac{e^2}{r}$, $\langle V \rangle = \frac{-e^2}{a_0 n^2}$ en $\langle V^2 \rangle = \frac{e^4}{(l + 1/2)n^3 a_0^2}$, waar a_0 de

Bohrstraal voorstelt, n het hoofdkwantumgetal is en l het nevenkwantumgetal. De relativistische correctie voor het waterstof atoom is daarom

$$E_n^{(1)} = -\frac{1}{2mc^2} \left(E_n^2 + 2E_n \frac{e^2}{a_0 n^2} + \frac{e^4}{(l + 1/2)n^3 a_0^2} \right) = -\frac{E_n^2}{2mc^2} \left(\frac{4n}{l + 1/2} - 3 \right)$$

waarbij gebruik gemaakt wordt van het feit dat

$$E_n = -\frac{e^2}{2a_0 n^2}$$

Numeriek gezien is de orde van grootte van de correctie voor de grondtoestand gelijk aan $-9,056 \times 10^{-4}$ eV.

In werkelijkheid is p^4 niet een hermitische operator voor waterstofachtige s-orbitalen ($l = 0$). Het gebruik van eerste-orde storing rekening vereist echter dat de verstoring van de Hamiltoniaan hermitisch is. Het bovenstaande bewijs is daarom niet volledig rigoureuus wanneer $l = 0$. Desalniettemin laat een vergelijking met het exacte resultaat (afgeleid van de Dirac-vergelijking) zien dat het bovenstaande resultaat correct is, zelfs wanneer $l = 0$.

Spin-baan koppeling

De spin-baankoppeling wordt gegeven door de betrekking:

$$H_{sb} = \frac{1}{2} \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \left(\frac{g_s}{2m_e c^2} \right) \frac{\vec{L} \cdot \vec{S}}{r^3}$$

De spin-baancorrectie ontstaat wanneer we van het standaard referentiekader (waar het elektron zich in een baan om de atoomkern bevindt) overgaan naar een kader waar het elektron stationair is en de atoomkern zich om het elektron beweegt. In dit geval vormt de kern een stroomlus, die op zijn beurt een magnetisch veld veroorzaakt. Het elektron heeft echter een magnetisch moment vanwege zijn intrinsieke spin. Het magneetveld \vec{B} koppelt daarom aan het moment $\vec{\mu}_s$, zodat de relatieve oriëntatie van de beide vectoren energie kost (of oplevert). Dit leidt tot een correctie van de energieniveaus van de vorm

$$\Delta E_{SB} = \xi(r) \vec{L} \cdot \vec{S}$$

De factor 2 heeft te maken met de verandering van referentiekader en wordt ook wel de Thomas-factor genoemd.

Aangezien

$$\left\langle \frac{1}{r^3} \right\rangle = \frac{1}{n^3 a_0^3} \frac{1}{l(l + \frac{1}{2})(l + 1)}$$

en

$$\langle \vec{L} \cdot \vec{S} \rangle = \frac{\hbar^2}{2} (j(j + 1) - l(l + 1) - s(s + 1))$$

is de verwachtingwaarde voor de energieniveaus

$$\langle H_{SB} \rangle = \frac{E_n^2}{m_e c^2} \left(n \frac{j(j + 1) - l(l + 1) - \frac{3}{4}}{l(l + \frac{1}{2})(l + 1)} \right)$$

In orde van grootte is de spin-baan koppeling daarmee

$$\frac{Z}{n^3} 10^{-5} \text{ eV}$$

Darwinterm

De Darwinterm wordt gegeven door

$$E_{\text{Darwin}} = \frac{\hbar^2}{8m_e^2 c^2} 4\pi \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \delta^3(\vec{r})$$

oftewel

$$E_{\text{Darwin}} = \frac{\hbar^2}{8m_e^2 c^2} 4\pi \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right) |\psi(0)|^2$$

met

$$\psi(0) = 0 \text{ als } l \geq 1$$

$$\psi(0) = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} 2 \left(\frac{Z}{na_0} \right)^{\frac{3}{2}} \text{ als } l = 0$$

En dus:

$$E_{\text{Darwin}} = \frac{2n}{m_e c^2} E_n^2$$

De Darwinterm beïnvloedt alleen de s-niveaus. De 2s-baan krijgt dezelfde energie als de 2p-baan door de 2s-toestand met $9,057 \times 10^{-5}$ eV te verhogen.

De Darwinterm verhoogt de effectieve potentiaal van de atoomkern en kan opgevat worden als het uitsmeren van de elektrische lading van het elektron en de kern vanwege Zitterbeweging (letterlijk: schokkerige beweging), de verandering van de klassieke baan van het elektron vanwege kwantumoscillaties.

Een ander mechanisme dat alleen de s-toestand beïnvloedt is de Lamb-verschuiving.

Totale fijnstructuurcorrectie

Het totale effect, verkregen door de drie verschillende termen op te sommen, is gegeven door:^[1]

$$\Delta E = -\frac{m_e c^2 (Z\alpha)^4}{2n^3} \left(\frac{1}{j + 1/2} - \frac{3}{4n} \right),$$

waar j het totale impulsmoment is ($j = 1/2$ als $l = 0$, anders $j = l \pm 1/2$). Deze formule werd gevonden door Arnold Sommerfeld met behulp van de oude kwantumtheorie, vóór de moderne formulering van de kwantummechanica.

Bronnen, noten en/of referenties

- Dit artikel of een eerdere versie ervan is (gedeeltelijk) vertaald vanaf de Engelstalige Wikipedia (http://en.wikipedia.org/wiki/En:fine_structure?oldid=), die onder de licentie Creative Commons Naamsvermelding/Gelijk delen (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>) valt. Zie deze pagina (http://en.wikipedia.org/wiki/En:fine_structure?offset=20120602&action=history) voor de bewerkingsgeschiedenis.

Fonon

Een **fonon** is een gekwantiseerde collectieve trillingswijze van een kristal.

In een kristallijn materiaal zijn de atomen en/of moleculen via wisselwerkingen van wisselende sterkte aan elkaar gekoppeld. In sommige structuren, zoals in diamant, zijn dit sterke covalente bindingen, in andere zoals vast argon (bij lage temperatuur) zijn het slechts zwakke vanderwaalswisselwerkingen. De meeste materialen nemen een tussenpositie in.

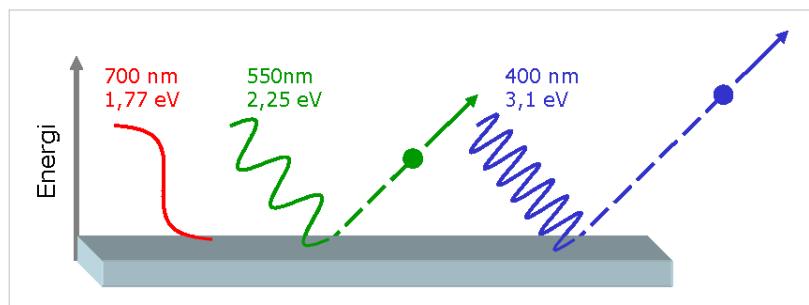
In een los molecuul kan men vaak de trillingswijzen van de afzonderlijke bindingen in eerste instantie als een harmonische oscillator beschrijven. Bij grotere moleculen ontstaan er echter trillingswijzen die meerdere atomen en hun bindingen omvatten. Bij een vaste stof moet men in de regel *alle* atomen van het gehele kristal in hun geheel beschouwen. De natuurlijke trillingswijzen van zo'n systeem kunnen dan het beste in termen van Bloch-functies (sinusoïdale golven) beschreven worden. De golven worden gekenmerkt door een golfvector \mathbf{k} in een beschrijving die analoog is aan die van de elektronenbanden van het kristal.

De energie van de trilling $E(\mathbf{k})$ is een functie van de waarde van \mathbf{k} en men kan deze functie als een band van trillingswijzen beschouwen. Omdat er meestal meer dan één atoom in een eenheidscel van de structuur zit, zijn er in het algemeen voor iedere waarde van de golfvector een aantal verschillende trillingswijzen met verschillende symmetrie.

Iedere trillingswijze kan afzonderlijk als een gekwantiseerd systeem beschouwd worden. Zo'n kwantum wordt **fonon** genoemd. Omdat fononen bosonen zijn kan een bepaalde trillingswijze meer dan een keer tegelijk aangeslagen worden.

Foto-elektrisch effect

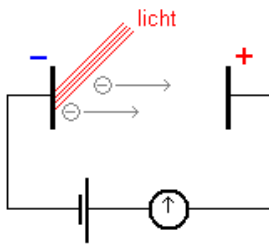
Het **foto-elektrisch effect** is het verschijnsel dat elektronen, die niet zo sterk gebonden zijn aan een atoom, loskomen nadat ze voldoende energie opnemen van een invallende lichtgolf. Het fenomeen werd ontdekt door Heinrich Hertz in 1887 tijdens zijn experimenten met elektromagnetische golven. Door een metaal te bestralen



kon er elektrische stroom opgewekt worden. Later zou Philipp Lenard een verband zien tussen de frequentie van de gebruikte straling en de grootte van de opgewekte stroom (in dit geval het aantal uitgestoten elektronen). In de gedachtegang van de toenmalige fysici was er enkel een verband mogelijk met de intensiteit van de straling, maar niet met de stralingsfrequentie. Dit was niet het enige vreemde gedrag van de elektronen: de spanning die nodig was om de uitgestoten elektronen te stoppen (de remspanning) bleek enkel afhankelijk van de frequentie en niet van de intensiteit. Dit was volledig in tegenspraak met de golftheorie op dat moment.

Het effect

Wanneer twee geleidende platen — bijvoorbeeld in een vacuümbuis (weggelaten in de figuur) — via een gelijkspanningsbron verbonden zijn zal een van de twee een positieve lading krijgen en de andere een negatieve lading. Valt er licht op de negatieve plaat, dan worden er elektronen uitgezonden (geëmitteerd), waardoor er een stroom gaat lopen in het circuit. Dit is het **foto-elektrisch effect**. Dit gebeurt echter niet als het invallende licht een te lage frequentie heeft, ook al is de lichtsterkte nog zo groot. Dit effect is niet te verklaren met de klassieke Wetten van Maxwell van elektromagnetisme die stelt dat licht is opgebouwd uit golven. Het foto-elektrisch effect heeft aan de wieg gestaan van het besef van de dualiteit van golven en deeltjes.



Verklaring

Max Planck had in 1900 al laten zien dat licht in karakteristieke energiepakketjes (kwanta) komt: de wet van Planck voor zwarte stralers, het startpunt van de oude kwantummechanica. De energie van licht is rechtevenredig met de frequentie van het licht. Albert Einstein werkte dit idee in 1905 verder uit en paste het toe op het foto-elektrisch effect:

- om een elektron vrij te maken uit de geleider is een bepaalde arbeid (W van *work*) nodig
- licht is opgebouwd uit lichtkwanta ofwel fotonen.
- deze fotonen kunnen niet "samenwerken" om een elektron vrij te maken

Hieruit volgt direct dat elektronen alleen kunnen worden vrijgemaakt wanneer de frequentie van het opvallende licht groot genoeg is.

In formulevorm:

$$E_k = hf - W$$

Waarbij:

- E_k de kinetische energie van het losgeslagen elektron
- h de constante van Planck = $6,63 \times 10^{-34}$ J s
- f de frequentie van het licht
- hf de energie van een invallend foton
- W de energie (werkfunctie) die nodig is om het elektron vrij te maken uit de geleidende plaat.

Voor dit werk ontving Einstein in 1921 de Nobelprijs natuurkunde.

Vergelijking

Het effect is te vergelijken met een jongen die een bal op het dak probeert te schoppen. Schopt hij niet hard genoeg, dan rolt de bal weer naar beneden. Schopt hij honderd keer te zacht, dan rolt de bal honderd keer weer terug. Het lukt pas als hij in een keer hard genoeg schopt.

Toepassingen

Het foto-elektrisch effect wordt onder meer toegepast in fotocellen die gebruikt worden in bewegingsdetectoren, geluid in films en de rookdetector met licht.

Externe links

- (en) Interactief Java-applet ^[1] dat het foto-elektrisch effect illustreert.

Fysische optica
<p>Absorptie · Airy-schijf · Amplitude · Brekingsindex · Brewsterhoek · Coherentie · Diffractie · Dispersie · Dopplereffect · Emissie · Fase · Fluorescentie · Fosforescentie · Foto-elektrisch effect · Frequentie · Fresnelvergelijkingen · Fresnel-zoneplaat · Gestimuleerde emissie · Getal van Abbe · Golffront · Golflengte · Halo · Holografie · Infrarood · Intensiteit · Interferentie · Interferometer · Kleur · Laser · Lasersnijden · Licht · Lichtbreking · Lichtenergie · Lichtgrootheden en -eenheden · Lichtmeter · Lichtsnelheid · Lichtsterkte · Lichtstroom · Luminantie · Luminescentie · Mach-Zehnder-interferometer · Michelson-interferometer · Monochromatisch licht · Newtonring · Ooggevoeligheid · Optische vezel · Polarimeter · Polarisatie · Poynting-vector · Principe van Huygens-Fresnel · Principe van Fermat · Prisma · Reflectie · Schlierenoptica · Specifieke lichtstroom · Spectraalanalyse · Spectraallijn · Spectroscopie · Spectrum · Stralingsdeler · Totale interne reflectie · Tralie · Transmissie · Transversale golf · Ultraviolet · UV/VIS-spectroscopie · Verlichtingssterkte · Wit licht</p>
<p>David Brewster · Christian Doppler · Charles Fabry · Pierre de Fermat · Joseph von Fraunhofer · Dennis Gabor · Augustin-Jean Fresnel · Heinrich Hertz · Christiaan Huygens · Hendrik Lorentz · Albert Michelson · James Clerk Maxwell · Edward Morley · Isaac Newton · Alfred Pérot · Thomas Young</p>

Referenties

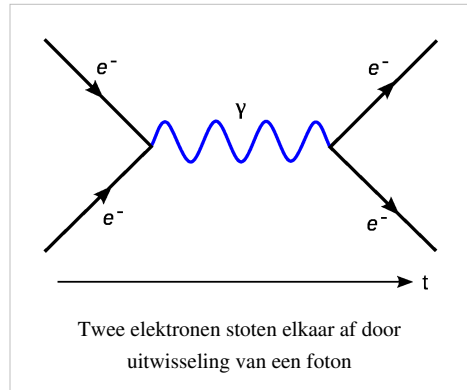
- [1] http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Photoelectric_Effect

Foton

Fotonen (φωτος, photos = licht) ("lichtdeeltjes") zijn een verschijningsvorm van elektromagnetische straling. Afhankelijk van de gebruikte meetopstelling zal straling (een vorm van energie) zich voordoen als golven of als een stroom van massalose deeltjes, de fotonen. Ze worden soms aangeduid met het symbool γ (de derde Griekse letter gamma).

Licht

Licht is niets anders dan elektromagnetische straling in een frequentiebereik dat door bepaalde cellen in onze ogen waargenomen kan worden. Licht bestaat uit fotonen.



Ontstaan

Fotonen kunnen binnen een atoom ontstaan als een elektron naar een lagere energietoestand terugvalt en de vrijkomende energie uitzendt in de vorm van een foton. Fotonen kunnen ook opgewekt worden bij processen in de atoomkern, zoals het terugvallen van een kern uit een aangeslagen toestand naar een lagere energietoestand, kernsplijting en kernfusie. Ook bij de wisselwerking tussen elementaire deeltjes of het spontane verval van één elementair deeltje naar een ander kunnen fotonen vrijkomen. Wanneer een elementair deeltje en zijn antideeltje botsen, kan alle massa worden omgezet in een energierijk foton (en omgekeerd). Elk elektromagnetisch veld dat in sterkte varieert, produceert ook elektromagnetische straling (en dus fotonen).

Snelheid

Fotonen bewegen zich met de lichtsnelheid (c), die in het vacuüm $2,99792458 \times 10^8$ meter per seconde bedraagt. Uit de speciale relativiteitstheorie volgt dat een deeltje met een eindige rustmassa nooit de lichtsnelheid kan bereiken. Een foton heeft dan ook geen rustmassa.

Een foton vervalt niet en is dus volkomen stabiel. Volgens de speciale relativiteitstheorie staat de lokale tijd van een foton stil, dus een foton krijgt niet de tijd om uiteen te vallen, zelfs als het een eindige levensduur had.

Formule van Planck

Licht met frequentie ν (de Griekse letter nu, in middelbareschoolboeken soms ook f) bestaat uit fotonen met energie E :

$$E = h\nu$$

met h de constante van Planck.

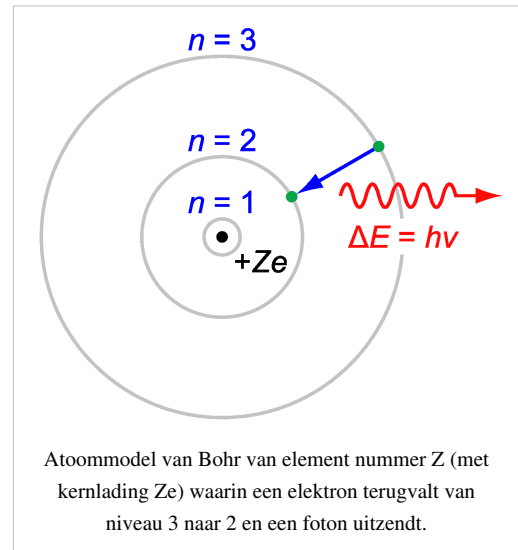
Met het begrip van de materiegolf van De Broglie kent men aan een foton een impuls toe:

$$p = \frac{h\nu}{c}$$

die ook geschreven kan worden als

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

(zie de dualiteit van golven en deeltjes).



Breking

Als fotonen zich door transparante media voortplanten, gaan ze langzamer dan in vacuüm, afhankelijk van de brekingsindex van het medium. Deze brekingsindex hangt ook af van de frequentie ν van de straling. Op een grensvlak tussen twee media vindt refractie (breking) van het licht plaats, als de brekingsindices van die media verschillen. (Wit licht is samengesteld uit verschillende frequenties (kleuren): een spectrum. Dit spectrum kan zichtbaar gemaakt worden door middel van de dispersie (kleurschifting) die optreedt als de verhouding tussen de brekingsindices van die media van de frequentie afhangt.)

Algemene relativiteit

Einsteins algemene relativiteitstheorie voorspelde dat de baan van fotonen door zwaartekracht wordt beïnvloed. Dit was destijds (1915) volstrekt in tegenspraak met de heersende opvattingen, maar werd later bevestigd door waarnemingen. De aanname dat fotonen steeds langs een rechte lijn bewegen moest worden aangepast naar de aanname dat fotonen langs geodeten (zie differentiaalmeetkunde) bewegen, en dat zijn in een massaloze ruimte rechte lijnen.

Verder lezen

- Born, M. & Wolf, E.: *Principles of optics*, Pergamon Press, Oxford, 1987
- Hecht, E. & Zajac, A.: *Optics*, Addison-Wesley, Reading, 1974
- Kronig, A. (red.): *Leerboek der natuurkunde*, Scheltema & Holkema, Amsterdam, 1962
- Biezeveld, H. en Mathot, L.: *Scoop Natuurkunde voor de bovenbouw 5/6 vwo*, Wolters-Noordhoff Groningen, 1997 vijfde druk

Fracton

Een **fracton** is een collectieve gekwantiseerde trillingswijze op een substraat met een fractale structuur.

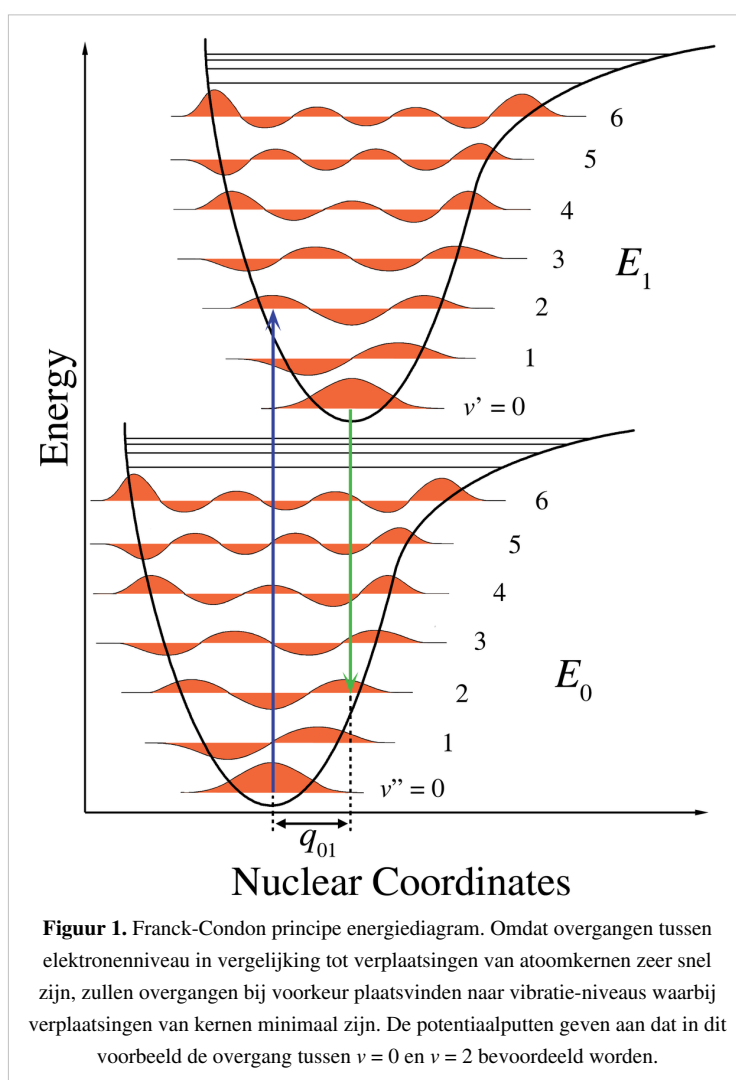
Fractonen zijn het fractale analogon van fononen. Fononen zijn het gevolg van het toepassen van translatiesymmetrie op de potentiaal in een Schrödingervergelijking. Men kan fractale zelfsimilariteit als een symmetrieoperatie beschouwen enigszins te vergelijken met translatiesymmetrie. Bij translatie is de operatie waaronder het substraat ongewijzigd blijft een *verschuiving*, bij zelfsimilariteit is het schaalvergroting of -verkleining. De kwantummechanische oplossingen van een dergelijk probleem leiden in het algemeen tot een continuüm van toestanden met verschillende frequenties, dat wil zeggen een fractonband vergelijkbaar met een fononband. De bijbehorende trillingswijzen beslaan echter maar een deel van het substraat en zijn dus niet geheel gedelocaliseerd in tegenstelling tot de fonontrillingswijzen. In plaats daarvan is er een hiërarchie van trillingwijzen die een steeds kleiner deel van het substraat omvatten.

Franck-Condon-principe

Het **Franck-Condon principe**^[1] is een regel in de spectroscopie, molecuulfysica en kwantumchemie waarmee de intensiteit van de trillingsovergangen verklaard kan worden. Trillingsovergangen zijn de gelijktijdige verandering van elektronen- en trillingsenergie in een molecuul ten gevolge van de absorptie of emissie van een foton met de juiste energie. Het principe stelt dat tijdens een elektronenovergang een verandering in trillingsenergie waarschijnlijker is naarmate de twee golf functies meer overlap vertonen.

Samenvatting

Het Franck-Condon-principe heeft een brede semiklassieke basis in het oorspronkelijke werk van James Franck [Franck, 1927]. Elektronenovergangen zijn in essentie momentaan vergeleken met de beweging van atoomkernen. Dus als tijdens de elektronenovergang ook een overgang plaatsvindt naar een ander trillingsniveau plaatsvindt, moet de nieuwe trillingstoestand momentaan compatibel zijn met de positie en impulsmomenten van de atoomkernen in het oude elektronenniveau. In het semiklassieke beeld van trilling (of oscillatie) wordt aan deze voorwaarde voldaan in de omkeerpunten van de beweging: daar is het impulsmoment nul.



In het semiklassieke beeld van trilling (of oscillatie) wordt aan deze voorwaarde voldaan in de omkeerpunten van de beweging: daar is het impulsmoment nul.

Vanuit klassiek gezichtspunt is het Franck–Condon-principe de benadering dat een elektron-overgang het meest waarschijnlijk optreedt zonder verandering van de positie van atoomkernen van het betrokken molecuul of zijn omgeving. Het molecuul verkeert vervolgens in een Franck–Condontoestand, en de betrokken overgang wordt een *verticale* overgang genoemd. Kwantummechanisch geformuleerd: de intensiteit van de vibratie-overgang is evenredig met het kwadraat van de overlap tussen de golf functies voor trilling die betrokken zijn bij de overgang.

— IUPAC Compendium of Chemical Terminology, 2nd Edition (1997)

Externe links

- <http://www.iupac.org/goldbook/F02510.pdf>
- <http://www.life.uiuc.edu/govindjee/biochem494/Abs.html>

Bronnen, noten en/of referenties

Fundamentele natuurkracht

In de natuurkunde zijn vier **fundamentele natuurkrachten** bekend: Alle krachten volgen uit de vier fundamentele krachten. In volgorde van afnemende sterkte zijn dit:

- de sterke kernkracht, die de protonen en neutronen in de kern bij elkaar houdt, overgebracht door gluonen
- de elektromagnetische kracht, die de elektronen bij een atoom vasthoudt, overgebracht door fotonen
- de zwakke kernkracht, die een rol speelt in diverse vervalprocessen, overgebracht door W-bosonen en Z-bosonen
- de zwaartekracht, die de materie op grote schaal bij elkaar houdt, hypothetisch overgebracht door gravitonen

	Relatieve Magnitude	Reikwijdte
Sterke kernkracht	10^{40}	$1/r^7$
Elektromagnetische kracht	10^{38}	$1/r^2$
Zwakke kernkracht	10^{15}	$1/r^{5-7}$
Zwaartekracht	10^0	$1/r^2$

In de theoretische natuurkunde tracht men deze krachten te verenigen in een theorie. De vereniging van de elektromagnetische en de zwakke kracht is onomstreden. De combinatie van de sterke kracht met deze twee krachten (de zogenaamde GUT, Grand Unification Theory) is goed onderweg, hoewel er nog geen spoor van experimenteel bewijs is. De combinatie van de zwaartekracht en de andere krachten (genaamd TOE, Theory of Everything (*Theorie van alles*)), is echter nog steeds problematisch, omdat de zwaartekracht door de algemene relativiteitstheorie wordt beschreven, en de andere krachten door de kwantumtheorie, en die zijn moeilijk te verenigen. Theorieën die hier mogelijk een oplossing bieden, zijn de snaartheorie en de Loop-kwantumzwaartekracht.

Gedelokaliseerd elektron

Een **gedelokaliseerd elektron** is een elektron in een molecuul of een vaste stof dat niet bij een specifiek atoom of een specifieke covalente binding hoort, maar is "uitgesmeerd" over het molecuul. Dit verschijnsel noemt men **delokalisatie**.

Chemische bindingen

Ruwweg kunnen de elektronen in een molecuul in twee groepen worden verdeeld: elektronen die in lagere schillen in de atomen zitten, en sterk aan een atoom gebonden zijn, en de elektronen die de covalente bindingen verzorgen. De valentiebindingstheorie beschrijft dit in termen van orbitalen: de orbitalen van twee atomen overlappen gedeeltelijk, wat energetisch voordelig kan zijn. In dat geval ontstaat er een binding tussen de twee atomen. Hierbij treedt bijna altijd hybridisatie op: mengvormen van verschillende typen orbitalen geven een grotere overlap, daarmee een lagere energie en een stabielere binding. In bepaalde gevallen wordt de overlap zo groot dat deze beschrijving niet meer opgaat: in de toestand met de laagste energie (grondtoestand) strekken orbitalen zich over meerdere atomen uit. Elektronen in deze orbitalen kunnen eenvoudig van het ene naar het andere atoom gaan en zijn dus niet meer "gelokaliseerd".

Voorbeelden

Benzeen

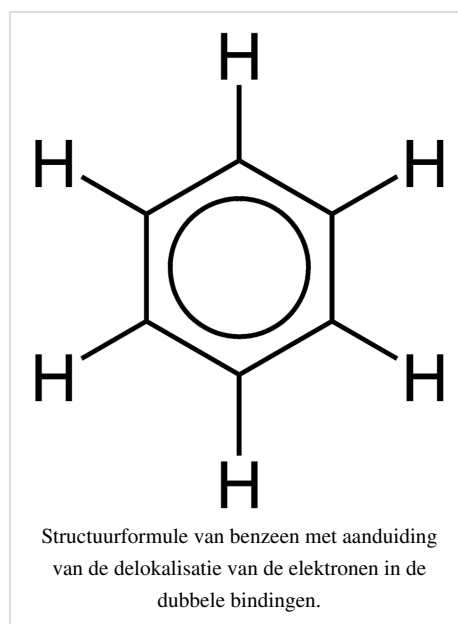
Het bekendste voorbeeld van delokalisatie is het benzeenmolecuul: de zes elektronen die de bindingen tussen de C-atomen verzorgen, zijn gedelokaliseerd over de gehele ring. Men geeft dit vaak grafisch weer door een cirkel in het midden van de zeshoek.

Organische polymeren

Ook bij bepaalde polymeren komt delokalisatie voor. Hierbij zijn elektronen over de "ruggengraat" van het polymeer verspreid. Doordat de elektronen zich makkelijk over het polymeer kunnen verplaatsen, kunnen zulke polymeren elektrische geleiders of (vaker) halfgeleiders zijn, terwijl de meeste organische polymeren zeer slechte geleiders zijn.

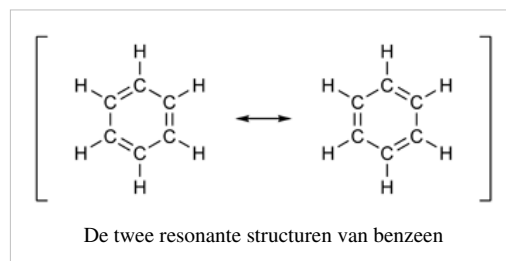
Metalen

In metalen zorgt de delokalisatie van de elektronen voor een bandstructuur.



Andere beschrijvingen

De Lewistheorie voor covalente bindingen beschrijft de structuur van een molecuul enkel in termen van enkel-, twee- en drievoudige bindingen, en kan geen goede beschrijving bieden van delocalisatie. Een fenomenologische "verklaring" wordt geboden door zogenaamde resonantiestructuren. Bij benzeen bijvoorbeeld, zijn er twee "mogelijke" structuurformules. Geen van beide beschrijft het molecuul correct, en men stelt het molecuul voor alsof het het 'gemiddelde' is van beide structuren (en de waarheid ligt vaak meer aan ene kant dan aan de andere kant, behalve bij symmetrische resonantie).



Gedelocaliseerde golven

Voor een golf is dit niet het geval. Het is hoogstens mogelijk te zeggen: er is een golf op het oppervlak van de oceaan, maar niet: de golf is hier op dit punt. Wiskundig is het zelfs zo dat een monochromatische golf, zeg een functie $\sin(\omega t)$ met een enkele frequentie ω alleen bestaat als we haar definiëren over het gehele domein van negatief oneindig tot positief oneindig. (De theorie van de Fourier transformatie laat bijvoorbeeld zien dat een afgebroken sinus altijd beschreven behoort te worden met meer dan één frequentie). Een golf is daarmee in grote mate **gedelocaliseerd** en een strikt monochromatische golf zou zelfs het gehele universum moeten omspannen. Een golf is dus eerder 'overall' dan 'hier'.

Delocalisatie in chemische structuren

Dualiteit stelt in zekere zin deeltjes aan golven gelijk en dat is een enormiteit waarmee vrijwel eenieder die voor het eerst met dualiteit geconfronteerd wordt te worstelen heeft. Immers, hoe kan iets dat 'hier' is (een deeltje), hetzelfde zijn als iets dat 'overall tegelijk' is (een golf)? Wellicht is het beter te zeggen dat wat de natuur te bieden heeft objecten zijn die *beperkt gelocaliseerd* zijn, maar de menselijke omgangstaal heeft geen goede woorden voor dat soort objecten.

In oudere theorieën over de chemische binding, zoals de Lewistheorie zijn elektronen altijd voorgesteld als gelocaliseerde deeltjes. In een Lewis-structuur zijn bijvoorbeeld elektronen altijd aanwezig als elektronenpaar, ofwel *gelocaliseerd* als eenzaam paar op een enkel atoom, ofwel als gedeeld paar *gelocaliseerd* tussen twee atomen. Deze theorie komt echter vaak in de problemen omdat elektronenparen ook door meer dan twee atomen gedeeld kunnen worden. Vanuit een deeltjes-optiek is dat niet goed te begrijpen. Hoe kan een deeltje tegelijkertijd tussen verschillende atomen *gelocaliseerd* zijn? Een goed voorbeeld van een molecule waar dit een rol speelt is benzeen, maar er zijn er legio.

Kwantummechanische theorieën over de chemische binding gaan echter uit van dualiteit en daarmee zijn deze probleemgevallen goed te beschrijven. Vanuit een golf-optiek is namelijk het delen van elektronen over meer dan twee atomen heel goed te begrijpen. Immers, golven zijn van huis uit geheel gedelocaliseerd. Wanneer een elektron (als golf) ingevangen wordt door bijvoorbeeld drie atomen is dat altijd nog een grote mate van beperkte localisatie te noemen. Toch spreken chemici dan vaak over het feit dat dit elektron 'gedelocaliseerd' is over drie atomen. Daarbij verraden zij dat zij onwillekeurig uitgaan van het idee dat elektronen deeltjes zijn en geen golven.

'Delocalisatie' (d.w.z. de noodzaak af te stappen van het deeltjes-idee) is zeker niet beperkt tot drie atomen zoals in het acetaat-ion of 6 zoals in benzeen of zelfs 60 bij buckminsterfullereen. Bij metaalbinding is het nodig delocalisatie over het gehele metaalkristal aan te nemen. Er is een misvatting met name in de organische chemie dat delocalisatie een systeem van π -bindingen vereist, maar dit is bij metalen zeker niet vol te houden.

Ook in halfgeleiders zoals silicium of diamant is dat het geval. De hoge mobiliteit van ladingdragers in deze stoffen is vanuit een optiek van gelocaliseerde σ -bindingen niet te begrijpen en vereist brede valentie- en geleidingsbanden

met een hoge graad van delocalisatie,

Generaties van de materie

De quarks en de leptonen zijn in drie zogeheten *generaties* in te delen:

elektrische lading	1e generatie	2e generatie	3e generatie
$+2/3 e$	up-quark	charm-quark	top-quark
$-1/3 e$	down-quark	strange-quark	bottom-quark
0	elektron-neutrino	muon-neutrino	tau-neutrino
$-e$	elektron	muon	tau

De deeltjes van zulk een kolom hebben verschillende elektrische lading:

- de quarks $+2/3 e$ en $-1/3 e$
- de leptons 0 en $-e$

We spreken bij zo'n viertal in één kolom van een generatie of familie van elementaire deeltjes. De massa is groter in elke volgende generatie.

Alle zichtbare materie in het heelal bestaat uit eerste-generatiedeeltjes: up- en down-quark en elektron. Dit komt doordat deeltjes van de tweede en derde generatie instabiel zijn: ze vervallen heel snel in deeltjes van de eerste generatie.

Geometrische fase

De **geometrische fase** of **Berry's phase** is een begrip uit de kwantummechanica. Het is een fase die kwantumtoestanden verkrijgen wanneer zij adiabatische processen ondergaan, als gevolg van de geometrische eigenschappen van de parameterruimte van de Hamiltoniaan. Het verschijnsel is genoemd naar Sir Michael Berry.

Golven worden gekarakteriseerd door amplitude en fase. De geometrische fase treedt op wanneer de parameters waarvan de golf functie afhankelijk is, tegelijk maar zeer traag (adiabatisch) worden veranderd (bijvoorbeeld door rotatie of translatie), en uiteindelijk weer in de begintoestand worden gebracht. Intuïtief zou men verwachten dat de golf functies dan ook terugkeren tot hun begintoestand (afgezien van een tijdsafhankelijke fasefactor), maar wanneer de verandering van de parameters een lus is, en niet hetzelfde pad heen en terug wordt gevolgd, verkrijgt het systeem een extra fasefactor: de geometrische fase.

De geometrische fase duikt onder andere op in de theorie van het Aharonov-Bohm-effect en bij conische intersecties van potentiële-energieoppervlakken. In het geval van het Aharonov-Bohm-effect is de adiabatische parameter het magnetisch veld in een solenoïde. In het geval van de conische intersectie zijn de adiabatische parameters de moleculaire coördinaten. Buiten de kwantummechanica komt de geometrische fase ook voor in andere golfsystemen, zoals klassieke optica.

Om de geometrische fase in een golfsysteem te meten, is een interferentie-experiment nodig. De slinger van Foucault is een voorbeeld van de Hannay-hoek uit de klassieke mechanica, het klassiek-mechanische equivalent van de geometrische fase.

Gestimuleerde emissie

Gestimuleerde emissie is een door Albert Einstein voorspeld verschijnsel, dat een atoom in een aangeslagen toestand dat botst met een foton zelf ook een foton uitzendt met dezelfde golflengte, polarisatie, bewegingsrichting en fase en daarbij naar de grondtoestand terugvalt. Het verschijnsel vormt de basis van de laser en de maser.

Fysische optica

Absorptie · Airy-schijf · Amplitude · Brekingsindex · Brewsterhoek · Coherentie · Diffractie · Dispersie · Dopplereffect · Emissie · Fase · Fluorescentie · Fosforescentie · Foto-elektrisch effect · Frequentie · Fresnelvergelijkingen · Fresnel-zoneplaat · Gestimuleerde emissie · Getal van Abbe · Golfvront · Golflengte · Halo · Holografie · Infrarood · Intensiteit · Interferentie · Interferometer · Kleur · Laser · Lasersnijden · Licht · Lichtbreking · Lichtenergie · Lichtgrootheden en -eenheden · Lichtmeter · Lichtsnelheid · Lichtsterkte · Lichtstroom · Luminantie · Luminescentie · Mach-Zehnder-interferometer · Michelson-interferometer · Monochromatisch licht · Newtonring · Ooggevoeligheid · Optische vezel · Polarimeter · Polarisatie · Poynting-vector · Principe van Huygens-Fresnel · Principe van Fermat · Prisma · Reflectie · Schlierenoptica · Specifieke lichtstroom · Spectraalanalyse · Spectraallijn · Spectroscopie · Spectrum · Stralingsdeler · Totale interne reflectie · Tralie · Transmissie · Transversale golf · Ultraviolet · UV/VIS-spectroscopie · Verlichtingssterkte · Wit licht

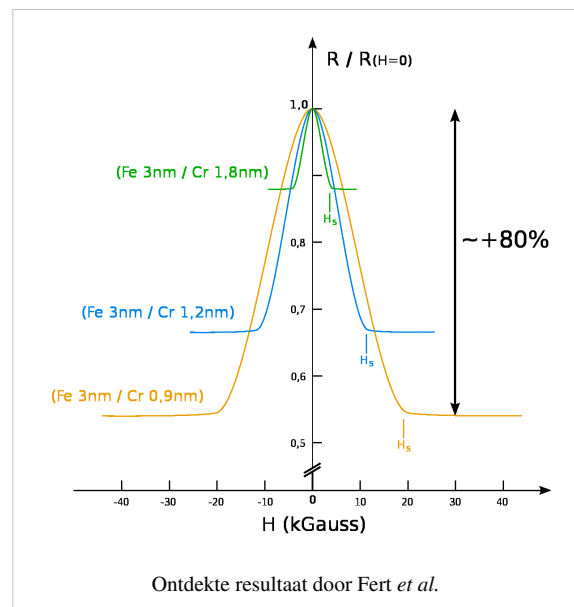
David Brewster · Christian Doppler · Charles Fabry · Pierre de Fermat · Joseph von Fraunhofer · Dennis Gabor · Augustin-Jean Fresnel · Heinrich Hertz · Christiaan Huygens · Hendrik Lorentz · Albert Michelson · James Clerk Maxwell · Edward Morley · Isaac Newton · Alfred Pérot · Thomas Young

GMR-effect

Het **GMR-effect** (GMR van het Engelse *giant magnetoresistance*) is een kwantummechanisch effect waarbij de elektrische weerstand van een materiaal sterk afneemt onder invloed van een magnetisch veld. Het effect treedt op in dunne lagen van afwisselend ferromagnetisch en niet-magnetisch metaal. De Nobelprijs voor de Natuurkunde van 2007 ging naar Albert Fert en Peter Grünberg voor hun ontdekking van het GMR-effect. Het effect vindt onder andere belangrijke toepassingen in magnetische opslagmedia zoals harde schijven. In 1998 ontving Peter Grünberg hiervoor de Duitse Toekomstprijs.

Ontdekking

GMR werd door twee groepen onafhankelijk van elkaar ontdekt in 1988. Een team onder leiding van Peter Grünberg van het Forschungszentrum Jülich (dat het octrooi bezit) zag het effect in een systeem van drie lagen, Fe/Cr/Fe. ^[1] De groep van Albert Fert van de Universiteit van Paris-Sud zag als eerste een werkelijk groot effect in systemen met veel lagen, en beschreef als eerste op correcte wijze de principes achter het effect. ^[2] De ontdekking van GMR wordt beschouwd als de geboorte van de spintronics, het schakelen



met elektronspin in plaats van elektrische lading. Grünberg en Fert hebben diverse prestigieuze prijzen gewonnen voor hun ontdekking en bijdrage in het veld van spintronics, waaronder de Nobelprijs voor de Natuurkunde in 2007.^[3]

Oorzaak en beschrijving van het effect

Het effect uit zich als een duidelijke afname van de elektrische weerstand in de nabijheid van een magnetisch veld. Dit laat zich verklaren doordat de verstrooiing van elektronen aan de grensvlakken tussen de verschillende metalen afhankelijk is van de spin van de elektronen. De precieze kwantummechanische verklaring is te gecompliceerd om hier te reproduceren, maar ruwweg kan men het als volgt beschrijven.^{[4][5]}

De geleiding van elektrische stroom in een metaal wordt verzorgd door elektronen. In een ferromagnetisch materiaal treedt een spontane magnetisatie op, en men kan spreken van twee soorten elektronen, spin-up en spin-down (spin omhoog en spin naar beneden), die ieder een duidelijk verschillende weerstand ondervinden wanneer zij door het materiaal reizen, afhankelijk van de magnetisatie van het materiaal. Ook de verstrooiing van de elektronen aan het grensvlak tussen een ferromagnetisch metaal en een "gewoon" metaal hangt van de richting van de elektronspin af.

Wanneer de richting van de magnetisatie van opeenvolgende ferromagnetische lagen antiparallel (teggesteld) is, zal een elektron met een bepaalde spin bij het doorkruisen van de ene ferromagnetische laag relatief ongehinderd kunnen bewegen, maar in de volgende laag (en de grensvlakken) sterk worden verstrooid. Zowel de spin-up als de spin-down elektronen zullen dus een relatief grote weerstand ondervinden.

Als echter op de een of andere manier de magnetisatie van alle ferromagnetische lagen dezelfde kant op komt te staan, zal één van de twee "soorten" elektronen relatief ongehinderd door alle lagen heen komen en maar weinig weerstand ondervinden. Dit effect kan groot genoeg zijn om de totale weerstand van het materiaal met tientallen procenten te doen afnemen.

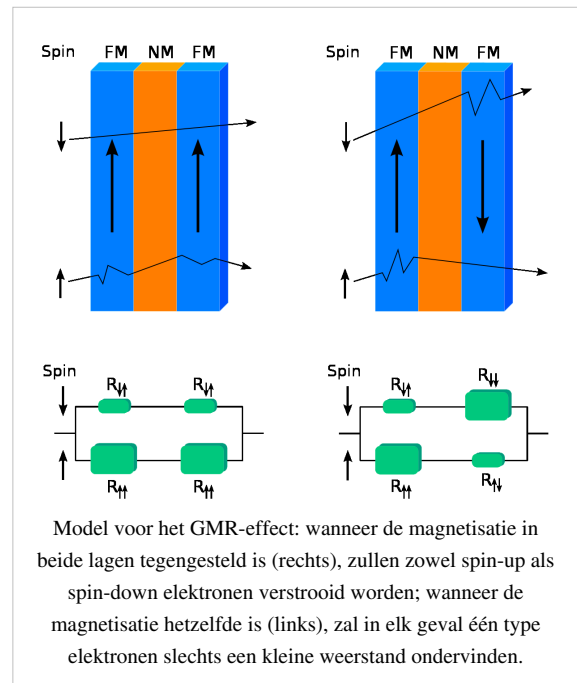
In principe zijn er ook andere bijdragen aan het effect mogelijk, en ook kan het zijn dat het boven beschreven effect slechts klein is (enkele procenten). Om deze redenen wordt het effect dat hier beschreven is ook wel *spin valve magnetoresistance* genoemd: het is een soort kraan (*valve*) voor elektrische stroom, gebaseerd op het feit dat de verstrooiing van de ladingsdragers (elektronen) van hun spin afhangt.

Systemen met GMR

Er zijn verschillende manieren om de magnetisatie van de ferromagnetische lagen te beïnvloeden om dit effect te bewerkstelligen, die tot verschillende systemen met GMR leiden.^[5]

Multilagen met verschillende coërciviteit

Twee of meer ferromagnetische lagen worden gescheiden door een dunne laag (3 nanometer) niet-ferromagnetisch metaal. De ferromagnetische lagen zijn afwisseld van twee typen, die iets andere magnetische eigenschappen hebben, dus bijvoorbeeld ...F1/N/F2/N/F1/N/F2/N... Hierdoor kan met één extern magnetisch veld de polarisatie van de afwisselende ferromagnetische lagen afzonderlijk geregeld worden. Hiervoor gebruikt men twee ferromagnetische materialen die een verschillende coërciviteit hebben.



Multilagen met antiferromagnetische koppeling

Wanneer de ferromagnetische lagen voldoende dicht bij elkaar zitten, is het mogelijk dat zij een antiferromagnetische wisselwerking hebben. De zogeheten RKKY-koppeling zorgt ervoor dat bij afwezigheid van een extern magnetisch veld, de naastgelegen lagen bij voorkeur een tegengestelde magnetisatie hebben, wat leidt tot een relatief hoge weerstand in het systeem. Het aanleggen van een voldoende sterk extern magnetisch veld "dwingt" de ferromagnetische lagen om in dezelfde richting gemagnetiseerd te worden, waardoor de weerstand in het systeem afneemt. Een voorbeeld van zo'n systeem is een multilaag ..Fe/Cr/Fe/Cr/Fe/Cr/Fe..., met dunne laagjes Cr, ongeveer 1 nanometer.

Spin valve sandwich

Een *spin valve sandwich* bestaat uit drie dunne lagen (sandwich). De magnetisatie van de twee ferromagnetische lagen kan afzonderlijk worden geregeld doordat een van de twee lagen gekoppeld is aan een dikke laag ferromagnetisch materiaal met een bepaalde polarisatie. De polarisatie van de andere laag kan dan met een extern magnetisch veld worden geregeld. Deze configuratie is industrieel het best toepasbaar en wordt gebruikt in harde schijven.

Toepassingen

GMR wordt uitgebreid gebruikt in de schrijf- en leeskoppen van harde schijven. Een andere applicatie is het GMR-effect in niet-vluchtig magnetoresistive random access memory(MRAM).

Referenties

- [1] G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, and W. Zinn, *magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange* (<http://link.aps.org/abstract/PRB/v39/p4828>Enhanced), Physical Review B, vol. **39** (1989), pp. 4828–4830
- [2] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, and J. Chazelas, *Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices* (<http://link.aps.org/abstract/PRL/v61/p2472>), vol. **61** (1988), pp. 2472–2475
- [3] Nobel Prize in Physics 2007 (http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/), Nobelprize.org
- [4] Kon. Zweedse Academie van Wetenschappen, The discovery of giant magnetoresistance (http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/phyadv07.pdf), wetenschappelijke achtergrond bij de Nobelprijs voor de Natuurkunde 2007
- [5] B. Dieny, *Giant magnetoresistance in spin-valve multilayers* (http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TJJ-46JYKJ4-G9&_user=10&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=2e4fb580c4f34553888a2a01bdc823af), Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. **136** (1994), pp. 335–359.

Externe links

- Presentation of GMR-technique (IBM Research) (<http://www.research.ibm.com/research/gmr.html>)
- Scientific background (http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2007/phyadv07.pdf)

Golffunctie

Kwantummechanica
$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
Onzekerheidsrelatie
Algemene inleiding... ^[1]
Achtergrond
Klassieke mechanica Interferentie Hamiltonformalisme
Fundamentele begrippen
Kwantumtoestand · Golffunctie · Postulaten Superpositie · Onzekerheidsprincipe Schrödingervergelijking · Tunneleffect Uitsluitingsprincipe Diracnotatie
Gevorderde onderwerpen
Interpretatie Klein-Gordonvergelijking Dirac-vergelijking Kwantumveldentheorie Kwantumgravitatie

Experimenten

Schrödingers kat
 Tweespletenexperiment
 Tunneleffect
 Stern-Gerlach-experiment

Wetenschappers

Planck · Einstein · Bohr
 · Sommerfeld · Bose ·
 Kramers · Heisenberg ·
 Born · Jordan · Pauli ·
 Dirac · de Broglie ·
 Schrödinger · von
 Neumann · Wigner ·
 Feynman · Bohm ·
 Everett · Bell

In de kwantummechanica, duidt men met de term **golffunctie** de kwantumtoestand aan van een systeem. Aangezien een subatomair deeltje volgens deze theorie niet strikt gelokaliseerd is, maar uitgespreid, dient men een deeltje dus niet te beschrijven met een positievector (zoals in de klassieke mechanica), maar met een functie. Deze functie noemt men dan de *golffunctie*. Bovendien geeft deze functie weer wat de kans is om het deeltje op een bepaalde plaats aan te treffen. De waarschijnlijkheid om een deeltje op een bepaalde plek aan te treffen is het kwadraat van de golffunctie van dat deeltje op die plek in de tijdruimte. Het kwadraat van de golffunctie noemt men dus de waarschijnlijkheidsdichtheid. De golffunctie van een systeem of deeltje wordt meestal aangeduid met Ψ . De meest algemene vorm van de golffunctie is

$$\Psi(q_1, q_2, q_3, \dots, t)$$

Golffuncties voor deeltjes zijn de oplossingen van een verbazend eenvoudige vergelijking die de Schrödingervergelijking wordt genoemd. Het probleem is dat deze vergelijking alleen voor zeer eenvoudige gevallen kan worden opgelost; voor situaties waarbij meer dan twee deeltjes een rol spelen moeten benaderingen worden gemaakt. Deze benaderingen zijn echter nog steeds zeer waardevol en hebben een grote voorspellende waarde.

Deeltjes in een doosje?

Wanneer de bewegingsvrijheid van een deeltje wordt beperkt resulteert de Schrödingervergelijking in een aantal staande golven die door het deeltje als golffunctie kunnen worden gebruikt. Elk van die staande golven correspondeert met een energieniveau: over het algemeen geldt dat hoe hoger de *orde* van de staande golf, hoe hoger de energie die hoort bij die golffunctie. Aangezien de natuur altijd streeft naar een zo laag mogelijke vrije energie is er slechts een beperkt aantal staande golven beschikbaar voor een opgesloten deeltje (zie hiervoor de Wet van Boltzmann).

Elektronen in een atoom

Het bovenstaande heeft belangrijke gevolgen voor de opbouw van een atoom. Als een elektron met zijn negatieve lading ingevangen wordt rond de positieve kern, is dat in feite een vorm van opsluiting. Het elektron kan als gevolg daarvan slechts kiezen uit een beperkt aantal trillingswijzen. Deze heten orbitalen of elektronenbanen. Ze kunnen beschreven worden aan de hand van hun patroon van buiken en knopen:

- **s**-functies zijn bolvormig zonder horizontaal of verticaal knoopvlak.
- **p**-functies hebben één knoopvlak door de oorsprong. Dit kan op 3 verschillende manieren en er zijn dus 3 verschillende p functies: p_x , p_y en p_z genoemd.
- **d**-functies hebben twee knoopvlakken door de oorsprong die loodrecht op elkaar staan. Dit kan op 5 verschillende manieren.
- **f**-functies hebben drie loodrecht op elkaar staande knoopvlakken door de oorsprong. Dit kan op 7 verschillende manieren.

(Er zijn nog hogere functies die met **g,h,i,j**, enz aangegeven worden, maar die komen in de praktijk alleen voor in de atoomopbouw van heel zware atomen).

Elk van de typen kan naast de genoemde vlakken nog *radiële* knoopvlakken hebben. Het totaal aantal knoopvlakken plus een wordt voor de naam van de functie gezet, zo heeft een $3p_z$ -functie een knoopvlak loodrecht op de Z-as door de oorsprong, en een enkel radieel knoopvlak.

Elk paar van functies zoals deze hier zijn beschreven is *orthogonaal*, dat wil zeggen dat de integraal van het product van elke twee verschillende genoemde functies over de ruimte nul is.

➤ *Zie ook Elektronenconfiguratie*

Tunneling

Een andere eigenschap van golffuncties is dat ze *continue* functies zijn. Met andere woorden: het is niet mogelijk dat er *sprongen* in de waarde van de golffunctie zitten. Als er een hoge energiebarrière is waar een deeltje niet doorheen kan, dan zal in die barrière de golffunctie heel snel (exponentieel) naar nul afvallen, maar niet *ineens* nul zijn. Het effect is dat zelfs in de barrière de golffunctie een waarde heeft, en dat er dus een mogelijkheid is dat het deeltje in de barrière wordt aangetroffen. Als de barrière erg dun is, is het zelfs mogelijk dat het deeltje van de ene kant naar de andere kant gaat. Dit effect heet tunneleffect of *tunneling*, en kan inderdaad worden waargenomen. In scanning tunneling microscopie wordt van dit effect gebruikgemaakt.

Golfgetal

Het **golfgetal** of **repetentie** is een golfeigenschap die gerelateerd is aan de golflengte en daarmee geheel gelijkwaardig is. Het golfgetal geeft aan hoeveel golven (golflengtes) er per lengte-eenheid voorkomen en is dus het omgekeerde van de golflengte. De eenheid van het golfgetal is per meter (m^{-1}). Ook andere eenheden worden gebruikt, zoals: per centimeter (cm^{-1}).

De exacte definitie van het golfgetal is anders voor verschillende gebieden in de wetenschap.

In de spectroscopie is het golfgetal gedefinieerd als 1 gedeeld door de golflengte λ . Het natuurkundige symbool voor het golfgetal is dan de Griekse letter ν (nu) met een tilde erboven.

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$$

In relatie tot de voortplantingssnelheid v geldt:

$$\tilde{\nu}v = f,$$

waarin f de frequentie is.

Cirkelgolfgetal

In de kwantumfysica, en ook wel in andere gebieden van de natuurkunde, wordt met golfgetal het *cirkelgolfgetal* aangeduid, gedefinieerd als 2π gedeeld door de golflengte. Het natuurkundige symbool voor het golfgetal is dan k .

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

In relatie tot de voortplantingssnelheid v geldt:

$$kv = \omega,$$

waarin ω de cirkel- of hoekfrequentie is.

Hartree-Fock-methode

Hartree-Fock is één van de meest eenvoudige benaderingsmethoden uit de kwantumchemie, om *ab initio* berekeningen te doen aan atomen en moleculen. Het is een benaderingsmethode van de golf functie en energie in de grondtoestand van een meerdeeltjesprobleem binnen de kwantummechanica. Deze methode wordt veel gebruikt bij kwantummechanische benaderingen bij berekeningen aan bijvoorbeeld moleculen in de computationele natuurkunde en scheikunde, omdat de exacte golf functie voor alle situaties die meer dan twee deeltjes bevatten niet zonder benadering op te lossen is (is niet exact oplosbaar).

Het doel van de Hartree-Fock-methode is dus om een zo eenvoudig mogelijke antisymmetrische, variationeel geoptimaliseerde golf functie te bekomen, die een benadering voor de echte golf functie vormt.

Principe

De methode gaat ervan uit dat de exacte golf functie van het N -deeltjesprobleem in de grondtoestand kan worden benaderd door één enkele Slaterdeterminant (als het om fermionen gaat) of door een permanente (ingeval het bosonen betreft) van N spinorbitalen. Dit is een vereenvoudiging van de werkelijkheid. Door het toepassen van het variatieprincipe kan een set van N -gekoppelde vergelijkingen worden afgeleid voor de N spinorbitalen. Deze kunnen de Hartree-Fock golf functie en energie opleveren, welke benaderingen zijn van de exacte golf functie en -energie. Afhankelijk van de benodigde nauwkeurigheid, wordt deze vervolgens direct als oplossing genomen of gebruikt als beginpunt voor verdere post-Hartree-Fock berekeningen.

Afleiding van de energie

De enkele Slaterdeterminant kan worden voorgesteld als

$$\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{N!}} \begin{vmatrix} \chi_1(\mathbf{x}_1) & \cdots & \chi_N(\mathbf{x}_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \chi_1(\mathbf{x}_N) & \cdots & \chi_N(\mathbf{x}_N) \end{vmatrix}$$

Hierbij vormen alle spinorbitalen χ een orthonormale set. Belangrijk is dat deze Slaterdeterminant, die in wezen een anti-symmetrische golf functie is, geen eigenfunctie is van de Hamiltoniaan. De reden hiervoor is dat de golf functie te eenvoudig is, omdat deze slechts een fractie vormt van alle mogelijke Slaterdeterminanten voor het N -deeltjesprobleem.

De verwachtingswaarde van deze golf functie wordt, wegens postulaat 4 van de kwantummechanica, gegeven door

$$\langle E \rangle = \langle \Phi_0 | \hat{H} | \Phi_0 \rangle$$

De uitdrukking voor de Hamiltoniaan is de volgende (in atomaire eenheden):

$$\hat{H} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \hat{\nabla}_i^2 - \sum_i \sum_A^P \frac{Z}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{R}_A|} + \sum_i \sum_{j>i}^N \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}$$

Deze bestaat uit drie termen: de kinetische energieterm, de term die de aantrekking tussen de elektronen en de kern beschrijft (de potentiële energieterm) en een term die de afstoting tussen elektronen onderling omvat (de Coulombterm). Deze uitdrukking wordt vaak herschreven tot

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^N \hat{h}(i) + \sum_i \sum_{j>i}^N \frac{1}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}$$

Daarin stelt $\hat{h}(i)$ de één-elektronterm voor, waarin de kinetische en potentiële energieterm vervat zitten. Indien deze uitdrukking wordt gesubstitueerd in de uitdrukking voor de verwachtingswaarde van de Slaterdeterminant, dan wordt volgende betrekking verkregen:

$$\begin{aligned}\langle E \rangle &= \langle \Phi_0 | \sum_{i=1}^N \hat{h}(i) + \sum_i \sum_{j>i}^N \frac{1}{|r_i - r_j|} | \Phi_0 \rangle \\ &= \langle \Phi_0 | \sum_{i=1}^N \hat{h}(i) | \Phi_0 \rangle + \langle \Phi_0 | \sum_i \sum_{j>i}^N \frac{1}{|r_i - r_j|} | \Phi_0 \rangle\end{aligned}$$

Het uitwerken van deze betrekking met de waarde voor de Slaterdeterminant levert uiteindelijk de uitdrukking voor de energiewaarde op:

$$E = \sum_{i=1}^N \langle \chi_i | \hat{h}(1) | \chi_i \rangle + \frac{1}{2} \sum_{i,j}^N ([\chi_i \chi_i | \chi_j \chi_j] - [\chi_i \chi_j | \chi_j \chi_i])$$

waarin

$$[\chi_i \chi_i | \chi_j \chi_j] = \int \chi_i^*(1) \chi_i(1) \frac{1}{|r_1 - r_2|} \chi_j^*(2) \chi_j(2) dx_1 dx_2$$

en

$$[\chi_i \chi_i | \chi_j \chi_j] = \int \chi_i^*(1) \chi_j(1) \frac{1}{|r_1 - r_2|} \chi_j^*(2) \chi_i(2) dx_1 dx_2$$

Deze integralen worden de twee-elektronintegralen genoemd.

Optimalisatie van de energie

De energie is een functie van golffuncties (spinorbitalen); dit wordt een functionaal genoemd. De waarde moet nu echter nog worden geoptimaliseerd met behulp van de variatiemethode, zodat een zo laag mogelijk bovengrens voor de energie wordt verkregen. De beste spinorbitalen (de zogenaamde Hartree-Fock-vergelijkingen) zijn deze met de laagste energie ϵ_i in de eigenwaardevergelijking

$$\hat{f}_1(1) \chi_i(1) = \epsilon_i \chi_i(1)$$

Hierbij stelt de operator f_1 de Fock-operator voor, die wordt gegeven door

$$\hat{f}_1(1) = \hat{h}(1) + \sum_j (\hat{J}_j - \hat{K}_j)$$

Hierin stellen J en K respectievelijk de Coulomb- en de exchange-integraal voor. Zij worden gegeven door

$$\hat{J}_j = \int \chi_j^*(x_n) \frac{1}{|r_1 - r_2|} \chi_j(x_n) dx_n$$

en

$$\hat{K}_j = \int \chi_j^*(x_n) \frac{1}{|r_1 - r_2|} \chi_i(x_n) dx_n$$

Hermitische matrix

Een **hermitische matrix**, ook wel **zelf-geadjungeerde matrix** genoemd, is een vierkante matrix met complexe elementen die gelijk is aan zijn geadjungeerde matrix. Dat wil zeggen dat het element in de i -de rij en de j -de kolom gelijk is aan de complex geconjugeerde van het element in de j -de rij en de i -de kolom. Hermitische matrices zijn genoemd naar Charles Hermite.

Definitie

De $n \times n$ -matrix A heet *hermitisch* als zijn getransponeerde matrix gelijk is aan zijn complex geconjugeerde matrix; in formule:

$$A^T = \bar{A}.$$

Voor de elementen van de matrix geldt dan voor alle indices i en j :

$$a_{i,j} = \overline{a_{j,i}}.$$

Voorbeeld

De onderstaande matrix is een hermitische 2×2 -matrix:

$$\begin{bmatrix} 3 & 2 + i \\ 2 - i & 1 \end{bmatrix}$$

Eigenschappen

- Voor een hermitische matrix A geldt voor een willekeurig inproduct (\cdot, \cdot) : $(x, Ay) = (Ax, y)$.
Daaruit ziet men ook direct dat de eigenwaarden van een hermitische matrix A reëel zijn, immers als λ een eigenwaarde van A is, bij de eigenvector $x \neq 0$, geldt:
 $\lambda(x, x) = (x, \lambda x) = (x, Ax) = (Ax, x) = (\lambda x, x) = \bar{\lambda}(x, x)$, zodat $\bar{\lambda} = \lambda$, dus reëel.
- Uit voorgaande eigenschap volgt dat de determinant van een hermitische matrix reëel is.
- Een reële hermitische matrix is een symmetrische matrix

Toepassing in de natuurkunde

In de natuurkunde spelen hermitische matrices een belangrijke rol, omdat deze altijd reële eigenwaarden hebben. Een operator met reële eigenwaarden correspondeert met een meetbare grootheid in de kwantummechanica.

Zo wordt bijvoorbeeld in de kwantummechanica de impuls p voorgesteld door de operator:

$$p_{op} = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x}.$$

Deze is hermitisch, want:

$$\langle \psi_1 | p_{op} \psi_2 \rangle = \langle p_{op} \psi_1 | \psi_2 \rangle$$

Immers:

$$\begin{aligned} \langle \psi_1 | p_{op} \psi_2 \rangle &= \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_1^* \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} \psi_2 dx = \psi_1^* \psi_2 \Big|_{-\infty}^{+\infty} - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} \psi_1^* \psi_2 dx = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} \right)^* \psi_1^* \psi_2 dx = \langle p_{op} \psi_1 | \psi_2 \rangle \end{aligned}$$

Door de randvoorwaarde $\psi_{1,2}(-\infty) = \psi_{1,2}(\infty) = 0$ valt de stokterm weg.

Bronnen, noten en/of referenties

- "Introduction to quantum mechanics" "David J. Griffiths" ISBN:0131244051

Hermitische operator

Een matrix is op te vatten als voorstelling van een lineaire afbeelding. Men spreekt dan ook van hermitische lineaire afbeeldingen en heel algemeen van **hermitische lineaire operatoren** indien zij zelf-geadjungeerd zijn. De eerstgenoemde eigenschap leent zich goed voor de generalisatie van het begrip hermitisch.

Algemene definitie

Van een operator u in een hermitische ruimte E zegt men dat deze hermitisch is als:

$$\forall x \in E, \forall y \in E, (u(x)|y) = (x|u(y))$$

In een orthonormale basis is de matrix van zo'n operator gelijk aan de getransponeerde matrix van zijn geconjugeerde zelf-geadjungeerde. Er geldt dat:

$$A^\dagger = {}^t(A)^*$$

Dus als $A = A^\dagger$, is A een matrix van een hermitische operator.

In de theoretische natuurkunde en de kwantummechanica wordt een operator hermitisch genoemd indien de volgende relatie geldt:

$$\langle \Psi_i | \hat{A} | \Psi_j \rangle \equiv \langle \Psi_j | \hat{A} | \Psi_i \rangle^*$$

Dit is de Diracnotatie voor

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \cdots \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_i^*(q_n) \hat{A} \Psi_j(q_n) d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \cdots \int_{-\infty}^{+\infty} (\Psi_j^*(q_n) \hat{A} \Psi_i(q_n))^* d\tau$$

Dit geldt indien de hermitische operator reëel is:

$$\langle A \rangle = \langle A \rangle^*$$

Rol in de kwantummechanica

Hermitische operatoren spelen een belangrijke rol in de kwantummechanica, waar zij natuurkundige grootheden voorstellen. Hun werkelijke (reële) waarden geven de mogelijke waarden van de grootte en hun vectoren de geassocieerde toestanden aan. Het tweede postulaat van de kwantummechanica stelt dat met iedere waarneembare natuurkundige grootheid A een hermitische operator \hat{A} geassocieerd is. Daar waar de grootheid A in de klassieke mechanica wordt uitgedrukt in termen van een coördinaat q_i en een impuls p_i :

$$A(q_i, p_i)$$

wordt in de kwantummechanica een lineaire hermitische operator ingevoerd:

$$\hat{A} \left(q_i, \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial q_i} \right)$$

Deze operator bezit een complete verzameling van (orthonormale)^[1] eigenfuncties. Dat impliceert dat iedere functie Ψ , die aan dezelfde randvoorwaarden voldoet als de eigenfuncties α_i van de operator, kan worden beschreven als een lineaire combinatie van deze eigenfuncties:

$$\Psi = \sum_n c_n |\alpha_i\rangle$$

Van bijzonder belang is de Hamiltoniaan, de hermitische operator die voorkomt in de Schrödingervergelijking:

$$\hat{H}\psi = \left(\hat{V} - \frac{\hbar^2}{2m} \hat{\nabla}^2 \right) \psi$$

Voetnoten

[1] Indien de eigenfuncties niet orthonormaal zijn, kan de Gram-Schmidtmethodede worden toegepast.

Historisch overzicht van de Bose-Einsteincondensatie

Hieronder staat een **historisch overzicht van de Bose-Einsteincondensatie**.

Jaren 20 van de 20e eeuw

Begin jaren twintig van de 20e eeuw ontwikkelde de Indische wetenschapper Satyendra Nath Bose een nieuwe afleiding voor de stralingswet van Planck. Deze nieuwe afleiding maakte gebruik van enkele nieuwe ideeën, waaronder het deeltjesaspect van licht. Het idee van licht als kwantum lag op dat moment het grootste deel van de natuurkundige gemeenschap zwaar op de maag. De meeste natuurkundigen negeerden het idee of stonden er afwijzend tegenover. Robert Millikan, bijvoorbeeld, probeerde uit alle macht de foto-elektrische vergelijking, en daarmee het kwanteus karakter van licht te falsifiëren. Zelfs nadat Albert Einsteins foto-elektrische wet algemeen werd aanvaard, was er, buiten Einstein zelf, eigenlijk niemand met naam en faam die ook maar iets met het idee van lichtkwanta te maken wilde hebben.

Omdat Bose zijn artikel aanvankelijk niet gepubliceerd kreeg, stuurde hij het naar Albert Einstein. Einstein zag wel wat in Boses benadering en gebruikte zijn invloed om het artikel gepubliceerd te krijgen.

Boses statistische theorie was ontwikkeld voor lichtdeeltjes, maar Einstein paste Boses benadering ook toe om een systeem van niet-interagerende massadeeltjes te beschrijven. In Einsteins tweede publicatie over dit onderwerp (gepubliceerd in 1925 en het manuscript in 2005 teruggevonden) beschrijft hij het condensatiefenomeen, dat we nu kennen onder de naam **Bose-Einsteincondensatie** (BEC).

Jaren 40 van de 20e eeuw

Pas rond 1940 komt Bose-Einsteincondensatie opnieuw onder de aandacht, wanneer Pjotr Kapitsa de overgang naar de supervloeibare fase van helium waarneemt. Fritz London was de eerste die er op wees dat deze overgang als Bose-Einsteincondensatie gekarakteriseerd kan worden. Er zijn echter wel enkele verschillen. De BEC-theorie was opgesteld voor een gas van niet (of zwak) interagerende deeltjes, wat zeker niet het geval is voor een vloeistof. Verder merkte men experimenteel dat in het helium hoogstens 10% van de deeltjes zich in de supervloeibare fase bevond, waar Bose-Einsteincondensatie eigenlijk geen begrenzing oplegt. Men had met supervloeibaarheid dus enkel een analogon voor Bose-Einsteincondensatie in interagerende systemen gevonden.

Jaren 90 van de 20e eeuw

Hierna duurt het tot 1993 vooraleer we weer van Bose-Einsteincondensatie horen. Deze keer is het de waarneming van een Bose-Einsteincondensaat van excitonen in een halfgeleider. Alhoewel de interacties hier zwak van aard zijn, zijn ze niet zo goed begrepen en zorgt de opbouw van het systeem voor de nodige moeilijkheden bij de analyse ervan.

Het is dan uiteindelijk in 1995 voordat groepen van het Joint Institute for Laboratory Astrophysics (Eric Cornell en Carl Wieman) en het Massachusetts Institute of Technology (Wolfgang Ketterle) er voor het eerst in slagen een Bose-Einsteincondensaat in een gas van een alkalimetaal (rubidium-87) te observeren. Cornell en Wieman observeerden een gas van rubidiumatomen en Ketterle observeerde een gas van natriumatomen. In datzelfde jaar heeft de groep van de Rice University (Randy Hulet) sterke aanwijzingen dat ze een Bose-Einsteincondensaat gecreëerd hebben in een lithiumgas. In 2001 kregen Cornell, Wieman en Ketterle de Nobelprijs voor de Natuurkunde voor deze opmerkelijke prestatie.

Zeventig jaar na de theoretische ontwikkeling is men nu eindelijk in staat theorie en experiment naast elkaar te leggen en te vergelijken.

Verdere ontwikkelingen

Het verhaal van Bose-Einsteincondensatie eindigt echter niet bij de realisaties van de groepen van Cornell & Wieman en Ketterle. Er zijn in 2004 reeds meer dan 30 groepen wereldwijd geslaagd in het creëren van condensaten en hun aantal blijft groeien. Toen in 1995 ineens experimentele controle van de theorie mogelijk werd, was dit het startschot voor een explosie aan onderzoek op dit gebied. Waar er de voorgaande zeventig jaar een handvol publicaties over het onderwerp verschenen waren, verschijnen er sinds 1995 ineens enkele honderden per jaar. Ontwikkelingen, zowel op theoretisch als op experimenteel vlak, blijven elkaar zeer snel opvolgen. Diverse van deze ontwikkelingen zijn terug te vinden bij Bose-Einsteincondensatie: Toepassingen.

Het manuscript

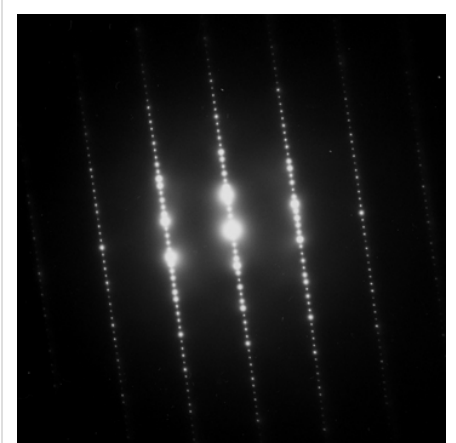
Op 22 juli 2005 dook aan de Universiteit Leiden, in het archief van Paul Ehrenfest, die hoogleraar was in Leiden en een goede vriend van Einstein, het manuscript op van het artikel waarin Einstein het verschijnsel beschrijft dat later Bose-Einsteincondensatie zal gaan heten. Het manuscript dateert uit 1924 en werd gevonden door de Utrechtse natuurkundestudent Rowdy Boeyink, die in Leiden onderzoek deed voor zijn scriptie over de Leidse jaren van Ehrenfest.

Hypothese van De Broglie

De **hypothese van De Broglie** is de door Louis-Victor de Broglie geformuleerde hypothese dat alle materie het karakter van een golf heeft waarvan de golflengte afhangt van de massa en de snelheid van het deeltje.

Geschiedenis

Het golfkarakter van materie werd in 1924 voor het eerst gepostuleerd in het proefschrift van De Broglie^[1] en is in 1927 voor het eerst experimenteel waargenomen door Clinton Davisson en Lester Germer bij experimenten aan elektronendiffractie. In 1929 ontving De Broglie de Nobelprijs voor de Natuurkunde voor zijn werk over het golfkarakter.^[2]



Interfererende elektrongolven in een elektronenmicroscop

Tegen het jaar 1900 waren alle natuurkundigen er van overtuigd dat licht een golfverschijnsel is. Interferentieproeven met licht leken dit experimenteel te bevestigen. Het succes van de in de 19e eeuw ontwikkelde diffractietheorie door o.a. Fresnel is ook geheel gebaseerd op het golfmodel. In 1901 echter, verklaarde Max Planck het door een zwart lichaam uitgezonden spectrum van elektromagnetische straling door aan te nemen dat de zwarte straler slechts energie kon uitwisselen met het elektromagnetische veld in hoeveelheden die een geheel veelvoud zijn van hf . Hierin is f de frequentie van de straling, en h een constante, later de constante van Planck genoemd. Albert Einstein breidde de hypothese in 1905 verder uit en nam aan dat licht daadwerkelijk uit dergelijke energiepakketjes bestond. Daarmee kon hij het foto-elektrisch effect beschrijven. Begin jaren twintig van de 20ste eeuw was men dus reeds bekend met het feit dat elektromagnetische straling zich zowel kan voordoen als een golf en als een deeltje: de zogenaamde golf-deeltjedualiteit. De Broglie stelde in 1924 dat deze golf-deeltjedualiteit ook de andere kant op werkt: een deeltje (bijvoorbeeld een elektron of atoom) kan zich ook voordoen als een golf.

Vergelijkingen van De Broglie

Voor elektromagnetische golven gelden de relaties $\lambda = h/p$ tussen de golflengte λ en de impuls p , en $f = E/h$ tussen de frequentie f en de energie E .

De Broglie veronderstelde dat deze relaties ook geldig zijn voor materiedeeltjes.

De eerste vergelijking van De Broglie geeft het verband tussen de golflengte en de impuls van een deeltje:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\gamma m v} = \frac{h}{m v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

met

- λ de golflengte van het deeltje
- h de constante van Planck
- p de impuls van het deeltje
- m de rustmassa van het deeltje
- v de snelheid van het deeltje
- γ de Lorentzfactor
- c de lichtsnelheid in vacuüm.

Toepassingen

Reeds in 1931 is met behulp van de theorie van materiegolven een elektronenmicroscop gebouwd door Ernst Ruska die daar in 1986 de Nobelprijs voor de natuurkunde voor heeft gekregen. Het principe is gebaseerd op het feit dat in een elektronenmicroscop de snelheid van de elektronen zo geregeld kan worden dat de golflengte van de elektronen een stuk kleiner wordt dan die van licht. Hierdoor kan een elektronenmicroscop veel kleinere structuren bekijken dan een standaard lichtmicroscop.

Referenties

- [1] L. de Broglie, *Recherches sur la théorie des quanta*, Proefschrift (Parijs), 1924; L. de Broglie, *Ann. Phys. (Paris)* **3**, 22 (1925). Herdrukt in *Ann. Found. Louis de Broglie* **17** (1992) p. 22.
- [2] Broglie, Louis de, The wave nature of the electron, Nobel Lecture, December 12, 1929 (http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1929/broglie-lecture.pdf) (en)

Ineenstorten van de golf functie

Het **ineenstorten van de golf functie** is het proces waardoor een golf functie die zich aanvankelijk in een superpositie van verschillende eigentoestanden bevond, na interactie met zijn omgeving tot niet meer dan één van deze toestanden wordt teruggebracht. Dit is een van de twee processen volgens welke kwantumsystemen in de loop van de tijd evolueren. Het andere proces is de 'ongestoorde' evolutie van het systeem volgens de tijdsafhankelijke Schrödingervergelijking.

Over de vraag of het ineenstorten van golf functies wel of niet niet werkelijk plaatsvindt zijn niet alle natuurkundigen het eens; het kan ook een epifenomeen van andere verschijnselen zoals decoherentie zijn.

Beschrijving

Zie het artikel kwantummechanica voor een beschrijving van de gebruikte begrippen en terminologie.

Met iedere meetbare grootheid (observabele) A is een kwantummechanische operator geassocieerd. Men kan de golf functie $|\psi\rangle$ (Diracnotatie) van een kwantummechanisch systeem ontwikkelen in eigentoestanden $|i\rangle$ van deze operator, dat wil zeggen dat een willekeurige golf functie $|\psi\rangle$ te schrijven is als

$$|\psi\rangle = \sum_i c_i |i\rangle$$

waar de c_i complexe getallen zijn. De $|i\rangle$ zijn een orthonormale basis van eigenvectoren van de operator A , dus $A|i\rangle = a_i|i\rangle$ met a_i (complexe) getallen, $\langle i|i\rangle = 1$ en $\langle i|j\rangle = 0$ voor $i \neq j$

Voorafgaande aan een meting kan een kwantummechanisch systeem zich in een willekeurige toestand bevinden, dus een superpositie van eigentoestanden zoals hierboven beschreven. Ná de meting bevindt het systeem zich in een zuivere eigentoestand van de operator die bij de observabele hoort. Bij een ontwikkeling van de functie in eigentoestanden is er dus nog maar één coëfficiënt ongelijk nul, de rest is 'ineengestort'. Welke eigentoestand resulteert, kan niet met zekerheid voorspeld worden (tenzij het te meten systeem zich al in een eigentoestand bevindt), en de waarschijnlijkheid dat een toestand $|\psi\rangle$ 'ineenstort' tot een bepaalde eigentoestand $|i\rangle$ wordt gegeven door $|\langle\psi|i\rangle|^2 = c_i$.

Toepassingen

Het bestaan van ineenstortende golffuncties wordt onder meer noodzakelijk geacht bij het beschrijven van:

- De Kopenhaagse interpretatie en bepaalde varianten hierop
- De transactionele interpretatie
- Bepaalde verschijnselen binnen de kwantummysiek

Het verschijnsel wordt daarentegen beschouwd als overbodig of als een alternatieve verklaring binnen het kader van:

- Interpretaties gebaseerd op consistente geschiedenissen
- De Veel-werelden-interpretatie
- De Bohm-interpretatie
- De Ensemble-interpretatie

Bij de interpretatie van de kwantummechanica staan verschijnselen die aan de hand van het ineenstorten van een golffunctie kunnen worden verklaard bekend als het meetprobleem. Volgens de Kopenhaagse interpretatie is het ineenstorten een specifiek kenmerk van het meetproces als zodanig. Volgens de vele-werelden-interpretatie van Everett zijn de lineaire wetten van de kwantummechanica algemeen geldig, doordat de enige manier waarop een kwantumsysteem evolueert afhangt van de Schrödingervergelijking of een equivalent hiervan binnen de relativiteitstheorie.

Interferentiecontrast

Met interferentiecontrast wordt de mate van zichtbaarheid van de interferentie die plaatsheeft binnen elk systeem dat golfeigenschappen vertoont - zoals de optica, kwantummechanica, golven in water of elektrische signalen - bedoeld. Wanneer twee of meer golven worden gecombineerd en hun onderlinge fase hierdoor verandert varieert het vermogen of de intensiteit van de resulterende golf. De zichtbaarheid van de interferentie wordt gedefinieerd als het quotiënt van de amplitude van deze oscillaties en de som van alle vermogens van de individuele golven.

Optica

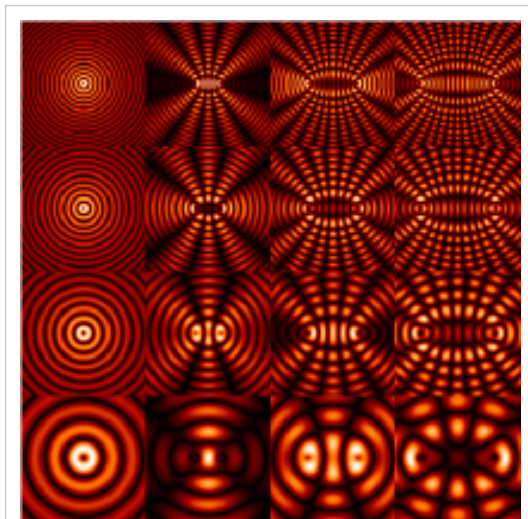
Bij optische interferometers zoals de Mach-Zehnder-interferometer, de Michelson-interferometer en

de Sagnac-interferometer manifesteert het interferentiecontrast zich in de vorm van oscillaties ("randen") in de uitgaande intensiteit van de golven, iets wat ook wel bekend staat als de "Mach-Zehnder-zichtbaarheid". De som van de intensiteit (of het vermogen) van twee interfererende golven is dan gelijk aan het gemiddelde van deze randen. Hieruit volgt dat het interferentiecontrast kan worden berekend aan de hand van de volgende formule:

$$\text{Contrast(echt)} = \frac{\text{amplitude}}{\text{gemiddeld}}$$

Deze formule kan worden herschreven als

$$\text{Contrast(echt)} = \frac{\text{max} - \text{min}}{\text{max} + \text{min}}$$



Verskillende interferentiepatronen vertonen een verschillend interferentiecontrast.

Hierin staan *max* en *min* voor het maximale respectievelijk minimale aantal oscillaties. Wanneer twee optische velden identiek zijn (dat wil zeggen dezelfde kleur, vorm, richting, tijdsprofiel enz. hebben) kan het voorspelde contrast als volgt worden beschreven:

$$\text{Contrast(ideaal)} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2},$$

Naarmate de optische velden onderling sterker verschillen, zal het interferentiecontrast sterker afwijken van de ideale waarde. Hiermee is het interferentiecontrast een maatstaf voor de mate van coherentie die tussen twee optische velden bestaat. Deze definitie van interferentie heeft rechtstreeks betrekking op golven in water en elektrische signalen.

Kwantummechanica

In de kwantummechanica kunnen alle voorwerpen volgens de Schrödingervergelijking als golven worden beschouwd, waardoor interferentie een alomtegenwoordig karakter heeft. Voorbeelden zijn de interferentieranden in het Bose-Einsteincondensaat en de interferentie die atomen in een Ramsey-interferometer laten zien. Bij tweespletenexperimenten laten elementaire deeltjes zoals atomen en moleculen interferentie zien.

Interpretatie van de kwantummechanica

Kwantummechanica
$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
Onzekerheidsrelatie
Algemene inleiding... ^[1]
Achtergrond
Klassieke mechanica Interferentie Hamiltonformalisme
Fundamentele begrippen
Kwantumtoestand · Golffunctie · Postulaten Superpositie · Onzekerheidsprincipe Schrödingervergelijking · Tunneffect Uitsluitingsprincipe Diracnotatie
Gevorderde onderwerpen
Interpretatie Klein-Gordonvergelijking Dirac-vergelijking Kwantumveldentheorie Kwantumgravitatie

Experimenten

Schrödingers kat
Tweespletenexperiment
Tunneleffect
Stern-Gerlach-experiment

Wetenschappers

Planck · Einstein · Bohr
· Sommerfeld · Bose ·
Kramers · Heisenberg ·
Born · Jordan · Pauli ·
Dirac · de Broglie ·
Schrödinger · von
Neumann · Wigner ·
Feynman · Bohm ·
Everett · Bell

Een **interpretatie van de kwantummechanica** is een poging om de vraag te beantwoorden *Waar heeft de kwantummechanica het precies over?* Hoewel de kwantummechanica de nauwkeurigst geteste en meest succesvolle theorie is in de geschiedenis van de wetenschap, begrijpen velen ze niet helemaal. Er is een aantal zich staande houdende stromingen die verschillen van mening of de kwantummechanica deterministisch is (zie kwantummechanica en vrije wil), welke elementen van de kwantummechanica als reëel kunnen worden beschouwd en andere vragen.

Historische achtergrond

De betekenis van de technische termen die gebruikt worden binnen de kwantummechanica (zoals golffuncties en matrixmechanica) heeft zich met een aantal tussenstappen ontwikkeld. Oorspronkelijk zag Schrödinger bijvoorbeeld de golffunctie van het elektron als de ladingsdichtheid van een object die uitgespreid is over een bepaald, mogelijk oneindig, volume in de ruimte. Later stelde Max Born de golffunctie voor als de waarschijnlijkheidsverdeling van de positie van het elektron in de ruimte. Andere belangrijke wetenschappers, zoals Albert Einstein, hadden veel moeite met accepteren van de radicale gevolgen van de theorie, zoals de kwantumonzekerheid.

Er moet echter niet aangenomen worden dat de meeste fysici de kwantummechanica beschouwen als vereiste interpretatie, behalve dan de erg minimale instrumentalistische interpretaties, die hieronder worden beschreven. De Kopenhaagse interpretatie lijkt de populairste te zijn onder wetenschappers, gevolgd door de veel-werelden-interpretatie en de consistente geschiedenissen. Maar het is ook waar dat de meeste natuurkundigen de niet-instrumentele vragen (in het bijzonder de ontologische) als irrelevant voor de fysica beschouwen. Zij vallen terug op de mening van Paul Dirac, die later werd uitgedrukt in de beroemde spreuk "zeur niet en reken uit" die vaak (misschien onterecht) wordt toegeschreven aan Richard Feynman.

Belemmeringen tot een directe interpretatie

De moeilijkheden in de interpretatie komen tot uiting in een aantal punten over de orthodoxe beschrijving van de kwantummechanica:

1. De abstracte, mathematische aard van de beschrijving van de kwantummechanica
2. Het bestaan van schijnbaar niet-deterministische en irreversibele processen in de kwantummechanica
3. Het verschijnsel van kwantumverstremgeling en in het bijzonder de hogere correlaties tussen ver van elkaar verwijderde gebeurtenissen dan zou worden verwacht in een klassieke theorie
4. De complementariteit van de mogelijke beschrijvingen van de werkelijkheid

Allereerst is de geaccepteerde wiskundige structuur van de kwantummechanica gebaseerd op nogal abstracte wiskunde, zoals Hilbertruimtes en operatoren op die Hilbertruimtes. In de klassieke mechanica en het elektromagnetisme worden eigenschappen van een puntmassa of eigenschappen van een veld beschreven door reële getallen of functies gedefinieerd in twee of driedimensionale stelsels. Deze hebben een directe, ruimtelijke betekenis, en bij deze theorieën schijnt een speciale interpretaties van deze getallen of functies minder noodzakelijk te zijn.

Verder speelt het meetproces een schijnbaar essentiële rol in de theorie. Het relateert de abstracte elementen van de theorie, zoals de golf functie, aan operationele definieerbare waarden, zoals waarschijnlijkheden. De meting toont interactie met de toestand van het systeem op een nogal merkwaardige manier, zoals blijkt uit het tweespletenexperiment.

Het mathematische formalisme dat gebruikt wordt om de tijdontwikkeling van een niet-relativistisch systeem te beschrijven, stelt twee verschillende soorten transformaties voor:

- Reversibele transformaties die worden beschreven door unitaire operatoren op de toestand van de ruimte. Deze transformaties worden bepaald door oplossingen van de Schrödingervergelijking.
- Niet-reversibele en onvoorspelbare transformaties die worden beschreven door wiskundig ingewikkeldere transformaties (zie kwantumoperaties). Voorbeelden hiervan zijn operaties die worden ondergaan door een systeem als het resultaat van een meting.

Naast het onvoorspelbare en irreversibele karakter van het meetproces, zijn er andere elementen binnen de kwantummechanica die haar scherp onderscheiden van de klassieke fysica en die niet kunnen worden weergegeven op een klassieke manier. Eén hiervan is het verschijnsel van kwantumverstremgeling, zoals wordt geïllustreerd in de EPR-paradox, die in lijkt te gaan tegen het principe van causaliteit.

Een andere belemmering voor een directe interpretaties is het verschijnsel van complementariteit, dat in lijkt te gaan tegen de basisprincipes van de propositielogica. Complementariteit zegt dat er geen logisch beeld is dat tegelijkertijd alle eigenschappen van een kwantumsysteem S kan beschrijven en dat gebruikt kan worden om hierover te beredeneren. Dit wordt vaak geformuleerd door te zeggen dat er complementaire sets A en B zijn van proposities die S kunnen beschrijven, maar niet tegelijkertijd. Voorbeelden van A en B zijn proposities die te maken hebben met de golfbeschrijving van S en een deeltjesbeschrijving van S .

Complementariteit betekent gewoonlijk niet dat de klassieke logica faalt. In plaats daarvan betekent complementariteit dat de samenstelling van fysische eigenschappen voor S (net zoals positie en impuls beiden waarden hebben binnen een bepaald bereik) niet gehoorzaamt aan de regels van de klassieke propositionele logica. Zoals men nu denkt, ligt de oorsprong in de complementariteit in de niet-commutativiteit van operatoren die observabelen beschrijven in de kwantummechanica.

Instrumentalistische interpretatie

Elke moderne wetenschappelijke theorie vraagt op zijn minst een instrumentalistische beschrijving die het wiskundig formalisme relateert aan de experimentele uitvoering en de voorspelling. In het geval van de kwantummechanica is de meest gangbare instrumentalistische beschrijving een bewering van statistische regulariteit tussen toestandsbereiding processen en meetprocessen. Dat betekent dat als een meting van een grootheid voldoende vaak wordt uitgevoerd terwijl elke keer van dezelfde startcondities wordt uitgegaan, de uitkomst een goed gedefinieerde waarschijnlijkheidsverdeling is binnen de reële getallen. Oftewel, de kwantummechanica voorziet in een berekeningswijze om de statistische eigenschappen van deze verdeling te bepalen, zoals haar verwachtingswaarde.

Berekeningen aan metingen die uitgevoerd zijn op een systeem S geven een Hilbertruimte H over de complexe getallen. Wanneer het systeem S in een zuivere toestand wordt geprepareerd, wordt het geassocieerd met een vector in H . Meetbare grootheden worden geassocieerd met Hermitische matrices die op H inwerken en worden observabelen genoemd.

De herhaalde meting van een observabele A voor S geprepareerd in toestand Ψ zorgt voor een verdeling van de waarden. De verwachtingswaarde van deze verdeling wordt gegeven middels bra-kets door de uitdrukking:

$$\langle \Psi | \hat{A} | \Psi \rangle$$

Deze mathematische methode geeft een eenvoudige, directe wijze om een statische eigenschap van de uitkomst van een experiment te berekenen als eenmaal begrepen wordt hoe de beginttoestand met een vector geassocieerd moet worden en de gemeten grootheid aan een observabele gerelateerd moet worden (dat betekent, een specifieke Hermitische matrix).

Als voorbeeld van zo'n berekening: de waarschijnlijkheid om het systeem in een gegeven toestand $|\varphi\rangle$ aan te treffen wordt gegeven door het berekenen van de verwachtingswaarde van een projectieoperator.

$$\Pi = |\varphi\rangle\langle\varphi|$$

De waarschijnlijkheid P is het niet-negatieve reële getal dat gegeven wordt door:

$$P = \langle \Psi | \Pi | \Psi \rangle = |\langle \Psi | \varphi \rangle|^2$$

De kale instrumentalistische beschrijving kan gezien worden als een interpretatie, alhoewel haar gebruik ietwat misleidend is, omdat instrumentalisme expliciet elke verklarende rol vermijdt. Het probeert geen antwoord te vinden op de vraag waar de kwantummechanica over gaat.

Samenvatting van de gebruikelijke interpretaties van de kwantummechanica

Een interpretatie kan gekarakteriseerd worden door te kijken of het voldoet aan bepaalde eigenschappen, zoals:

- Realisme
- Compleetheid
- Lokaal realisme
- Determinisme

Om deze eigenschappen uit te leggen, moet we explicieter zijn over het soort beeld waarin een interpretatie voorziet. We zullen een interpretatie zien als een correspondentie tussen de elementen van het wiskundig formalisme W en de elementen van de interpreterende structuur I , waarbij:

- Het wiskundig formalisme bestaat uit de Hilbertruimte systeem van bra-ket, zelftoegevoegde operatoren die werken op de ruimte van ket-vectoren, unitaire tijdafhankelijkheid van ket-vectoren en meetoperaties. In deze context kan een meetoperatie gezien worden als een transformaties die een ket-vector in een waarschijnlijkheidsverdeling van ket-vectoren brengt.
- De interpreterende structuur toestanden, overgangen tussen toestanden, meetoperaties en mogelijke informatie over ruimtelijke uitbreiding van deze elementen behelst. Een meetoperatie refereert hier aan een operatie die terugkeert naar een waarde en resulteert in een mogelijke verandering van de toestand van een systeem.

Ruimtelijke informatie bijvoorbeeld zou vertoond zijn door toestanden die gerepresenteerd worden als functies op een configuratieruimte. De overgangen kunnen niet-deterministisch of probabilistisch zijn of er kunnen oneindig veel toestanden zijn. Maar de kritische aanname van een interpretatie is dat de elementen van I als fysisch reëel worden gezien.

In dit opzicht kan een interpretatie gezien worden als een semantiek voor het wiskundig formalisme.

In het bijzonder, de kale instrumentalistische visie van de kwantummechanica die in de vorige paragraaf werd onderstreept, is helemaal geen interpretatie omdat het niets zegt over elementen van fysische realiteit.

De oorsprong van het huidige gebruik in de natuurkunde van compleetheid en realisme wordt vaak gezien in document van Einstein et al uit 1935 waarin de EPR-paradox naar voren werd gebracht. In dit document kwamen de auteurs met de begrippen *element van realiteit* en *compleetheid* van een fysische theorie. Alhoewel ze *element van realiteit* niet definieerden, voorzagen zij in een voldoende karakterisering ervoor, namelijk een grootheid wier waarde met zekerheid voor de meting voorspeld kan worden zonder het op een of ander manier te verstoren. EPR definieerde een complete fysische theorie als een waarin ieder element van de interpreterende structuur wordt verklaard door het wiskundig formalisme. Realisme is een eigenschap van elk van de elementen van het wiskundig formalisme. Elk element is reëel als het correspondeert met iets in de interpreterende structuur. In sommige interpretaties van de kwantummechanica (zoals de veel-werelden-interpretatie) bijvoorbeeld wordt de ket-vector die geassocieerd wordt met de toestand van het systeem, beschouwd als te corresponderen met een element van fysische realiteit, terwijl het in andere niet zo is.

Determinisme is een eigenschap die toestandsveranderingen karakteriseert die het gevolg zijn van het verloop van de tijd, namelijk dat de toestand op een moment in de toekomst een functie is van de toestand in het heden. Het hoeft niet altijd duidelijk te zijn of een bepaalde interpreterende structuur deterministisch is of niet, omdat er geen duidelijke keuze hoeft te zijn van een tijdparameter. Daarom kan een theorie twee interpretaties hebben, waarvan er een deterministisch is en de andere niet.

Lokaal realisme bestaat uit twee delen:

- De waarde die uit de meting komt correspondeert met de waarden van een of andere functie van de toestandsruimte. Op een andere manier gezegd is deze waarden een element binnen de realiteit.
- Het effect van een meting heeft een snelheid die niet beperkt is door universele grenzen (zoals de snelheid van het licht). Om dit zinvol te maken, moeten meetoperaties ruimtelijk gelocaliseerd zijn in de interpreterende structuur.

Een exacte formulering van lokaal realisme in termen van een lokale verborgen variabele theorie werd gegeven door John Bell. De stelling van Bell en haar experimentele bewijs beperkt het soort eigenschappen die een kwantumtheorie kan hebben. Het theorema van Bell zegt namelijk dat de kwantummechanica niet voldoet aan lokaal realisme.

Statistische interpretatie

De statistische interpretatie is een interpretatie die gezien kan worden als een minimalistische interpretatie. Dat wil zeggen dat het een kwantummechanische interpretatie is waarbij zo weinig mogelijk aannames worden gemaakt en gebruik wordt gemaakt van de standaard wiskundige formalisering. Het maakt grotendeels gebruik van de statistisch interpretatie van Born. De interpretatie zegt dat de golf functie niet toepasbaar is op een individueel systeem, of bijvoorbeeld een enkel deeltje, maar dat het een abstracte wiskundige, statistische grootheid is die alleen toepasbaar is op het geheel van gelijk geprepareerde deeltjes. De waarschijnlijk meest opzienbarende aanhanger van zo'n interpretatie was Albert Einstein:

"De poging om te komen tot een kwantum-theoretische beschrijving als de complete beschrijving van de individuele systemen leidt tot onnatuurlijke theoretische interpretaties die onmiddellijk onnodig worden als men de interpretatie accepteert dat de beschrijving refereert aan het geheel van systemen en niet aan individuele systemen."

Consistente geschiedenissen

De theorie van consistente geschiedenissen generaliseert de conventionele Kopenhaagse interpretatie en probeert een natuurlijke interpretatie te leveren van kwantumkosmologie. De theorie is gebaseerd op een consistentie criterium die toestaat om de geschiedenis van een systeem zodanig te beschrijven dat de waarschijnlijkheden voor alle geschiedenissen gehoorzaamt aan de optelregels voor klassieke waarschijnlijkheid terwijl ze consistent blijven met de Schrödingervergelijking. Volgens deze interpretatie is het doel van de kwantummechanica om waarschijnlijkheden te voorspellen van verschillende alternatieve geschiedenissen.

Veel-werelden-interpretatie

De veel-werelden-interpretatie is een interpretatie van de kwantummechanica die het niet-deterministische en irreversibele ineenstorten van de golffunctie, die met meting wordt geassocieerd bij de Kopenhaagse interpretatie, verwerpt ten faveure van een beschrijving in termen van kwantumverstrengeling en reversibele tijdevolutie van toestanden. Het fenomeen dat met meting wordt geassocieerd wordt uitgelegd met behulp van decoherentie, dat plaatsvindt wanneer toestanden interactie vertonen met de omgeving. Ten gevolge van decoherentie splitsen de wereldlijnen van macroscopische objecten zich herhaaldelijk in wederzijds niet-observeerbare, vertakkende geschiedenissen: verschillende universa binnen een groter multiversum.

De Kopenhaagse interpretatie

De Kopenhaagse interpretatie is een interpretatie van de kwantummechanica die geformuleerd is door Niels Bohr en Werner Heisenberg terwijl zij rond 1927 samenwerkten. Bohr en Heisenberg breidden de waarschijnlijkheidsinterpretatie van de golffunctie, zoals geformuleerd door Max Born, uit. De Kopenhaagse interpretatie ziet vragen als "Waar was het deeltje voordat ik zijn positie mat" als betekenisloos. De meting zelf veroorzaakt het instantaan ineenstorten van de golffunctie. Dit betekent dat het meetproces random een van de vele toegestane mogelijkheden van de golffunctie van die toestand uitkiest en de golffunctie instantaan verandert om die positie te reflecteren.

De interpretatie van Bohm

De interpretatie van Bohm van de kwantummechanica is een interpretatie die gepostuleerd is door David Bohm waarin het bestaan van een niet-lokale universele golffunctie toestaat dat ver van elkaar verwijderde deeltjes instantaan met elkaar interactie vertonen. De interpretatie generaliseert de golftheorie van Louis de Broglie uit 1927, waarin gesteld wordt dat zowel golf als deeltje reëel zijn. De golffunctie geleidt de beweging van het deeltje en evolueert volgens de Schrödingervergelijking. De interpretatie gaat uit van een enkel, niet-opsplitsbaar universum (anders dan de veel-werelden-interpretatie) en is deterministisch (anders dan de Kopenhaagse interpretatie). Het zegt dat de toestand van het universum rimpelloos door de tijd evolueert zonder het ineenstorten van de golffunctie als er een meting plaatsvindt, zoals in de Kopenhaagse interpretatie. Maar het zegt dit door het bestaan aan te nemen van een aantal verborgen variabelen, namelijk de posities van alle deeltjes in het heelal, welke, net zoals de waarschijnlijkheidsamplitudes in andere interpretaties, nooit direct gemeten kunnen worden.

Transactionele interpretatie

De transactionele interpretatie van de kwantummechanica van John Cramer is een ongebruikelijke interpretatie die kwantuminteracties beschrijft in termen van staande golven die gevormd worden door geretardeerde (vooruit in de tijd) en geavanceerde (terug in de tijd) golven. Cramer beweert dat het de filosofische problemen van de Kopenhaagse interpretatie en de rol van de waarnemer vermijdt en verschillende kwantumparadoxen oplost.

Bewustzijn veroorzaakt de ineenstorting

De theorie waarbij beweerd wordt dat het bewustzijn de ineenstorting veroorzaakt is een speculatieve theorie waarbij waarnemen door een waarnemer met bewustzijn verantwoordelijk is voor de ineenstorting van de golf functie. Het is een poging om de Vriend van Wigner paradox op te lossen door eenvoudigweg te zeggen dat de ineenstorting veroorzaakt wordt door de eerste waarnemer met bewustzijn. Aanhangers claimen dat dit geen herleving is van stofdualisme, omdat het bewustzijn en objecten verstrengeld zijn en niet als afzonderlijk beschouwd kunnen worden. De theorie kan beschouwd worden als een speculatief aanhangsel van bijna elke kwantumfysische theorie en de meeste fysici verwerpen het als niet-toetsbaar en het introduceren van onnodige zaken in de fysica.

Relationele kwantummechanica

Het essentiële idee achter relationele kwantummechanica is dat, uitgaande van de speciale relativiteitstheorie, verschillende waarnemers een andere verklaring kunnen geven voor de zelfde serie van gebeurtenissen. Bijvoorbeeld: voor een waarnemer kan een systeem zich op een bepaald tijdstip in een enkele ineengestorte eigentoestand bevinden, terwijl voor een andere waarnemer op het zelfde tijdstip het in superpositie kan zijn van twee of meer toestanden. Als gevolg hiervan beargumenteert de relationele kwantummechanica dat, als de kwantummechanica een complete theorie is, het begrip toestand niet het systeem zelf beschrijft, maar de relatie, of een correlatie, tussen het systeem en de waarnemer. De toestandsvector van de conventionele kwantummechanica wordt een beschrijving van de correlatie van enkele vrijheidsgraden van de waarnemer, aangaande het geobserveerde systeem. Maar volgens de relationele kwantummechanica is dit toepasbaar op alle fysische objecten, of ze nu een bewustzijn hebben of macroscopisch zijn of niet. Elke meting wordt gezien als een gewone fysische interactie, een vestiging van een soort correlatie zoals hierboven besproken. Dus de fysische inhoud van de theorie heeft niet alleen van doen met objecten zelf, maar ook met de relaties ertussen.

Modale interpretaties van de kwantumtheorie

- Kopenhaagse variant
- Kochen-Dieks-Healey interpretaties

Vergelijking

Op dit moment is er geen experimenteel bewijs dat ons helpt een keuze te maken tussen de verschillende interpretaties. In die zin houdt de fysische theorie stand en is het consistent met zichzelf en met de realiteit en komen problemen alleen wanneer men probeert deze te interpreteren. Desalniettemin wordt er actief onderzoek gedaan in een poging om te komen tot experimentele testen waarmee de verschillen tussen de interpretaties experimenteel getest kunnen worden.

Enkele van de meest gebruikelijke interpretaties zijn hier samengevat, maar de toekenning van de waarden is niet zonder controversie, omdat de exacte betekenis van enkele begrippen onduidelijk is en, in feite, een onderwerp is van de theorie zelf.

Interpretatie	Deterministisch?	Golffunctie reëel?	Unieke geschiedenis?	Verborgene variabelen?	Ineenstorten van de golffunctie?
Kopenhaagse interpretatie (Geen reële golffunctie)	Nee	Nee	Ja	Nee	Ja
Statistische interpretatie	Nee	Nee	Ja	Agnostisch	Nee
Kopenhaagse interpretatie (Reële golffunctie)	Nee	Ja	Ja	Nee	Ja
Consistente geschiedenissen	Agnostisch ¹	Agnostisch ¹	Nee	Nee	Nee
Veel-werelden-interpretatie	Ja	Ja	Nee	Nee	Nee
Interpretatie van Bohm	Ja	Ja ²	Ja ³	Ja	Nee
Transactionele interpretatie	Nee	Ja	Ja	Nee	Ja
Bewustzijn veroorzaakt de ineenstorting	Nee	Ja	Ja	Nee	Ja
Relationele kwantummechanica	Nee	Ja	Agnostisch ⁴	Nee	Ja ⁵

¹Als de golffunctie reëel is dan wordt dit de veel-werelden-interpretatie. Als de golffunctie minder dan reëel is, maar meer dan alleen maar informatie, dan wordt het de existentiële interpretatie genoemd.

²Zowel deeltje als geleidende golffunctie zijn reëel.

³Unieke geschiedenis voor een deeltje, maar meerdere geschiedenissen voor golven.

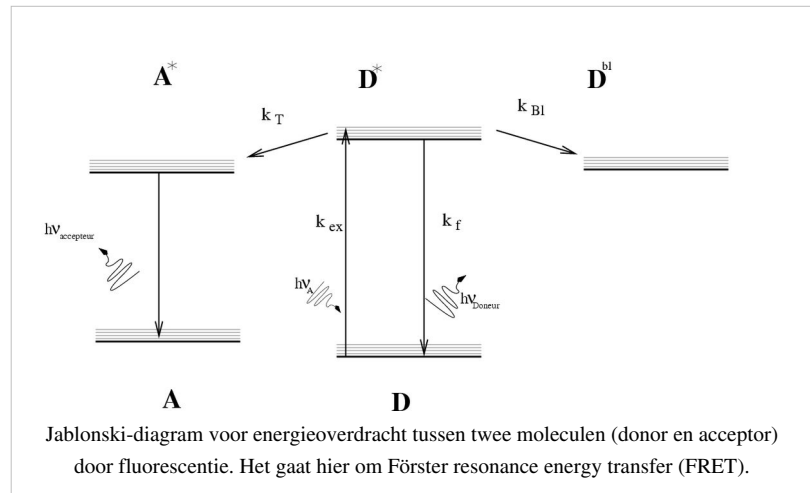
⁴Geschiedenissen vergelijken tussen systemen heeft in deze interpretatie geen goed gedefinieerde betekenis.

⁵Iedere fysische interactie wordt behandeld als een ineenstorting in relatie tot het betreffende systeem, niet alleen macroscopisch of waarnemers met een bewustzijn.

Elke interpretatie heeft vele varianten. Het is moeilijk een precieze definitie te geven van de Kopenhaagse interpretatie. In de bovenstaande tabel worden twee varianten getoond. Eén waarbij de golffunctie wordt beschouwd als iets dat alleen wiskundige eigenschappen heeft, en één waarbij de golffunctie gezien wordt als een element van de realiteit.

Jablonski-diagram

Het **Jablonski-diagram** is een diagram dat de energieniveaus van de elektronen van een atoom of molecule verticaal weergeeft. Het wordt toegepast om bijvoorbeeld de werking van een laser te verklaren of fluorescentie en fosforescentie. Het diagram is vernoemd naar de Poolse natuurkundige Aleksander Jabłoński.



Betekenis

Dit diagram geeft de overgang aan van elektronen tussen lagere en hogere energieniveaus. De overgang van een elektron naar een hoger niveau (*aangeslagen toestand*, aangegeven met een *) geschiedt door excitatie. De overgang naar een lager niveau kan met verschillende processen, zoals emissie of interne conversie. Lange rechte pijlen geven excitatie of emissie door fotonen aan. De ribbelige pijlen geven veranderingen weer die niet te maken hebben met fotonen, zoals fononen of omzetting naar warmte.

Josephson-junctie

Een **Josephson-junctie** bestaat uit twee supergeleiders met een dunne isolator ertussen. In de junctie treedt nu het **Josephson-effect** op, dat werd ontdekt door Brian David Josephson en waarvoor hij in 1973 de Nobelprijs voor de Natuurkunde ontving. Als de isolator dun genoeg is, kan er namelijk toch een elektrische stroom door lopen door het tunneleffect van de kwantummechanica. Een van de bijzondere eigenschappen van de Josephson-junctie is dat deze stroom (hoewel deze door een isolator loopt) geen weerstand ondervindt.

Als er een gelijkspanning U wordt aangelegd, zal er geen gelijkstroom meer lopen, maar een zeer hoogfrequente wisselstroom. Als dan op de gelijkspanning een kleine wisselspanning wordt gesuperponeerd, dan zal voor een welbepaalde frequentie $f = 2eU/h$ resonantie optreden. Hierin is e de elementaire lading en h de constante van Planck.

Toepassingen

Lange tijd zag men in Josephson-juncties een veelbelovende technologie om er snelle computers mee te maken. Tot dusver is die technologie niet doorgebroken, vooral door de technische moeilijkheden rond de koeling die nodig is voor supergeleiding.

Josephson-juncties vinden toepassing in SQUIDs om heel nauwkeurig een magnetisch veld te meten.

Lange juncties

Als de junctie lang genoeg is dat er langs de junctie verschillen in de fase van de kwantummechanische golf functie kunnen bestaan, spreken we van een lange Josephson-junctie. Deze heeft nog extra bijzondere eigenschappen en wordt wiskundig beschreven met de sine-Gordon vergelijking.

Karakterisering van de Bose-Einsteincondensatie

Bose-Einsteincondensatie heeft een aantal opmerkelijke eigenschappen.

In dit artikel worden de volgende stellingen besproken:

- BEC is geen gevolg van de interacties tussen de deeltjes maar wel van de gebruikte statistiek.
- BEC kan gezien worden als een verzadigingsverschijnsel.
- In een uniforme uitwendige potentiaal komt er in de thermodynamische limiet geen BEC voor in 1 en 2 dimensies.
- Bij het absolute nulpunt bevinden alle deeltjes zich in het condensaat.

Een niet-interagerend Bosegas

Toen Einstein in 1925 zijn publicatie publiceerde waarin hij het condensatiefenomeen in een Bosegas besprak, had hij het over een gas van niet-interagerende deeltjes. Hiermee wordt meteen ook een eerste eigenschap van deze kwantumfaseovergang aangehaald:

- **BEC is geen gevolg van de interacties tussen de deeltjes maar wel van de gebruikte statistiek.**

Bekijken we een zo eenvoudig mogelijk systeem van niet-interagerende spinloze (dat wil zeggen, spin=0) bosonen waar geen (of constante) uitwendige potentiaal aanwezig is, dan wordt de toestandsdichtheid (Engels: *Density of states*) in D (ruimtelijke) dimensies gegeven door:

$$f(\epsilon)d\epsilon = \frac{\pi^{D/2} \cdot L^D}{h^D \cdot \Gamma(D/2)} \cdot (2m)^{D/2} \cdot (\sqrt{\epsilon})^{D-2} d\epsilon$$

hierbij is D het aantal dimensies, h de Constante van Planck, L de lengte van de zijde van een D-dimensionaal volumekubusje, m de massa van 1 deeltje en Γ de gammafunctie.

Wanneer het systeem zich op de kritische temperatuur T_c bevindt, is er nog geen condensaat gevormd en kan aangenomen worden dat er zich geen deeltjes in de grondtoestand bevinden, alle deeltjes bevinden zich dus in een geëxciteerde energietoestand. Omdat de deeltjes bosonen zijn, zijn ze volgens de Bose-Einsteinstatistiek over de energieniveaus verdeeld, zodat er zich gemiddeld

$$n_i = \frac{1}{e^{\frac{\epsilon_i - \mu}{k_B T}} - 1}$$

deeltjes in het i de energieniveau (met energie ϵ_i) bevinden. Hierbij is k_B de Boltzmannconstante en μ de chemische potentiaal.

Het totaal aantal deeltjes dat zich in geëxciteerde energietoestanden kan bevinden wordt gegeven door:

$$N = \int_0^\infty n_i \cdot f(\epsilon) d\epsilon$$

wat uiteindelijk

$$N = \left(\frac{L^2 \cdot 2\pi \cdot m \cdot k_B \cdot T_c}{h^2} \right)^{D/2} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^{D/2}}$$

wordt. Deze laatste formule vertelt nu hoeveel deeltjes N er in een blokje met volume $V = L^D$ (in 2 dimensies is dit een vierkant met zijde L, in 3 dimensies is dit een kubus met zijde L, in 4 dimensies is dit een hyperkubus met zijde L, ...) aanwezig kunnen zijn en zich hierbij in een geëxciteerde energietoestand kunnen bevinden. De term die hiervoor van belang is, is de som $\sum k^{-D/2}$; is een hyperharmonische reeks. Deze som divergeert naar oneindig als $D \leq 2$ en convergeert naar een eindige waarde voor $D > 2$.

Wat betekent dit? Als in een 3 dimensionale ruimte wordt gewerkt (het universum zoals we het kennen) dan bestaat er een maximum aantal deeltjes dat je in je doos kan stoppen, waarbij deze deeltjes zich in geëxciteerde

energietoestanden kunnen bevinden (Iets wat ze steeds zullen proberen doen om de entropie te maximaliseren). Wil je dan nog meer deeltjes in je doos stoppen dan zullen deze deeltjes noodgedwongen in de energiegrotoestand terecht komen. Er treedt dus een soort verzadiging op, te vergelijken met de verzadiging van een damp. Zolang de damp niet verzadigd is kun je deeltjes aan de damp blijven toevoegen, wanneer de damp verzadigd is zal er condensatie van de damp optreden als je nog meer dampdeeltjes probeert toe te voegen. Dit geeft ineens ook de verklaring van de naam Bose-Einstein**condensatie**.

Indien we in een vlakke wereld zouden leven zou in het bovenstaande systeem geen condensatie optreden. In twee dimensies is de som immers divergent, wat betekent dat je oneindig veel deeltjes in je doos zou kunnen stoppen en dat deze allemaal in geëxciteerde energietoestanden een plaatsje zouden kunnen vinden.

Opmerking

Experimenteel wordt er met eindige systemen gewerkt en worden de deeltjes in een harmonische potentiaal gevangen gehouden. Voor zo een situatie kan bewezen (en berekend) worden dat er eveneens in één en twee dimensies condensatie optreedt. Dit is van belang voor experimenten waarbij de valpotentiaal zodanig vervormd wordt dat het systeem zich als één of twee dimensionaal zal gedragen. Dat zijn op zich interessante situaties om dynamische eigenschappen te onderzoeken.

Thermodynamische eigenschappen in drie dimensies (harmonische val)

- De kritische temperatuur is gelijk aan:

$$k_B T_c = 0.94 \hbar \omega \sqrt[3]{N}$$

Beneden de kritische temperatuur T_c geldt:

- fractie deeltjes in de grondtoestand:

$$\frac{N_0}{N} = 1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^3$$

- totale energie van het systeem:

$$E = 3Nk_B \left(\frac{T}{T_c}\right)^4 \frac{\zeta(4)}{\zeta(3)}$$

- warmtecapaciteit:

$$C_v = 12Nk_B \left(\frac{T}{T_c}\right)^3 \frac{\zeta(4)}{\zeta(3)}$$

- druk in de thermische wolk (=niet gecondenseerde deeltjes):

$$P = k_B T \frac{N}{V} \left(\frac{T}{T_c}\right)^3 \frac{\zeta(4)}{\zeta(3)}$$

telkens met $T < T_c$, k_B de Boltzmannconstante, \hbar de gestreepte Planckconstante, ω de geometrisch gemiddelde oscillatorfrequentie van de valpotentiaal, N_0 het aantal deeltjes dat zich in de grondtoestand bevindt en ζ de Riemann zetafunctie.

Conclusie

- BEC kan gezien worden als een verzadigingsverschijnsel.
- In een uniforme uitwendige potentiaal komt er in de thermodynamische limiet geen BEC voor in 1 en 2 dimensies.
- Bij het absolute nulpunt bevinden alle deeltjes zich in het condensaat.

Een interagerend Bosegas

Hoewel BEC geen rechtstreeks gevolg is van de interacties tussen de deeltjes, hebben deze interacties wel een invloed op het fenomeen.

Om dit probleem aan te pakken wordt er beroep gedaan op een gemiddeldveldtheorie (Engels: *mean field theory*). Men gebruikt hiervoor meestal de **Gross-Pitaevskii-vergelijkingen** of de **Bogoliubovbenadering**.

Het opmerkelijkste verschil tussen een interagerend BEC en een niet-interagerend BEC is dat bij een interagerend BEC zelfs bij het absolute nulpunt er deeltjes in de geëxciteerde toestanden blijven voorkomen. Deze fractie is weliswaar zeer klein (orde enkele procent maximaal).

Enkele thermodynamische grootheden (Bogoliubov-benadering)

- grondtoestandsenergie van het systeem:

$$E_0 = N\epsilon_0 + N\frac{ng}{2}\left(1 + \frac{128}{15}\sqrt{\frac{na_s^3}{\pi}}\right)$$

- chemische potentiaal:

$$\mu = \epsilon_0 + ng\left(1 + \frac{32}{3}\sqrt{\frac{na_s^3}{\pi}}\right)$$

- druk:

$$P = \frac{n^2g}{2}\left(1 + \frac{64}{5}\sqrt{\frac{na_s^3}{\pi}}\right)$$

- geluidssnelheid:

$$c = \sqrt{\frac{ng}{m}\left(1 + 16\sqrt{\frac{na_s^3}{\pi}}\right)}$$

- Aantal deeltjes dat zich niet in de grondtoestand bevindt bij het absolute nulpunt:

$$N_{dpl} = \sum_{p \neq 0} \left(\frac{\epsilon_p - \epsilon_0 + ng}{2\sqrt{(\epsilon_p - \epsilon_0)^2 + 2ng(\epsilon_p - \epsilon_0)}} - \frac{1}{2} \right)$$

met hierbij N het totaal aantal deeltjes, n de dichtheid, g de interactiesterkte, ϵ_0 de grondtoestandsenergie van een deeltje, ϵ_p de energie van een deeltje met impuls p , m de massa van een deeltje en a_s de verstrooiingslengte.

Klassieke kwantummechanica

Klassieke kwantummechanica is een natuurkundige theorie gemaakt door de Amerikaanse wetenschapper Randell Mills. De theorie gaat ervan uit dat klassieke natuurwetten (waaronder de wetten van Maxwell, de wetten van Newton en de speciale relativiteitstheorie) geldig zijn op alle niveaus. Klassieke kwantummechanica is in tegenspraak met de huidige kwantummechanica, en is derhalve zeer controversieel.

Een opmerkelijke voorspelling van de theorie is het bestaan van hydrino's. Hydrino's zijn waterstofatomen in een fractionele kwantumtoestand. Het bewijs van het bestaan van hydrino's is echter niet breed geaccepteerd in de wetenschappelijke wereld.

Externe links

- Boek over klassieke kwantummechanica door Randell Mills ^[1] (op de website van zijn bedrijf)

Referenties

[1] <http://www.blacklightpower.com/theory/book.shtml>

Klein-Gordonvergelijking

Aan het begin van de negentiende eeuw werd duidelijk dat de klassieke mechanica niet toereikend was om het gedrag van het heel kleine te verklaren. Om bijvoorbeeld het gedrag van een elektron of het waterstofatoom te verklaren waren nieuwe vergelijkingen nodig. Vele natuurkundigen, onder wie Erwin Schrödinger, hielden zich hiermee bezig. Voordat hij de vergelijking vond die nu de Schrödingervergelijking wordt genoemd, leidde hij de **Klein-Gordonvergelijking** af:

$$\left(\square + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2}\right)\psi = 0$$

waarin $\square = c^{-2}\partial^2/\partial^2t - \Delta$ de d'Alembertiaan en $\hbar = h/2\pi$ de constante van Planck. Verder:

- m: de massa,
- c: de lichtsnelheid,
- ψ : de 'golffunctie'.

Er deed zich echter een aantal problemen voor met deze vergelijking. Ten eerste is de golffunctie ψ niet positief-definiet ($|\psi|^2 > 0$), wat een interpretatie als kansdichtheid, zoals bij de Schrödingervergelijking, onmogelijk maakt. Verder blijken sommige oplossingen van de vergelijking een negatieve energie te hebben, wat tot instabiliteiten leidt.

Merk op dat voor massaloze deeltjes ($m=0$) de vergelijking overgaat in de golfvergelijking, waarmee bijvoorbeeld licht beschreven wordt.

Schrödinger was op zoek naar een vergelijking om het gedrag van het elektron mee te beschrijven. Maar de Klein-Gordonvergelijking neemt de spin van een deeltje niet in beschouwing en kan dus een aantal belangrijke eigenschappen van het elektron niet verklaren. Voor lage energie leidde Schrödinger uit de Klein-Gordonvergelijking de vergelijking af die nu zijn naam draagt.

Hoewel Schrödinger dus de eerste was die de vergelijking vond, heeft hij haar nooit gepubliceerd en waren het Oscar Klein en Walter Gordon die de vergelijking naar zich vernoemd kregen. Ze kregen deze erkenning echter pas een kwart eeuw nadat Klein de vergelijking in 1926 publiceerde.

Afleiding

Sinds het werk van De Broglie was bekend dat materie golfeigenschappen bezit. De relatie tussen de impuls en de golflengte (λ) of het golfgetal ($k = 2\pi/\lambda$) is als volgt:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k.$$

De relatie tussen de energie en de frequentie werd al eerder gevonden door Max Planck:

$$E = h\nu = \hbar\omega.$$

Voor een vlakke golf

$$\psi = e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)}$$

worden dus de impuls en energie gevonden met behulp van de volgende operatoren:

$$\hat{p} = \frac{\hbar}{i}\nabla \text{ en } \hat{E} = -\frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial t}.$$

Dit zijn dezelfde operatoren die ook gebruikt kunnen worden om de Schrödingervergelijking af te leiden. Echter, in plaats van deze operatoren te substitueren in de klassieke Hamiltoniaan

$$H = \frac{p^2}{2m} + V$$

gebruiken we nu de relativistische relatie tussen energie en impuls

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

welke waarschijnlijk beter bekend is voor een stilstaand object, waarbij $p = 0$ en $E = mc^2$.

Wanneer we hierin de gevonden operatoren substitueren en vermenigvuldigen met ψ krijgen we

$$\hbar^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = m^2 c^4 \psi - \hbar^2 c^2 \nabla^2 \psi$$

wat met de definitie van de d'Alembertiaan de Klein-Gordonvergelijking oplevert.

Oplossingen

Relativistisch vrij deeltje

Zoals gebruikt in de afleiding is een mogelijke oplossing van de Klein-Gordonvergelijking een vlakke golf

$$\psi = e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)}$$

waarbij na substitutie in de Klein-Gordonvergelijking volgt:

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2}\right) e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)} = 0$$

$$\left(-\frac{\omega^2}{c^2} + k^2 + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2}\right) e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)} = 0$$

$$\hbar^2 \omega^2 = m^2 c^4 + \hbar^2 k^2 c^2$$

wat met $E = \hbar\omega$ en $p = \hbar k$ de bekende relativistische relatie tussen energie en impuls oplevert:

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

Dit resultaat laat zien dat een vlakke golf een oplossing is van de Klein-Gordonvergelijking en dat de relatie tussen energie en impuls die van een relativistisch deeltje is.

Zoals eerder opgemerkt zijn zowel oplossingen met positieve als negatieve energie mogelijk, wat komt door het kwadraat in bovenstaande uitdrukking voor de energie

$$E = \pm \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$$

Yukawa-potentiaal

Voor stationaire oplossingen verdwijnt de tijdsafgeleide in de d'Alembertiaan zodat

$$\left(-\Delta + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2}\right)\psi = 0$$

Wanneer ψ slechts afhangt van een radiale coördinaat r wordt de Laplaciaan

$$\Delta\psi = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 r\psi}{\partial r^2}$$

zodat de Klein-Gordonvergelijking wordt:

$$\frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \psi - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 r\psi}{\partial r^2} = 0$$

met als oplossing

$$r\psi = C e^{\pm \frac{m c}{\hbar} r} \rightarrow \psi = C \frac{e^{-r/r'}}{r} \text{ met } r' = \frac{\hbar}{m c}$$

Hideki Yukawa gebruikte in 1934 deze uitdrukking in een poging de kracht tussen deeltjes in een atoomkern te verklaren. Deze Yukawa-potentiaal komt (voor relatief grote afstand) goed overeen met de experimenteel gevonden interactie.

Tachyonen

Tachyonen komen onder andere in sommige versies van snaartheorie voor als deeltjes die sneller bewegen dan het licht. Tachyonen met een reële energie moeten volgens de relativistische relatie

$$E = \gamma m c^2$$

een imaginaire massa hebben, aangezien $\gamma = (1 - (v/c)^2)^{-1/2}$ voor $v > c$ imaginair is.

Voor een homogeen tachyonveld $\psi(t)$ verdwijnt de Laplaciaan in de Klein-Gordonvergelijking:

$$\frac{d^2 \psi(t)}{dt^2} + \frac{m^2 c^4}{\hbar^2} \psi(t)$$

Voor $m^2 > 0$ zijn de oplossingen harmonisch oscillerende functies. Echter voor een tachyon met imaginaire massa is $m^2 < 0$ zodat de oplossingen exponentiële functies worden.

$$\psi(t) = A \exp\left(\frac{|m|c^2 t}{\hbar}\right) + B \exp\left(-\frac{|m|c^2 t}{\hbar}\right)$$

Dit betekent dat het tachyonveld in de tijd onbegrensd toeneemt. Dit is niet wat wordt waargenomen en dit vormt dan ook een van de grote problemen van de snaartheorie.

Knoopvlak

In de kwantummechanica is een **knoopvlak** in een orbitaal een vlak waar de waarschijnlijkheid om een elektron aan te treffen 0 (nul) is. Aan weerszijden van een knoopvlak is het teken van de waarschijnlijkheidsfunctie waarmee de orbitaal beschreven wordt tegengesteld. Algemeen geldt dat naarmate het aantal knoopvlakken van een orbitaal stijgt, ook de energie van een elektron in de betreffende orbitaal groter is.

Knoopvlakken en elektronenschillen

De kleinste elektronenschil, de K-schil heeft geen knoopvlakken. Dit betekent dat een elektron in deze schil geen "verboden" gebieden heeft. De orbitalen in de tweede schil hebben elk één knoopvlak. Voor de 2s-orbitaal is dit een bol rond de atoomkern, voor de 2p-orbitalen is dat een vlak door de atoomkern. Voor de derde schil is er opnieuw een extra knoopvlak: de 3s-orbitaal heeft een extra knoop-"bol", de 3p-orbitalen hebben een extra knoopvlak in hun lobben. Voor de 3d-orbitalen geldt dat de knoopvlakken elkaar snijden, en er een moeilijk te tekenen en beschrijven geheel ontstaat.

De relatieve eenvoud in de s- en p-orbitalen blijft zich ook in de hogere schillen herhalen, de complexiteit in de d- en f-orbitalen neemt in de hogere schillen slechts toe.

Knoopvlakken en binding

De knoopvlakken in de atoom-orbitalen spelen een belangrijke rol in de binding die de atomen kunnen aangaan. In de beschrijving van Moleculaire orbitalen moeten de waarschijnlijkheidsfuncties van de verschillende atomen eerst bij elkaar geteld worden. Het wisselen van teken rond een knoopvlak bij slechts één van de atomen leidt tot een lage waarschijnlijkheid om een elektron daar aan te treffen. Een lage waarschijnlijkheid betekent ook slechts weinig bindend vermogen → een zwakke binding.

Kopenhaagse interpretatie

De **Kopenhaagse interpretatie** is een interpretatie van de kwantummechanica die rond 1927 geformuleerd werd door Niels Bohr en Werner Heisenberg toen zij samenwerkten in Kopenhagen. Bohr en Heisenberg breidden de waarschijnlijkheidsinterpretatie van de golf functie, zoals die door Max Born was opgesteld, uit. Met hun interpretaties trachtten zij een antwoord te geven op een aantal knellende vragen die waren ontstaan als het resultaat van de golf-deeltje-dualiteit in de kwantummechanica, zoals het meetprobleem in de kwantummechanica.

De betekenis van de golf functie

De Kopenhaagse interpretatie neemt aan dat er twee verschillende processen zijn die de golf functie beïnvloeden:

- De unitaire ontwikkeling volgens de Schrödingervergelijking
- Het proces van de meting

Alhoewel er geen dubbelzinnigheid bestaat over het eerste, staat het tweede verschillende interpretaties toe, zelfs binnen de Kopenhaagse interpretatie. Men kan de golf functie óf zien als een reëel object die een ineenstorting ondergaat, óf men kan de golf functie voorstellen als een wiskundig hulpmiddel zonder reële fysische eigenschappen, waarvan de enige fysische toepasbaarheid het berekenen van de waarschijnlijkheden is. Niels Bohr benadrukte dat het alleen het resultaat van de meting is dat voorspeld zou moeten worden en andere vragen daarom niet wetenschappelijk, maar eerder filosofisch van aard zijn. Bohr volgde daarmee het principe van het positivisme uit de filosofie dat stelde dat alleen meetbare vragen door wetenschappers zouden moeten worden bestudeerd.

In het tweespletenexperiment van Thomas Young, worden op een scherm, als licht door twee spleten op een scherm valt, afwisselend heldere en donkere banden geproduceerd. Deze kunnen verklaard worden als gebieden waar het licht dan wel constructief, dan wel destructief, interfereert. Maar er werd experimenteel aangetoond dat licht enkele deeltjesachtige eigenschappen bezit en dat deeltjes, zoals elektronen, golfeigenschappen bezitten en zodoende ook interferentiepatronen kunnen produceren.

Dit bracht een aantal interessante vragen naar voren. Stel dat men het tweespletenexperiment zou uitvoeren en de intensiteit van de bron zodanig zou reduceren dat er maar één foton (of elektron) tegelijkertijd door de spleten gaat. Bij uitvoering van het experiment zal men zien dat er per keer maar één elektron of foton het scherm zal raken. Maar als men dit zeer veel malen zou herhalen, dan zou men wederom een interferentiepatroon te zien krijgen als bij interfererende golven, alhoewel het experiment is uitgevoerd met één deeltje per keer. Deze eigenschap betekent dat we leven in een waarschijnlijkheidswereld, een met vaste waarschijnlijkheden voor de "volgende" klassieke toestand op een gegeven moment, in plaats van dat we leven in een wereld waarin er een oneindig bereik is aan wat er als "volgende" toestand gerealiseerd zal worden.

Gevolgen

De vragen die dit experiment oproepen zijn:

1. De regels van de kwantummechanica vertellen je statistisch waar de deeltjes het scherm zullen raken en zullen heldere banden identificeren als plaatsen waar waarschijnlijk veel deeltjes terecht zullen komen en donkere banden met plaatsen waar waarschijnlijk weinig deeltjes terecht zullen komen. Maar, voor een *enkel* deeltje kunnen de regels van de kwantummechanica niet voorspellen waar dat deeltje waargenomen zal worden. Wat zijn de regels die bepalen waar een individueel deeltje zal worden geobserveerd?
2. Wat gebeurt er met het deeltje tussen het tijdstip waarop hij wordt uitgezonden en het tijdstip waarop het wordt waargenomen? Het deeltje lijkt met beide spleten interactie te vertonen en dit lijkt inconsistent met het gedrag van een puntdeeltje, maar wanneer het wordt geobserveerd, ziet men een puntdeeltje.
3. Wat zorgt er voor dat het deeltje schakelt tussen statistisch en niet-statistisch gedrag? Als het deeltje door de spleten beweegt, lijkt zijn gedrag beschreven te worden door een niet-gelocaliseerde golf functie die door beide

spleten tegelijkertijd reist. Maar wanneer het deeltje wordt geobserveerd is het nooit een niet-gelocaliseerd golfpakket, maar blijkt het altijd een enkel puntdeeltje te zijn.

De Kopenhaagse interpretatie beantwoordt deze vragen als volgt:

1. De waarschijnlijkheidstoestanden die door de kwantummechanica ontstaan, zijn onherleidbaar in de zin dat zij niet exclusief staan voor onze gelimiteerde kennis van een of meerdere verborgen variabelen. In de klassieke natuurkunde werden waarschijnlijkheden gebruikt voor het voorspellen van het aantal ogen dat gegooid wordt met een dobbelsteen, alhoewel men dacht dat het proces deterministisch bepaald is. Waarschijnlijkheden werden gebruikt als vervanging voor de volledige kennis. De Kopenhaagse interpretatie zegt daarentegen dat binnen de kwantummechanica de uitkomst van de meting volledig onbepaald is.
2. Natuurkunde is de wetenschap die de uitkomst van metingen bestudeert. Verdere speculaties kunnen niet worden geverifieerd: de Kopenhaagse interpretatie ziet vragen als "Waar was het deeltje voordat ik de positie ging meten?" als zonder betekenis.
3. De meting zelf veroorzaakt het direct instorten van de golffunctie. Dit houdt in dat het meetproces random (willekeurig) een van de vele toegestane mogelijkheden voor de golffunctie van die toestand uitkiest en de golffunctie instantaan verandert zodat hij staat voor die keuze.

De originele formulering van de Kopenhaagse interpretatie heeft tot verschillende varianten geleid: één hiervan is gebaseerd op de consistente geschiedenissen en het concept van kwantumdecoherentie dat ons toestaat om de wazige grens tussen microscopische en de macroscopische wereld te berekenen. Andere varianten verschillen in de manier waarop de realiteit wordt toegekend aan de golffunctie.

Acceptatie onder de natuurkundigen

Volgens een peiling tijdens een workshop over kwantummechanica in 1997, is de Kopenhaagse interpretatie de meest algemeen geaccepteerde specifieke interpretatie van de kwantummechanica, gevolgd door de veel-werelden-interpretatie. Alhoewel de huidige trends een duidelijke competitie laat zien met andere interpretaties, heeft de Kopenhaagse interpretatie door de 20e eeuw heen op veel acceptatie kunnen rekenen onder fysici.

Kritiek

De compleetheid van de kwantummechanica (stelling 1) werd aangevallen door het Einstein-Podolsky-Rosen-gedachte-experiment waarin werd getracht te laten zien dat de kwantumfysica geen complete theorie kan zijn. Maar pogingen om de EPR-paradox experimenteel te testen -gebruik makend van de ongelijkheid van Bell- hebben de voorspellingen van de kwantummechanica ondersteund. Zij lieten zien dat theorieën over lokale verborgen variabelen niet overeenstemmen met het experimentele bewijs.

Van de drie stellingen hierboven is de derde misschien wel de meest problematische vanuit natuurkundig oogpunt, omdat deze een speciale status toekent aan het meetproces zonder precies te de eigenaardige effecten te definiëren of uit te leggen. In zijn artikel genaamd "Criticism and Counterproposals of the Copenhagen Interpretation of Quantum Theory" (Kritiek en tegenvoorstellen op de Kopenhaagse interpretatie van de kwantumtheorie) zegt Heisenberg:

"Natuurlijk moet de introductie van de waarnemer niet verkeerd begrepen worden door te impliceren dat er een of ander subjectief kenmerk wordt ingebracht in de beschrijving van de natuur. De waarnemer heeft alleen de functie van het registreren van beslissingen (dat wil zeggen processen in ruimte en tijd) en het doet er niet toe of de waarnemer een apparaat is of een mens. Maar het proces van registratie (dat wil zeggen de transformatie van het "mogelijke" naar het "feitelijke") is hier onontbeerlijk en kan niet worden weggelaten uit de interpretatie van de kwantumtheorie."

Veel fysici en filosofen hebben bezwaar gemaakt tegen de Kopenhaagse interpretatie, zowel vanwege het niet-deterministische ervan, als vanwege de beschouwing van het meetproces die de waarschijnlijkheidsfuncties omzet in niet-waarschijnlijkheidsmetingen. Zo zei Einstein: "Ik ben er in ieder geval van overtuigd dat Hij niet met

dobbelstenen gooit." en "Denk je werkelijk dat de maan er niet is op het moment dat je er niet naar kijkt?" Bohr zei hierop: "Einstein, vertel God niet wat hij moet doen". Erwin Schrödinger bedacht het experiment met Schrödingers kat om de incompleteheid van de kwantumfysica te illustreren wanneer je gaat van een sub-atomair naar een macroscopisch systeem.

Ook het benodigde ineenstorten van de golffunctie over de gehele ruimte kan als problematisch worden beschouwd.

Steven Weinberg zei in "Einstein's Mistakes", Physics Today, November 2005, pagina 35:

"Al deze bekende verhalen zijn waar, maar er blijft een zekere ironie over. Bohrs versie van de kwantummechanica was onvolledig, maar niet vanwege de reden die Einstein had bedacht. De Kopenhaagse interpretatie beschrijft wat er gebeurt als een waarnemer een meting doet, maar de waarnemer en de meting zelf worden klassiek behandeld. Dit is zeker verkeerd. Fysici en hun apparatuur moeten beschreven worden volgens dezelfde kwantummechanische regels die al het andere in het universum beschrijven. Maar deze regels worden uitgedrukt in termen van golffuncties (of, nog preciezer, toestandsvectoren) die op een perfect deterministische wijze veranderen. Dus waar komen de waarschijnlijkheidsregels van de Kopenhaagse interpretatie vandaan?"

In de afgelopen jaren is er volop vooruitgang geboekt in de richting van de oplossing van het probleem, waarop hier niet kan worden ingegaan. Het volstaat te zeggen dat Bohr noch Einstein zich concentreerden op het echte probleem van de kwantummechanica. De Kopenhaagse regels blijken maar al te duidelijk te werken, dus moeten ze worden geaccepteerd. Maar dit laat de taak over om ze te verklaren door het toepassen van de deterministische vergelijkingen van de verandering, de Schrödingervergelijking, de waarnemer en hun apparatuur."

Koppelingsconstante

De **koppelingconstante**, meestal aangeduid met **g** is in de natuurkunde een getal dat de sterkte van een interactie bepaalt. Meestal kunnen de Lagrangiaan of de Hamiltoniaan van een systeem worden gescheiden in een *kinetisch gedeelte* en een *interactie gedeelte*. De koppelingconstante bepaalt de sterkte van het interactie gedeelte met betrekking tot het kinetisch gedeelte, of tussen twee sectoren van het interactieve gedeelte. De elektrische lading van een deeltje is bijvoorbeeld een koppelingconstante.

NMR-spectroscopie

In de NMR-spectroscopie is de koppelingconstante de maat voor de interactie tussen verschillende magnetisch actieve atoomkernen. In de NMR-spectroscopie wordt doorgaans het symbool **J** gebruikt. De eenheid is in dat geval Hz.

Kwantum

In de fysica is een **kwantum** de kleinste, ondeelbare hoeveelheid van een grootte die bij een interactie betrokken kan zijn. Hoeveelheden van de grootte komen alleen voor in veelvouden van een kwantum. Men zegt dat de grootte gekwantiseerd is. Een foton is een voorbeeld van een lichtkwantum. Sinds het ontstaan van de kwantumfysica zijn in dit onderzoeksgebied meerdere specialisaties ontstaan, waaronder: kwantummechanica, kwantumoptica, kwantumelektrodynamica (QED), kwantumchromodynamica (QCD), kwantumchemie en kwantuminformatica.

Kwantummechanica

Het woord "kwantum" is afgeleid van het Latijnse "quantum" dat refereert aan een gehele hoeveelheid van iets (vragend: hoeveel? en relatief: zoveel als). Dit brengt ons bij het basisidee van de kwantummechanica, namelijk, dat een fysische eigenschap (lading, spin, energie, pariteit e.d.) gekwantiseerd kan zijn. Anders gezegd dat een fysische eigenschap als geheel veelvoud van een basiseenheid kan worden weergegeven en altijd als een geheel veelvoud hiervan zal voorkomen in de natuur. Voor lading is deze basiseenheid de elektronlading. Op de nog kleinere schaal van quarks is de basiseenheid overigens een derde van die lading. In tegenstelling tot lading is energie niet gekwantiseerd, hoewel de energie in elektromagnetische straling van een bepaalde frequentie slechts uit kwanta van de energie E van een foton kan bestaan. Deze energie van een foton is $E = h \nu$, waarin ν de frequentie van het foton is en h de constante van Planck.

Golf-deeltje-dualiteit

Een tweede basisidee van de kwantummechanica is de golf-deeltje-dualiteit. Deze stelt dat elk fysisch object zowel een deeltjes- als een golf-karakter heeft, waarbij de ene of de andere wordt waargenomen naargelang de manier waarop men observeert. Voor afmetingen die aanzienlijk groter zijn dan de de Broglie-golflengte ($\lambda = \frac{h}{p}$) is kwantummechanica tot klassieke natuurkunde te herleiden. Als deze golflengte van dezelfde orde is als het object waarmee men interageert, dan moet men een kwantummechanische beschrijving gebruiken. Een mens en ook een auto, kun je dus zonder problemen als klassiek systeem beschouwen omdat hun afmeting ten opzichte van de de Broglie-golflengte enorm groot is. Voor atomen en andere elementaire deeltjes is dit niet altijd het geval. Bij atomen in een Bose-Einsteincondensaat kan deze lengte vele centimeters bedragen en hebben we dus een macroscopisch systeem waar toch kwantummechanische effecten een rol spelen.

De kwantumfysica onderzoekt dus processen die zich in het kwantumregime afspelen; veelal is dit op atomair of subatomair niveau, maar soms kan dit ook een macroscopisch systeem zijn, waarvoor men wetmatigheden probeert op te sporen.

Er zijn recent pogingen ondernomen een kwantumcomputer te vervaardigen. De nano- of picocomputer moet gebruikmaken van kwantumeffecten om tot nu toe onuitvoerbare berekeningen aan te kunnen en zou bij verwezenlijking een nieuwe revolutionaire stap zijn en grote gevolgen hebben voor alle wetenschappen.

Kwantumbaan

Een **kwantumbaan** is een baan waarbij een elektron zich in een atoom langs verschillende banen rond de kern kan bewegen. Deze banen worden onderverdeeld in schillen, elke schil kan slechts een bepaald aantal elektronen bevatten. Deze banen worden beschreven door golffuncties.

Kwantumchemie

De **kwantumchemie** is het deelgebied van de natuurkunde en de theoretische scheikunde dat tracht chemische verschijnselen zoals chemische binding en katalyse te beschrijven met behulp van de kwantummechanica.

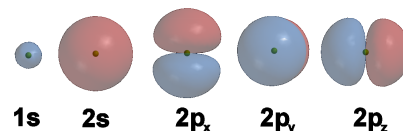
Daar het ondoenlijk is om dit exact te doen (zelfs de Schrödingervergelijking is een benadering die relativistische effecten verwaarloost), hebben benaderingsmethoden altijd een grote rol gespeeld binnen de kwantumchemie. Aanvankelijk waren dat analytische benaderingen en "intuïtieve" modellen, zoals de hybridisatietheorie van Pauling, maar met het beschikbaar komen van krachtige computers konden de benaderingen steeds complexer en nauwkeuriger worden. Het vakgebied is dan ook sterk verweven met dat van de computationele chemie.

Ontstaan

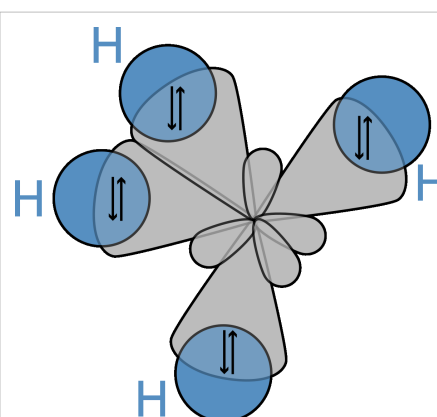
Bij het min of meer gereedkomen van het formalisme van de kwantummechanica in de jaren 20 van de twintigste eeuw werden de eerste pogingen ondernomen om moleculaire systemen op kwantummechanische wijze te beschrijven. Het exact oplossen van de Schrödingervergelijking was daarbij al niet meer aan de orde: alles wat ingewikkelder is dan een waterstofatoom kan niet exact analytisch worden opgelost.

Een van de eerste problemen waar men in ieder geval een benaderde oplossing kon geven (in 1927) was het eenwaardig positief geladen moleculair waterstofion H_2^+ met behulp van de Born-Oppenheimerbenadering. Omdat het proton zo'n 1700 maal zwaarder is dan het elektron, kan men in goede benadering aannemen dat op de relevante tijdschalen voor de elektronen, de protonen stilstaan. Men kan dan voor gegeven posities van de protonen de golffunctie van de elektronen uitrekenen en de bijbehorende elektronische energie. Vervolgens kan men dan de posities van de protonen variëren tot men de minimale totale energie heeft gevonden.

Rond 1930 kwamen de op orbitalen gebaseerde benaderingen op. Een orbitaal is een min of meer intuïtieve beschrijving van de golffuncties van een individueel elektron rond een positief geladen atoomkern, alsmede de naam voor die golffuncties zelf. Om moleculen en bindingen te beschrijven, kan men de golffuncties van de elektronen in zo'n molecuul beschrijven in termen van (atomaire) orbitalen. Twee "concurrerende" theorieën uit die tijd zijn de molecuulorbitaaltheorie, waarbij de moleculaire orbitalen zich over het gehele molecuul kunnen uitstrekken en die geschikt is om gedelokaliseerde systemen te beschrijven, en de valentiebindingstheorie, die aanschouwelijker is en werkt met "intuïtieve" begrippen als hybridisatie van orbitalen en resonantie.



De vorm van de verschillende atomaire orbitalen. De kleuren geven tegenovergestelde fasen in de golffunctie aan.



Methaan (CH_4) beschreven in termen van gehybridiseerde atomaire orbitalen: elk van de "lobben" van het centrale koolstofatoom is een som van een $1s$ -orbitaal met een of meer $2p$ -orbitalen.

Moderne methoden

De meeste moderne op orbitalen gebaseerde berekeningsmethoden gebruiken moleculaire orbitalen. Daarbij past men vaak de Hartree-Fockmethode toe, die al in de jaren dertig werd ontwikkeld, maar pas na 1950 daadwerkelijk werd toegepast, met het beschikbaar komen van digitale computers. De Hartree-Fockmethode (HF) is niet zozeer een volledige methode, maar een manier om de golffunctie van een veeldeeltjessysteem te benaderen als een bepaald soort som (een Slaterdeterminant) over producten van ééndeltjesgolffuncties (in een molecule zijn dit de moleculaire orbitalen). Men kan vervolgens de precieze vorm van de moleculaire orbitalen variëren tot men de oplossing met de laagste energie heeft gevonden, en dit is dan de beste benadering binnen de HF-methode. Deze moleculaire orbitalen worden op hun beurt vaak benaderd als lineaire combinatie van atoomorbitalen, de LCAO-methode, en men zoekt dan de set coëfficiënten in deze lineaire combinatie die de laagste HF-energie geven. Het uitrekenen van deze energie is op zichzelf een niet-triviale opgave en er bestaan verschillende benaderingen voor, afhankelijk van welke "integralen" men verwaarloost, of vervangt door een empirisch bepaalde waarde (zogenoeten semi-empirische methoden). Ook zijn er verschillende manieren om de atomaire orbitalen uit te drukken in eenvoudige basisfuncties.

Los van de op HF gebaseerde methoden is er de zogeheten dichtheidsfunctionaaltheorie. Hier vervangt men als het ware het idee van een golffunctie door een elektronendichtheid, die dan vaak wel weer in termen van orbitalen wordt benaderd.

Kwantumchromodynamica

Kwantumchromodynamica is de natuurkundige theorie die de wisselwerking tussen quarks en gluonen beschrijft. Kwantumchromodynamica is een onderdeel van het standaardmodel van de elementaire-deeltjesfysica en is een niet-abelse ijktheorie. Kwantumchromodynamica wordt vaak afgekort met QCD, uit de tijd dat de officiële spelling nog *Quantumchromodynamica* was en in lijn met het Engelse *Quantum Chromodynamics*.

Kwantumchromodynamica heeft twee karakteristieke eigenschappen:

- **asymptotische vrijheid**, wat inhoudt dat de interactie tussen quarks en gluonen zeer zwak is bij hoge energieën. Deze voorspelling van de kwantumchromodynamica werd voor het eerst in het begin van de jaren 70 van de twintigste eeuw ontdekt door David Politzer, Frank Wilczek en David Gross, wat hen in 2004 de Nobelprijs voor de natuurkunde opleverde.
- **confinement**, wat inhoudt dat de kracht tussen quarks en gluonen niet verdwijnt wanneer ze ruimtelijk van elkaar gescheiden worden. Hierdoor komen quarks en gluonen nooit los voor, maar zijn ze altijd gebonden in hadronen. Dit is compatibel met het feit dat er nooit vrij voorkomende quarks of gluonen zijn waargenomen.

Terminologie

Kwantum in kwantumchromodynamica geeft aan dat kwantumchromodynamica een kwantumveldentheorie is. *Chromo* komt van het Griekse woord voor kleur, *chroma*. Gluonen, de deeltjes die de overbrengers zijn van de sterke kernkracht, koppelen alleen aan deeltjes met een *kleurlading*. Er zijn drie kleurladingen: rood, groen en blauw en de corresponderende anti-kleuren: anti-rood, anti-groen en anti-blauw. De benaming *kleurlading* komt van de analogie met de ons zichtbare kleuren dat een combinatie van rood, groen en blauw een kleurloos object oplevert. Dit is echter de enige overeenkomst met het gebruikelijke begrip kleur.

Lagrangiaan

De dynamica van quarks en gluonen worden bepaald door de QCD-Lagrangiaan. Deze ijkinvariante Lagrangiaan wordt gegeven door

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{QCD}} &= \bar{\psi}_i (i\gamma^\mu (D_\mu)_{ij} - m \delta_{ij}) \psi_j - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} \\ &= \bar{\psi}_i (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi_i - g G_\mu^a \bar{\psi}_i \gamma^\mu T_{ij}^a \psi_j - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu}.\end{aligned}$$

Hier is $\psi_i(x)$ het quarkveld, een dynamische functie van de ruimtetijd in de fundamentele representatie van de ijkgroep SU(3), gelabeld door de kleurenindices i, j, \dots ($i = 1, 2, 3$). Spinoriële indices voor de quarkvelden zijn hierboven niet expliciet beschreven. $G_{\mu\nu}^a(x)$ zijn de gluonvelden, eveneens een dynamische functie van de ruimtetijd in de toegevoegde representatie van de ijkgroep, gelabeld door de kleurindex a, b, \dots . Aangezien de ijkgroep SU(3) acht dimensies heeft, geldt dat $a = 1, 2, \dots, 8$: men telt acht gluonen in QCD. De γ^μ 's zijn de Diracmatrices, die de spinorrepresentatie van de Lorentz-groep verbinden met de vectorrepresentatie hiervan. T_{ij}^a zijn de generatoren, die de fundamentele, de anti-fundamentele en de toegevoegde representaties van de SU(3)-ijkgroep met elkaar verbinden. De Gell-Mann-matrices geven een voorstelling van de generatoren.

Het symbool $G_{\mu\nu}^a$ stelt de ijkinvariante gluonische veldsterkte-tensor voor, analoog aan de elektromagnetische veldtensor $F_{\mu\nu}$. Hij wordt gegeven door

$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g f_{abc} G_\mu^b G_\nu^c,$$

waar f_{abc} de structuurconstanten van SU(3) zijn.

De constanten m en g bepalen (na renormalisatie van de kwantumtheorie) de quarkmassa en de koppelingsconstante van de theorie.

Geschiedenis

Sinds de uitvinding van het bellenvat en de vonkenkamer in de jaren '50 werden er in de experimentele deeltjesfysica steeds meer zogenaamde hadrondeeltjes ontdekt. Het leek dat zo'n groot aantal deeltjes niet alle fundamenteel konden zijn. Eerst werden de deeltjes door Wigner en Heisenberg geklasseerd volgens elektrische lading en isospin, en later, in 1953, door Gell-Mann en Nishijima volgens vreemdheid. Om een beter inzicht te verkrijgen, werden de hadronen gesorteerd in groepen met gelijkaardige eigenschappen en massa's met behulp van de zogenaamde *eightfold way*, bedacht door Gell-Mann en Ne'eman in 1961. Gell-Mann en Zweig verbeterden een eerder voorstel van Sakata door voor te stellen dat de structuur van de classificatie te wijten kon zijn aan het bestaan van kleinere deeltjes van drie verschillende smaken of *flavours* binnenin de hadronen: de quarks.

Op dit punt bleef één deeltje, het Δ^{++} , wat mysterieus. In het quarkmodel bestaat het uit drie quarks met parallelle spins. Aangezien quarks fermionen zijn, is deze combinatie echter in strijd met het uitsluitingsprincipe van Pauli. In 1965 losten Han en Nambu, en onafhankelijk daarvan ook Greenberg, het probleem op door voor te stellen dat quarks een extra vrijheidsgraad bezitten: een lading voor een SU(3) ijkgroep, later kleurlading genoemd. Han en Nambu merkten op dat de quarks konden interageren via een octet van ijkbosonen, de gluonen.

Quarks werden echter pertinent niet ontdekt, en aangezien elementaire deeltjes toen werden gedefiniëerd als deeltjes die konden worden afgezonderd en geïsoleerd, zei Gell-Mann vaak dat quarks niet meer waren dan handige, wiskundige verzinsels — geen echte deeltjes. Hiermee bedoelde hij in werkelijkheid dat quarks *confined* zijn: ze kunnen het hadron niet uit. Hij impliceerde hiermee echter ook dat de sterke interacties waarschijnlijk niet volledig zouden kunnen worden geschreven door een kwantumveldentheorie.

Feynman verdedigde het standpunt dat experimenten bij hoge energie aantoonde dat quarks echte deeltjes waren. Hij noemde ze "*partonen*" (omdat ze deel, "*part*", uitmaken van hadronen). Met deeltjes bedoelde Feynman objecten die zich langs zekere wegen voortbewegen: elementaire deeltjes van een veldentheorie.

Het verschil tussen de aanpakken van Feynman en Gell-Mann gaf blijk van een diep schisma in de gemeenschap van de theoretische fysica. Feynman dacht dat quarks een verdeling in positie of momentum zouden hebben, als elk ander deeltje, en hij geloofde (terecht) dat de diffusie van partonmomentum kon worden beschreven door diffractieverstrooiing. Hoewel Gell-Mann geloofde dat bepaalde quarkladingen konden worden gelokaliseerd, stond hij open voor de mogelijkheid dat de quarks zelf niet konden worden gelokaliseerd door falen van de ruimtetijd. Dit was de radicalere aanpak van S-matrix-theorie.

Bjorken stelde voor dat puntvormige partonen zeker relaties zouden impliceren in diep inelastische verstrooiing van elektronen protonen. Deze relaties werden op spectaculaire wijze geverifieerd in experimenten aan het SLAC in 1969. Dit zorgde ervoor dat de natuurkundige gemeenschap S-matrix-theorie verliet voor de sterke wisselwerking.

De ontdekking van asymptotische vrijheid in de sterke interacties door Gross, Politzer en Wilczek liet fysici toe nauwkeurige voorspellingen te maken voor de resultaten van heel wat hoge-energie-experimenten met behulp van perturbatieve technieken uit de kwantumveldentheorie. Het bestaan van gluonen werd voor het eerst aangetoond in drie-jet-events aan de PETRA in 1979. Deze experimenten werden hoe langer hoe nauwkeuriger, totdat QCD perturbatief binnen een paar percent is geverifieerd aan het LEP in het CERN.

De keerzijde van asymptotische vrijheid is confinement. Aangezien de kracht tussen twee kleurladingen niet toeneemt met de afstand, wordt geloofd dat quarks en gluonen nooit uit hadronen kunnen worden bevrijd. Dit aspect van de theorie is vastgesteld in computersimulaties, maar het is nog niet analytisch bewezen. Een van de Millenniumprijsproblemen van het *Clay Mathematics Institute* bestaat eruit dat zo'n bewijs wordt gevraagd. Een ander niet-perturbatief aspect van QCD is het onderzoek naar de fasen van quarkmaterie, zoals het quark-gluonplasma.

De puzzel van confinement is een de plaatsen waar de snaartheorie, een moderne vorm van S-matrix-theorie, recent nieuw licht op heeft geworpen.

De theorie

Enkele definities

Elke veldentheorie van de deeltjesfysica is gebaseerd op zekere symmetrieën van de natuur, waarvan het bestaan kan worden afgeleid uit observaties. Er zijn twee soorten symmetrieën:

- lokale symmetrieën, die op elk punt van de ruimtetijd anders inwerken; zulke symmetrieën zijn de basis van ijktheorieën en ze vereisen de invoering van een ijkboson.
- globale symmetrieën, waarbij de symmetrie tegelijk op alle punten van de ruimtetijd moet worden toegepast.

QCD is de ijktheorie van de speciale unitaire groep $SU(3)$, die ontstaat als men de kleurlading gebruikt om een lokale symmetrie te definiëren.

Aangezien de sterke wisselwerking geen onderscheid maakt tussen de verschillende quarkflavors, heeft QCD bij benadering een **flavorsymmetrie**, die wordt gebroken door de verschillende massa's van de quarks.

Er bestaan nog meer globale symmetrieën, die worden gedefinieerd aan de hand van chiraliteit. Dit concept leunt dicht aan bij handigheid: als de spin van een deeltje een positieve projectie heeft op de bewegingsrichting ervan (als ze dus, grosso modo, in dezelfde richting wijzen), dan is het deeltje linkshandig; in het omgekeerde geval is het rechtshandig. Chiraliteit en handigheid herleiden zich tot elkaar voor hoge energieën.

- **Chirale symmetrieën** bestaan uit transformaties die onafhankelijk zijn van het type deeltje.
- **Vectorsymmetrieën** (ook diagonale symmetrieën genoemd) zijn transformaties die worden toegepast op beide chiraliteiten.
- **Axiale symmetrieën** zijn die waarbij een transformatie wordt toegepast op de linkshandige deeltjes en de inverse transformatie op de rechtshandige.

De symmetriegroepen

De kleurgroep $SU(3)$ komt overeen met de lokale symmetrie die wordt geïjkt om QCD te geven. De elektrische lading labelt de representatie van de lokale symmetriegroep $U(1)$, die wordt geïjkt om QED te geven — dit is een abelse groep. Indien men een versie van QCD beschouwt met N_f flavors van massaloze quarks, dan is er een globale (chirale) flavorsymmetrie-groep $SU_L(N_f) \times SU_R(N_f) \times U_B(1) \times U_A(1)$. De chirale symmetrie wordt spontaan gebroken tot de vectorsymmetrie $SU_V(N_f)$ door de vorming van een zogenaamd chiraal condensaat. De vectorsymmetrie $U_B(1)$ komt overeen met het baryongetal van quarks en is een exacte symmetrie. De axiale symmetrie $U_A(1)$ is exact in de klassieke theorie, maar wordt gebroken in de kwantumtheorie, wat een anomalie wordt genoemd. Bepaalde gluonconfiguraties genaamd instantonen staan in nauw verband met deze anomalie.

Opmerking

Er zijn twee types $SU(3)$ -symmetrie. Er is de symmetrie die inwerkt op de verschillende quarkkleuren, en dit is een exacte ijsymmetrie die wordt overgebracht door de gluonen. Hiernaast is er ook een flavorsymmetrie die de verschillende quarksmaken onder elkaar roteert: de "smaak- $SU(3)$ ". Flavorsymmetrie is een niet-exacte symmetrie van het QCD-vacuüm, en het is helemaal geen fundamentele symmetrie. Het is een toevallige symmetrie die volgt uit de kleine massa's van de drie lichtste quarks.

In het QCD-vacuüm zijn er vacuümcondensaten van al de quarks met massa kleiner dan de QCD-schaal. Dit houdt de op- en neer-quarks in, en in mindere mate ook de vreemd-quark — maar niet de andere. Het vacuüm is symmetrisch onder $SU(2)$ -isospinrotaties van op en neer, en in mindere mate ook onder rotaties van op, neer en vreemd, de volledige flavorgroep $SU(3)$. De waarneembare deeltjes vormen multiplets van $SU(3)$.

De benaderde flavorsymmetrieën hebben geassocieerde ijkbosonen, geobserveerde deeltjes zoals het rho- en het omega-deeltje, maar deze deeltjes zijn helemaal niet als de gluonen en zij zijn niet massaloos. Ze komen tevoorschijn als ijkdeeltjes in een benaderde snaartheoretische beschrijving van QCD.

De velden

Quarks zijn massieve fermionen met spin gelijk aan een half. Ze dragen kleurlading die wordt geïjkt om tot QCD te komen. Quarks worden voorgesteld door het Diracveld in de fundamentele representatie **3** van de ijkgroep $SU(3)$. Ze dragen eveneens elektrische lading ($-1/3$ of $2/3$) en ze interageren zwak als deel van doublets van zwakke isospin. Ze dragen globale kwantumgetallen zoals het baryongetal, dat $1/3$ bedraagt voor elke quark, hyperlading en een van de kwantumgetallen voor flavor.

Gluonen zijn bosonen met spin één die eveneens kleurlading dragen. Ze behoren tot de toegevoegde representatie **8** van $SU(3)$. Ze hebben geen elektrische lading, interageren niet volgens de zwakke wisselwerking en ze hebben geen flavor. Ze behoren tot de singlet-representatie **1** van al deze symmetriegroepen.

Elke quark heeft zijn eigen antiquark. De lading van elk antiquark is exact tegengesteld aan die van het overeenkomstige quark.

De dynamica

Volgens de regels van de kwantumveldentheorie en de bijbehorende Feynmandiagrammen, geeft de theorie drie basisinteracties: een quark kan een gluon uitzenden of absorberen, een gluon kan een gluon uitzenden of absorberen, en twee gluonen kunnen direct interageren. Dit staat in contrast met QED, waar slechts de eerste soort interactie kan optreden, gezien de ladingloosheid van het foton. Diagrammen met Faddeev-Popov-spoken doen ook mee, die zorgen voor de correcte ijkfixing.

Methoden

Verdere analyse van de inhoud van de theorie is ingewikkeld. Verscheidene technieken zijn ontwikkeld om met QCD te werken. Enkele hiervan worden hieronder kort besproken.

Perturbatieve QCD

Deze aanpak is gebaseerd op asymptotische vrijheid, wat toelaat om perturbatietheorie te gebruiken om experimenten bij hoge energie nauwkeurig te beschrijven. Hoewel deze techniek beperkt is in haar bereik, heeft ze geleid tot de meest precieze tests van QCD nu voorhanden.

Rooster-QCD

Tot de niet-perturbatieve aanpakken van QCD is rooster-QCD de meest gevestigde. Deze aanpak gebruikt een discrete verzameling ruimtetijdspunten (de rooster) om de analytisch onoplosbare padintegraal van de continuümtheorie te herleiden tot een numeriek moeilijke berekening die dan wordt uitgevoerd op een supercomputer zoals de QCDOC (*Quantum Chromodynamics on a Chip*) die met juist dit doel is gebouwd. Hoewel deze methode traag en werkintensief is, wordt ze algemeen toegepast en ze geeft inzicht in delen van de theorie in anders onbereikbaar zijn.

1/N-ontwikkeling

Een zeer bekende benadering, de 1/N-ontwikkeling, begint met de onderstelling dat het aantal kleuren nagenoeg oneindig is, en gaat dan verder met corrigeren voor het feit dat dit niet werkelijk zo is. Met deze methode bereikt men kwalitatieve inzichten eerder dan kwantitatief juiste voorspellingen. Moderne varianten gebruiken de AdS/CFT-dualiteit.

Effectieve theorieën

Voor specifieke problemen kunnen enkele theorieën worden neergeschreven die kwalitatief correcte resultaten schijnen te leveren. In de beste gevallen kunnen deze worden bekomen als systematische ontwikkelingen in een parameter van de QCD-Lagrangiaan. Tot de efficiëntste hiervan behoren zeker chirale perturbatietheorie (die ontwikkeld rond massaloze quarks), zware-quarks effectieve theorie (die ontwikkeld rond zware quarks) en zacht-collineaire effectieve theorie (die ontwikkeld rond grote verhoudingen tussen de energieschalen). Andere, minder accurate, modellen zijn het Nambu-Jona-Lasinio-model en het chiraal model.

Experimentele bewijzen

De notie van quarkflavor werd opgedrongen door de nood aan een verklaring voor de eigenschappen van hadronen tijdens de ontwikkeling van het quarkmodel. De notie van kleur was nodig voor het oplossen van de Δ^{++} -puzzel.

Het eerste bewijs voor het bestaan van quarks als reële onderdelen van hadronen werd gevonden in diep-inelastische verstrooiingsexperimenten aan het SLAC. Het eerste bewijs voor gluonen kwam bij drie-jet-evenementen aan PETRA.

Goede kwantitatieve tests voor perturbatieve QCD zijn

- de running van de koppelingsconstante zoals afgeleid uit waarnemingen
- *scaling violation* in gepolariseerde en ongepolariseerde diep inelastische verstrooiing
- vector-bosonproductie in versnellers (zoals het Drell-Yan-proces)
- werkzame doorsneden van jet in versnellers
- *event shape observables* aan het LEP
- productie van zware quarks in versnellers

Kwantitatieve tests voor niet-perturbatieve QCD zijn er minder, doordat het moeilijker is voorspellingen te maken. De beste in waarschijnlijk de running van de koppelingsconstante zoals berekend in roostersimulaties van de spectra van quarkonium van zware quarks. Andere niet-perturbatieve voorspellingen kloppen tot op 5% nauwkeurigheid op zijn best. Voortgaand werk op massa's en vormfactoren van hadronen en hun matrixelementen voor de zwakke wisselwerking zijn veelbelovende kandidaten voor toekomstige kwantitatieve tests. Het hele onderwerp van quarkmaterie en het quark-gluonplasma is een niet-perturbatieve test voor QCD die nog moet worden onderzocht.

Referenties en externe links

Alle in het Engels.

- Greiner, Walter; Schäfer, Andreas. *Quantum Chromodynamics*, Springer. ISBN 0-387-57103-5, 1994
- Halzen, Francis; Martin, Alan. *Quarks & Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics*, John Wiley & Sons. ISBN 0-471-88741-2, 1984
- Particle data group ^[8]
- De Millenniumprijs ^[1] voor het bewijs van confinement ^[1]

Referenties

[1] <http://www.claymath.org/millennium/>

Kwantumcomputer

De **kwantumcomputer** is in 1981 als een mogelijke nieuwe vorm van computerarchitectuur voorgesteld door Richard Feynman. In de jaren daarna ontwikkelden David Deutsch en Peter Shor het concept verder. Deze computer maakt gebruik van de kwantumeffecten *verstrengeling* en *superpositie*, die kwantumdeeltjes zoals een elektron of foton onder bepaalde omstandigheden kunnen vertonen.

- **verstrengeling** (entanglement) van een *gepaard* elementair deeltje betekent dat er een mysterieuze verbinding bestaat tussen deze twee deeltjes die schijnbaar onafhankelijk is van de onderlinge afstand. Als de toestand van een deeltje gemeten wordt, weet men ook *onmiddellijk* wat de toestand van het andere deeltje is, hoever zij ook van elkaar verwijderd zijn.
- **superpositie** van een deeltje betekent dat bijvoorbeeld de *spin* hiervan (normaal maar één mogelijke waarde) alle mogelijke waarden *tegelijktijd* kan aannemen.

Door deze eigenschappen kan een kwantumdeeltje gebruikt worden voor binaire eenheden die *tegelijktijd* waarden tussen 0 en 1 bit aannemen. In de gebruikelijke processors kunnen de binaire eenheden alleen de waarde 0 of 1 aannemen. In de *kwantum-binaire* eenheden (qubits) van de kwantumprocessor zijn waarden mogelijk die bijvoorbeeld 30% 0 en *tegelijk* 70% 1 zijn. Hierdoor kan een n-qubit systeem beschreven worden met 2^n vectoren in de Hilbertruimte; dankzij dit fenomeen stijgt de capaciteit van kwantumcomputers exponentieel met het aantal qubits. Waar een klassieke computer 64 bits nodig heeft om 2^{64} waardes uit te drukken, heeft een kwantumcomputer over het algemeen slechts 5 qubits nodig.

Gerelateerd aan dit verschijnsel is de tijd die een kwantumprocessor nodig heeft om berekeningen uit te voeren: deze processors kunnen 2^n berekeningen uitvoeren in de tijd dat een klassieke processor 1 berekening kan uitvoeren. Hierdoor kan men in theorie enorm snel parallel berekeningen uitvoeren die met conventionele computers onmogelijk zijn. De kunst is wel om deze speciale kwantumtoestand lang genoeg stabiel te houden om gegevens te kunnen invoeren, te verwerken, en uit te lezen om zinvolle uitkomsten te krijgen. Door de grote (theoretische) mogelijkheden wordt er tegenwoordig, na aanvankelijke scepsis, wereldwijd veel geld in research gestoken en vordert men gestaag in de richting van een mogelijk prototype.

Gevolgen

Als men er in slaagt een goed werkende kwantumcomputer te maken zou dat een grote hulp voor wetenschappelijk onderzoek zijn. Men zou in staat zijn gigantische hoeveelheden data te analyseren en hier allerlei verbanden en patronen tussen te leggen. Aangezien dit een van de fundamentele voorwaarden is om tot nieuwe wetenschappelijke inzichten te komen zal dit een enorme revolutie voor de wetenschappen betekenen. Ook zou men dan zeer gedetailleerde simulaties kunnen laten draaien om theorieën te testen en te verfijnen. Waarschijnlijk zal dan eveneens de rest van de maatschappij de gevolgen merken in bijvoorbeeld de entertainmentindustrie (films, games, enz.).

Een minder gewenst gevolg zou zijn dat men dan een ander systeem zou moeten zoeken om bijvoorbeeld gevoelige informatie op internet te versleutelen. Tegenwoordig gebruiken veel programma's daar priemgetallen voor. Een actueel voorbeeld is het online-bankierprogramma dat de meeste banken gebruiken om transacties veilig en snel te laten verlopen. Hierbij worden twee zeer grote priemgetallen gebruikt die met elkaar vermenigvuldigd zijn. Een 'normale' computer kan deze twee getallen onmogelijk vinden binnen een redelijke tijd. Maar een kwantumcomputer zou dit in principe wel kunnen. Dan zou een criminele computerhacker snel alle mogelijke versleutelde transacties kunnen onderscheppen en voor eigen gewin kunnen aanpassen.

Verskil ten opzichte van een normale computer

Om een simpel voorbeeld te geven van een kwantumcomputer ten opzichte van een normale computer, kan men zich het als volgt voorstellen als er de volgende vraag wordt gesteld: Er zijn tien deuren en achter één ligt een appel, achter welke deur ligt die appel? Ervan uitgaande dat de appel zich bijvoorbeeld achter deur nummer 8 bevindt, zal de normale computer deur nummer 1 openen, kijken of de appel daarachter ligt, en daarna de deur sluiten en naar de volgende deur gaan. Dit proces zal de computer herhalen totdat hij de appel heeft gevonden. Een kwantumcomputer daarentegen zal alle deuren tegelijk openen en al na de eerste cyclus de appel achter deur nummer 8 vinden.

Externe links

- onderzoeksgroep Quantumtransport TU Delft ^[1]
- onderzoeksgroep Quantumcomputing Universiteit van Oxford met veel achtergrondinformatie. ^[2]
- artikel op natuurkunde.nl geschreven voor bovenbouw middelbare scholier. ^[3]

Referenties

[1] <http://www.ns.tudelft.nl/qt/>

[2] <http://www.qubit.org>

[3] <http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=692020>

Kwantumelektrodynamica

Kwantumelektrodynamica, of (**QED**: van Quantumelectrodynamics) is een relativistische kwantumveldentheorie van het elektromagnetisme. Deze theorie is een integratie van de relativistische versie van de Wetten van Maxwell met de theorie van de kwantummechanica.

QED beschrijft wiskundig alle fenomenen die betrekking hebben op de elektrische lading van deeltjes die op elkaar inwerken door middel van de uitwisseling door fotonen, tussen licht en materie of tussen geladen deeltjes. Het wordt "het juweel van de natuurkunde" genoemd voor de zeer nauwkeurige voorspelling van fysische 'hoeveelheden', zoals onder andere het magnetische moment van het elektron en de Lambverschuiving van de energieniveaus van waterstof.

De electromagnetische interacties zijn de meest belangrijke interacties omdat de andere interacties (de sterke interactie en de zwakke interactie) alleen op het niveau van atoomkernen van belang zijn. Deze theorie kan alle elektrische, chemische en optische verschijnselen nauwkeurig voorspellen en verklaren. Door de ontwikkeling van de Kwantumchromodynamica is de zwakke interactie verdwenen als aparte interactie en geïntegreerd met de electromagnetische interactie met als resultaat de elektrozwakke interactie.

Geschiedenis

Werk aan kwantumelektrodynamica is begonnen door onder andere Dirac, Pauli, Weisskopf en Jordan. Voor de uiteindelijke theorie is het werk van Richard Feynman, Julian Schwinger, Shinichiro Tomonaga en Freeman Dyson bepalend geweest. De benadering van Swinger en Tomanaga verschilt van die van Feynman, maar Dyson toonde aan dat de beide benaderingen gelijkwaardig waren. De eerste drie hebben voor de ontwikkeling van de theorie in 1965 de Nobelprijs ontvangen. Voor een eenvoudige behandeling van het door Feynman geïntroduceerde begrip padintegraal zij verwezen naar het Feynman-Kac-formalisme en ook de bekende Schrödingervergelijking.

Lagrangiaan

De hele theorie van QED kan (net zoals de meeste andere natuurkundige theorieën) op een bondige manier samengevat worden door het opgeven van een Lagrangiaan. In het geval van QED is deze gegeven door

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu D_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} ,$$

Hierbij stelt ψ het (kwantum)veld van elektronen en positronen voor, en $F_{\mu\nu}$ is de electromagnetische veldtensor. Verder is m de massa ("bare mass") en zijn γ_μ de gamma-matrices en is D_μ de ijk-covariante afgeleide. Indien men de Lagrangiaan uitschrijft, krijgt men verschillende termen. Eén stuk beschrijft de elektronen en positronen apart. Een ander stuk beschrijft het electromagnetisch veld, en de rest beschrijft de interactie tussen beiden.

Kwantumfluctuatie

Kwantumfluctuatie is een fluctuatie van energie in de lege ruimte volgens de onzekerheidsrelatie van Heisenberg. Vacuüm heeft zelf een bepaalde energie. De ogenblikkelijke energie is niet stabiel, maar schommelt om die waarde. Uit de energie kunnen deeltjes en antideeltjes (virtueel deeltje) uit het niets verschijnen en verdwijnen. Volgens sommige kwantumfysici is onze hele kosmos het gevolg van een kwantumfluctuatie: zie oerknal.

Kwantumgetal

Kwantumgetallen worden in de kwantummechanica gebruikt voor het beschrijven van de eigenschappen van bepaalde deeltjes. Een stel kwantumgetallen karakteriseert een eigentoestand van een kwantummechanisch systeem volledig. Zij kunnen, in tegenstelling tot de beschrijvende grootheden in de klassieke mechanica, alleen discrete waarden aannemen. Er zijn verschillende kwantumgetallen voor verschillende eigenschappen, en ook voor verschillende deeltjes.

Kwantumgetallen zijn vanwege hun discreetheid contra-intuïtief in vergelijking met de klassieke continue wereld. Het is echter een wezenlijk kenmerk van de kwantummechanica dat bepaalde grootheden alleen maar exacte en discrete waarden kunnen hebben.

Behalve in de atoom- en molecuulfysica zijn kwantumgetallen ook van essentieel belang in de deeltjesfysica. Daar dienen zij om atoomkernen en subatomaire deeltjes en hun toestandsovergangen te beschrijven.

Gebonden elektron in het waterstofatoom

De eigentoestanden van het gebonden elektron en zijn golffuncties in het waterstofatoom worden beschreven door vier kwantumgetallen:

$$|\psi\rangle = |n, l, m, s\rangle$$

Hoofdkwantumgetal

Het hoofdkwantumgetal n beschrijft in het schillenmodel de schil waarin het elektron zich met een waarschijnlijkheid van 90% bevindt. Het beschrijft het basale energieniveau en kan willekeurige natuurlijke getalwaarden groter dan nul aannemen:

$$n \in \{1, 2, 3, \dots\}$$

Dit komt overeen met steeds hogere aangeslagen toestanden. Bij zeer grote n spreekt men van Rydberg-atomen. Het energieniveau voor het waterstofatoom volgt uit het hoofdkwantumgetal:

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -E_R \frac{1}{n^2}$$

waarin $E_R = 13,6 \text{ eV}$ (Rydberg-Energie)

Nevenkwantumgetal

Het nevenkwantumgetal l , ook wel impulsmomentkwantumgetal genaamd, bepaalt de vorm van het orbitaal van een atoom. Het kan de waarde 0 en willekeurige natuurlijke getallen aannemen, maar moet in ieder geval kleiner zijn dan n :

$$l \in \{0, 1, 2, \dots, n - 1\}$$

De nevenkwantumgetallen worden ook vaak met de letters s, p, d, f, \dots aangeduid.

De naam *impulsmomentkwantumgetal* is historisch bepaald en is gebaseerd op de voorstelling dat dit kwantumgetal het impulsmoment van het om de atoomkern draaiende elektron beschrijft (zie Atoommodel van Sommerfeld). Tegelijkertijd is $l(l+1)\hbar^2$ de eigenwaarde van de impulsmomentoperator L^2 .

Magnetisch kwantumgetal van het impulsmoment

Het magnetisch kwantumgetal van het impulsmoment wordt met m aangeduid en beschrijft de ruimtelijke oriëntatie van het baanimpulsmoment van het elektron. Het mag in waarde niet groter zijn dan het nevenkwantumgetal l , maar het mag wel negatieve waarden aannemen:

$$m \in \{-l, -(l-1), \dots, (l-1), l\}$$

Het wordt *magnetisch* kwantumgetal genoemd omdat de extra potentiële energie in een magneetveld in de z -richting (normaal Zeeman-effect) ervan afhangt (bij $m = 0$ geen z -component, dat wil zeggen geen extra potentiële energie; bij $m = l$ alleen een z -component, dat wil zeggen maximale extra energie).

Spinkwantumgetal

➤ *Zie Spin (kwantummechanica) voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Het spinkwantumgetal s van het elektron beschrijft de oriëntatie van de spin van het elektron. Het is halftallig:

$$s = \frac{1}{2}$$

Voor de projectie van de spin in de z -richting zijn er maar twee mogelijkheden:

$$s_z \in \left\{ -\frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\}$$

Verdere kwantumgetallen

Kwantumgetal van het totale impulsmoment

Het kwantumgetal van het totale impulsmoment beschrijft het totale impulsmoment van een elektron, waarbij de spin gekoppeld is aan het impulsmoment en de beide impulsmomenten niet meer kunnen worden onderscheiden.

Voor het kwantumgetal geldt bijvoorbeeld bij LS-koppeling:

$$J = (L + S), (L + S - 1), \dots, |L - S|$$

Kernspinkwantumgetal

Het kernspinkwantumgetal beschrijft het impulsmoment van een atoomkern. Het is samengesteld uit de spins van de afzonderlijke neutronen en protonen en kan daardoor alleen positieve heel- of halftallige waarden aannemen.

Meer-elektronensystemen

In tegenstelling tot waterstof bestaan de schillen van andere atomen uit meerdere elektronen, die elkaar beïnvloeden. Desondanks kan men hun toestand vaak bij benadering door bovengenoemde kwantumgetallen beschrijven. Om dergelijke systemen echter van één-elektronensystemen te onderscheiden, worden de kwantumgetallen in dat geval met hoofdletters geschreven. Zo is dan bijvoorbeeld S het totale impulsmoment van alle elektronen.

Men moet zich echter realiseren dat elektronen Fermionen zijn en dus onderhevig zijn aan het Pauli-principe: er mogen geen twee elektronen alle kwantumgetallen gelijk hebben.

Literatuur

- Haken, Wolf: *Atom- und Quantenphysik*. 8. Auflage. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 2004, ISBN 3-540-02621-5
- Eidenberger, Mag. Ronald: "Basismodul Chemie", Seiten 55 und 56

Weblinks

- Quantenzahlen ^[1] (op pag. 55ev toegelicht)

Referenties

[1] http://www.brg19.at/~eid/pdf/53_61.pdf

Wiskundige structuur van de kwantummechanica

De **wiskundige structuur van de kwantummechanica** is de verzameling van wiskundige formalismen, die een strikte beschrijving van de kwantummechanica toelaten. Voor theorieën die voor de vroege jaren 1900 zijn ontwikkeld onderscheidt de wiskundige structuur van de kwantummechanica zich van eerdere wiskundige formalismen door het gebruik van abstracte wiskundige structuren, zoals oneindig-dimensionale Hilbertruimten en operatoren op deze Hilbertruimten. Veel van deze structuren kwamen van de functionaalanalyse, een onderzoeksgebied binnen de zuivere wiskunde dat gedeeltelijk was beïnvloed door de behoeften van de kwantummechanica. In het kort werden de waarden van natuurkundige observabelen, zoals energie en impuls niet langer beschouwd als waarden van functies op de faseruimte, maar als eigenwaarden; om meer precies te zijn als spectrale waarden (puntspectrum plus absoluut continue- plus enkelvoudige continue spectrum) van lineaire operatoren in de Hilbertruimte. ^[1]

Voetnoten

[1] (en) Frederick W. Byron, Robert W. Fuller, *Mathematics of classical and quantum physics*, *Mathematical formulation of quantum mechanics*, 5.11 pag. 277 (http://books.google.com/books?id=D2Xs8NUKecAC&pg=PA277&lpg=PA277&dq=mathematical+formulation+of+quantum+mechanics&source=bl&ots=hV5VX7FfDj&sig=JuVbSojzBrKJ9MLKrEGGvqLn9SE&hl=en&ei=BTsvSq6CL6amM8PVhIcK&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=8)

Kwantumoptica

De **kwantumoptica** is een discipline van de natuurkunde die de kwantumeffecten die bij licht optreden bestudeert en gebruikt.

Aangezien in de kwantumoptica de wisselwerking van licht met materie op atomair niveau beschreven wordt kan het licht meestal niet als elektromagnetische golf opgevat worden. In het bijzonder moet licht opgevat worden als bestaande uit ondeelbare, dus gekwantiseerde energieporties, waarvan de fotonen geabsorbeerd en uitgezonden kunnen worden. Vaak kan echter nog het zogenaamde halfklassieke model gebruikt worden waarbij de atomen kwantummechanisch en het licht als elektromagnetisch verschijnsel beschreven wordt.

Experimenten uit de kwantumoptica

Veel van de experimenten in de kwantumoptica beschrijven wisselwerkingen tussen licht en materie. Bij dit soort experimenten heeft de laser zich gevestigd als de nagenoeg ideale lichtbron vanwege coherentie van de lichtbron en het monochromatisch licht.

- Laserkoeling van atomen
- Interferentie van een individueel foton met zichzelf
- EPR (Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon) - experimenten
- GHZ (Greenberger-Horne-Zeilinger) - toestanden
- Ongelijkheid van Bell
- Realisatie van kwantumcomputers

Externe links

- (de) <http://heart-c704.uibk.ac.at/LV/Quantenoptik> ^[1]
- (en) [An introduction to quantum optics of the light field](http://gerdbreitenbach.de/gallery/) ^[2]

Referenties

[1] <http://heart-c704.uibk.ac.at/LV/Quantenoptik>

[2] <http://gerdbreitenbach.de/gallery/>

Kwantumput

Een kwantumput is een fysisch potentiaalproces, dat een vlak potentiaalpatroon vertoont met aan de wanden heel hoge sprongen. Zo wordt de bewegingsvrijheid van deeltjes beperkt in een ruimtedimensie, zodat ze alleen een vlak gebied kunnen innemen. De breedte van de kwantumput bepaalt sterk de kwantummechanische toestanden die het deeltje kan innemen. Dit leidt in het bijzonder tot de ontwikkeling van energieniveaus (subbanden), zodat het deeltje nu discrete energiewaarden kan aannemen.

Kwantumschuim

De kwantumtheorie beschrijft het universum op de kleinst mogelijke schaal. Het gaat dan om 'stoffen' van 10^{-35} meter, dat is ongeveer 10^{20} keer kleiner dan de diameter van een proton. De theorie voorspelt dat op deze schaal ruimte-tijd zich voordoet als een schuimend geheel, het **kwantumschuim**. Dit 'schuim' bestaat volgens verschillende theorieën uit Planckdeeltjes en mini zwarte gaten. Ook is het mogelijk dat wormgaten het schuim doorkruisen.

Kwantumsprong

In de kwantummechanica, een deelgebied van de natuurkunde, is een **kwantumsprong** een verandering van een elektron binnen een atoom van de ene kwantumtoestand naar de andere kwantumtoestand. Het lijkt discontinu dat het elektron zeer snel van het ene naar het andere energieniveau "springt", na zeer kort in een toestand van superpositie te hebben bestaan. De tijd dat dit kost staat in verhouding tot de druk die de spectraallijnen verbreedt. Dit fenomeen is in tegenspraak met klassieke theorieën, die verwachten dat energieniveaus continu zijn. Kwantumsprongen veroorzaken de emissie van elektromagnetische straling, waaronder die van het licht, dat plaatsvindt in de vorm van gekwantiseerde eenheden, die fotonen worden genoemd.

Externe link

- (en) Bestaan er kwantumsprongen? ^[1]

Referenties

[1] <http://www.mikomma.de/schroe/quantumjumps.htm>

Kwantumtoestand

Kwantummechanica
$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
Onzekerheidsrelatie
Algemene inleiding... ^[1]
Achtergrond
Klassieke mechanica Interferentie Hamiltonformalisme
Fundamentele begrippen
Kwantumtoestand · Golffunctie · Postulaten Superpositie · Onzekerheidsprincipe Schrödingervergelijking · Tunneffect Uitsluitingsprincipe Diracnotatie
Gevorderde onderwerpen
Interpretatie Klein-Gordonvergelijking Dirac-vergelijking Kwantumveldentheorie Kwantumgravitatie

Experimenten

Schrödingers kat
 Tweespletenexperiment
 Tunneleffect
 Stern-Gerlach-experiment

Wetenschappers

Planck · Einstein · Bohr
 · Sommerfeld · Bose ·
 Kramers · Heisenberg ·
 Born · Jordan · Pauli ·
 Dirac · de Broglie ·
 Schrödinger · von
 Neumann · Wigner ·
 Feynman · Bohm ·
 Everett · Bell

Een **kwantumtoestand** is de fysische toestand van een systeem, zoals die wordt beschreven in het kader van de kwantummechanica. Men kan een kwantumtoestand beschrijven met een golf functie. In de kwantummechanica is de toestand van een systeem typisch een *uitgesmeerde* versie van de klassieke toestanden.

Notatie

Men duidt een kwantumtoestand typisch aan met de diracnotatie: een symbool geplaatst tussen een verticale streep en een rechte haak, zoals

$$|\psi\rangle.$$

Wanneer men de toestand als een golf functie beschrijft, kan men de afhankelijkheid van de coördinaten en/of de tijd expliciet maken, en bijvoorbeeld schrijven:

$$\psi(\mathbf{r}, t)$$

Klassieke toestanden en kwantumtoestanden

In de natuurkunde bedoelt men met een *systeem* datgene waarop men zijn aandacht richt. Een atoom is het systeem dat door een atoomfysicus bestudeerd wordt; in de warmteleer bestudeert men systemen van veel atomen of moleculen; een sterrenstelsel is een systeem dat in de astronomie bestudeerd wordt, enzovoort. De *toestand* van zo'n systeem is de situatie waarin het op een gegeven moment verkeert. Een fysische beschrijving van die toestand geeft zo volledig mogelijke informatie over het systeem op dat moment.

Klassieke toestandsbeschrijving

Volgens de klassieke mechanica is het mogelijk de toestand van een systeem te beschrijven door van ieder van de deeltjes waar het systeem uit bestaat de positie en bewegingssnelheid op een bepaald moment te specificeren. Een klassieke toestand wordt dus weergegeven door middel van een lijst posities en snelheden, weergegeven met hun coördinaten: voor een systeem bestaand uit de deeltjes 1 t/m n zijn het de getallen

$$(x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, \dots, x_n, y_n, z_n; v_{x1}, v_{y1}, v_{z1}, v_{x2}, v_{y2}, v_{z2}, \dots, v_{xn}, v_{yn}, v_{zn}).$$

Hoe nauwkeuriger deze getallen bekend zijn, hoe nauwkeuriger de toestandsbeschrijving is. Er bestaat geen grens aan de nauwkeurigheid die in principe te bereiken is: door nauwkeuriger te meten kan men de toestand altijd nauwkeuriger bepalen.

Kwantummechanische toestandsbeschrijving

De kwantummechanica stelt dat dit niet precies klopt. Om te beginnen is de nauwkeurigheid waarmee plaats en bewegingssnelheid bekend kunnen zijn, beperkt door het onzekerheidsprincipe. Hoe nauwkeuriger de plaats bekend is, hoe groter de onzekerheid in snelheid, en omgekeerd. Maar men gaat nog verder. Het onzekerheidsprincipe is niet zo zeer een beperking aan wat *meetbaar* is, maar meer een echte *eigenschap* van systemen: volgens de kwantummechanica gedragen deeltjes zich in een bepaald opzicht als golven en hebben ze dus helemaal niet een precies bepaalde plaats en snelheid. Net zoals een golf op het water niet op één plaats is en ook meestal niet in zijn geheel in één uniforme bewegingstoestand is, zo schiet ook bij deeltjes en andere (microscopische) systemen de beschrijving met posities en snelheden tekort.

In de kwantummechanica wordt de toestand van een systeem beschreven met een abstract begrip, de kwantumtoestand, vaak weergegeven met een verticale streep, een symbool en een rechte haak, zoals $|\Psi\rangle$. Concrete gegevens over de kwantumtoestand worden weergegeven als getallen ten opzichte van een coördinatenstelsel, maar niet op de manier van de klassieke mechanica. Bij een kwantumtoestand hebben de getallen betrekking op de *waarschijnlijkheid* van de mogelijke uitkomsten van een meting aan het systeem. Deze zogeheten *amplituden* zijn complexe getallen die aangeven hoe waarschijnlijk iedere meetuitkomst is. Met andere woorden: wanneer een kwantumtoestand $|\Psi\rangle$ wordt gespecificeerd ten opzichte van een coördinatenstelsel van mogelijke meetuitkomsten, krijgen we de golffunctie Ψ .

Als voorbeeld van een systeem kunnen we één deeltje nemen. Stel dat het in een kwantumtoestand $|\phi\rangle$ verkeert en dat we geïnteresseerd zijn in mogelijke uitkomsten van een meting van de plaats van het deeltje. Dan kunnen we de toestand (dus onze kennis van het systeem) weergeven met de functie $\phi(x, y, z)$. Deze *plaats-golffunctie* geeft voor iedere mogelijke plaats (x, y, z) de amplitude, en daarmee de kans dat het deeltje bij meting op die plaats wordt aangetroffen.

Opvallend is het verschil met de klassieke natuurkunde. Die zou de toestand van dit systeem weergeven met zes getallen: drie om de plaats van het deeltje te beschrijven en drie voor de snelheid. In de beschrijving van de kwantumtoestand is er voor *iedere mogelijke plaats* een apart getal, dus in de meeste gevallen *oneindig veel* getallen. Het coördinatenstelsel heeft dus oneindig veel 'assen': voor iedere mogelijke meetuitkomst een.

Een alternatieve beschrijving van de kwantumtoestand zou de impuls-golffunctie zijn: die geeft de amplituden voor mogelijke uitkomsten van een meting van de impuls p (snelheid \times massa) van het deeltje. Ook deze $\phi(p_x, p_y, p_z)$ is een volledige beschrijving van de kwantumtoestand $|\phi\rangle$. En er zijn vaak nog meer mogelijkheden. Zo kan de toestand van een systeem van een deeltje met beperkte bewegingsmogelijkheden, bijvoorbeeld een elektron dat om een atoomkern heen beweegt, beschreven worden met de amplitudes voor de waarden van de energie van het deeltje, de getallenreeks ϕ_E . Er zijn dus verschillende beschrijvingen mogelijk van dezelfde kwantumtoestand.

Kwantumveldentheorie

Kwantumveldentheorie is een onderdeel van de moderne natuurkunde. Het is een theoretisch kader voor de constructie van kwantummechanische modellen van veld-achtige systemen of, equivalent, veeldeeltjessystemen. De meeste theorieën in de moderne deeltjesfysica zijn geformuleerd als relativistische kwantumveldentheorieën. In de vastestoffysica worden kwantumveldentheorieën in heel wat situaties gebruikt, vooral dan wanneer het aantal deeltjes kan variëren — bijvoorbeeld in de BCS-theorie van supergeleiding.

Geschiedenis

De kwantumveldentheorie is ontstaan in de jaren 1920 uit het probleem van de constructie van een kwantummechanische theorie van het elektromagnetische veld. In 1926 bouwden Max Born, Pascual Jordan en Werner Heisenberg zulk een theorie door de interne vrijheidsgraden van het veld uit te drukken in een oneindige verzameling harmonische oscillatoren. Vervolgens hebben ze die gekwantiseerd op de gewoonlijke wijze (kanonieke kwantisatie). Deze theorie veronderstelde de afwezigheid van elektrische ladingen of stromen en ze zou vandaag worden geklasseerd als een "vrije" veldentheorie. De eerste complete theorie van kwantumelektrodynamica, die zowel elektromagnetische velden als elektrisch geladen materie (namelijk elektronen) bevatte als kwantummechanische objecten, werd opgesteld door Paul Dirac in 1927. Deze kwantumveldentheorie kon worden gebruikt voor de modellering van belangrijke processen zoals de uitstraling van een foton door een elektron wanneer dit naar een kwantumtoestand met lagere energie valt, een proces gedurende hetwelk het "aantal deeltjes verandert" — een atoom in de oorspronkelijke toestand wordt een atoom plus een foton in de uiteindelijke toestand. Sindsdien is duidelijk geworden dat de mogelijkheid zulke fenomenen te beschrijven een van de belangrijkste kenmerken is van de kwantumveldentheorie.

Vanaf het begin was het duidelijk dat een correcte behandeling van het elektromagnetische veld op de een of andere manier Einsteins relativiteitstheorie moest bevatten, aangezien deze theorie was voortgekomen uit een studie van het klassieke elektromagnetisme. De behoefte aan het samenvoegen van relativiteit en kwantummechanica was de tweede grote drijfveer achter de ontwikkeling van de kwantumveldentheorie. Jordan en Pauli toonden in 1928 aan dat het mogelijk was om kwantumvelden bij coördinatentransformaties het gedrag op te leggen dat wordt voorspeld door speciale relativiteit (specifiek toonden ze aan commutatoren van velden Lorentzinvariant zijn), en in 1933 toonden Bohr en Rosenfeld aan dat dit resultaat kan worden geïnterpreteerd als een beperking op het meten van velden die door een ruimteachtig interval van elkaar worden gescheiden, zoals geëist door relativiteit. De evolutie van kwantumveldentheorie maakte een volgende grote stap door de ontdekking van de Dirac-vergelijking, een eendeeltjesvergelijking die gehoorzaamt aan de wetten van zowel kwantummechanica als van relativiteit, wanneer ervan werd aangetoond dat sommige dan haar minder gewenste eigenschappen (zoals toestanden met negatieve energie) geen probleem meer vormen bij een herformulering als een kwantumveldentheorie. Dit werk werd verricht door Furry, Oppenheimer, Fock en anderen.

De derde fase in de ontwikkeling van kwantumveldentheorie bestond uit de consistente en eenvoudige behandeling van de statistiek van veeldeeltjessystemen. In 1927 trachtte Jordan de kanonieke kwantisatie van velden uit te breiden naar de golf functie van een systeem van veel identieke deeltjes. Deze procedure wordt soms *tweede kwantisatie* genoemd. In 1928 vonden Jordan en Wigner dat de kwantumvelden die elektronen of andere fermionen beschrijven, moeten worden ontwikkeld met anticommuterende creatie- en annihilatieoperatoren vanwege het uitsluitingsprincipe van Pauli. Deze nieuwe ontwikkeling werd geïncorporeerd in de veeldeeltjestheorie en oefende een grote invloed uit op de vastestoffysica en de kernfysica.

Ondanks haar eerste successen werd kwantumveldentheorie geplaagd door enkele ernstige theoretische moeilijkheden. Veel schijnbaar ongevaarlijke fysische grootheden, zoals de energieverhuizing van elektron toestanden in de aanwezigheid van het elektromagnetisch veld, leverden oneindig — een zinloos resultaat — wanneer ze werden berekend met kwantumveldentheorie. Dit "divergentieprobleem" is opgelost in de jaren 1940

door Bethe, Tomonaga, Schwinger, Feynman en Dyson door een procedure genaamd renormalisatie. Deze fase van ontwikkelingen vond haar hoogtepunt in de constructie van de moderne theorie van kwantumelektrodynamica (QED). In het begin van de jaren 1950 werd QED door het werk van Yang en Mills uitgebreid naar een klasse van kwantumveldentheorieën bekend als ijktheorieën. In de jaren 1960 en '70 werd een ijktheorie geformuleerd die nu bekend staat als het standaardmodel van de deeltjesfysica. Dit model beschrijft alle bekende elementaire deeltjes en de interacties ertussen. Het deel van het standaardmodel dat handelt over de zwakke wisselwerking werd geformuleerd door Glashow, met het higgsmechanisme toegevoegd door Weinberg en Salam. De theorie is consistent bewezen door 't Hooft en Veltman.

Nog tijdens de jaren 1970 leidden parallelle ontwikkelingen in de studie van faseovergangen in de vastestoffysica Kadanoff, Fisher en Wilson (voortbouwend op werk van Stueckelberg, Peterman, Gell-Mann en Low) tot een nieuwe kijk en nieuwe methoden die renormalisatiegroep heten. Ze gaven een beter fysisch inzicht in de procedure van renormalisatie die in de jaren 1940 is uitgevonden. Deze renormalisatiegroep gaf de aanleiding tot wat de "grote synthese" van de theoretische natuurkunde werd genoemd, de vereniging van kwantumveldentheoretische technieken gebruikt in deeltjesfysica en in vastestoffysica in een enkel theoretisch kader.

De studie van kwantumveldentheorie is volop in ontwikkeling en er zijn veel toepassingen van haar methodes op fysische problemen. Ze blijft de meest bloeiende tak van de theoretische natuurkunde van vandaag door het leveren van een gemeenschappelijke taal aan heel wat takken van de fysica.

Principes van kwantumveldentheorie

Klassieke en kwantumvelden

De kwantummechanica is, in haar meest algemene formulering, een theorie van abstracte operatoren (observabelen) die inwerken op een abstracte toestandsruimte (de Hilbertruimte). De observabelen stellen fysisch waarneembare grootheden voor en de toestandsruimte bevat alle mogelijke toestanden van het systeem onder beschouwing. Elke observabele komt overeen met het klassieke idee van een vrijheidsgraad. Zo zijn, bijvoorbeeld, de fundamentele observabelen geassocieerd met de beweging van een enkel kwantumdeeltje de positie- en de impulsoperatoren \hat{x} en \hat{p} . De gewone kwantummechanica handelt over zulke systemen, die een beperkt aantal vrijheidsgraden bezitten.

(Op dit punt is het belangrijk op te merken dat dit artikel het woord "deeltje" niet gebruikt in de context van de dualiteit van golven en deeltjes. In kwantumveldentheorie is "deeltje" een generieke benaming voor alle discrete kwantummechanische entiteiten, zoals een elektron, die zich onder verschillende experimentele regimes kunnen gedragen als klassieke deeltjes of golven.)

Een **kwantumveld** is een kwantummechanisch systeem dat een groot, mogelijk oneindig groot, aantal vrijheidsgraden bevat. Dit is niet zo exotisch als het zou lijken. Een klassiek veld bezit een verzameling vrijheidsgraden in elk punt van de ruimte. Het klassieke elektromagnetisch veld bestaat bijvoorbeeld uit twee vectoren — het elektrische en het magnetische veld — die in principe verschillende waarden kunnen aannemen in elk punt van de ruimte. Wanneer het veld in zijn geheel wordt beschouwd als een kwantumsysteem, heeft het een oneindige verzameling observabelen (zelfs een niet-aftelbare verzameling), aangezien er oneindig veel punten in de ruimte zijn.

Daarnaast zijn de vrijheidsgraden in een kwantumveld geordend in "herhaalde" verzamelingen. De vrijheidsgraden in een elektromagnetisch veld, bijvoorbeeld, kunnen worden gegroepeerd volgens de positie \mathbf{r} met exact twee vectoren voor iedere positie \mathbf{r} . Merk op dat \mathbf{r} een gewoon getal is dat de observabelen "nummert"; het moet niet worden verward met de positieoperator $\hat{\mathbf{r}}$ die men heeft in gewone kwantummechanica en die zelf een observabele is. (Gewone kwantummechanica wordt hierom soms "nul-dimensionale kwantumveldentheorie" genoemd, aangezien ze slechts een enkele verzameling observabelen bezit.) Het is ook belangrijk op te merken dat er niets bijzonders is aan \mathbf{r} , aangezien er meerdere manieren zijn om de vrijheidsgraden te "nummeren".

De volgende paragrafen zullen uiteenzetten hoe deze ideeën kunnen worden gebruikt voor de constructie van een kwantummechanische theorie met de gewenste eigenschappen. We zullen dit aanvangen met de uitleg van de

kwantummechanica van een enkel deeltje en de bijbehorende eigenschappen van de mechanica van veel deeltjes. Vervolgens zullen we, met behulp van een "nummering" van de vrijheidsgraden van het veeldeeltjesprobleem, een kwantumveld opbouwen en zijn implicaties bestuderen.

Kwantummechanica van één en veel deeltjes

In de gewone kwantummechanica is de tijdsafhankelijke Schrödingervergelijking die de beweging van een enkel niet-relativistisch deeltje beschrijft:

$$\left[\frac{|\mathbf{p}|^2}{2m} + V(\mathbf{r}) \right] |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle$$

waar m de massa van het deeltje is, V de potentiaal die wordt aangelegd en $|\psi\rangle$ de kwantumtoestand (we gebruiken bra-ketnotatie).

We wensen te bekijken hoe dit probleem te veralgemenen voor N deeltjes. Er zijn twee redenen om zulk een veeldeeltjesprobleem te beschouwen. Ten eerste is dit nodig in de vastestoffysica, waar het typische aantal deeltjes van de orde van de constante van Avogadro ($6,022\,141\,5 \times 10^{23}$) is. Een tweede motivatie komt van de deeltjesfysica en de wens om de effecten van speciale relativiteit in de theorie te brengen. Indien men de relativistische rustenergie in de bovenstaande vergelijking probeert te brengen, is het resultaat ofwel de Klein-Gordon-, ofwel de Diracvergelijking. Deze vergelijkingen hebben echter enkele imperfecties. Ze bezitten bijvoorbeeld eigenwaarden die lopen tot aan $-\infty$, zodat er geen eenvoudige definitie schijnt te zijn van een grondtoestand. Blijkt dat deze inconsistenties vloeien uit de verwaarlozing van de mogelijkheid tot de dynamische creatie of vernietiging van deeltjes, wat een cruciaal aspect van de relativiteit is. Einsteins beroemde massa-energiere relatie $E = m c^2$ voorspelt dat voldoende massieve deeltjes kunnen vervallen tot lichter deeltjes, en voldoende energetische deeltjes kunnen samenbundelen tot de vorming van massieve deeltjes. Zo kunnen, bijvoorbeeld, een elektron en een positron annihileren tot fotonen. Een consistente relativistische kwantumtheorie moet dus worden geformuleerd als een veeldeeltjestheorie.

Verder zullen we onderstellen dat de N deeltjes ononderscheidbaar zijn. Dit impliceert dat de toestand van het gehele systeem ofwel symmetrisch (voor bosonen) of antisymmetrisch (voor fermionen) moet zijn wanneer de coördinaten van twee deeltjes worden verwisseld. Deze veeldeeltjestoestanden zijn eerder ingewikkeld om neer te schrijven. De algemene kwantumtoestand van een systeem van N bosonen, bijvoorbeeld, gaat als:

$$|\phi_1 \cdots \phi_N\rangle = \sqrt{\frac{\prod_j N_j!}{N!}} \sum_{p \in \mathcal{S}_N} |\phi_{p(1)}\rangle \cdots |\phi_{p(N)}\rangle$$

waar $|\phi\rangle$ de eendeeltjestoestanden zijn, N_j is het aantal deeltjes op toestand j en de som wordt genomen over alle mogelijk permutaties p van N elementen. In het algemeen is dit een som van $N!$ (N faculteit) verschillende termen, wat al snel onhandelbaar wordt voor grotere waarden van N . Om dit probleem te vereenvoudigen, veranderen we dit in een kwantumveldentheorie.

Tweede kwantisatie

In deze paragraaf zullen we een methode voor de opbouw van een kwantumveldentheorie bespreken die **tweede kwantisatie** wordt genoemd. Dit houdt in dat een manier moet worden gekozen om de kwantumvrijheidsgraden in de ruimte van veeldeeltjestoestanden te indexeren. Het is gebaseerd op het Hamiltoniaanse formalisme van de kwantummechanica; er bestaan andere aanpakken, zoals het padintegraalformalisme van Feynman die een Lagrangiaanse formulering gebruikt.

Tweede kwantisatie van bosonen

Voor de eenvoud zullen we beginnen met de behandeling van tweede kwantisatie voor bosonen, die symmetrische kwantumtoestanden vormen. Zij $|\varphi_1\rangle$, $|\varphi_2\rangle$, $|\varphi_3\rangle$ enzovoort onderling orthogonale eendeeltjestoestanden. De drie-eeltjestoestand, bijvoorbeeld, met één deeltje in toestand $|\varphi_1\rangle$ en twee in toestand $|\varphi_2\rangle$ wordt dan

$$\frac{1}{\sqrt{3}} [|\phi_1\rangle|\phi_2\rangle|\phi_2\rangle + |\phi_2\rangle|\phi_1\rangle|\phi_2\rangle + |\phi_2\rangle|\phi_2\rangle|\phi_1\rangle].$$

De eerste stap in tweede kwantisatie is het uitdrukken van deze kwantumtoestanden in termen van **bezettingsgetallen** door het opsommen van het aantal deeltjes in elke eendeeltjestoestand $|\varphi_1\rangle$, $|\varphi_2\rangle$ enzovoort. Dit is niet meer dan een nieuwe manier om de toestanden te labelen. De toestand hierboven wordt dan bijvoorbeeld

$$|1, 2, 0, 0, 0, \dots\rangle.$$

De volgende stap bestaat uit het uitbreiden van de ruimte van N -deeltjestoestanden totdat ze de toestanden voor alle mogelijke waarden van N bevat. Deze uitgebreide ruimte, genaamd Fockruimte, is samengesteld uit de toestandsruimte van een systeem zonder deeltjes (de zogenaamde vacuümtoestand), plus de toestandsruimte van een eendeeltjessysteem, plus de toestandsruimte van een tweedeeltjessysteem enzovoort. Het is eenvoudig in te zien dat er een eenduidig verband bestaat tussen de representatie met bezettingsgetallen en de geldige bosontoestanden in de Fockruimte.

Op dit punt gekomen is het kwantummechanisch systeem verworpen tot een kwantumveld in de betekenis die hiervoor werd beschreven. De elementaire vrijheidsgraden van het veld zijn de bezettingsgetallen en elk bezettingsgetal wordt geïndexeerd door een getal j dat aanduidt op welke eendeeltjestoestand $|\varphi\rangle$ het betrekking heeft.

De eigenschappen van dit kwantumveld kunnen worden onderzocht door het definiëren van creatie- en annihilatieoperatoren. Deze voegen een deeltje toe respectievelijk nemen er een weg. Ze zijn analoog met de "ladder operatoren" bij de kwantummechanische beschrijving van de harmonische oscillator, waar deze een energiekwantum toevoegen of wegnemen. In onze setting, echter, zijn het deeltjes met een gegeven kwantumtoestand die worden gecreëerd of vernietigd. De bosonische annihilatieoperatoren a_2 en de creatieoperatoren a_2^\dagger bezitten de volgende werking:

$$a_2 |N_1, N_2, N_3, \dots\rangle = \sqrt{N_2} |N_1, (N_2 - 1), N_3, \dots\rangle,$$

$$a_2^\dagger |N_1, N_2, N_3, \dots\rangle = \sqrt{N_2 + 1} |N_1, (N_2 + 1), N_3, \dots\rangle.$$

Men kan bewijzen dat ze operatoren zijn in de kwantummechanische betekenis, dus lineaire operatoren die inwerken op de Fockruimte. Daarbij zijn ze elkaars Hermitisch toegevoegde, wat de gebruikte notatie rechtvaardigt. Men kan bewijzen dat ze voldoen aan de volgende commutatierelaties:

$$[a_i, a_j] = 0 \quad , \quad [a_i^\dagger, a_j^\dagger] = 0 \quad , \quad [a_i, a_j^\dagger] = \delta_{ij},$$

waar δ de Kroneckerdelta voorstelt. Dit zijn juist de relaties waaraan de ladderoperatoren voor een oneindige verzameling onafhankelijke kwantummechanische harmonische oscillatoren voldoen, een voor elke eendeeltjestoestand. Een boson toevoegen of wegnemen is dus analoog aan het exciteren of desexciteren van een energiekwantum in een harmonische oscillator.

De Hamiltoniaan van het kwantumveld (die, via de Schrödingervergelijking, de dynamica bepaald) kan worden geschreven in termen van creatie- en annihilatieoperatoren. De Hamiltoniaan van een veld van vrije (niet-interagerende) bosonen is

$$H = \sum_k E_k a_k^\dagger a_k,$$

waar E_k de energie van de k 'de eendeeltjes-energieëigentoestand is. Merk op dat

$$a_k^\dagger a_k |\dots, N_k, \dots\rangle = N_k |\dots, N_k, \dots\rangle.$$

Tweede kwantisatie van fermionen

Voor de beschrijving van fermionen blijkt dat een andere definitie van creatie- en annihilatieoperatoren moet worden gebruikt. Volgens het uitsluitingsprincipe van Pauli kunnen er geen twee fermionen dezelfde kwantumtoestand bezetten. Hierom kunnen de bezettingsgetallen N_i enkel de waarden 0 en 1 aannemen. De fermionische annihilatieoperatoren c en creatieoperatoren c^\dagger worden gedefinieerd door

$$\begin{aligned} c_j |N_1, N_2, \dots, N_j = 0, \dots\rangle &= 0 \\ c_j |N_1, N_2, \dots, N_j = 1, \dots\rangle &= (-1)^{(N_1 + \dots + N_{j-1})} |N_1, N_2, \dots, N_j = 0, \dots\rangle \\ c_j^\dagger |N_1, N_2, \dots, N_j = 0, \dots\rangle &= (-1)^{(N_1 + \dots + N_{j-1})} |N_1, N_2, \dots, N_j = 1, \dots\rangle \\ c_j^\dagger |N_1, N_2, \dots, N_j = 1, \dots\rangle &= 0 \end{aligned}$$

Ze voldoen aan anticommutatierelaties:

$$\{c_i, c_j\} = 0 \quad , \quad \{c_i^\dagger, c_j^\dagger\} = 0 \quad , \quad \{c_i, c_j^\dagger\} = \delta_{ij}$$

Men merke hieruit op dat het tweemaal laten inwerken van een fermionische creatieoperator nul geeft. Het is dus onmogelijk om twee deeltjes in dezelfde eendeeltjestoestand te vinden, conform het uitsluitingsprincipe.

Veldoperatoren

Er werd al opgemerkt dat er meer dan één manier kan zijn om de vrijheidsgraden in een kwantumveld te "nummeren". Tweede kwantisatie indexeert de velden door hun eendeeltjes-kwantumtoestanden te nummeren. Het is echter natuurlijker om over een "veld", zoals het elektromagnetische veld, te spreken als een verzameling vrijheidsgraden met de positie als index.

Hiertoe kunnen we *veldoperatoren* definiëren, die deeltjes creëren of vernietigen op een zeker punt in de ruimte. In de deeltjesfysica blijken deze operatoren handiger om mee te werken. Ze zijn namelijk gemakkelijk bij het formuleren van theorieën die voldoen aan de eisen van de relativiteitstheorie.

Eendeeltjestoestanden worden gewoonlijk geïndexeerd volgens hun impuls. We kunnen veldoperatoren opbouwen door een Fouriertransformatie toe te passen op de creatie- en annihilatieoperatoren van deze toestanden. De bosonische veld-annihilatieoperator $\varphi(\mathbf{r})$ is bijvoorbeeld

$$\phi(\mathbf{r}) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_j e^{i\mathbf{k}_j \cdot \mathbf{r}} a_j$$

De bosonische veldoperatoren voldoen aan de commutatierelatie

$$[\phi(\mathbf{r}), \phi(\mathbf{r}')] = 0 \quad , \quad [\phi^\dagger(\mathbf{r}), \phi^\dagger(\mathbf{r}')] = 0 \quad , \quad [\phi(\mathbf{r}), \phi^\dagger(\mathbf{r}')] = \delta^3(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$$

waar $\delta(x)$ de Diracdeltafunctie voorstelt. Zoals voordien zijn de fermionische relaties dezelfde, maar met anticommutatoren in de plaats van commutatoren.

Het moet worden opgemerkt dat de veldoperatoren níét hetzelfde zijn als de eendeeltjes-golffunctie. De eerste is een operator die inwerkt op de Fockruimte, de tweede is een scalair veld. Ze zijn echter nauw verwant en ze worden gewoonlijk met hetzelfde symbool aangeduid. Gaan we bijvoorbeeld uit van een Hamiltoniaan in de ruimtelijke voorstelling:

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m} \sum_i \nabla_i^2 + \sum_{i < j} U(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|)$$

waar i en j lopen over alle deeltjes, dan is de veldentheoretische Hamiltoniaan

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m} \int d^3r \phi^\dagger(\mathbf{r}) \nabla^2 \phi(\mathbf{r}) + \int d^3r \int d^3r' \phi(\mathbf{r})^\dagger \phi(\mathbf{r}')^\dagger U(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) \phi(\mathbf{r}') \phi(\mathbf{r})$$

Dit lijkt veel op de uitdrukking van de verwachtingswaarde van de energie, met φ die de rol van golffunctie speelt. Deze relatie tussen veldoperatoren en golffuncties maakt het gemakkelijk om veldentheorieën op te bouwen met

ruimtelijke Hamiltonianen als uitgangspunt.

Implicaties van kwantumveldentheorie

Unificatie van velden en deeltjes

De procedure van "tweede kwantisatie" die in de vorige paragraaf werd beschreven, vertrekt van een verzameling eendeeltjestoestanden. Soms is het onmogelijk zulke toestanden te definiëren en moet men onmiddellijk beginnen met de kwantumveldentheorie. Een kwantumtheorie van het elektromagnetische veld, bijvoorbeeld, móét een kwantumveldentheorie zijn, aangezien het (om velerlei redenen) onmogelijk is een golf functie te definiëren voor een enkel foton. In zulke gevallen kan de kwantumveldentheorie worden opgebouwd door een studie van de mechanische eigenschappen van het klassieke veld en door het gissen van de corresponderende kwantumtheorie. De kwantumveldentheorieën die op deze manier worden verkregen, hebben dezelfde eigenschappen als die verkregen door tweede kwantisatie, zoals goed gedefinieerde creatie- en annihilatieoperatoren die voldoen aan commutatie- of anticommutatierelaties.

Kwantumveldentheorie levert dus een verenigd kader voor de beschrijving van "veldachtige" objecten (zoals het elektromagnetische veld, waar de excitaties fotonen van zijn) en "deeltjesachtige" objecten (zoals elektronen, die worden behandeld als de excitaties van een onderliggend elektronveld).

Fysische betekenis van ononderscheidbaarheid van deeltjes

Essentieel voor tweede kwantisatie is de aanname dat de deeltjes niet onderscheidbaar zijn. Het is niet mogelijk een kwantumveldentheorie op te bouwen uitgaand van onderscheidbare deeltjes, aangezien hun vrijheidsgraden niet te scheiden en te indexeren zijn.

Heel wat natuurkundigen nemen de omgekeerde interpretatie aan: "Kwantumveldentheorie verklaart wat identieke deeltjes zijn." In gewone kwantummechanica is er weinig reden voor het gebruik van symmetrische (bosonische) of antisymmetrische (fermionische) toestanden, en het feit dat dit zo hoort, wordt beschouwd als een empirisch gegeven. Vanuit het standpunt van kwantumveldentheorie zijn deeltjes enkel identiek als ze excitaties zijn van hetzelfde onderliggende kwantumveld. De vraag "Waarom zijn alle elektronen identiek?" vloeit dus voort uit het foutieve beeld van elektronen als fundamentele objecten, terwijl het eigenlijk het elektronveld is dat fundamenteel is.

Behoud en niet-behoud van deeltjes

Bij de tweede kwantisatie vertrokken we van een Hamiltoniaan en een toestandenruimte die een vast aantal deeltjes (N) beschreven, en we eindigden met een Hamiltoniaan en een toestandenruimte voor een willekeurig aantal deeltjes. In heel wat situaties is N uiteraard een belangrijke en welgedefinieerde grootte, zoals wanneer we een gas van atomen in een vat beschrijven. Vanuit het gezichtspunt van kwantumveldentheorie worden zulke situaties beschreven door kwantumtoestanden die eigentoestanden van de aantallenoperator \hat{N} , die het aantal aanwezig deeltjes telt. Zoals met elke kwantummechanische observabele, geeft deze operator een behouden grootte indien hij commuteert met de Hamiltoniaan. In dat geval zit de kwantumtoestand "gevangen" in de subruimte van de Fockruimte met N deeltjes, en de situatie had net zo goed kunnen worden beschreven met gewone N -deeltjes-kwantummechanica.

Men kan bijvoorbeeld zien dat de Hamiltoniaan van het vrije boson die hierboven wordt beschreven, deeltjesaantal behoudt. Wanneer de Hamiltoniaan op een toestand inwerkt, zal elk deeltje dat wordt vernietigd door een annihilatieoperator a_k onmiddellijk worden teruggeplaatst door de creatieoperator a_k^\dagger .

Aan de andere kant is het mogelijk, en zelfs gangbaar, om kwantumtoestanden tegen te komen die géén eigentoestanden zijn van \hat{N} , die geen welgedefinieerd deeltjesaantal hebben. Zulke toestanden zijn moeilijk of zelfs onhandelbaar met gewone kwantummechanica, maar in kwantumveldentheorie kunnen ze eenvoudig worden beschreven als superposities van toestanden met verschillende N . Hebben we, bijvoorbeeld, een bosonisch veld waarvan de deeltjes kunnen worden gecreëerd of vernietigd door interactie met een fermionisch veld. De

Hamiltoniaan van het gecombineerde systeem zou worden gegeven door de Hamiltoniaan van het vrije boson- en het vrije fermionveld plus een "potentiële energie"-term zoals

$$H_I = \sum_{k,q} V_q (a_q + a_{-q}^\dagger) c_{k+q}^\dagger c_k,$$

waar a_k^\dagger en a_k de bosonische creatie- en annihilatieoperatoren, c_k^\dagger en c_k de fermionische creatie- en annihilatieoperatoren en V_q een parameter voor de beschrijving van de sterkte van de interactie zijn. Deze "interactieterm" beschrijft processen waarin een fermion in toestand k een boson absorbeert of uitzendt, waarbij het fermion overgaat naar een toestand $k + q$. (In feite wordt dit type Hamiltoniaan gebruikt bij de beschrijving van de interactie tussen geleidingselektronen en fononen in metalen. De interactie tussen elektronen en fotonen wordt op gelijkaardige wijze beschreven, maar is een ietwat ingewikkelder door de rol van spin.) Er kan nog worden opgemerkt dat het mogelijk is te starten in een toestand met een vast aantal bosonen en op een later tijdstip typisch te eindigen in een superpositie van toestanden met verschillende aantallen bosonen. Het aantal fermionen is, in dit geval, echter behouden.

In vastestoffysica zijn toestanden met ongedefinieerd aantal deeltjes bijzonder belangrijk voor de beschrijving van verschillende soorten superfluiditeit. Veel van de belangrijkste eigenschappen van superfluide vloeistoffen zijn te wijten aan het feit dat hun kwantumtoestand een superpositie is van toestanden met verschillende deeltjesaantallen.

Axiomatische aanpakken

De voorgaande beschrijving van kwantumveldentheorie volgt de geest volgens dewelke de meeste natuurkundigen het onderwerp benaderen. Dit is echter niet wiskundig rigoureuus. De laatste decennia zijn verschillende pogingen gedaan om kwantumveldentheorie op een degelijke wiskundige basis te plaatsen door er een set axioma's voor te formuleren. Deze pogingen kunnen worden gebundeld in twee klassen.

De eerste klasse axioma's, voor het eerst voorgesteld in de jaren 1950, omvat de Wightman-, Osterwalder-Schrader- en Haag-Kastler-systemen. Zij trachtten de fysische notie van een "operatorwaardig veld" te formaliseren in de context van de functionaalanalyse en ze bereikten een zeker succes. Het was mogelijk te bewijzen dat elke kwantumveldentheorie die voldoet aan deze axioma's eveneens voldoet aan enkele algemene theorema's, zoals het spin-statistiektheorema en CPT-symmetrie. Het bleek spijtig genoeg echter ongelooflijk moeilijk om te bewijzen dat enkele realistische kwantumveldentheorieën zoals het Standaardmodel aan deze axioma's voldoen. De meeste theorieën die konden worden behandeld met deze analytische axioma's, waren fysisch triviaal; ze waren beperkt tot lage dimensies en ze toonden geen interessante dynamica. De constructie van theorieën die aan een van de sets axioma's voldoen, behoort tot de zogenaamde constructieve kwantumveldentheorie. Belangrijk werd in dat gebied werd in de jaren 1970 verricht door Segal, Glimm, Jaffe en anderen.

In de jaren 1980 werd een nieuwe verzameling axioma's voorgesteld, nu gebaseerd op meetkundige ideeën. Dit onderzoek, dat zijn aandacht beperkt tot een bijzondere klasse van kwantumveldentheorie genaamd topologische kwantumveldentheorieën, is opgebouwd door Atiyah en Segal en uitgebreid door Witten, Borchers, en Kontsevitsj. De meeste fysisch relevante kwantumveldentheorieën, zoals het Standaardmodel, zijn echter geen topologische kwantumveldentheorieën; de kwantumveldentheorie van het fractionele kwantum-Hall-effect is een belangrijke uitzondering. De impact van axiomatische topologische kwantumveldentheorie was het grootst in de wiskunde, met belangrijke toepassingen in representatietheorie, algebraïsche topologie en differentiaalmeetkunde.

Het vinden van de juiste axioma's voor kwantumveldentheorie is nog steeds een open en moeilijk wiskundig probleem. Een van de Millenniumprijsproblemen —het bewijs van het bestaan van een mass-gap in Yang-Mills ijtheorie— houdt hiermee verband.

Fenomenen gelinkt met kwantumveldentheorie

In het voorgaande hebben we de algemene kenmerken van kwantumveldentheorieën beschreven. Sommige van de theorieën die worden bestudeerd in de verschillende takken van de theoretische natuurkunde, bezitten nog specifieke bijzonderheden, zoals renormaliseerbaarheid, ijsymmetrie en supersymmetrie. Deze worden beschreven in de volgende paragrafen.

Renormalisatie

➤ *Zie Renormalisatie voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Al vroeg in de geschiedenis van de kwantumveldentheorie werd vastgesteld dat veel schijnbaar onschuldige berekeningen, zoals de perturbatieve verschuiving van de energie van een elektron in de aanwezigheid van een elektromagnetisch veld, oneindige resultaten geven. Veel van deze problemen stonden in verband met zwakke punten van de klassieke elektrodynamica die al waren gevonden (maar niet opgelost) in de 19e eeuw. Ze vloeien voort uit het feit dat veel zogezegde "intrinsieke" eigenschappen van een elektron nauw gelinkt zijn met het elektromagnetische veld waarmee het interageert. Om dit te illustreren, is het nodig zich te herinneren dat een interactie-Hamiltoniaan, zoals die die de interactie beschrijft tussen een elektron en het elektromagnetische veld, geen deeltjes hoeft te behouden. Indien we dus starten met een enkel elektron en geen fotonen, zal de kwantumtoestand snel evolueren tot een superpositie van toestanden die één of meerdere fotonen kunnen bevatten. Hierom is de energie van een "enkel" elektron —zijn zelfenergie— niet gewoon de "naakte" waarde, maar ook de som van de energie die in de wolk van vergezellende fotonen zit. Wanneer deze energie wordt berekend, vindt men dat de bijdrage van fotonen met willekeurig hoge energieën (of, equivalent, willekeurig korte golflengten) leidt tot een oneindige waarde.

De oplossing van dit probleem, eerst gegeven door Schwinger, wordt renormalisatie genoemd. De idee is om een "cutoff" op te leggen voor de fotonische bijdrage, bijvoorbeeld door te stellen dat fotonen geen energie kunnen hebben boven een extreem hoge waarde. Elke grootheid die we wensen te berekenen, zoals de rustenergie, is nu eindig maar afhankelijk van de cutoff. We herschrijven de resultaten dan in termen van fysisch waarneembare grootheden, zoals de waargenomen elektronmassa, in de plaats van niet-waarneembare grootheden, zoals de cutoff-energie en de "naakte" elektronmassa. Het uiteindelijke resultaat is onafhankelijk van de details van de cutoff-procedure, inclusief de waarde van de cutoff-energie, op voorwaarde dat de relevante processen gebeuren bij energieën voldoende onder de cutoff.

De renormalisatieprocedure werkt enkel voor een zekere klasse van kwantumveldentheorieën. Deze worden **renormaliseerbare kwantumveldentheorieën** genoemd. Het Standaardmodel van de deeltjesfysica is renormaliseerbaar, zoals zijn deeltheorieën (kwantumelektrodynamica/elektrozwakke theorie en kwantumchromodynamica). Volgens de theorie van de renormalisatiegroep is elke renormaliseerbare theorie een unieke limiet voor lage energie (een zogenaamde "effectieve" veldentheorie) voor een breed gamma aan hoge-energie-theorieën. Renormaliseerbare theorieën zijn daarom onafhankelijk van de exacte aard van de onderliggende hoog-energetische fenomenen.

Ijkvrijheid

Een ijktheorie is een theorie die een symmetrie toelaat met een lokale parameter. In elke kwantumtheorie is bijvoorbeeld de fase van de golffunctie willekeurig en beschrijft deze dus niets fysisch. De theorie is dus invariant onder een globale verandering van fasen (i.e. het toevoegen van een constante aan alle fasen van alle golffuncties). In kwantumelektrodynamica is the theorie ook invariant onder *lokale* veranderingen in fase; men kan dus de fasen van alle golffuncties veranderen en deze verandering kan op elk punt van de ruimte anders zijn. Dit is een lokale symmetrie. Om een goedgedefinieerde afleidingsoperator te kunnen hebben, echter, moet een nieuw veld worden ingevoerd, het ijkveld, die eveneens transformeert onder de lokale verandering van fase, opdat de totale verandering

de afleiding niet zou beïnvloeden. In kwantumelektrodynamica is dit ijkveld het elektromagnetische. De lokale verandering van variabelen heet een ijktransformatie.

In kwantumveldentheorie stellen de excitaties van het veld deeltjes voor. Het deeltje geassocieerd met de excitatie van een ijkveld heten ijkbosonen, en dit is het foton in het geval van kwantumelektrodynamica.

De vrijheidsgraden van een kwantumveldentheorie zijn lokale fluctuaties van het veld. Het bestaan van een ijksymmetrie herleidt het aantal vrijheidsgraden, gewoon door het feit dat sommige fluctuaties kunnen worden getransformeerd tot nul door een ijktransformatie. Zij zijn dus gelijkwaardig met helemaal geen fluctuaties. Deze fluctuaties worden doorgaans "onfysische vrijheidsgraden" of "artefacten van de ijk" genoemd; gewoonlijk hebben sommigen onder hen een negatieve norm, zodat ze ongeschikt zijn voor een consistente theorie. Hierom zal de gekwantiseerde versie van een klassieke veldentheorie met ijksymmetrie deze symmetrie eveneens bezitten. Een ijksymmetrie kan met andere woorden geen anomalie hebben. Indien een ijksymmetrie een anomalie heeft (en dus wordt gebroken in de kwantumtheorie), is de theorie niet consistent. In kwantumelektrodynamica, bijvoorbeeld, zou een ijk-anomalie het opduiken van een longitudinale polarisatie en van een polarisatie in een tijdsrichting hebben geëist; deze laatste heeft een negatieve norm, zodat de theorie inconsistent wordt; een andere mogelijkheid is dat deze fotonen enkel in intermediaire processen zouden opduiken en niet in de uiteindelijk reactieproducten, maar dit zou de theorie niet-unitair en dus weer inconsistent hebben gemaakt.

In het algemeen kunnen de ijktransformaties van een theorie bestaan uit verschillende transformaties, die niet noodzakelijk hoeven te commuteren. Deze transformaties worden dan samen beschreven met een wiskundig object genaamd een ijkgroep. Infinitesimale ijktransformaties zijn de generatoren van de ijkgroep. Het aantal ijkbosonen is hierom de dimensie van de groep (het aantal generatoren dat een basis vormt).

Alle fundamentele natuurkrachten worden beschreven door ijktheorieën. Deze zijn:

- Kwantumelektrodynamica, waarvan de ijktransformaties lokale veranderingen van fase zijn, zodat de ijkgroep $U(1)$ is. Het ijkboson is het foton.
- Kwantumchromodynamica, waarvan de ijkgroep $SU(3)$ is. De ijkbosonen zijn de acht gluonen.
- De elektro-zwakke interactie, waarvan de ijkgroep $U(1) \times SU(2)$ is.
- De zwaarte kracht, waarvan de klassieke theorie, de algemene relativiteitstheorie, een equivalentieprincipe toelaat dat de vorm van een ijksymmetrie heeft.

Supersymmetrie

Supersymmetrie onderstelt dat elk fundamenteel fermion een superpartner heeft die een boson is en omgekeerd. Dit is geïntroduceerd om het zogenaamde Hiërarchieprobleem op te lossen: waarom deeltjes die niet worden beschermd door de een of andere symmetrie (zoals het higgsboson) geen stralingscorrecties krijgen zodat hun massa's naar de grote schalen (GUT, Planck...) worden gedreven. Het werd al vlug ontdekt dat supersymmetrie andere interessante eigenschappen heeft: haar ijkversie is een uitbreiding van de algemene relativiteit (Superzwaarte kracht) en ze is een basisingrediënt voor de consistentie van snaartheorie.

De manier waarop supersymmetrie de hiërarchieën beschermt is: aangezien er voor elk deeltje een superpartner bestaat met dezelfde massa, wordt elke lus in een stralingscorrectie gecancelled door de lus met de corresponderende superpartner, zodat de theorie UV-eindig wordt.

Aangezien er nog geen superpartners zijn waargenomen, moet supersymmetrie (indien het bestaat) worden gebroken (door een zogenaamde zachte term, die supersymmetrie breekt zonder haar goede kanten kapot te maken). Het meest eenvoudige model van zulk een breking vereist dat de energieën van de superpartners niet te hoog zijn. In dat geval verwacht men supersymmetrie te kunnen observeren bij experimenten met de LHC.

Aangeraden literatuur

(Alle in het Engels.)

- Wilczek, Frank ; *Quantum Field Theory*, Review of Modern Physics 71 (1999) S85-S95. Overzichtsartikel geschreven door een van de meesters van Q.C.D., *Nobelprijswinnaar 2003* ^[1]. Volledige tekst te krijgen op: hep-th/9803075 ^[2]
- Ryder, Lewis H. ; *Quantum Field Theory* (Cambridge University Press, 1985), [ISBN 0-521-33859-X]. Inleiding tot relativistische KVT voor deeltjesfysica.
- Zee, Anthony ; *Quantum Field Theory in a Nutshell*, Princeton University Press (2003) [ISBN 0-691-01019-6].
- Peskin, M and Schroeder, D. ; *An Introduction to Quantum Field Theory* (Westview Press, 1995) [ISBN 0-201-50397-2]
- Weinberg, Steven ; *The Quantum Theory of Fields* (3 boekdelen) Cambridge University Press (1995). Een monumentaal werk over KVT geschreven door een expert in het veld, *Nobelprijswinnaar 1979* ^[3].
- Loudon, Rodney ; *The Quantum Theory of Light* (Oxford University Press, 1983), [ISBN 0-19-851155-8]
- Greiner, Walter and Müller, Berndt. *Gauge Theory of Weak Interactions*, Springer. ISBN 3-540-67672-4, 2000
- Frampton Paul, *Gauge Field Theories*, Frontiers in Physics, Addison-Wesley (1986), Second Edition, Wiley (2000).
- Kane, Gordon. *Modern Elementary Particle Physics*, Perseus Books. ISBN 0-201-11749-5, 1987

Externe links

- ^(en) Siegel, Warren ; *Fields* ^[4] (ook te vinden op arXiv:hep-th/9912205)
- ^(en) 't Hooft, Gerard, *The Conceptual Basis of Quantum Field Theory*, Handbook of the Philosophy of Science, Elsevier (nog te publiceren). Overzichtsartikel geschreven door een meester in ijktheorieën, 1999 ^[5]. Volledige tekst te verkrijgen in [6].
- ^(en) Srednicki, Mark ; *Quantum Field Theory* ^[7]
- ^(en) Kuhlmann, Meinard ; *Quantum Field Theory* ^[8], Stanford Encyclopedia of Philosophy
- ^(en) Handboeken over kwantumveldentheorie: een lijst ^[9]
- ^(nl) Een Nederlandse introductie First Encounter ^[10]

Referenties

- [1] <http://nobelprize.org/physics/laureates/2004/wilczek-autobio.html>
- [2] <http://fr.arxiv.org/abs/hep-th/9803075>
- [3] <http://nobelprize.org/physics/laureates/1979/weinberg-lecture.html>
- [4] <http://insti.physics.sunysb.edu/%7Eesiegel/errata.html>
- [5] <http://nobelprize.org/physics/laureates/1999/thoof-autobio.html>"Nobelprijswinnaar
- [6] <http://www.phys.uu.nl/~thoof/lectures/basisqft.pdf>"pdf"
- [7] <http://gabriel.physics.ucsb.edu/~mark/qft.html>
- [8] <http://plato.stanford.edu/entries/quantum-field-theory/>
- [9] <http://motls.blogspot.com/2006/01/qft-didactics.html>
- [10] http://www.cwi.nl/~haverkort/documents/FE2_Quantumveldentheorie.pdf

Ladingconjugatie

Ladingconjugatie is de transformatie van deeltjes in hun antideeltjes. Als er sprake is van een symmetrie zijn de fysische wetten dus symmetrisch onder deze transformatie, dit wordt C-symmetrie van *charge conjugation* genoemd.

De Maxwell vergelijkingen zijn invariant onder deze transformatie.

$$C(\rho) = -\rho$$

$$C(\vec{J}) = -\vec{J}$$

$$C(\vec{E}) = -\vec{E}$$

$$C(\vec{B}) = -\vec{B}$$

Onder de combinatie van deze transformaties blijven de fysische eigenschappen gelijk, de dynamica verandert niet.


Aangezien enkel de massa van deeltjes invloed heeft op de gravitatiekracht, is de gravitatiekracht invariant onder ladingconjugatie.

Deze symmetrie geldt dus voor elektromagnetisme en de gravitatiekracht, het geldt ook voor de sterke wisselwerking, maar niet voor de zwakke wisselwerking.

Lagetemperatuurfysica

Lagetemperatuurfysica is de fysica bij lage temperatuur, dus dicht bij het absolute nulpunt van nul kelvin.

Het belangrijke is, dat de Bose-Einsteinstatistiek en de Fermi-Diracverdeling bij lage temperatuur effecten van kwantummechanica gaan vertonen. Zo treden verschijnselen als supergeleiding en superfluiditeit op.

<p><i>Geplaast</i> op: 06-04-2007</p>	<p><i>Dit artikel is een beginnetje over natuurkunde. U wordt uitgenodigd op bewerken ^[1] te klikken om uw kennis aan dit artikel toe te voegen.</i></p>	
---	--	---

Referenties

[1] <http://en.wikipedia.org/wiki:Lagetemperatuurfysica>

Laserkoeling

Laserkoeling is een koeltechniek die gebruik maakt van lasers om in een gas ultralage temperaturen te bereiken. Het waren de ontwikkelingen in de jaren tachtig op dit gebied die ten grondslag lagen aan de creatie van de eerste Bose-Einsteincondensaten in 1995. De eenvoudigste vorm van laserkoeling is de zogenaamde *optische molasse*.

Het idee achter de techniek

Laserkoeling steunt in essentie op een drietal aspecten van de fysische wereld:

1. De snelheden van de deeltjes van een gas zijn verdeeld volgens een welbepaalde statistische verdeling (Boltzmannverdeling) die op een specifieke wijze met de temperatuur van het systeem kan verbonden worden.
2. De golf-deeltjes dualiteit van de kwantummechanica.
3. De wet van actie en reactie van Newton.

Uit het eerste punt kan worden afgeleid dat indien ervoor gezorgd wordt dat de deeltjes gemiddeld trager bewegen, de temperatuur van het systeem verlaagd is. Dit kan op twee manieren gerealiseerd worden; enerzijds kan men de deeltjes die het snelst bewegen uit het systeem verwijderen en zo de gemiddelde snelheid en dus temperatuur van het systeem verlagen, dit is de basis waarop evaporatieve koeling gebaseerd is. Anderzijds kan men de snelheid van *alle* deeltjes gemiddeld verlagen. Dit is waar bij laserkoeling op gesteund wordt.

Hiervoor wordt de frequentie van het licht van een laser een klein beetje onder de excitatie-energie van de gebruikte atomen gekozen. Indien de atomen tegen de laserbundel in bewegen zorgt de blauwe dopplerverschuiving ervoor dat de frequentie van het laserlicht dichter bij de excitatie-energie komt te liggen zodat deze atomen gemakkelijker de fotonen zullen absorberen. Indien ze echter met de bundel meebewegen treedt er een rode dopplerverschuiving op zodat de kans kleiner wordt dat de atomen fotonen zullen absorberen. Tijdens het absorberen van een foton moet er behoud van impuls zijn zodat in het eerste geval de atomen afgeremd zullen worden en in het tweede geval versneld. Omdat er door de dopplerverschuivingen meer atomen zullen zijn die worden afgeremd dan versneld is het volledige effect of het gehele systeem een gemiddelde afremming in de richting van de laserbundel.

Bij het vervallen uit de geëxciteerde toestand (na het absorberen van een foton) naar de grondtoestand wordt door het atoom een foton uitgezonden in een willekeurige richting. Door dit uitzenden van een foton moet wegens behoud van impuls het atoom ook een impulsverandering in de tegengestelde richting ondergaan.

Omdat dit proces zich vele malen herhaalt moet men zich geen zorgen maken om de bijdrage van het vervalproces, gezien het foton in een *willekeurige* richting wordt uitgezonden zodat het nettoresultaat van veel dergelijke vervallen voor het atoom op nul uitmiddelt.

Het netto resultaat van het gehele proces is dus een gemiddelde vertraging in één specifieke richting. Door gebruik te maken van zes lasers (naar links, rechts, voor, achter, beneden en boven) kan een algemene beweging afgeremd worden. Een dergelijke constructie wordt een optische molasse (of optisch rooster) genoemd.

Beperkingen

Het is echter niet mogelijk een gas op deze manier tot het absolute nulpunt af te koelen, of anders gezegd, alle atomen perfect tot stilstand te brengen.

Door de spontane emissie van fotonen (vervalgedeelte van het proces) en de kwantisatie van de energie van de fotonen ($E = h\nu$) voeren de atomen een random walk uit in de impulsruimte, met stappen ter grootte van de impuls van de fotonen. Dit veroorzaakt een opwarmingseffect dat de afkoeling tegen gaat en er zelfs een grens aan oplegt. De laagste temperatuur waarbij deze twee mechanismen elkaar in evenwicht houden wordt de Dopplertemperatuur genoemd. Dit is de laagste temperatuur die men met dopplerkoeling (het systeem met 6 lasers uit de vorige paragraaf) kan bereiken.

Wil men echter nog lagere temperaturen bereiken dan moeten andere technieken aangesproken worden. Men kan bijvoorbeeld gebruikmaken van de Sisyphuskoeling, genaamd naar de mythologische figuur Sisyphus, een laserkoelingstechniek waarbij men tot de zogenaamde recoil-limiet kan koelen.

Leptongetal

In de kwantummechanica is het **Leptongetal** gelijk aan het aantal leptonen minus het aantal antileptonen.

De zes leptonen zijn: het elektron, muon en tau en hun neutrino's: elektron-neutrino, muon-neutrino en tau-neutrino. De zes anti-leptonen zijn hun antideeltjes: het positron, antimuon, antitau, elektron-antineutrino, muon-antineutrino en tau-antineutrino.

Het leptongetal blijft in de meeste reacties behouden. Als een lepton ontstaat, dan zal doorgaans tegelijk een ander lepton verdwijnen of - wat op hetzelfde neerkomt - een antilepton ontstaan.

Loop-kwantumzwaartekracht

Loop-kwantumzwaartekracht is een natuurkundige theorie die probeert algemene relativiteitstheorie en kwantummechanica te verenigen tot één theorie.


Zwaartekracht is de enige fundamentele natuurkracht die nog niet in een consistente kwantumveldentheorie is geformuleerd. Loop-kwantumzwaartekracht is een niet-perturbatieve kwantisatie van een achtergrondafhankelijke ijktheorie van het zwaartekrachtsveld. Dit betekent dat kwantumwetten opgelegd worden aan het zwaartekrachtsveld. Abhay Ashtekar beschreef de Einstein-veldvergelijking in termen van wat nu Ashtekarvariabelen worden genoemd. In deze formulering bleek het mogelijk tot kwantisatie te komen.

De bijval in de natuurkundige gemeenschap is voorlopig beperkt. Er zijn geen voorspellingen van experimenteel toegankelijke data, wat de theorie volgens velen onwetenschappelijk maakt. Binnen de wereld van kwantumgravitatie zijn meer onderzoekers actief in snaartheorie dan in loop-kwantumzwaartekracht. Interessant aan loop-kwantumzwaartekracht is de achtergrondafhankelijkheid. In tegenstelling tot in Snaartheorie wordt niet ondersteund t.o.v. een vaste (vlakke) metriek te werken, maar kan gewerkt worden op een willekeurige dynamische variëteit. Loop-kwantumzwaartekracht bestudeert voorlopig enkel gravitatie, dus de geometrie van de ruimte-tijd zonder inhoud, daar waar de Snaartheorie tracht alle krachten te verenigen. Snaartheorie is heel wat ambitieuzer, en heeft reeds meer resultaten geboekt, maar steunt op extra niet-geverifieerde hypothesen.

Matrixmechanica

De **matrixmechanica** is een formulering van de kwantummechanica die in 1925 werd opgesteld door Werner Heisenberg, Max Born en Pascual Jordan.

De matrixmechanica was de eerste volledige en correcte definitie van de kwantummechanica. Het breidde het Bohr-model uit door te beschrijven hoe kwantumovergangen optreden. De matrixmechanica interpreteert fysische eigenschappen van deeltjes als matrices die in de tijd evolueren. De matrixmechanica, in haar moderne formulering ook wel bekend als het Heisenbergbeeld, is equivalent aan de van Schrödinger afkomstige golfformulering van de kwantummechanica en ligt aan de basis van Diracs bra-ket notatie voor de golf functie.

<small>Geplaatsd op: 30-07-2010</small>	<i>Dit artikel is een beginnetje over natuurkunde. U wordt uitgenodigd op bewerken^[1] te klikken om uw kennis aan dit artikel toe te voegen.</i>	
---	--	---

Referenties

[1] <http://en.wikipedia.org/wiki:Matrixmechanica>

Meetprobleem in de kwantummechanica

Het **meetprobleem in de kwantummechanica** is het onopgeloste probleem van hoe (of zelfs *of*) het ineenstorten van de golf functie precies in zijn werk gaat. Het onvermogen om dit proces direct te kunnen observeren heeft aanleiding gegeven tot verschillende interpretaties van de kwantummechanica en vormt een belangrijke reeks van vragen die elke interpretatie van de kwantummechanica moet beantwoorden. De golf functie in kwantummechanica evolueert volgens de Schrödingervergelijking tot een lineaire superpositie van de verschillende kwantumtoestanden, maar werkelijke metingen vinden het natuurkundige systeem altijd in één bepaalde toestand. Elke toekomstige evolutie is vervolgens gebaseerd op de toestand, waarin het systeem zich bleek te bevinden, op het moment dat de meting werd gedaan. Dat betekent dat de meting "iets doet" in het te onderzoeken proces. Wat dat 'iets' wel kan zijn wordt niet verklaard in de basistheorie van de kwantumtheorie.

Multiversum

De term **multiversum** verwijst naar het idee of concept dat er naast het zichtbare universum waar we in leven nog veel (volgens sommigen oneindig veel) andere universa zijn waarnaar verwezen wordt als *parallele universa*.

Volgens de oerknaltheorie zal het heelal uitdijen, maar als er meerdere ruimten zijn die dat ook doen, zullen ze zo elkaar op den duur kruisen. Dit hangt nauw samen met het idee van een multiversum. Er ontstaan nieuwe centra, waar materie zich opnieuw samenvoegt, en waar zodoende ook nieuwe oerknallen kunnen ontstaan. Zo ontstaat er een soort "superheelal".



Artistieke weergave van een niveau 2 multiversum.

Multiversum in de natuurkunde en kosmologie

Het concept van het multiversum of 'veel universa' is voorgesteld in de jaren vijftig van de 20e eeuw door de natuurkundige Hugh Everett om bepaalde problemen in de kwantumfysica op te lossen. In het kort komt het erop neer dat bij iedere observatie van een gebeurtenis in de kwantumwereld (waar meerdere uitkomsten mogelijk zijn) *iedere* uitkomst verwerkelijk wordt in een nieuw parallel universum of tijdslijn voor iedere mogelijkheid. Dit zou een ontzaglijk groot aantal verschillende universa opleveren. Het *multiversum* is dan het geheel, of de verzameling van alle mogelijke universa. Na aanvankelijke scepsis van de wetenschappelijke wereld is de meerderheid [Wikipedia:Bronvermelding van de natuurkundigen het tegenwoordig \(2009\) eens over de noodzaak om de 'vele-wereldeninterpretatie' te gebruiken als men zou willen komen tot een fundament van een 'allesomvattend' beeld van het universum. Voorbeelden zijn de Snaartheorie of M-theorie en de inflatie-theorie. De theoretisch natuurkundige en M-theoriesdeskundige Michio Kaku schat het aantal mogelijke universa op minstens \$10^{500}\$.](#)

Kritiek

Veel natuurkundigen hangen echter een formalisme aan dat alleen een wiskundige beschrijving wil geven met voorbijgaan aan de vraag naar de feitelijke aard van de onderliggende natuurkundige werkelijkheid. Het multiversum is een mogelijke interpretatie van het wiskundige model die er wiskundig gezien echter niets aan toevoegt. Het is ook niet duidelijk of deze interpretatie de status van wetenschappelijke theorie heeft; het is bijvoorbeeld onduidelijk of zij empirisch te toetsen is. Het lijkt erop dat alle mogelijke waarnemingen binnen de interpretatie vallen; er is dan geen mogelijkheid tot falsificatie en de interpretatie is in dat geval alleen te rechtvaardigen als een pure tautologie.

Een veel gehoorde tegenwerping tegen het idee van een multiversum is dat het niet zou voldoen aan de eis van Ockhams Scheermes: omdat het multiversum het bestaan van zoveel universa inhoudt, lijkt het minder waarschijnlijk te zijn dan het alternatief dat er maar één universum is. Over het algemeen wordt er echter van uitgegaan dat die eis niet relevant is in die gevallen waar een groot aantal verschijnselen noodzakelijk voortvloeit uit een enkel fundamenteel principe of inherent is aan een samenhangend gebeuren. Zo mag men het concept van de natuurlijke getallen niet verwerpen met het argument dat het er oneindig veel zijn of het trekken van een lijn onwaarschijnlijk achten omdat die oneindig veel punten bevat.

Andere toepassingen

Theologie

Het idee van de *Vele Werelden* heeft al een lange traditie binnen de filosofie. Een verband met de theologie werd gelegd door het werk van Gottfried Wilhelm Leibniz over de theodicee: het probleem om het kwaad in de wereld te verzoenen met de gedachte aan een almachtige God kan immers worden opgelost door aan te nemen dat God inderdaad een perfecte wereld heeft geschapen - en veel onvolmaakte waaronder de onze.

Evolutie

Een moderne toepassing van het multiversum buiten de natuurkunde wordt gevormd door het werk van Johnjoe McFadden die het gebruikt als een aanvulling van de natuurlijke selectie bij de verklaring van de evolutie. Wij mensen bevinden ons dan noodzakelijkerwijze op die tijdlijnen waarop mensen geëvolueerd zijn, ook al was dat zeer toevallig. Hier ligt een verband met het antropisch beginsel.

Informatica

In de computerwetenschap is David Deutsch een belangrijke voorstander van het multiversum concept om te verklaren hoe een toekomstige kwantumcomputer kan functioneren.

Sciencefiction

➤ *Zie parallel universum voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

In sciencefiction is het concept van het multiversum of parallelle universums een populair thema om een verhaal aan op te hangen over een universum waar de geschiedenis anders is verlopen dan in ons universum of waar andere natuurwetten gelden. Een voorbeeld gaf Robert Heinlein met zijn roman *The number of the Beast* (1980) waarin de helden verschillende universums bezoeken met andere geschiedenissen en/of natuurwetten. Hoe het 'multiversum-voertuig' precies werkt wordt echter in het vage gehouden. Een idee dat Heinlein in voornoemd boek introduceerde was het *pantheïstisch solipsisme*. Dit is ook wel bekend als *De wereld als mythe*. Het komt erop neer dat als bijv. een schrijver een innerlijk consistente wereld bedenkt in zijn boeken deze in een oneindig multiversum per definitie ook moet bestaan. Kortom: alle bedachte werelden en ook die van de mythologie moeten ergens in de realiteit bestaan. Een ander sf-verhaal over het multiversum gaf Jack Vance met zijn korte verhaal *Rumfuddle* (1973) waarbij de helden via in grote verstelbare 'poorten' die 'gestanst zijn in de interdimensionale structuur tussen de verschillende parallel heelals' kunnen reizen.

Literatuur

- *Parallel Worlds - The science of alternate universes*, Michio Kaku, 2005, Penguin ISBN 0713997281
- *Het grijpbare Niets - Metafysisch model als antwoord op de fundamentele zijnsvraag*, Ben J. G. Pirard, 2005, ISBN 90810697133

Externe links

- (en) Voorpublicatie van David Deutsch' artikel *The Structure of the Multiverse* ^[1]
- (en) Het relevante deel van Michael Price' FAQ over Hugh Everett ^[2]
- (en) Many Worlds & Parallel Universes — achtergrondinformatie over het concept van het parallel en multiversum ^[3]
- (en) Multiversum - Radiodiscussie op [[BBC Four ^[4]] met Melvyn Bragg]

Referenties

- [1] <http://xxx.lanl.gov/abs/quant-ph/0104033>
- [2] <http://www.hedweb.com/manworld.htm#believes>
- [3] <http://timetravelportal.com/viewtopic.php?t=288>
- [4] <http://www.bbc.co.uk/programmes/b008z744>

Muon

In het standaardmodel van elementaire deeltjes is het **muon** in de tweede generatie het equivalent van het elektron in de eerste. Beide behoren ze tot de familie van fermionen die leptonen worden genoemd. Een muon heeft een massa die 207 keer de massa van het elektron is (105,6 MeV) en een spin van 1/2. Een muon wordt aangeduid met μ^- en een anti-muon met μ^+ .

Geschiedenis en naamgeving

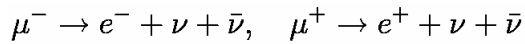
In 1934 realiseerde Yukawa zich dat de sterke kracht die de protonen en neutronen in atoomkernen bij elkaar houdt, kon worden gemodelleerd als een gevolg van de uitwisseling van massieve bosonen tussen de kerndeeltjes. In 1934 waren er nog geen deeltjesversnellers die deze bosonen zouden kunnen produceren en de beste kans om er een te vinden was in hoogenergetische kosmische straling.

In 1936 ontdekte Carl David Anderson, toen hij met behulp van een nevelvat kosmische straling bestudeerde, het muon. Anderson merkte op dat in zijn nevelvat sporen te zien waren die sterker kromden dan die van protonen, maar minder sterk dan die van elektronen. Hij trok de conclusie dat het om sporen van een "nieuw" deeltje moest gaan. Ervan uitgaande dat de elektrische lading van het deeltje gelijk was aan die van het elektron volgde eveneens dat de massa van het nieuwe deeltje tussen die van het proton en die van het elektron moest liggen. Anderson noemde het deeltje daarom in eerste instantie *mesotron*. Het werd echter al snel duidelijk dat het muon niet het door Yukawa gezochte boson kon zijn; het drong onder andere veel dieper door in allerlei stoffen (waaronder lucht) dan het theoretisch voorspelde boson (in feite is het muon zelfs geen boson, maar een fermion). Het muon leek in eerste instantie geen natuurlijke plaats te hebben in de deeltjesfysica. Dit gaf Isidor Rabi (Nobelprijs voor de Natuurkunde 1944) aanleiding tot zijn veel geciteerde uitspraak "Who ordered that?". Het duurde nog tot 1947 tot de door Yukawa voorspelde deeltjes werden gevonden. Deze worden nu pionen genoemd.

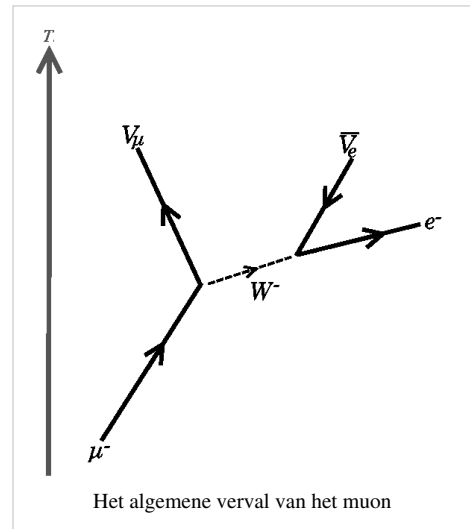
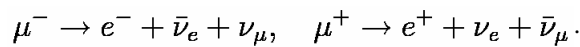
In de decennia na de ontdekking van het muon werden nog veel meer deeltjes met massa's tussen die van het elektron en die van het proton ontdekt en de naam *meson* werd ingevoerd als aanduiding voor al dit soort deeltjes. Het "mesotron" werd hernoemd tot *mu-meson*. Intussen heeft de term meson nog een betekenisverschuiving doorgemaakt; een "meson" is nu een deeltje dat is opgebouwd uit een quark en een anti-quark. Het muon is in deze zin geen meson meer (het is een lepton), maar desondanks kom je de oude benaming nog wel eens tegen.

Muon verval

Omdat het muon tweehonderd keer zwaarder is dan het elektron is het niet stabiel, het heeft een gemiddelde levensduur van 2,2 μsec . In 1950 toonden Bruno Pontecorvo en Ted Hincks van de **Chalk River Laboratories** aan dat bij het verval van een muon een elektron en twee neutrino's worden uitgezonden:



Deze reactie leverde een probleem op want als er een neutrino en een anti-neutrino ontstaan waarom annihileren deze nooit tot een foton. Later toonden Melvin Schwartz, Leon Lederman en Jack Steinberger aan dat er tenminste twee soorten neutrino's bestaan. De door Pontecorvo en Hincks gevonden reacties moeten dus geschreven worden als:



Muon-neutrino

Een **muon-neutrino** of **mu-neutrino** (symbool ν_μ) is een neutrino dat optreedt als de isospin partner van het muon.

Het is een ongeladen lepton. Het is dus een elementair deeltje of meer algemeen een subatomair deeltje. Het muon-neutrino heeft een spin van een half en is dus een fermion. Het is elektrisch ongeladen, dus neutraal, vandaar de naam. Het muon-neutrino is van dezelfde generatie van materie als het muon. Het is nog niet zeker, of het muon-neutrino een massa bezit of niet, maar als het er één heeft, dan is ze kleiner dan 0,19 MeV.

Het muon-neutrino is een neef (2e generatie) van het elektron-neutrino (1e generatie) en het tau-neutrino (3e generatie). Net als de andere twee neutrino's heeft ook het muon-neutrino een antideeltje – het muon-antineutrino. Voor meer gegevens zie het standaardmodel van de deeltjesfysica.

Ontdekking

Het muon-neutrino werd in 1962 ontdekt met een experiment bij het Alternating Gradient Synchrotron[1] op Brookhaven National Laboratory in de Verenigde Staten. Voor de ontdekking van het muon-neutrino kregen de natuurkundigen Leon Lederman, Melvin Schwartz en Jack Steinberger in 1988 de Nobelprijs voor de natuurkunde.

Externe link

- (en) Ontdekking van het muon-neutrino ^[2]

Fysische deeltjes

Atomaire deeltjes: Molecuul · Atoom · Ion

Subatomaire deeltjes: Nucleon · Atoomkern

Bosonen: Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson

Fermionen: Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Referenties

[1] <http://www.bnl.gov/bnlweb/facilities/AGS.asp>

[2] http://www.bnl.gov/bnlweb/history/nobel/nobel_88.asp

Kwantumverstrengeling

Kwantumverstrengeling is een fenomeen uit de kwantummechanica waarbij twee of meer natuurkundige objecten zodanig verbonden zijn, dat het ene object niet meer volledig beschreven kan worden zonder het andere specifiek te noemen - ook al zijn de beide objecten ruimtelijk gescheiden ('non lokaal'). Omdat kwantummechanische deeltjes zich tegelijkertijd in meerdere meetbare toestanden kunnen bevinden, zolang er nog niet gemeten wordt, betekent de verstrengeling dat er een correlatie zal zijn tussen metingen aan de deeltjes. Dit doet denken aan de klassieke "gemeenschappelijke oorzaak"-correlatie die kan bestaan, met dit verschil dat de verstrengeling bij kwantummechanische systemen kan gaan over een superpositie van schijnbaar tegenstrijdige toestanden. Dit verband gaat dus verder dan in de klassieke natuurkunde mogelijk is.

Dit onderlinge verband leidt tot correlaties tussen waarneembare natuurkundige eigenschappen van ver van elkaar verwijderde systemen. Zo stelt de kwantummechanica bijvoorbeeld dat kwantumtoestanden zoals de spin - zeg maar de draairichting - onbepaald zijn tot het moment dat er een fysieke interventie is gedaan om de spin van het object te meten. Het is even waarschijnlijk dat een object een opwaartse spin heeft als dat het een neerwaartse spin heeft. Als van meerdere deeltjes wordt bepaald welke richting hun spin heeft, zal een onvoorspelbare reeks metingen gedaan worden die neigt naar een evenwichtige verdeling tussen opwaartse en neerwaartse spin.

Maar als dit experiment gedaan wordt met verstrengelde deeltjes, zijn de resultaten anders. Als de twee leden van een verstrengeld paar worden gemeten, zal de een altijd een opwaartse spin hebben en de ander een neerwaartse spin. De afstand tussen de twee deeltjes doet er daarbij niet toe. Om dit resultaat te verklaren zijn er theoretici die stellen dat er verborgen variabelen kunnen zijn die staan voor de spin van elk deeltje, en dat deze verborgen variabelen bepaald worden als het verstrengelde paar wordt gecreëerd. Het lijkt er daardoor op dat de twee deeltjes met elkaar moeten kunnen communiceren op willekeurig welke afstand, omdat de verborgen variabele die het ene deeltje beschrijft onmiddellijk kan omslaan als het andere wordt gemeten. Als de verborgen variabelen op afstand geen informatie-uitwisseling meer met elkaar zouden hebben dan zou je een ongelijkheid verwachten (de Stelling van Bell), die echter geschonden wordt zowel in de theorie van de kwantummechanica als bij experimenten.

Als deeltjesparen gemaakt worden door het verval van andere deeltjes, natuurlijk of door een opgewekte botsing, dan mogen die deeltjesparen "verstrengeld" genoemd worden, in zoverre dat zulke paren noodzakelijkerwijs gekoppelde en tegenovergestelde eigenschappen zullen hebben, zoals de spin of de lading. De aanname dat het de meting is die leidt tot de gemeten toestand gaat terug op de argumenten van, onder andere, Schrödinger, Einstein, Podolsky, en Rosen (zie: EPR-paradox) inzake Heisenbergs onzekerheidsprincipe en de relatie daarvan met observatie (zie ook de Kopenhaagse interpretatie). De analyse van verstrengelde deeltjes door middel van de stelling van Bell kan de indruk wekken van non-lokaliteit (dat wil zeggen, dat er een verbinding is tussen de leden van zo'n paar dat spot met zowel

de klassieke als de relativistische concepten van ruimte en tijd). Dit is aannemelijk als aangenomen wordt dat elk deeltje de plek van creatie van het deeltjespaar verlaat in een ambigue staat (wat een mogelijke interpretatie is van Heisenberg). In zo'n geval blijven beide mogelijke uitkomsten van de meting mogelijk; alleen door de meting zelf zou een bepaalde waarde ontstaan.

Aan de andere kant, als elk deeltje de plaats van het ontstaan van het deeltjespaar zou verlaten met eigenschappen die ondubbelzinnig gemeten zal kunnen worden dan zou het niet meer nodig zijn om te postuleren dat er een directe uitwisseling van informatie is over ruimte en tijd.^[1] De interpretatie van Bohm stelt dat een gidsgolf bestaat die wat als individuele deeltjes wordt gezien, verbindt, zodanig dat de veronderstelde verborgen variabelen in feite de deeltjes zelf zijn, die bestaan als een resultaat van de golf.

Observatie van de ineenstorting kan de indruk geven dat de metingen die op het ene systeem plaatsvinden het andere verstrengelde systeem direct beïnvloeden, zelfs op grote afstand. Een andere interpretatie van dit fenomeen is dat de kwantumverstregeling niet noodzakelijkerwijs sneller informatie overbrengt dan de snelste overdracht in de klassieke natuurkunde (de lichtsnelheid) omdat een klassiek communicatie-kanaal nodig is om het proces af te maken.

Kwantumverstregeling heeft toepassingen in de opkomende technologie van kwantumcomputer en kwantumcryptografie, en is gebruikt om experimenteel kwantumteleportatie te bewerkstelligen^[2]. Tegelijkertijd roept het meer en meer filosofische discussies op over kwantumtheorie. De voorspelde correlaties van kwantummechanica, en wat is geobserveerd in experimenten, verwerpt het principe van lokaliteit, die stelt dat informatie over de staat van een systeem alleen beïnvloed kan worden door interacties in de onmiddellijke omgeving en dat de staat van een systeem bestaat en vast staat voor de meting. Verschillende visies op wat er feitelijk plaatsvindt in het proces van kwantumverstregeling hangt samen met verschillende interpretaties van kwantummechanica. In de standaard interpretatie, de Kopenhaagse interpretatie, is kwantummechanica noch "reëel" (aangezien metingen de eigenschappen van het systeem niet vaststellen maar instellen) noch "lokaal" (omdat de statusvector $|\psi\rangle$ de simultane kansamplitudes voor alle posities omvat, b.v.

$$|\psi\rangle \rightarrow \psi(x, y, z).$$

Achtergrond

De theorie van verstregeling stond Albert Einstein en anderen niet aan. In 1935 formuleerden Einstein, Podolsky en Rosen de EPR-paradox, een kwantummechanisch gedachte-experiment met een sterk tegen-intuïtieve en schijnbaar niet-lokale uitkomst. Dit in antwoord op Niels Bohr die het idee aanhing dat kwantummechanica als theorie compleet was. Einstein staat er om bekend dat hij verstregeling afdeed als "*spukhafte Fernwirkung*" zeg maar een griezelig/begeesterde werking op afstand. Hij geloofde dat toekomstige wiskundigen zouden ontdekken dat kwantumverstregeling niets meer of minder zou zijn dan een fout in hun berekeningen. Zoals hij eens schreef: "*Ik vind het een ontolereerbaar idee dat een elektron dat blootgesteld wordt aan straling zou kiezen uit zijn eigen vrije wil, niet alleen het moment om (op een positie) te springen, maar ook zijn richting. In dat geval zou ik liever timmerman zijn, of zelfs werken in een speelhal, dan een natuurkundige.*"

Aan de andere kant is kwantummechanica geslaagd in het doen van goede voorspellingen van de uitkomst van experimenten, en de sterke correlaties die voorspeld worden door de theorie van kwantumverstregeling zijn nu daadwerkelijk waargenomen. Een mogelijke manier om de gevonden correlaties te verklaren in overeenstemming met de voorspellingen van kwantumverstregeling is de benadering die bekend staat als de "local hidden variable theory", waarin onbekende, gedeelde lokale parameters de correlaties zouden veroorzaken. Maar in 1964 leidde John Stewart Bell een bovengrens af die bekend staat als de stelling van Bell over de kracht van de correlaties voor alle theorieën die zich houden aan het principe van lokaliteit. Kwantumverstregeling kan leiden tot sterkere correlaties die deze bovengrens overschrijden, zodat in experimenten de uitkomsten verschillend zouden zijn als de kwantumverstregeling klopt dan als één van de lokale verborgen-variabelen theorieën juist is. De resultaten van verschillende experimenten ondersteunen op overweldigende wijze de kwantummechanica. Toch zijn er mogelijk

gaten in de Bell experimenten waarmee de validiteit van deze experimenten staat of valt. Om dat te bevestigen of ontkennen zijn nu experimenten in gang gezet. Meer daarover in het Engelstalige artikel over de experimental tests of Bell's inequality.

Observaties betreffende verstrengelde staten lijken in strijd te zijn met de eigenschap van de relativiteitstheorie dat informatie niet sneller kan reizen dan de lichtsnelheid. Hoewel twee verstrengelde systemen elkaar lijken te beïnvloeden over grote afstand in de ruimte, is de huidige opinie dat geen bruikbare informatie op deze wijze overgebracht kan worden, wat betekent dat de 'oorzakelijke natuurkunde' niet geschonden wordt door verstrengeling. Dit is de geen-communicatie-stelling ("no-communication theorem").

Zelfs als informatie niet verzonden kan worden door verstrengeling alleen, wordt aangenomen dat het mogelijk is om informatie over te brengen door een set van verstrengelde staten te gebruiken in combinatie met een *klassiek* informatiekanaal. Dit proces staat bekend als kwantumteleportatie. Ondanks de naam staat kwantumteleportatie mogelijk nog niet toe dat informatie sneller dan de lichtsnelheid verzonden wordt, omdat er een klassiek communicatiekanaal voor nodig is.

Er wordt ook gewerkt aan experimenten om te zien of verstrengeling het resultaat is van retrocausaliteit.^{[3][4]}

Voetnoten

- [1] An Intuitive Paradigm for Quantum Mechanics (<http://www.nonloco-physics.000freehosting.com/>). *Physics Essays* 5 (2) 226-234 (1992).
- [2] Dik Bouwmeester, Jian-Wei Pan, Klaus Mattle, Manfred Eibl, Harald Weinfurter & Anton Zeilinger, Experimental Quantum Teleportation, *Nature* vol.390, 11 Dec 1997, pp.575. (Samenvatting op <http://www.quantum.univie.ac.at/research/photonentangle/teleport/>)
- [3] Paulson, Tom (2006-11-15). *Going for a blast in the real past* (http://www.seattlepi.com/local/292378_timeguy15.html?source=mypi). *Seattle Post-Intelligencer*. Geraadpleegd op 2006-12-19.
- [4] Boyle, Alan (2006-11-21). Time-travel physics seems stranger than fiction (<http://www.msnbc.msn.com/id/15817394/>). MSNBC. Geraadpleegd op 2006-12-19.

Referenties

- M. Horodecki, P. Horodecki, R. Horodecki, "Separability of Mixed States: Necessary and Sufficient Conditions", *Physics Letters A* **210**, 1996.
- L. Gurvits, "Classical deterministic complexity of Edmonds' Problem and quantum entanglement", *Proceedings of the thirty-fifth annual ACM symposium on Theory of computing*, 2003.
- I. Bengtsson and K. Życzkowski, "Geometry of Quantum States. An Introduction to Quantum Entanglement", Cambridge University Press, Cambridge, 2006.
- E. G. Steward, "Quantum Mechanics: Its Early Development and the Road to Entanglement", World Scientific Publishing, 2008.

Externe links

- *Quantum mechanics the way I see it* van dr W. M. de Muynck (<http://www.phys.tue.nl/ktn/Wim/muynck.htm>)
- Kennislink: Teleportatie uit de sci-fi hoek (<http://www.kennislink.nl/web/show?id=83751>)
- De Standaard Online: Kwantumverstrengeling in het groot (http://www.standaard.be/Archief/Artikel/index20031212DSW12122003_014.aspx)

Neutrino

Het **neutrino** is een ongeladen subatomair, elementair deeltje. Het heeft een spin van $1/2$ en is daarmee een fermion.

Het neutrino is een lepton. De voornaamste wisselwerking (interactie) die neutrino's vertonen is de zwakke kernkracht: neutrino's zijn niet gevoelig voor de sterke kernkracht of elektromagnetische interacties. Doordat het neutrino zo weinig wisselwerking vertoont met materie, gaat het bijna ongehinderd door gewone materie heen.

De meeste neutrino's die de aarde bereiken, zijn afkomstig van de zon. Per seconde wordt elke vierkante centimeter van de ruimte in de nabijheid van de aarde, die loodrecht op de richting van de zonnestralen staat, gepasseerd door 65 miljard zonneneutrino's; dit zijn elektron-neutrino's.

Doordat het neutrino zo weinig wisselwerking vertoont met materie, gaat het bijna ongehinderd door gewone materie heen. Een blok lood zou een lichtjaar (circa 9,5 biljoen km) dik moeten zijn om de helft van de neutrino's die erdoorheen gaan tegen te houden.

Massa

Lang werd gedacht dat de massa van het neutrino nul was, maar experimentele resultaten van bijvoorbeeld de Super-Kamiokande detector hebben aangetoond dat ze groter dan nul is. Daarmee zijn neutrino's ook onderhevig aan de zwaartekracht.

Snelheid

Omdat neutrino's massa hebben, zou volgens de relativiteitstheorie van Albert Einstein hun snelheid net iets onder de lichtsnelheid moeten liggen.

Een neutrino met bijvoorbeeld een massa van $0.2 \text{ eV}/c^2$ en een energie van 10 MeV heeft volgens de formule

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

een snelheid die 60 nm/s (een fractie 2×10^{-16}) lager is dan de lichtsnelheid. Dit is niet meetbaar, daardoor zal een snelheidsbepaling binnen de meetnauwkeurigheid de lichtsnelheid moeten opleveren.

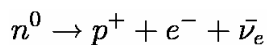
In september 2011 meldden onderzoekers van het CERN in Zwitserland en de *Laboratori Nazionali del Gran Sasso* in Italië dat zij, tijdens het CNGS-experiment, mogelijk hebben waargenomen dat hoog-energetische muon-neutrino's een fractie sneller dan de lichtsnelheid reizen.^[1] Maar in februari 2012 maakte CERN bekend dat de metingen waarschijnlijk beïnvloed waren door een niet goed functionerende oscillator en glasvezelverbinding.^{[2][3]}

CERN kondigde in juni 2012 aan dat nieuwe metingen in verscheidene Gran Sasso experimenten (OPERA, ICARUS, Borexino en LVD) aangeven dat de snelheid van neutrino's "consistent is met de lichtsnelheid". Daarmee werd het afwijkende CNGS resultaat van 2011 definitief weerlegd.^[4]

Geschiedenis

Voorstel van Pauli

Het neutrino (meer in het bijzonder het *elektronneutrino*) werd in 1930 voor het eerst gepostuleerd door Wolfgang Pauli, die het nodig had om het continue spectrum van bètaverval te verklaren. Het voorspelde deeltje was nodig om de wet van behoud van energie, de wet van behoud van impuls, en de wet van behoud van impulsmoment bij bètaverval theoretisch te kunnen behouden. Sommige natuurkundigen, zoals Niels Bohr, waren tegen deze interpretatie van bèta-verval en waren bereid te accepteren dat energie, impuls en impulsmoment geen behouden grootheden waren.

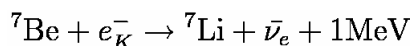


Pauli theoriseerde dat een nog niet ontdekt deeltje het waargenomen verschil tussen de energie, impuls en impulsmoment van de eerste en laatste deeltjes met zich meevoerde.

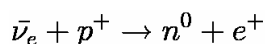
Pauli noemde zijn voorgestelde lichte deeltje oorspronkelijk een *neutron*, naar analogie met het proton en het elektron, waarvan reeds bekend was dat zij producten van bètaverval zijn. Toen James Chadwick in 1932 echter een veel massiever deeltje ontdekte en dit ook een neutron noemde, zat men met twee verschillende deeltjes met dezelfde naam. Enrico Fermi, die de theorie van het bètaverval ontwikkelde, bracht uitkomst. Hij verzoon in 1934 de term *neutrino* om zo de verwarring op te lossen. Het is het Italiaanse equivalent van "neutraaltje".

Directe detectie

In 1942 stelde Wang Ganchang als eerste het gebruik van *K*-vangst voor om zo het door Pauli voorgestelde neutrino experimenteel te bevestigen. Hij suggereerde om daarvoor beryllium te gebruiken:



en nog datzelfde jaar bevestigde James Allen dat de 'terugstoot' van lithium in dit proces klopte met de verwachting bij uitzenden van een neutrino. Ook dit was echter een indirect resultaat: het neutrino zelf werd niet expliciet gemeten. Hans Bethe en Robert Bacher hadden al in 1936 vastgesteld dat er maar één proces was dat neutrino's met zekerheid zouden moeten veroorzaken als ze bestonden, en dat was het *inverse beta process*:



In 1956 publiceerden Clyde Cowan, Frederick Reines, F.B. Harrison, H.W. Kruse, en A.D. McGuire in het wetenschappelijk tijdschrift *Science* de bevestiging dat zij op deze manier inderdaad het neutrino hadden gedetecteerd.^[5] In dit experiment, dat nu bekend staat als het Cowan-Reines-neutrinoexperiment, reageren neutrino's, die in een kernreactor worden gemaakt door middel van bèta-verval, met protonen, waarbij neutronen en positronen ontstaan. Het positron vindt snel een elektron en beide deeltjes annihileren elkaar. De twee resulterende gammadeeltjes (fotonen) zijn aantoonbaar. Het neutron kan worden gedetecteerd doordat dit deeltje kan worden ingevangen door een hiervoor in aanmerking komende kern, waarbij een gammadeeltje vrijkomt. Het samenvallen van beide gebeurtenissen - positron-annihilatie en neutronvangst - geeft een unieke signatuur aan een antineutrino-wisselwerking. Deze ontdekking leverde een van de auteurs, Frederick Reines, bijna veertig jaar later, in 1995, de Nobelprijs voor de Natuurkunde op.

Het is nu bekend dat zowel de voorgestelde als de waargenomen deeltjes antineutrino's waren.



Eerste waarneming van een neutrino in een bellenvat, november 1970. Het onzichtbare neutrino raakt een proton (rechts op foto) en verandert in een muon (de lange dunne streep vanaf het midden van de foto naar linksboven). De korte, licht gebogen streep naar boven is het proton. Het derde gebogen spoor naar linksonder is van een pi-meson dat is ontstaan door de botsing van het neutrino met het proton.

Drie generaties

In het standaardmodel van de deeltjesfysica komen drie generaties neutrino's voor. De eerste generatie noemt men het *neutrino* (ook wel *elektron-neutrino* of *e-neutrino*), de tweede generatie *muon-neutrino* en de derde generatie *tau-neutrino*. De neutrino's zijn genoemd naar de elektrisch geladen leptonen uit dezelfde generatie: elektron, muon en tau. Elk type neutrino bezit een eigen bijbehorend antideeltje: het antineutrino.

Neutrino		Antineutrino		massa
naam	symbool	naam	symbool	
Elektron-neutrino	ν_e	Elektron-antineutrino	$\bar{\nu}_e$	<2,5 eV
Muon-neutrino	ν_μ	Muon-antineutrino	$\bar{\nu}_\mu$	<170 keV
Tau-neutrino	ν_τ	Tau-antineutrino	$\bar{\nu}_\tau$	<18 MeV

Detectie

Doordat het neutrino weinig wisselwerking heeft met materie is het heel moeilijk te detecteren. Voor neutrino's met weinig energie is helemaal geen detectiemethode bekend. Een zeer klein deel van neutrino's met voldoende energie reageert echter wel, en kan dan gedetecteerd worden door de uitgezonden Čerenkovstraling, een zwakke blauwe flits. Neutrinodetectoren maken daarom gebruik van heel grote hoeveelheden doorzichtig materiaal zoals water of ijs (tot tienduizenden tonnen voor de Super-Kamiokande). Die zijn nodig om een paar neutrino's per dag te detecteren uit de miljarden die er per seconde doorheen gaan. In water botst dan af en toe een neutrino op een proton, en ontstaat door opname van elektrische lading er een muon of een elektron met een positieve respectievelijk negatieve lading. Deze deeltjes snellen door het water en geven Čerenkovstraling af die door fotomultiplicatoren worden gedetecteerd.

Detectie vindt plaats diep onder de grond omdat daar minder andere straling uit de ruimte doordringt die een flits veroorzaakt. Voor wat betreft de straling die daar wel doordringt kan men in het geval van een flits zien of de straling van boven of onder komt, en zich dan richten op de straling die van onder komt, want andere straling dan neutrino's kan niet of minder goed de hele aarde doorkruisen.^[6]

In het geval van zéér dichte materie (neutronensterren, zwaartekrachtimplosies bij de vorming van supernova's) is er wel een relevante interactie met neutrino's.

Voetnoten

Fysische deeltjes

Atomaire deeltjes: Molecuul · Atoom · Ion

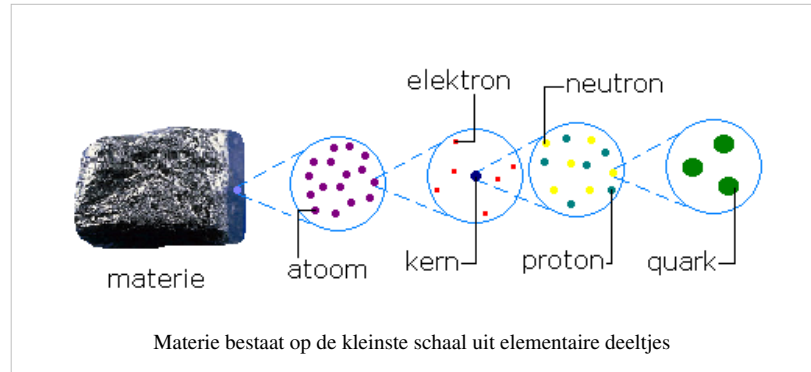
Subatomaire deeltjes: Nucleon · Atoomkern

Bosonen: Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson

Fermionen: Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Neutron

Een **neutron** is een subatomair deeltje zonder elektrische lading dat voorkomt in atoomkernen. Het is opgebouwd uit 3 quarks, namelijk 2 down-quarks en 1 up-quark. Alle atoomkernen op één na bevatten naast een of meer protonen ook een of meer neutronen. De enige uitzondering is ^1H (de meest voorkomende vorm van waterstof), waarvan de kern uit alleen één proton



bestaat. De massa van het neutron is vrijwel gelijk aan die van het proton (het neutron is iets zwaarder), maar het neutron mist de positieve lading van het proton.

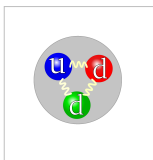
Ontdekking

In 1920 had Ernest Rutherford gespeculeerd over het mogelijke bestaan van het neutron. Hij had een ongelijkheid gevonden tussen het atoomnummer en de atoommassa. Aanvankelijk werd dit verschil verklaard door aan te nemen dat de ontbrekende elektronen door protonen uit de kern waren geabsorbeerd en dus een neutrale proton-elektronconfiguratie vormden.

In 1931 ontdekten Walther Bothe en Herbert Becker van de universiteit van Heidelberg dat bij beschieting van beryllium met sterk energetische α -deeltjes er een ongewoon doordringende straling werd geproduceerd. In eerste instantie werd gedacht dat dit γ -straling was, ondanks dat deze doordringender was dan γ -straling. De volgende belangrijke bijdrage werd gerapporteerd in 1932 door het echtpaar Frédéric en Irène Joliot-Curie. Uit hun experimenten bleek dat deze uitgezonden γ -stralen in staat waren protonen te stoten uit paraffine, een waterstofrijke materie.

Naar aanleiding van deze publicatie voerde James Chadwick een serie van experimenten uit waarin hij aantoonde dat hij niet met γ -straling had te doen maar met de door Rutherford gepostuleerde neutrale deeltjes. Reeds op 27 februari 1932, ruim een maand na het artikel van Joliot-Curie verscheen zijn antwoord in *Nature*: "*Possible Existence of a Neutron*".^[1] Een uitgebreider artikel, nu met de zelfverzekerde titel "*The Existence of a Neutron*" verscheen drie maanden later in de *Proceedings* van de Royal Society.^{[2][3]} Door beryllium te beschieten met α -deeltjes ($^9\text{Be} + \alpha \rightarrow ^{12}\text{C} + n$) kon hij de massa van het neutron bepalen op $1,66033 \times 10^{-27}$ kg. In 1935 ontving Chadwick hiervoor de Nobelprijs voor de Natuurkunde.

Eigenschappen



De rustmassa van een neutron is 1,008665 atomaire massa-eenheid (a.e.), dat is $1,67493 \times 10^{-27}$ kg. Het deeltje kan vrijkomen bij kernsplijting, bijvoorbeeld in kernreactoren en bij de explosie van een atoombom, maar het is in deze vrije toestand (dus buiten de atoomkern) niet stabiel. De vervaltijd (aangeduid met τ) is 14 minuten en 46 seconden (886 seconden). Het vervalt tot een elektron, een proton en een elektron-antineutrino. Dit is een voorbeeld van β -verval (elektronenemissie wordt bètastraling genoemd). Vrijwel alle massa wordt daarbij doorgegeven aan het proton.

Neutronen spelen een belangrijke rol in kernreacties:

- neutronenactivering
- kernsplijting

Zij kunnen ook gebruikt worden voor structuuronderzoek:

- neutronenverstrooiing
 - Small Angle Neutron Scattering (SANS)

De snelheid van een vrij neutron correspondeert met een bepaalde temperatuur, er wordt daarom wel gesproken van de neutronentemperatuur. Zie ook uranium.

Referenties

- [1] Chadwick, J. (1932). *Possible Existence of a Neutron*. *Nature* **129** (3252): 312. DOI: 10.1038/129312a0 (<http://dx.doi.org/10.1038/129312a0>).
- [2] Chadwick, J. (1932). *The Existence of a Neutron*. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **136** (830): 692. DOI: 10.1098/rspa.1932.0112 (<http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1932.0112>).
- [3] Chadwick, J. (1933). *Bakerian Lecture. The Neutron*. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **142** (846): 1. DOI: 10.1098/rspa.1933.0152 (<http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1933.0152>).

Non-lokaal

Non-lokaal betekent zoiets als *niet plaatsgebonden* of *zonder oorzaak*. In de kwantummechanica en de parapsychologie worden non-lokale effecten beschreven.

Non-lokaal in de natuurkunde

Volgens de *Kopenhaagse interpretatie* (CHI) van de kwantummechanica is de toestand van een atomair systeem aan het begin van een meting ongedefinieerd en kan alleen 'enigszins' met statistische methoden worden voorspeld. Hoewel Einstein en andere natuurkundigen dit ernstig bestreden (zie de Einstein-Podolsky-Rosen-paradox) is dit aspect van de kwantummechanica, geïntroduceerd door Niels Bohr, Werner Heisenberg en Max Born, nog altijd een van de hoekstenen van de theorie. Enige consequenties van de CHI zijn:

1. In de kwantumwereld gebeurt het soms dat er in een lege ruimte 'spontaan' deeltjes kunnen verschijnen of verdwijnen. Dit volgt uit het onzekerheidsprincipe van Heisenberg.
2. De interactie binnen een systeem neemt niet af met de afstand tussen de verschillende onderdelen van dit systeem
3. De interactie kan direct zijn; dus sneller dan de lichtsnelheid
4. Bepaalde plaatsen kunnen direct met elkaar verbonden zijn zonder dat de tussenliggende ruimte er toe doet

Deze 'bizarre' aspecten zijn door John Clauser in 1978 en Alain Aspect in 1982 experimenteel bevestigd. In de sub-atomaire wereld treden deze effecten dus inderdaad op en dit is ondertussen ook bijna algemeen erkend door de wetenschap.

Hierbij dient aangetekend te worden dat bovenstaande mening over non-lokaliteit niet door iedereen wordt gedeeld, omdat de argumenten die ertoe aanleiding geven niet dwingend zijn (de Muynck (2006) ^[1]). Bovendien heeft de bedoelde non-lokaliteit een metafysisch karakter: ze is zuiver theoretisch en niet empirisch toetsbaar. Om deze reden wordt ze in de literatuur vaak aangeduid met behulp van esoterische namen als *passion-at-a-distance* (in plaats van *action-at-a-distance*), vreedzame co-existentie en non-separabiliteit.

Non-lokaal in de parapsychologie

Maar dit is niet het geval voor de claims aangedragen door de parapsychologie. Het zou ook een ernstige schending zijn van in het algemeen het causaliteitsprincipe - een van de fundamenteën van de natuurkunde -, en meer in het bijzonder van de speciale relativiteitstheorie. Men redeneert dat niet zomaar de non-lokaliteit van de sub-atomaire kwantumwereld geëxtrapoleerd kan worden naar de macrowereld van de 'menselijke maat'. De meeste wetenschappers vinden de voorbeelden van non-lokale gebeurtenissen zoals aangedragen door parapsychologen niet

overtuigend genoeg om zonder meer voor waar aangenomen te worden. En zeker niet zo overtuigend dat hierdoor het causaliteitsprincipe overboord gegooid kan worden.

Referenties

[1] <http://www.phys.tue.nl/ktn/Wim/nonloc06.pdf>

Observabele

Een **observabele** (van het Latijnse *observabilis* = *waarneembaar*) is in de natuurkunde, met name in de kwantummechanica, de formele naam voor een meetwaarde of voor een speciale klasse van operatoren, die op een abstracte Hilbertruimte inwerken. Voorbeelden van observabelen zijn de energie, de ruimtelijke coördinaten, de impulscoördinaten en de spincomponenten van deeltjes. Een belangrijk voorbeeld van een observabele is de Pauli-matrix.

Oerstof

Met **oerstof**, **oersubstantie** of **materia prima** wordt in de filosofie de ultieme substantie aangeduid waaruit, waarin, en waardoor alles bestaat. Het is dat wat als ondeelbaar overblijft, indien men analytisch en deductief elke bekende substantie gaat opdelen tot in haar kleinste samenstelling. Omgekeerd kan men ook inductief ervan uitgaan dat aan de basis van alles een enkel oergegeven moet liggen. In de mythologie en in de religies wordt eveneens het concept *oerstof* in verschillende termen genoemd en mee behandeld. En ook de wetenschap blijkt er al lang naar op zoek. In al deze gevallen is wat men zoekt: de eenheid in de verscheidenheid.

Metafysische zoektocht

Het begrip *oerstof* is in de eerste plaats het voorwerp van de metafysica die speculatief op zoek gaat naar wat er zich aan de andere kant van deze fysische wereld bevindt en waaruit dat fysische dan is opgemaakt. In die zin is *oerstof* niet noodzakelijk 'stof'. Het is een elementair gegeven of hoedanigheid van een geheel andere orde (die men dan op een religieus of metafysisch vlak kan situeren).

De elementen

Het speculatieve denken over de aard der dingen werd onder meer door de Griekse natuurfilosofie gsystematiseerd, omdat zij in feite een herbezinningsoefening startte naar het gedachtegoed dat de inmiddels gedegeneerde religie met haar uiterst complex geworden pantheon verhulde. Men was in oost en west reeds vroeger tot het inzicht gekomen dat er onderliggende algemene 'elementen' of hoedanigheden aan de basis van de waarneembare multipliciteit van deze wereld liggen. Zo was er in de Chinese filosofie het yin en yang principe, in de Indiase filosofie kende men het gegeven van de drie guna's. Maar zowat alle antieke filosofieën, waaronder de reeds genoemde, hanteerden bovendien een verdeling in vier of vijf basiselementen: water, vuur, lucht, aarde en eventueel hout (Chinese filosofie) en/of het vijfde element waaruit de voorgaande dan allemaal zijn opgebouwd en waar zij in voor komen, dat dan de kwintessens wordt genoemd of de ruimte of ether, in de Noordse mythologie de kosmische substantie eitr, en door de Grieken ook gepersonifieerd als de god Aether. Deze elementen waren in feite hoedanigheden of fasen van hetzelfde, de *oerstof*. Deze visie moest onder meer toelaten om zoiets als vuur bijvoorbeeld toch een plaats in deze wereld te geven, ook al week het in vorm en eigenschappen sterk af van wat er aan solide structuren deze wereld opbouwt.

Griekse natuurfilosofen

De oudheid van de 7e/5e eeuw v.Chr. is voor de Griekse filosofie de **wordingsperiode**. De filosofieën uit die periode worden kosmologieën genoemd. Hierbij staat de studie van de kosmos of het universum centraal en meer bepaald de éérste principes die er de grondslag van vormen.

De vertegenwoordigers van de School van Milete, de eersten onder de Griekse natuurfilosofen, stellen dat de oorsprong (αρχή, 'archè') van alle zijnden ligt in eenzelfde *oerstof*, die bezielde materie is.

Thales van Milete beschouwde het element water als de *oerstof*. Het is niet duidelijk of hij met 'water' ook letterlijk het water bedoelde zoals dat zich in de fysische wereld voor doet en of hij in feite zocht naar de ultieme stof waaruit de Oeroceaan bestond, die in de mythologieën werd geëvoceerd. Want waarschijnlijker lijkt het, dat het ook hier om een allegorisch beeld ging, waarmee de *samenhangende vloeibaarheid* (het paradoxale samengaan van stabiliteit en flexibiliteit) aan de basis van het oergegeven werd weerspiegeld. In zijn zorg voor het duiden van de eenheid in de verscheidenheid moest hij kiezen voor het element dat elementair bij uitstek leek, het element der elementen. Dat was voor hem de *oerstof*. Over zijn theorieën is niets rechtstreeks opgeschreven. We zijn van Aristoteles afhankelijk voor notities van de Griekse Natuurfilosofen en volgens hem redeneerde Thales dat "*de aarde op water dreef*". De vraag is opnieuw of dit letterlijk genomen moet worden en of het om een beeld gaat om uit te drukken dat de *vaste structuur* ('aarde') gebaseerd is op de aanwezigheid van een hoogst flexibel veld dat met 'water' wordt vergeleken. Ook in antieke mythologieën is de allegorie van water en een oeroceaan, met haar oceaangod, een gegeven dat aan de oorsprong van de gevormde materie ligt. In ieder geval was het een andere natuurfilosoof, Heraclitus, die de stelling poneerde *panta rhei* (παντα ρει), "*alles stroomt; het is allemaal in beweging*" en voor hem beantwoordde 'vuur' het best aan de vereisten om als *oerstof* te worden beschouwd. Bij Anaximandros werd niet één van de vier traditionele elementen als archè aanzien, maar het apeiron. Hiermee bedoelde hij een onbepaalde, ongedifferentieerde en ongestructureerde oermassa, waaruit vervolgens diverse ordeningen ontstaan zijn tot zich de ordening voordeed die wij de kosmos noemen. Zijn volgeling Anaximenes noemde echter terug de lucht als eerste substantie. Bij Pythagoras en de Pythagoreërs gaat men de archè van de kosmos niet langer zoeken in de elementen, maar stelt men dat alles in de kosmos te herleiden valt tot getallen.

Later zou ook Democritus dieper ingaan op vooral de fysische eenheid in de kosmos en doordringen tot het 'ondeelbare' element, dat voor hem dan het α-τομος, het 'atoom' werd en waarvoor hij zelfs een eerste model ontwierp naar analogie met een zonnestelsel.

Religieus getinte zoektocht

Kaballah of Joodse filosofie

In de speculatieve Kaballah of Iejoenieth die rond 135 v.Chr. (begin talmoedische periode) opgeld doet, ontstaat later het concept van de En-Sof, de absolute oneindige God, als *oerstof*. Daarin werd de wereld in al haar verschijningsvormen opgenomen. De energie van de En-Sof wordt getemperd door de Sefirot, die op hun beurt een aantal hoedanigheden, beperkingen of elementen vertegenwoordigen.

Christelijk geïnspireerde filosofie

In de klassieke filosofie werd verder gespeculeerd over de *oerstof* in termen van Het Absolute. Hier is opnieuw de religieuze connotatie niet ver weg. Dit is vooral het geval in de Middeleeuwen waar de westerse filosofie sterk door de religie gemotiveerd wordt. Maar filosofen als Spinoza, Fichte en Hegel voeren er een toenemende *subjectieve* dimensie in door.

Dat laatste was ook reeds veel eerder gebeurd bij de Indiase denkers en filosofen zoals Shankara, die het brahman als vanouds tot de *oerstof* benoemen, dat tegelijk de absolute substantie is die aan de basis van de menselijke geest, het atman, ligt.

Wetenschappelijke zoektocht

Van alchemie tot de tabel van Mendelejev

In het Midden-Oosten werd met *Al Koehl* niet alleen het fijne zwarte houtskoolpoeder bedoeld dat Arabieren rond de oogleden smeren ter bescherming tegen zon en infectie. In overdrachtelijke zin betekende dit woord ook de allerfijnst denkbare stof als essentie van de dingen. Ons woord voor alcohol is ervan afgeleid. *Al Iksir* was dan weer de godendrank als fijnste essentie voor hun levenskenmerk. Het was tegelijk dat wat alle metaal tot goud maakt.

Ook in het westen is de wetenschap zich verder gaan toeleggen op de zoektocht naar de *oerstof*. De alchemie heeft op dat punt baanbrekend werk verricht. In haar zoektocht naar het onveranderlijke goud werden een na een nieuwe 'elementen' ontdekt. En het bleek dat deze atomen uiteindelijk ook allemaal weer splitsbaar waren, in tegenstelling tot wat Democritus ooit had gedacht. Deze vaststelling deed een aantal theoretische fysici besluiten om verder te speculeren over wat nu de feitelijke *oerstof* dan wel is. En deze zoektocht leidde tot de theorieën waarbij de elementaire natuurkrachten een na een werden verenigd, tot er uiteindelijk nog vier leken over te blijven (de zwakke en sterke bindingskracht, elektromagnetisme en de zwaartekracht). Er zijn ten slotte pogingen ondernomen om ook deze elementaire krachten tot een enkele te verenigen in de zogenaamde Grand Unification Theorie, de GUT. Maar de wiskundige berekeningen die hiervoor als bewijzen moeten dienen worden nog steeds door andere wetenschappers aangevochten.

Astronomische observaties en berekeningen van de kosmos hebben intussen geleid tot de aanvaarding van het begrip donkere materie, die op zich niet waarneembaar is. Maar het bestaan ervan wordt wetenschappelijk gepostuleerd om bepaalde inconsistenties in de Oerknaltheorie te verklaren. Metingen met de WMAP brachten aan het licht dat 23% van de massa van het heelal donkere materie is, dat is veel meer dan de 'gewone' zichtbare materie. Niemand weet wat die "donkere materie" is.

Theoretische fysica en kwantummechanica

In de wetenschap is men dus de focus van het (atoom)deeltje gaan verleggen naar een energie, kracht of lading van de oerstof. Men gaat er van uit dat op zeer kleine schaal zowel een deeltje als een golf functie kan waargenomen worden en dat beide in elkaar kunnen overgaan, zodat de ware aard van de oerstof wetenschappelijk nog steeds niet duidelijk is.

Inmiddels zijn er theorieën over een zogenaamd verenigd veld, een onderliggend substraat dat alle materie en energie doordringt en bevat en grote overeenkomsten vertoont met een absoluut vacuüm, het niets. In dit verenigd veld kunnen alle mogelijke deeltjes opkomen en weer verdwijnen, aldus de kwantummechanica. En hier kan men filosofisch nog een stap verder gaan door aan dit 'vacuüm' of 'niets' een bewuste of 'geestelijke dimensie' te geven, die meteen een significante uitleg of alternatief voor een oerstof of liever voor een 'oerprincipe' zou zijn .

Onzekerheidsrelatie van Heisenberg

Kwantummechanica
$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
Onzekerheidsrelatie
Algemene inleiding... [1]
Achtergrond
Klassieke mechanica Interferentie Hamiltonformalisme
Fundamentele begrippen
Kwantumtoestand · Golffunctie · Postulaten Superpositie · Onzekerheidsprincipe Schrödingervergelijking · Tunneffect Uitsluitingsprincipe Diracnotatie
Gevorderde onderwerpen
Interpretatie Klein-Gordonvergelijking Dirac-vergelijking Kwantumveldentheorie Kwantumgravitatie

Experimenten

Schrödingers kat
 Tweespletenexperiment
 Tunneleffect
 Stern-Gerlach-experiment

Wetenschappers

Planck · Einstein · Bohr
 · Sommerfeld · Bose ·
 Kramers · Heisenberg ·
 Born · Jordan · Pauli ·
 Dirac · de Broglie ·
 Schrödinger · von
 Neumann · Wigner ·
 Feynman · Bohm ·
 Everett · Bell

De **onzekerheidsrelatie van Heisenberg**, door Werner Heisenberg in 1927 gepubliceerd, is een van de belangrijkste resultaten van de kwantummechanica. De relatie drukt uit dat er zgn. incommensurabele paren van grootheden bestaan, waarvoor geldt dat niet van beide grootheden de waarden tegelijkertijd exact kunnen vastliggen. Een voorbeeld van zo'n paar is: plaats en impuls. Een ander voorbeeld is: energie en tijd. Elke theorie die een kwantummechanisch systeem beschrijft moet deze relatie bevatten. In golf functies die oplossingen zijn van Schrödingers golfvergelijking hebben de daaruit af te leiden plaats en impuls geen scherp gedefinieerde waarden, maar zijn zij stochastische variabelen met kansverdelingen die impliciet in de golfvergelijking besloten liggen. De kansverdelingen van die twee grootheden hangen met elkaar samen: als de standaardafwijking van de ene kleiner wordt, wordt die van de andere automatisch groter. Heisenberg formuleerde de ondergrens voor het product van standaarddeviaties voor de kansverdelingen van plaats en impuls als volgt:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

waarbij Δx de onzekerheid (standaardafwijking) in de plaats is, Δp de onzekerheid in de impuls en h de constante van Planck. De waarde van deze constante is $(6,626\ 069\ 3 \pm 0,000\ 001\ 1) \times 10^{-34}$ Js.

Tegenwoordig schrijft men deze uitdrukking vaak met een aangepaste versie van de constante h , de zogenaamde constante van Dirac \hbar , h -streep geheten:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

De onzekerheidsrelatie van Heisenberg heeft belangrijke gevolgen in veel takken van de natuurkunde, op subatomaire schaal (kwantumfysica). Voor macroscopische voorwerpen, zoals stoelen, huizen of stuifmeelkorrels, geldt de relatie uiteraard ook, maar is de onzekerheid verwaarloosbaar doordat de constante van Planck zo klein is. Een belangrijk gevolg van de onzekerheidsrelatie is dat metingen altijd invloed hebben op het systeem. Wordt bijvoorbeeld zeer exact de plaats van een deeltje gemeten, dan zal hierdoor de impuls, en dus de snelheid, zeer onzeker worden. Een inperking van de plaats heeft hetzelfde effect. Een goed voorbeeld hiervan is een stroom elektronen die op een plaat met een klein gaatje valt. De elektronen die door het gaatje vliegen, hebben een kort moment een zeer exact bepaalde positie in het vlak van de plaat. Hieruit volgt dat hun impuls parallel aan de plaat zeer onzeker is; de stroom elektronen zal uiteen waaieren achter de plaat en vertoont dus diffractie. Een elektron heeft dus ook het karakter van een golf.

Ook voor andere grootheden dan plaats en impuls geldt een vergelijkbaar verband. Van belang is de onzekerheidsrelatie voor tijd t en energie E

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{4\pi}$$

Dit betekent dat de hoeveelheid energie in een systeem des te onzekerder is naarmate de tijdschaal waarop het systeem varieert kleiner is. Hierdoor kan er ook als het ware energie 'geleend' worden, wat onder meer aanleiding geeft tot het bestaan van virtuele deeltjes en het tunneleffect.

Afleiding

In de kwantummechanica zijn plaats x en impuls p Hermitische operatoren. Volgens de ongelijkheid van Schwarz geldt algemeen:

$$\text{var}(x)\text{var}(p) \geq |\text{cov}(x, p)|^2.$$

Zonder de algemeenheid te schaden nemen we aan dat $Ex = 0$ en $Ep = 0$. Nu is:

$$2|\text{cov}(x, p)| \geq 2|\text{Im cov}(x, p)| = |\text{cov}(x, p) - \text{cov}(p, x)| = |\text{E}(xp) - \text{E}(px)| = |\text{E}(xp - px)| = |i\hbar| = \hbar,$$

zodat volgt:

$$\sigma(x)\sigma(p) \geq \frac{\hbar}{2}.$$

Daarbij is gebruikgemaakt van het feit dat de operatoren x en p niet commuteren, wat inhoudt dat hun volgorde belangrijk is. In de kwantummechanica wordt gewerkt met het volgende postulaat:

$$[x, p] = xp - px = i\hbar.$$

Dit is ook te zien aan de Schrödinger-operatoren in de plaats-ruimte:

$$(xp - px)\psi = x \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} \psi - \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} (x\psi) = x \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} \psi - \frac{\hbar}{i} \psi - x \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} \psi = i\hbar\psi.$$

Externe links

- (en) Uitleg ^[1]
- (en) Uitgebreide uitleg ^[2]
- (en) The certainty principle ^[3]

Referenties

- [1] <http://www.doingnothing.com/ta9.html>
 [2] <http://plato.stanford.edu/entries/qt-uncertainty/>
 [3] <http://daarb.narod.ru/tcp-eng.html>

P-braan

Een **p-braan** is een begrip uit de theoretische fysica, meer bepaald uit supergravitatie. Een p-braan is een ruimtelijk uitgestrekt voorwerp met een bepaalde massa en lading, en wordt -net als de meeste objecten die onderzocht worden in de theoretische fysica- bestudeerd louter op basis van de wiskundige eigenschappen van het object. Of p-branen echt bestaan, hangt af van de vraag of supergravitatie een correcte uitbreiding van de fysica is, en hangt dus nauw samen met de vraag of supersymmetrie bestaat. Deze vraag zou (volgens sommige fysici) kunnen beantwoord worden door experimenten in de nieuwe deeltjesversneller in CERN, de Large Hadron Collider.

Technische informatie

Een p-braan is een oplossing van de veldvergelijkingen van de supergravitatie-theorie in kwestie, en beschrijft een massief, geladen object, met ruimtelijke dimensie p , ingebed in een bepaalde achtergrond-ruimte. Net als een zwart gat, heeft een p-braan een horizon, waarin materie kan verdwijnen, maar niet uit kan ontsnappen. Onderzoek naar de eigenschappen van p-branen heeft het bestaan van D-branen onthuld in snaartheorie. Deze geven een microscopisch beeld van een p-braan, namelijk de *bron* van de geometrie rondom een p-braan. Het verband tussen p- en D-branen is erg analoog aan het verband tussen elektrisch geladen objecten en elektronen/protonen. De eersten zijn macroscopische objecten, met een meetbare lading etc., terwijl het tweede de microscopische objecten zijn, welke -indien talrijk aanwezig- aanleiding geven tot een macroscopisch object. Meer precies zijn D-branen de solitonische objecten die men als aparte objecten moet toevoegen aan de perturbatieve beschrijving van snaartheorie.

Padintegraal

Een **padintegraal** is een door de natuurkundige Richard Feynman in 1948 gelanceerd wiskundig begrip om de niet-relativistische kwantummechanica te kunnen formuleren in termen van de actie (gelijk aan de integraal over de tijd van de Lagrangiaan) uit de klassieke mechanica.

De niet-relativistische kwantummechanica associeert met iedere mogelijk toestand van een systeem, een complex getal. De aldus ontstane golffunctie voorspelt de waarschijnlijkheid dat het systeem zich in een bepaalde toestand bevindt.

Feynman associeert een complex getal met iedere mogelijke *evolutie* van het systeem. Dit is een functie op een oneindig-dimensionale ruimte, ook als het systeem zelf een eindig aantal deeltjes in drie meetkundige dimensies betreft. De aldus ontstane "golffunctionaal" voorspelt volgens hem de waarschijnlijkheid dat het systeem een bepaalde tijdsevolutie volgt.

Op een evenredigheidsfactor na is de golffunctie van Feynman

$$\exp\left(\frac{i}{\hbar} \int_0^t L(\dot{x}(s), x(s), s) ds\right)$$

waar L de Lagrange-functie is, en $x : [0, t] \rightarrow \mathbb{R}^n : s \mapsto x(s)$ een mogelijke evolutie van het systeem tussen de tijdstippen 0 en t . (We hebben als toestandsruimte de reële as \mathbb{R}^n gekozen, dit kan natuurlijk ook \mathbb{R}^n of een zelfs een algemene gladde variëteit zijn)

Voorbeeld

Voor een puntmassa m in een conservatieve energiepotentiaal V is de Lagrange-functie het verschil tussen kinetische en potentiële energie:

$$L = \frac{1}{2}m\{\dot{x}(s)\}^2 - V(x(s))$$

Wiskundig probleem

Het optellen van alle mogelijke evoluties die tot een gegeven waarneming leiden, vereist een integraal over een oneindigdimensionale parameter. Feynman zelf noteert dit als

$$\int_{\omega} \exp\left(\frac{i}{\hbar} \int_0^t L(\dot{\omega}(s), \omega(s), s) ds\right) d\omega$$

en stelt dat de integratieveranderlijke $d\omega$ "varieert over alle mogelijke differentieerbare tijdsevoluties van het systeem met gegeven begin- en eindvoorwaarden".

Een wiskundig consistente formulering ligt niet voor de hand. Er zijn verschillende voorstellen gedaan om Feynmans **padintegralen** een streng wiskundig kader te geven. De twee meest geciteerde interpretaties zijn:

- veralgemeen het begrip Fresnelintegraal tot oneindigdimensionale ruimten;
- herformuleer de theorie in termen van Brownse beweging (wiskunde) en de Wienerintegraal.

De eerste benadering (veralgemeende Fresnelintegraal) sluit het nauwst aan bij Feynmans oorspronkelijke formulering, maar vereist strenge voorwaarden op de actiefunctie om nog zinvolle convergente integralen op te leveren.

De tweede benadering wijkt op twee belangrijke punten van de Feynmanintegraal af: (1) de factor i in de exponent wordt door -1 vervangen, en (2) de integraal verloopt over alle *continue* evoluties van het systeem, waarbij de differentieerbare evoluties in de minderheid zijn (technisch vormen ze een nulverzameling voor de Wienermaat). Het is evenwel de meest krachtige formulering, omdat binnen het rigide raamwerk van de Brownse beweging vele resultaten van de waarschijnlijkheidsrekening ter beschikking staan. Zie Feynman-Kac-formalisme.

Toepassing

Ondanks het *flou artistique* dat de wiskundige strengheid van padintegralen omgeeft, hebben ze aanleiding gegeven tot zeer concrete baanbrekende resultaten in de natuurkunde, onder meer in de formulering van de kwantumelektrodynamica (QED).

Referenties

1. R.P.Feynman, Space-Time Approach to Non-relativistic Quantum Mechanics, *Review of Modern Physics* vol.20 (1948), pp.367 e.v.
2. Richard P. Feynman en Albert R. Hibbs, "Quantum Mechanics and Path Integrals", McGraw-Hill 1965.

Pariteitsymmetrie

Pariteitsymmetrie is de invariantie van een systeem onder een pariteitstransformatie. Bij een pariteitstransformatie worden de ruimtelijke coördinaten geïnverteerd.

$$P : \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix}$$

In een driedimensionale ruimte kan men pariteitstransformatie niet beschouwen als een rotatie, echter in een tweedimensionaal vlak is pariteitstransformatie te beschouwen als een rotatie van 180° .

In de klassieke mechanica zijn Newtons tweede wet,

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

en impulsmoment

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

bijvoorbeeld invariant onder pariteitstransformatie.

$$P(\vec{L}) = P(\vec{r} \times \vec{p}) = -\vec{r} \times -\vec{p} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{L}$$

De Maxwell vergelijkingen zijn ook invariant onder pariteitstransformatie. Als men twee ladingen omwisselt, zal het elektrische veld en de stroomdichtheid van teken veranderen, maar dit geldt niet voor de ladingsdichtheid en het magnetische veld.

$$P(\rho) = \rho$$

$$P(\vec{J}) = -\vec{J}$$

$$P(\vec{E}) = -\vec{E}$$

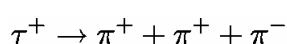
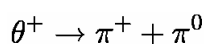
$$P(\vec{B}) = \vec{B}$$

De Maxwell vergelijkingen zijn invariant onder de combinatie van bovenstaande transformaties.

Echter het is gebleken dat pariteit geen symmetrie is, het wordt namelijk geschonden bij de zwakke wisselwerking, er is tot op heden geen sprake van schending in de sterke wisselwerking, elektromagnetisme en de gravitatiekracht.

De schending van pariteitsymmetrie is meerdere keren gesuggereerd, maar dit werd niet serieus genomen bij gebrek aan bewijs. Een onderzoek door de theoretische fysici Tsung Dao Lee en Chen Ning Yang gaf aan dat er sprake was van een symmetrie in de sterke wisselwerking, maar dat er geen onderzoek naar was gedaan in de zwakke wisselwerking. Zij stelden verschillende experimenten voor die konden uitwijzen of er sprake was van een symmetrie in de zwakke wisselwerking. Zij werden echter bijna geheel genegeerd, maar Lee wist zijn collega Chien-Shiung Wu te overtuigen om het te onderzoeken. Wegens benodigde speciale apparatuur werd het experiment uitgevoerd op The National Bureau of Standards, tegenwoordig The National Bureau of Standards and Technology. In 1956-57 ontdekten Wu, E. Ambler, R.W. Hayward, D.D. Hoppes en R.P. Hudson een duidelijke schending van pariteitbehoud in het bètaverval van kobalt-60. Terwijl het onderzoek langzaam afgebouwd werd, informeerde Wu haar collega's van de universiteit van Colombia van hun resultaten. Drie collega's, R.L. Garwin, Leon Lederman en R. Weinrich pasten een bestaand cyclotron experiment aan en verifieerden de schending van pariteitsymmetrie. De twee groepen publiceerden gelijktijdig hun resultaten.

Dankzij de ontdekking van pariteitschending kon men de zogenaamde T- θ -puzzel oplossen. Deze puzzel gaat om de volgende vervalreacties:



Aangezien de twee eindtoestanden verschillende pariteit hebben, dacht men dat de begintoestanden ook verschillende pariteit hadden. Echter dankzij steeds preciezere metingen kwam men erachter dat het om dezelfde deeltjes ging. Dankzij pariteitscheiding hoeft pariteit niet behouden te blijven en konden de twee vervalreacties veroorzaakt worden door hetzelfde deeltje, K^+ .

Pauli-matrix

In de natuurkunde zijn de **Pauli matrices** een verzameling van 2×2 complexe Hermitische en unitaire matrices (zie ook ref.^[1]). Meestal aangeduid met de Griekse letter sigma (σ), worden zij soms ook aangeduid met een 'tau' (τ), wanneer Pauli-matrices gebruikt worden in verband met isospin-symmetrieën. Zij zijn:

$$\begin{aligned}\sigma_1 = \sigma_x &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \\ \sigma_2 = \sigma_y &= \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \\ \sigma_3 = \sigma_z &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.\end{aligned}$$

De naam verwijst naar Wolfgang Pauli.

De reële (dus ook, complexe) deelalgebra, die wordt gegenereerd door de σ_i (dat wil zeggen de verzameling van reële of complexe lineaire combinaties van alle elementen, die kunnen worden geconstrueerd als producten van Pauli-matrices) is de volledige verzameling $\mathbf{M}_2(\mathbf{C})$ van complexe 2×2 matrices. De σ_i kan ook gezien worden als de generator van de reële Clifford-algebra van de reële kwadratische vorm met "handtekening" (3.0): dit toont aan dat deze Clifford-algebra $Cl_{3,0}(\mathbf{R})$ isomorf is met $\mathbf{M}_2(\mathbf{C})$, waar de Pauli-matrices voorzien in een expliciet isomorfisme. (In het bijzonder definiëren de Pauli-matrices een getrouwe representatie van de reële Clifford-algebra $Cl_{3,0}(\mathbf{R})$ over de complexe vectorruimte \mathbf{C}^2 van dimensie 2.)

Voetnoten

[1] <http://planetmath.org/encyclopedia/PauliMatrices.html>

Referenties

- (en) Liboff, Richard L.. *Introductory Quantum Mechanics*, Addison-Wesley, 2002 ISBN 0-8053-8714-5.
- (en) Schiff, Leonard I.. *Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, 1968

Pentaquark

Een **pentaquark** is een (hypothetisch) subatomair deeltje dat bestaat uit 5 quarks. Tot nu heeft men het pentaquark nog niet gevonden. Het pentaquark is speciaal omdat het zou bestaan uit 5 quarks, terwijl de tot nu toe bekende hadronen uit 2 of 3 quarks bestaan.

Aanwijzingen

Men heeft in 2003 aanwijzingen gevonden dat er pentaquarks - "exotische" baryonen de bestaan uit vier quarks en één antiquark - zouden bestaan.^{[1][2]} Men vond deze aanwijzingen door de beschieting van koolstofatomen met fotonen van hoge energie. Het pentaquark zou bestaan uit 2 up-quarks, 2 down-quarks en 1 anti-strange quark. Een pentaquark vervalst zeer snel.

Als een pentaquark echt zou bestaan is dit van enorm belang voor de kwantumchromodynamica, dit is een theorie die beschrijft hoe het komt dat quarks altijd in groepjes voorkomen.

Huidige status

De deeltjesfysicagemeenschap als geheel achtte hun bestaan in 2006 niet zo waarschijnlijk,^[3] en was in 2008 met overweldigende meerderheid van mening dat er geen bewijs was voor het bestaan van de gemelde pentaquarks.^[4]

Voetnoten

[1] (en) H. Muir (2003)

[2] (en) K. Carter (2003)

[3] (en) W.-M. Yao *et al.* (2006): Particle listings - Θ (http://pdg.lbl.gov/2006/reviews/theta_b152.pdf)

[4] (en) C. Amsler *et al.* (2008): Pentaquarks (http://pdg.lbl.gov/2008/reviews/pentaquarks_b801.pdf)

Periodiek systeem/Golffuncties

De banen van de elektronen worden beschreven door wiskundige formules: de golffuncties.

De golfmechanica of kwantummechanica gaat uit van het idee dat golven en deeltjes twee verschijningsvormen van hetzelfde fenomeen zijn. Aan een deeltje met massa m en snelheid v wordt een golflengte toegekend van $\lambda = h/mv$. Het deeltje heeft dus ook eigenschappen die kenmerkend voor een golf zijn.

Dit heeft belangrijke gevolgen voor de opbouw van een atoom. Wanneer een golfbeweging ingevangen wordt in een beperkte ruimte, bijvoorbeeld een trilling op een snaar van een gitaar of in de luchtkolom van een fluit, ontstaat er altijd een beperkt aantal staande trillingswijzen. Deze worden meestal harmonischen genoemd. Ook op het trillingsvlies van een trom zijn maar een

beperkt aantal trillingswijzen mogelijk met een bepaald patroon van buiken en knopen. Als een elektron met zijn negatieve lading ingevangen wordt rond de positieve kern gebeurt in feite hetzelfde. Het elektron kan kiezen uit een beperkt aantal trillingswijzen. Deze kunnen beschreven worden met golffuncties, die gerangschikt worden naar hun patroon van buiken en knopen:

- s functies zijn bolvormig zonder horizontaal of verticaal knoopvlak
- p functies hebben één horizontaal of verticaal knoopvlak
- d functies hebben twee knoopvlakken die loodrecht op elkaar staan
- f functies hebben drie loodrecht op elkaar staande knoopvlakken

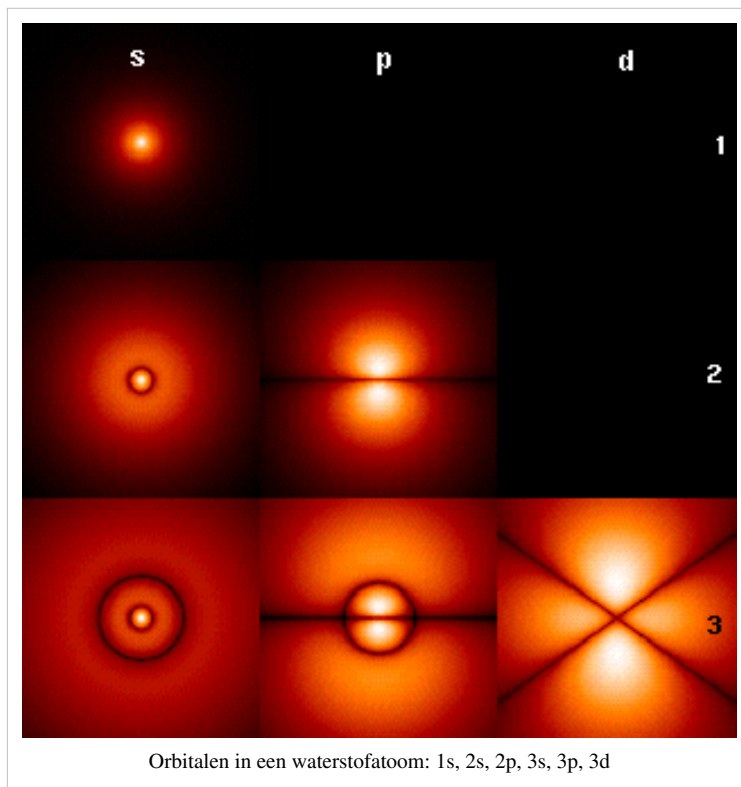
(Er zijn nog hogere functies die met g,h,i,j, enz aangegeven worden, maar zij zijn minder belangrijk voor de atoomopbouw.)

Ook s-functies kunnen knopen hebben maar zij zijn bolvormig in plaats van vlak, zoals de schillen van een ui. Zo heeft de 1s functie geen knoopvlak, 2s één, 3s twee, 4s drie, in het algemeen ns heeft er n-1. Dit is vergelijkbaar met de boventonen op een snaar. Het getal n in ns wordt het hoofdkwantumgetal genoemd.

Een p-functie is pas mogelijk vanaf n=2, een d-functie vanaf n=3 enz. Dit betekent dat de volgende golffuncties beschikbaar zijn.:

```
1s
2s 2p
3s 3p 3d
4s 4p 4d 4f
enz.
```

Er is maar één 4s functie, maar drie 4p's, vijf 4d's, zeven 4f's enzovoorts.



Elektronen zijn fermionen, dit zijn deeltjes met een halftallige spin, die de eigenschappen hebben dat er altijd maar één deeltje dezelfde *totale* golffunctie kan bezitten. De spin van een elektron is $s=1/2$ en dat betekent dat het elektron in twee spintoestanden kan voorkomen: spin op en spin neer. Omdat dit de totale golffunctie verschillend maakt, passen er twee elektronen in één trillingswijze rond de kern van het atoom. Dat wil zeggen dat er bijvoorbeeld $2 \times 7 = 14$ elektronen in de 4f functies passen.

Op zich kunnen elektronen zich op vele wijzen over de beschikbare golffuncties van een atoom verdelen. Bijvoorbeeld een lithium atoom heeft drie elektronen. Zij zouden bijvoorbeeld in een 1s, een 2p en een 4f functie kunnen zitten. Die **elektronenconfiguratie** zou dan geschreven worden als $1s^1 2p^1 4f^1$. Echter deze verdeling is niet de verdeling die de laagste energie heeft. Dat is de configuratie $1s^2 2s^1$, waarin twee elektronen in de 1s functie zitten (met tegengestelde spin!) en één in de 2s functie. Deze toestand wordt de *grondtoestand* genoemd. Enige andere configuratie is een *aangeslagen* toestand die spontaan onder uitzending van zijn overtollige energie in de vorm van een foton zal terugvallen naar de grondtoestand. Meestal duurt dat maar fracties van een seconde. Meestal hebben we dus te maken met de configuratie van de grondtoestand.

De elektronenconfiguratie (van de grondtoestand) bepaalt in grote mate de chemische eigenschappen van het atoom. Het periodiek systeem weerspiegelt de manier waarop de golffuncties worden opgevuld met toenemend atoomnummer, dat wil zeggen met toenemen van het aantal elektronen in de wolk rond de kern. Meestal zijn alleen de buitenste paar elektronen betrokken bij de chemische eigenschappen van het element. Daarom wordt de configuratie meestal vereenvoudigd geschreven door de binnenelektronen weer te geven in de vorm van het dichtstbijzijnde edelgas onder het element. Bijvoorbeeld voor natrium kunnen we voluit schrijven: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$, maar meestal worden de volle binnenschillen $1s^2 2s^2 2p^6$ afgekort als het element dat deze configuratie heeft (neon) en schrijft men $[\text{Ne}]3s^1$.

Periodiek systeem/Tabel met verkorte benoeming van de elektronenconfiguratie

De kolom "Oxidatietoestanden" geeft de mogelijke valenties bij verbindingen. De opgave is niet volledig. De edelgassen bijvoorbeeld hebben een oxidatiestaat van 0, maar van Xenon en Krypton zijn verbindingen bekend.

(Zie ook: elektronenconfiguratie)

Nr	Sym.	Schillen	Subschillen	Oxidatietoestanden
1	H	1	1s1	±1
2	He	2	1s2	0
Nr	Sym.	Schillen	Subschillen	Oxidatietoestanden
3	Li	2,1	[He]2s1	+1
4	Be	2,2	[He]2s2	+2
5	B	2,3	[He]2s2 2p1	+3
6	C	2,4	[He]2s2 2p2	+2,±4
7	N	2,5	[He]2s2 2p3	±1,±2,±3,+4,+5
8	O	2,6	[He]2s2 2p4	-2
9	F	2,7	[He]2s2 2p5	-1
10	Ne	2,8	[He]2s2 2p6	0
Nr	Sym.	Schillen	Subschillen	Oxidatietoestanden
11	Na	2,8,1	[Ne]3s1	+1

12	Mg	2,8,2	[Ne]3s ²	+2
13	Al	2,8,3	[Ne]3s ² 3p ¹	+3
14	Si	2,8,4	[Ne]3s ² 3p ²	+2,±4
15	P	2,8,5	[Ne]3s ² 3p ³	±3,+5
16	S	2,8,6	[Ne]3s ² 3p ⁴	-2,+4,+6
17	Cl	2,8,7	[Ne]3s ² 3p ⁵	±1,+5+,7
18	Ar	2,8,8	[Ne]3s ² 3p ⁶	0
Nr	Sym.	Schillen	Subschillen	Oxidatietoestanden
19	K	2,8,8,1	[Ar]4s ¹	+1
20	Ca	2,8,8,2	[Ar]4s ²	+2
21	Sc	2,8,9,2	[Ar]4s ² 3d ¹	+3
22	Ti	2,8,10,2	[Ar]4s ² 3d ²	+2,+3,+4
23	V	2,8,11,2	[Ar]4s ² 3d ³	+2,+3,+4,+5
24	Cr	2,8,13,1	[Ar]4s ¹ 3d ⁵	+2,+3,+6
25	Mn	2,8,13,2	[Ar]4s ² 3d ⁵	+2,+3,+4,+7
26	Fe	2,8,14,2	[Ar]4s ² 3d ⁶	+2,+3
27	Co	2,8,15,2	[Ar]4s ² 3d ⁷	+2,+3
28	Ni	2,8,16,2	[Ar]4s ² 3d ⁸	+2,+3
29	Cu	2,8,18,1	[Ar]4s ¹ 3d ¹⁰	+1,+2
30	Zn	2,8,18,2	[Ar]4s ² 3d ¹⁰	+2
31	Ga	2,8,18,3	[Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ¹	+3
32	Ge	2,8,18,4	[Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ²	+2,+4
33	As	2,8,18,5	[Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ³	±3,+5
34	Se	2,8,18,6	[Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁴	-2,+4,+6
35	Br	2,8,18,7	[Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁵	±1,5
36	Kr	2,8,18,8	[Ar]4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁶	0
Nr	Sym.	Schillen	Subschillen	Oxidatietoestanden
37	Rb	2,8,18,8,1	[Kr]5s ¹	+1
38	Sr	2,8,18,8,2	[Kr]5s ²	+2
39	Y	2,8,18,9,2	[Kr]5s ² 4d ¹	+3
40	Zr	2,8,18,10,2	[Kr]5s ² 4d ²	+4
41	Nb	2,8,18,12,1	[Kr]5s ¹ 4d ⁴	+3,+5
42	Mo	2,8,18,13,1	[Kr]5s ¹ 4d ⁵	+6
43	Tc	2,8,18,13,2	[Kr]5s ² 4d ⁵	+4,+6,+7
44	Ru	2,8,18,15,1	[Kr]5s ¹ 4d ⁷	+3
45	Rh	2,8,18,16,1	[Kr]5s ¹ 4d ⁸	+3
46	Pd	2,8,18,18,0	[Kr]5s ⁰ 4d ¹⁰	+2,+4
47	Ag	2,8,18,18,1	[Kr]5s ¹ 4d ¹⁰	+1
48	Cd	2,8,18,18,2	[Kr]5s ² 4d ¹⁰	+2

49	In	2,8,18,18,3	[Kr]5s2 4d10 5p1	+3
50	Sn	2,8,18,18,4	[Kr]5s2 4d10 5p2	+2,+4
51	Sb	2,8,18,18,5	[Kr]5s2 4d10 5p3	±3,+5
52	Te	2,8,18,18,6	[Kr]5s2 4d10 5p4	-2,+4,+6
53	I	2,8,18,18,7	[Kr]5s2 4d10 5p5	±1,+5,+7
54	Xe	2,8,18,18,8	[Kr]5s2 4d10 5p6	0
Nr	Sym.	Schillen	Subschillen	Oxidatietoestanden
55	Cs	2,8,18,18,8,1	[Xe]6s1	+1
56	Ba	2,8,18,18,8,2	[Xe]6s2	+2
Nr	Sym.	Schillen	Subschillen	Oxidatietoestanden
57	La	2,8,18,18,9,2	[Xe]6s2 5d1	+3
58	Ce	2,8,18,19,9,2	[Xe]6s2 5d0 4f2	3,4
59	Pr	2,8,18,21,8,2	[Xe]6s2 5d0 4f3	+3
60	Nd	2,8,18,22,8,2	[Xe]6s2 5d0 4f4	+3
61	Pm	2,8,18,23,8,2	[Xe]6s2 5d0 4f5	+3
62	Sm	2,8,18,24,8,2	[Xe]6s2 5d0 4f6	+2,+3
63	Eu	2,8,18,25,8,2	[Xe]6s2 5d0 4f7	+2,+3
64	Gd	2,8,18,25,9,2	[Xe]6s2 5d1 4f7	+3
65	Tb	2,8,18,27,8,2	[Xe]6s2 5d0 4f9	+3
66	Dy	2,8,18,28,8,2	[Xe]6s2 5d0 4f10	+3
67	Ho	2,8,18,29,8,2	[Xe]6s2 5d0 4f11	+3
68	Er	2,8,18,30,8,2	[Xe]6s2 5d0 4f12	+3
69	Tm	2,8,18,31,8,2	[Xe]6s2 5d0 4f13	+3
70	Yb	2,8,18,32,8,2	[Xe]6s2 5d0 4f14	+2,+3
71	Lu	2,8,18,32,9,2	[Xe]6s2 5d1 4f14	+3
Nr	Sym.	Schillen	Subschillen	Oxidatietoestanden
72	Hf	2,8,18,32,10,2	[Xe]6s2 4f14 5d2	+4
73	Ta	2,8,18,32,11,2	[Xe]6s2 4f14 5d3	+5
74	W	2,8,18,32,12,2	[Xe]6s2 4f14 5d4	+6
75	Re	2,8,18,32,13,2	[Xe]6s2 4f14 5d5	+4,+6,+7
76	Os	2,8,18,32,14,2	[Xe]6s2 4f14 5d6	+3,+4
77	Ir	2,8,18,32,15,2	[Xe]6s2 4f14 5d7	+3,+4
78	Pt	2,8,18,32,16,2	[Xe]6s1 4f14 5d9	+2,+4
79	Au	2,8,18,32,18,1	[Xe]6s1 4f14 5d10	+1,+3
80	Hg	2,8,18,32,18,2	[Xe]6s2 4f14 5d10	+1,+2
81	Tl	2,8,18,32,18,3	[Xe]6s2 4f14 5d10 6p1	+1,+3
82	Pb	2,8,18,32,18,4	[Xe]6s2 4f14 5d10 6p2	+2,+4
83	Bi	2,8,18,32,18,5	[Xe]6s2 4f14 5d10 6p3	+3,+5
84	Po	2,8,18,32,18,6	[Xe]6s2 4f14 5d10 6p4	+2,+4,+6

85	At	2,8,18,32,18,7	[Xe]4f14 5d10 6s2 6p5	±1,5,7
86	Rn	2,8,18,32,18,8	[Xe]6s2 4f14 5d10 6p6	0
Nr	Sym.	Schillen	Subschillen	Oxidatietoestanden
87	Fr	2,8,18,32,18,8,1	[Rn]7s1	+1
88	Ra	2,8,18,32,18,8,2	[Rn]7s2	+2
Nr	Sym.	Schillen	Subschillen	Oxidatietoestanden
89	Ac	2,8,18,32,18,9,2	[Rn]7s2 6d1	+3
90	Th	2,8,18,32,18,10,2	[Rn]7s2 6d2	+4
91	Pa	2,8,18,32,20,9,2	[Rn]7s2 5f2 6d1	+4,+5
92	U	2,8,18,32,21,9,2	[Rn]7s2 5f3 6d1	+3,+4,+5,+6
93	Np	2,8,18,32,22,9,2	[Rn]7s2 5f4 6d1	+3,+4,+5,+6
94	Pu	2,8,18,32,24,8,2	[Rn]7s2 5f6	+3,+4,+5,+6
95	Am	2,8,18,32,25,8,2	[Rn]7s2 5f7	+3,+4,+5,+6
96	Cm	2,8,18,32,25,9,2	[Rn]7s2 5f7 6d1	+3
97	Bk	2,8,18,32,27,8,2	[Rn]7s2 5f9	+3,+4
98	Cf	2,8,18,32,28,8,2	[Rn]7s2 5f10	+3
99	Es	2,8,18,32,29,8,2	[Rn]7s2 5f11	+3
100	Fm	2,8,18,32,30,8,2	[Rn]7s2 5f12	+3
101	Md	2,8,18,32,31,8,2	[Rn]7s2 5f13	+2,+3
102	No	2,8,18,32,32,8,2	[Rn]7s2 5f14	+2,+3
103	Lr	2,8,18,32,32,9,2	[Rn]7s2 5f14 6d1	+3
Nr	Sym.	Schillen	Subschillen	Oxidatietoestanden
104	Rf	2,8,18,32,32,10,2	[Rn]7s2 5f14 6d2	+4
105	Db	2,8,18,32,32,11,2	[Rn]7s2 5f14 6d3	?
106	Sg	2,8,18,32,32,12,2	[Rn]7s2 5f14 6d4	?
107	Bh	2,8,18,32,32,13,2	[Rn]7s2 5f14 6d5	?
108	Hs	2,8,18,32,32,14,2	[Rn]7s2 5f14 6d6	?
109	Mt	2,8,18,32,32,15,2	[Rn]7s2 5f14 6d7	?
110	Ds	2,8,18,32,32,16,2	[Rn]7s1 5f14 6d9	?
111	Rg	2,8,18,32,32,17,2	[Rn]7s1 5f14 6d10	?
112	Cn	2,8,18,32,32,18,2	[Rn]7s2 5f14 6d10	?
113	Uut	2,8,18,32,32,18,3	[Rn]7s2 5f14 6d10 7p1	?
114	Uuq	2,8,18,32,32,18,4	[Rn]7s2 5f14 6d10 7p2	?
115	Uup	2,8,18,32,32,18,5	[Rn]7s2 5f14 6d10 7p3	?
116	Uuh	2,8,18,32,32,18,6	[Rn]7s2 5f14 6d10 7p4	?
117	Uus	2,8,18,32,32,18,7	[Rn]7s2 5f14 6d10 7p5	?
118	Uuo	2,8,18,32,32,18,8	[Rn]7s2 5f14 6d10 7p6	?

Chemische elementen en isotopen

Periodiek systeem: Standaard · Alternatief · Elektronenconfiguratie
Isotopentabel: Op element (compleet) · Op element (in delen) · Op
 atoommassa
 Lijst van elementen

Planckdeeltje

Planckdeeltjes, genoemd naar Max Planck, zijn de kleinst mogelijke deeltjes en hebben een grootte van minimaal de Plancklengte (10^{-35} meter), maar een massa m_P die gelijk is aan:

$$m_P = \sqrt{\frac{c \cdot \hbar}{G}} \approx 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$$

Daarmee zou een Planckdeeltje de dichtheid hebben van een soort elementair zwart gat. Volgens sommige theorieën is de 'lege' ruimte geheel gevuld met Planckdeeltjes, en zijn deze de begrenzers van de lichtsnelheid in het vacuüm en de eigenlijke oorsprong van zwaartekracht.

Plancklengte

Volgens de huidige stand van de wetenschap is de **Plancklengte**, ook **kwantumlengte** genoemd, de kleinste lengte die in onze kosmos voorkomt; kleinere afstanden kunnen niet voorkomen. De Plancklengte is een Planck-eenheid, een natuurlijke eenheid die alleen van natuurconstanten is afgeleid.

De Plancklengte is gelijk aan de vierkantswortel van het product van de gravitatieconstante (G) en de planckconstante (\hbar) gedeeld door de derdemacht van de lichtsnelheid (c):

$$l_P = \sqrt{\frac{G \cdot \hbar}{c^3}} \approx 1,6162412 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

Dat is ongeveer een honderd triljoenste deel van de middellijn van een proton, oftewel 0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 016 162 412 meter. Om deze ontzaglijk kleine schaal te verduidelijken: stel je voor dat een proton opgeblazen zou worden tot de grootte van de gehele Melkweg. Een planckdeeltje zou op deze schaal dan de grootte hebben van een mens.

Plancktemperatuur

De **Plancktemperatuur**, vernoemd naar de Duitse natuurkundige Max Planck, is een eenheid van temperatuur genoteerd als T_P . Over het algemeen geven de Planckeenheden de grenzen weer van de kwantummechanica. De Plancktemperatuur is de hoogste temperatuur denkbaar, het is de temperatuur waarop wordt gezegd dat zwarte gaten verdampen en waarmee het heelal is begonnen en vandaar weer is afgekoeld volgens de huidige kosmologie. De Plancktemperatuur is de temperatuur zoals die was 5×10^{-44} seconden na de Big Bang.

De formule voor deze temperatuur luidt:

$$T_P = \frac{m_P c^2}{k} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k^2}} \approx 1,41679(11) \times 10^{32} \text{ K}$$

waarin:

- m_P de Planckmassa,
- c de lichtsnelheid in vacuüm,
- \hbar de gereduceerde constante van Planck of ook wel de constante van Dirac,
- k de constante van Boltzmann en
- G de gravitatieconstante is.

Plancktijd

De **Plancktijd**, ook **kwantumtijd** genoemd, is volgens de huidige stand van de wetenschap de kleinste betekenisvolle lengte van tijd. Deze tijd is een natuurlijke eenheid, bedacht door Max Planck, die alleen is afgeleid van natuurconstanten.

De Plancktijd is gelijk aan de tijd die licht nodig heeft om een Plancklengte af te leggen, dus

$$t_P = \frac{l_P}{c} = \sqrt{\frac{G \hbar}{c^5}} = 5,391 \cdot 10^{-44} \text{ s}$$

De Plancktijd speelt met name een belangrijke rol bij theorieën rond de Oerknal en in de unificatietheorie.

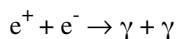
Positron

Een **positron** (ook: positon) is het antideeltje van het elektron. Het heeft dezelfde massa, maar een tegengestelde lading. Het wordt wel weergegeven als e^+ .

Antimaterie

Het positron was het eerste theoretisch voorspelde antideeltje. Tijdens het opstellen van een kwantummechanisch en relativistisch consistente theorie over het gedrag van elektronen stuitte Paul Dirac in zijn formalisme (de Dirac-vergelijking) op een deeltje met dezelfde massa en spin als een elektron, maar met een tegengestelde lading. Hij zag dit deeltje aan voor het proton, aangezien er nog geen spoor gevonden was van een positron. Later bleek echter dat zijn theorie toch het positron beschrijft. Het positron werd 1932 voor het eerst waargenomen door Carl Anderson.

Positronen komen vrij bij het radioactief verval van sommige isotopen, bijvoorbeeld van ^{21}Na . In principe zijn het net als elektronen stabiele deeltjes, maar wanneer een positron en een elektron op elkaar botsen zullen zij elkaar annihilieren. Dit wil zeggen dat alle massa wordt omgezet in energie, volgens Einsteins beroemde formule $E=mc^2$. Deze energie manifesteert zich in de vorm van fotonen (ook lichtkwanta genoemd). Men spreekt in dit verband van γ -straling (gammastraling). De reactie luidt:

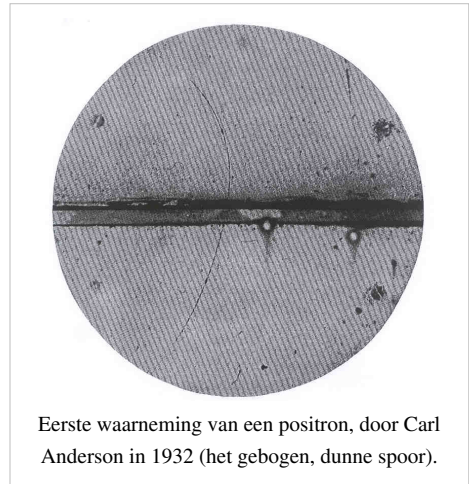


De twee gammaquanta zullen in tegenovergestelde richting van de plaats van annihilatie weg bewegen als de snelheid van het elektron tegengesteld is aan die van het positron. Als een positron met hoge snelheid op een elektron botst ontstaan twee gammaquanta met dezelfde totale impuls als het positron-elektronpaar, wat inhoudt dat ze onder een scherpe hoek afsplitsen van de annihilatieplek. Dit is wat we zien bij kosmische straling. De gammaquanta kunnen zelf weer een elektron-positronpaar vormen als hun energie hoog genoeg is. Op de grond worden kunnen dan grote aantallen gammafotonen ongeveer gelijktijdig worden gedetecteerd.

Bij positronemissietomografie (PET-scan) wordt met een ring van detectoren en nauwkeurige klokken vastgesteld of twee quanten ongeveer gelijktijdig aankomen, dan worden ze beschouwd als afkomstig van dezelfde annihilatie. Het geringe tijdsverschil is een maat van de afstand tot het middelpunt van de detectoren en de positie van de detectoren die een foton signaleren is een maat voor de richting.

Positronium

Vóór de wederzijdse vernietiging kan er echter eerst een ander proces plaatsvinden: de twee deeltjes kunnen een binding aangaan die (afgezien van het enorme verschil in massa) wel vergeleken kan worden met wat er gebeurt tussen een proton en een elektron, wanneer die samen een waterstofatoom (hydrogenium) vormen. Een positron en een elektron kunnen samen een positronium'atoom' vormen. Positronium kan op zijn beurt weer bindingen aangaan, maar dat gebeurt allemaal op bijzonder korte tijdschaal, want positronium is niet stabiel, doordat het elektron en het positron elkaar na enige tijd alsnog annihilieren.



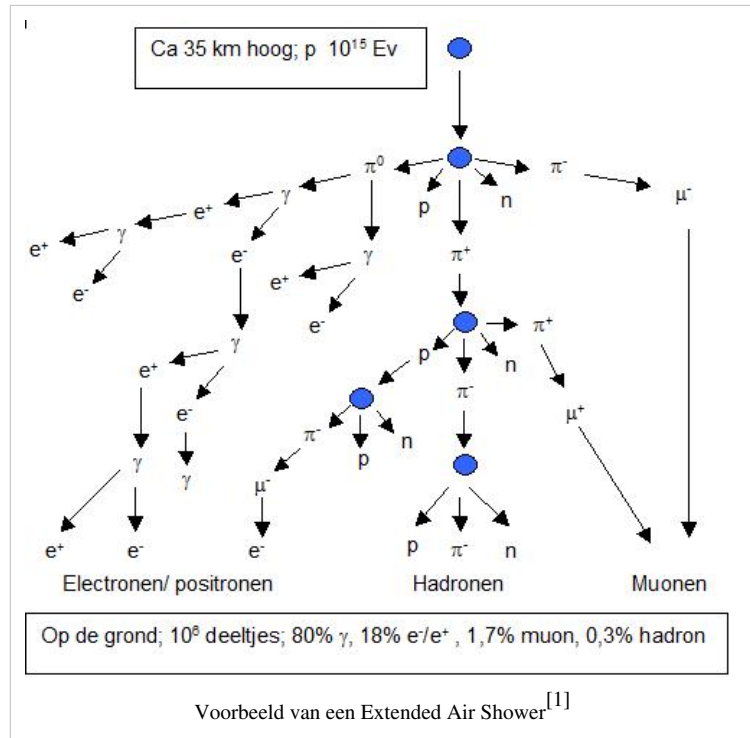
Eerste waarneming van een positron, door Carl Anderson in 1932 (het gebogen, dunne spoor).

Materiaalonderzoek

Materialen worden wel bloot gesteld aan een positronenbron om hun structuur te onderzoeken met positronannihilatie.

Positronen in of door kosmische straling

De aarde wordt blootgesteld aan kosmische straling. Als deze straling de bovenste laag van onze dampkring bereikt, ontstaat er een waterval van subatomaire deeltjes; de zgn. *Extended Air Shower*. De deeltjes waar de kosmische straling uit bestaat hebben een extreem hoge energie en impuls. De gevormde producten botsen al snel weer met materie in de atmosfeer en elke keer ontstaat een steeds groter aantal deeltjes met steeds lagere energie. Door dit voortdurende proces van vorming en annihilatie van deeltjes worden positronen zelfs gedetecteerd aan het aardoppervlak, hoewel ze normaliter slechts enkele centimeters in de lucht blijven bestaan voordat ze door een elektron worden geannihileerd.



Science Fiction

In sciencefiction wordt het positron gebruikt in het positronisch brein van robots. Zo'n positronisch brein is bedacht door Isaac Asimov en wordt in al diens robotverhalen toegepast.

Referenties

[1] Voorbeeld van een Extended Air Shower (<http://www-ik.fzk.de/~joerg/ps/AT1-10b.pdf>)

Post-Hartree-Fock

Post-Hartree-Fock is een benaming die verwijst naar een serie methoden die binnen de theoretische chemie worden toegepast om grotere nauwkeurigheid te bereiken bij berekeningen die met de Hartree-Fock-methode zijn uitgevoerd. Deze methoden worden dan losgelaten op de uitkomst van de Hartree-Fock berekeningen.

Deze methodes proberen te corrigeren voor de vereenvoudigingen die bij de Hartree-Fock zijn doorgevoerd, om tot een exactere golf functie en energie te komen. Zelfs bij een ideale Slaterdeterminant bij de Hartree-Fock berekeningen wordt geen exacte uitkomst verkregen. Dit komt doordat de elektronencorrelatie niet wordt meegenomen. Hier corrigeren de meeste post-Hartree-Fock methoden voor met enige mate.

Bij de Hartree-Fock-methode zijn enkele aannames gedaan, zoals scheiding van de kern- en elektroncoördinaten (Born-Oppenheimerbenadering), relativistische effecten worden genegeerd, de basisset bestaat gewoonlijk uit een eindig aantal orthogonale functies en de energie-eigenfuncties worden aangenomen een product te zijn van één-elektronfuncties.

Enkele voorbeelden van post-Hartree-Fock methoden zijn:

- Møller-Plesset perturbatietheorie (verschillende niveaus)
- Configuratie-interactie
- Kwadratische configuratie-interactie
- Coupled Cluster

Postulaten van de kwantummechanica

Kwantummechanica
$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
Onzekerheidsrelatie
Algemene inleiding... ^[1]
Achtergrond
<ul style="list-style-type: none"> Klassieke mechanica Interferentie Hamiltonformalisme
Fundamentele begrippen
<ul style="list-style-type: none"> Kwantumtoestand · Golffunctie · Postulaten Superpositie · Onzekerheidsprincipe Schrödingervergelijking · Tunneleffect Uitsluitingsprincipe Diracnotatie
Gevorderde onderwerpen
<ul style="list-style-type: none"> Interpretatie Klein-Gordonvergelijking Dirac-vergelijking Kwantumveldentheorie Kwantumgravitatie

Experimenten

Schrödingers kat
 Tweespletenexperiment
 Tunneleffect
 Stern-Gerlach-experiment

Wetenschappers

Planck · Einstein · Bohr
 · Sommerfeld · Bose ·
 Kramers · Heisenberg ·
 Born · Jordan · Pauli ·
 Dirac · de Broglie ·
 Schrödinger · von
 Neumann · Wigner ·
 Feynman · Bohm ·
 Everett · Bell

Om in de **kwantummechanica** bepaalde methoden en ontwikkelingen door te voeren, moet men zich beroepen op een aantal niet wiskundig bewijsbare **postulaten**. Er zijn 4 basispostulaten en een extra postulaat met betrekking tot de tijdsafhankelijke Schrödingervergelijking.

Postulaat 1

Het eerste postulaat handelt over de golffunctie. Ze stelt dat de golffunctie de kwantumtoestand van een kwantummechanisch systeem beschrijft. Deze golffunctie hangt af van alle coördinaten q van alle samenstellende deeltjes en van de tijd. Deze golffunctie wordt in zijn meest algemene vorm als volgt voorgesteld:

$$\Psi(q_1, q_2, q_3, \dots, t)$$

De golffunctie bevat bijgevolg alle mogelijke informatie van het systeem, maar geeft niet weer hoe men aan deze informatie moet komen. Bovendien is deze golffunctie onderworpen aan een aantal door Max Born opgelegde eisen of voorwaarden:

- De golffunctie moet kwadratisch integreerbaar zijn. Dat impliceert dat de golffunctie in kwestie moet voldoen aan:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(q_1, q_2, q_3, \dots, t)|^2 d\tau < \infty$$

- De golffunctie moet eenduidig zijn: er mag bij elke waarde voor x slechts 1 golffunctiewaarde aangetroffen worden.
- De golffunctie moet continu zijn.

Dit geldt ook voor alle afgeleiden van de golffunctie.

Postulaat 2

Het tweede postulaat beschrijft wat er gebeurt wanneer een natuurkundige grootheid A moet worden geïmplementeerd in de kwantummechanica. Het postulaat stelt dat met iedere waarneembare grootheid A een hermitische operator \hat{A} geassocieerd is. Daar waar de grootheid A in de klassieke mechanica wordt uitgedrukt in termen van een coördinaat q_i en een impuls p_i :

$$A(q_i, p_i)$$

wordt in de kwantummechanica een lineaire hermitische operator ingevoerd:

$$\hat{A}\left(q_i, \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial q_i}\right)$$

Deze operator bezit een complete verzameling van orthonormale eigenfuncties. Dat impliceert dat iedere functie Ψ , die aan dezelfde randvoorwaarden voldoet als de eigenfuncties α_i van de operator, kan worden neergeschreven als een lineaire combinatie van deze eigenfuncties:

$$\Psi = \sum_n c_n |\alpha_i\rangle$$

Merk op dat de eigenfuncties niet per sé orthonormaal hoeven te zijn: ze kunnen immers steeds orthonormaal gezet worden middels de Gram-Schmidtmethode.

Voor de operator geldt dat

$$\hat{A}|\alpha_i\rangle = a_i |\alpha_i\rangle$$

Dit is een eigenwaardevergelijking van de operator, met α_i als eigenfunctie en a_i als eigenwaarde. Deze eigenwaarde is het onderwerp van het derde postulaat.

Postulaat 3

Het derde postulaat stelt dat de mogelijke meetwaarden van de waarneembare natuurkundige grootheid A worden bepaald door de eigenwaarden van de lineaire hermitische operator \hat{A} . Dat houdt in dat de enige waarneembare meetwaarden gelimiteerd of gekwantiseerd zijn. Indien de eigenwaardevergelijking van A wordt gegeven door

$$\hat{A}|\alpha_i\rangle = a_i |\alpha_i\rangle$$

dan geldt dat elke meting van de grootheid A slechts één van de waarden a_i kan opleveren. Wanneer het systeem zich in een toestand bevindt met golffunctie Ψ en deze golffunctie tegelijkertijd een eigenfunctie van de hermitische operator \hat{A} is, dan is de enige mogelijke waarde voor de gemeten grootheid deze van de eigenwaarde van \hat{A} in de eigenwaardevergelijking

$$\hat{A}|\Psi\rangle = a_\Psi |\Psi\rangle$$

Dit principe sloeg in de jaren '20 en '30 van de 20e eeuw in als een bom in de natuurkundige kringen. Daar waar men steeds dacht dat energie een continu spectrum bezette in de macroscopische wereld, wordt men geconfronteerd met discrete of gekwantiseerde systemen op moleculair, atomair en subatomair niveau. Slechts welbepaalde energieniveaus konden door deze zogenaamde kwantumdeeltjes bezet worden; alle andere waarden daartussen bestaan niet.

De eigenfuncties moeten echter steeds blijven voldoen aan de eis van kwadratische integreerbaarheid (de tijd wordt hier niet in acht genomen, omdat het courant is om tijdsafhankelijke problemen te behandelen):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \cdots \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(q_1, q_2, q_3, \dots, q_i)|^2 d\tau < \infty$$

De fysische betekenis van $|\Psi(q_1, q_2, q_3, \dots, q_i)|^2$ is niets anders dan een probabiliteitsdichtheid, oftewel de kans om bij meting van de coördinaten de meetwaarden aan te treffen tussen $(q_1, q_2, q_3, \dots, q_i)$ en $(q_1 + dq_1, q_2 + dq_2, q_3 + dq_3, \dots, q_i + dq_i)$. Bijgevolg wordt het kwadraat van de golffunctie beschouwd als

een distributiefunctie. Dit is onder meer het onderwerp van het vierde postulaat.

Postulaat 4

Het vierde postulaat veronderstelt dat het systeem in een kwantummechanische toestand $\Psi(q_i)$ verkeert. Dan wordt de waarschijnlijkheid om bij meting van de fysische grootte A de meetwaarde a_i (de eigenwaarde uit de eigenwaardevergelijking) te bekomen, gegeven door $|c_n|^2$, waarbij geldt dat

$$\Psi(q_i) = c_1\Psi_1(q_i) + c_2\Psi_2(q_i) + c_3\Psi_3(q_i) + \dots + c_n\Psi_n(q_i) + \dots$$

Of algemeen

$$\Psi(q_i) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n\Psi_n(q_i)$$

De verwachtingswaarde van de grootte A wordt gegeven door

$$\langle A \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^*(q_i) \hat{A} \Psi(q_i) dq_1 dq_2 dq_3 \dots dq_k$$

In de Diracnotatie wordt dit:

$$\langle A \rangle = \langle \Psi | \hat{A} | \Psi \rangle$$

De verwachtingswaarde of gemiddelde waarde is dus het gewogen gemiddelde van de verschillende mogelijke individuele eigenwaarden van de hermitische operator \hat{A} , waarbij de weging gebeurt aan de hand van het kwadraat van de expansiecoëfficiënt van de eigenfuncties van \hat{A} in de toestandfunctie. In het geval van een hermitische operator geldt de volgende identische gelijkheid:

$$\langle \Psi_i | \hat{A} | \Psi_j \rangle \equiv \langle \Psi_j | \hat{A} | \Psi_i \rangle^*$$

Postulaat 5

De oplossingen van de eigenwaardevergelijking van hermitische operatoren zijn golf functies, die de toestand van het systeem beschrijven als een functie van plaatscoördinaten. Veelal wordt de tijdsonafhankelijke Schrödingervergelijking aangewend, maar het is ook mogelijk om naast de coördinaten ook de tijd in acht te nemen. Het verloop in de tijd van een toestand van een onverstoord kwantummechanisch systeem wordt beschreven door de tijdsafhankelijke Schrödingervergelijking

$$-\frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \hat{H} \Psi$$

Hierin stelt \hat{H} de Hamiltoniaan van het systeem voor.

In de klassieke mechanica heeft de kennis van een toestand van een onverstoord systeem op een tijdstip t tot gevolg dat de toestand op een later tijdstip reeds volledig eenduidig is bepaald. In de kwantummechanica is dit allesbehalve het geval. De kennis van een toestand op een tijdstip t heeft tot gevolg dat alleen de waarschijnlijkheden voor verschillende mogelijke meetresultaten bekend zijn.

Principe van lokaliteit

Men noemt een effect **lokaal**, wanneer een oorzaak op afstand niet meteen een gevolg heeft.

Lokaliteit 'ontstaat' wanneer in een causale keten {oorzaak → transport → effect} het transportmechanisme met een eindige snelheid werkt. Op kleine afstanden van de oorzaak arriveert hierdoor het effect eerder dan op grotere afstand. Bij een non-lokaal fenomeen is het effect daarentegen 'overall' onmiddellijk aanwezig.

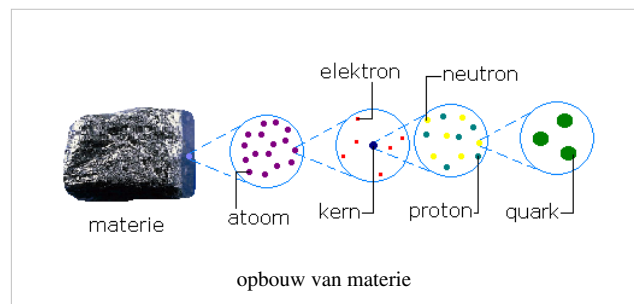
Zo is de zwaartekracht volgens Newton bijvoorbeeld een niet-lokaal verschijnsel, daar uit die wetten blijkt dat de massa van een object een onmiddellijke invloed heeft op een ander object, ongeacht de afstand tussen beide. Met de herformulering van deze wetten in de algemene relativiteitstheorie van Einstein blijkt dat ook de zwaartekracht een beperkte snelheid heeft (namelijk die van het licht), en dus lokaal is.

Het ontbreken van lokaliteit in de kwantummechanica

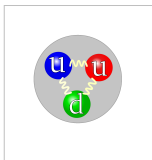
In de kwantumwetenschappen is lokaliteit zeer belangrijk, omdat zij op het niveau van de microwereld niet noodzakelijkerwijs lijkt te hoeven bestaan, zoals experimentele verificaties van onder andere het Einstein Podolsky Rosen-gedachtenexperiment bij herhaling laten zien.

Proton (deeltje)

Een **proton** (voorgesteld door p , p^+ of N^+) is een subatomair deeltje met een positieve elektrische lading. Ernest Rutherford ontdekte het in 1919. De atoomkern (of nucleus) van het meest voorkomende type (zie ook isotoop) waterstofatoom, H, is één enkel proton. De nucleï van andere atomen bevatten zowel neutronen als protonen. Het aantal protonen van de kern bepaalt tot welk chemisch element het atoom behoort.



Bij afspraak noemt men de lading van één proton de eenheid van lading. De lading van een elektron is exact tegengesteld aan die van een proton, daar het elektron negatief geladen is. In een neutraal atoom is het aantal protonen in de kern gelijk aan het aantal elektronen in de 'schil(len)' eromheen. In deze situatie heffen de positieve ladingen van de protonen en de negatieve ladingen van de elektronen elkaar naar buiten op. Het atoom is dan van buiten af gezien elektrisch neutraal.



Een proton heeft een rustmassa van $1,672\,623\,1 \times 10^{-27}$ kg of 938 MeV, hetgeen iets minder is dan de massa van een neutron. Daarmee is het ongeveer 1800 keer zo zwaar als een elektron. De lading van een proton is gelijk aan $1,6 \times 10^{-19}$ C.

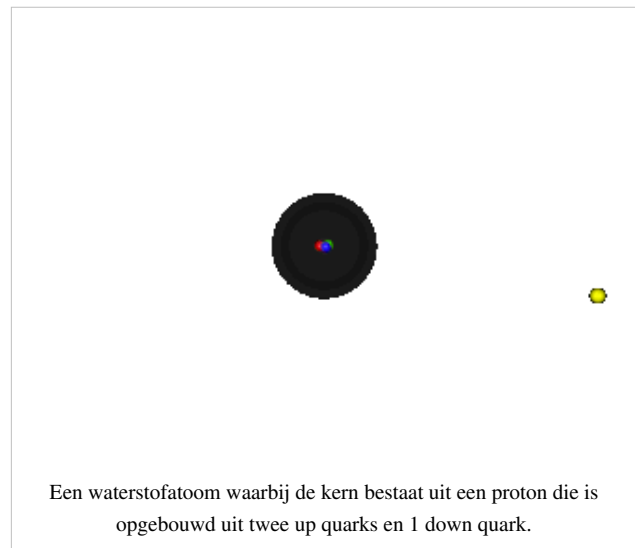
Protonen worden geclassificeerd als baryonen en bestaan op hun beurt weer uit quarks, namelijk twee 'up' quarks en een 'down' quark. Deze quarks worden bij elkaar gehouden door gluonen, de dragers van de sterke kernkracht.

Ook protonen en neutronen worden binnen een atoomkern bij elkaar gehouden door de sterke kernkracht, een kracht die alleen een merkbare rol speelt op subatomaire schaal (dus binnen de kern), maar die dan zo sterk is dat deze de onderlinge elektrische afstoting tussen de protonen overwint.

Aangezien de elektromagnetische kracht vele malen sterker is dan de zwaartekracht, moet men concluderen dat het aantal protonen in het universum gelijk is aan het aantal elektronen. Was dat niet het geval, dan zou de nettoafstoting door het overschot aan positieve of negatieve lading (afhankelijk of protonen of elektronen zouden domineren) een merkbaar effect hebben op de expansie van het universum en op alle materie onder de invloed van zwaartekracht (planeten, sterren, en dergelijke).

Het blijkt dat 99,985 % van de waterstofionen (H^+) bestaan uit protonen. De andere 0,015 % zijn deuteronen en een minieme hoeveelheid tritonen. In de natuur komen de tritonen (3H) niet voor, deze kunnen alleen kunstmatig aangemaakt worden

Een zuur is een chemische stof die een waterstofion H^+ kan afstaan. In waterig milieu gaat dit los proton bijna altijd een verbinding aan met water door een hydroxoniumion (H_3O^+) te vormen.

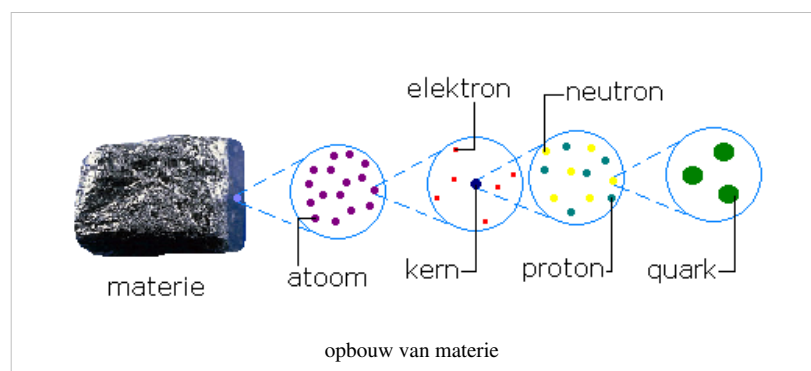


Quark

Quarks zijn elementaire deeltjes, of meer algemeen subatomaire deeltjes. Er bestaan zes soorten, ook wel smaken genoemd, quarks: voor elke 'generatie' van elementaire deeltjes een paar. De drie paren worden aangeduid door de Engelse namen *up* en *down*; *charm* en *strange*; *top* en *bottom* (ook wel *truth* en *beauty* genoemd). Het eerste uit het paar heeft een elektrische lading van $+2/3$ elementaire lading, het tweede van $-1/3$. Voor elke quark bestaat er ook als antideeltje een antiquark, met de tegengestelde lading. Quarks hebben spin $\pm 1/2$ en zijn dus fermionen. Het bestaan van quarks werd in 1964 voorspeld door de fysisch Murray Gell-Mann, waarvoor hij in 1969 de Nobelprijs ontving.

Het voorkomen van quarks

Alledaagse, normale materie is opgebouwd uit de lichtste quarks, *up* en *down*. De op één na lichtste quarks – *charm* en *strange* – zitten ook in deeltjes uit kosmische straling. De *top*- en *bottom*-quarks komen alleen onder extreme omstandigheden voor: in deeltjesversnellers en bij de oerknal. Ze hebben veel meer energie (zijn *zwaarder*) dan de *up* en *down*.



Quarks zijn nooit individueel waargenomen, maar alleen in samengestelde deeltjes. Experimenten in deeltjesversnellers geven wel aanwijzingen voor het bestaan van quarks. Quarks zijn de bouwstenen van deeltjes die

hadronen worden genoemd. Een meson bestaat uit een quark en een antiquark; een baryon bestaat uit 3 quarks of 3 antiquarks.

Protonen zijn opgebouwd uit drie quarks waarvan één *down*-quark en twee *up*-quarks; de totale lading komt dan op +1 elementaire lading.

Neutronen bestaan uit twee *down*-quarks en één *up*-quark, met een totale lading van 0.

Quarks worden bij elkaar gehouden door gluonen (van het engelse 'glue'). Aangenomen wordt dat de aantrekkende kracht tussen quarks groter wordt, naarmate de onderlinge afstand groter wordt (zoals bij een veer).

In de quarktheorie bestaan ook deeltjes die bestaan uit bijvoorbeeld drie *up*-quarks. Omdat quarks fermionen zijn is dit in strijd met het uitsluitingsprincipe van Pauli (Er kunnen niet 3 fermionen in dezelfde toestand bestaan). Om dit te ondervangen is het begrip *kleur* geïntroduceerd, dit heeft echter geen relatie met kleur zoals we die in het dagelijks leven kennen. De drie kleuren zijn rood, groen en blauw. Antiquarks hebben een anti-kleurlading (anti-rood, anti-blauw, anti-groen). Gluonen kunnen kleur 'transporteren', waardoor ze de eigenschap van een quark kunnen veranderen.

Deeltjes die zijn opgebouwd uit quarks moeten kleurneutraal zijn. Er zijn nog nooit uit quarks bestaande deeltjes aangetoond die niet kleurneutraal zijn.

Kleurneutraal betekent, dat een deeltje geen netto kleurlading heeft. Zo zijn de drie kleuren rood, groen en blauw samen wit (kleurneutraal); een kleur en zijn corresponderende antikleur zijn samen ook kleurneutraal. Dit impliceert dat een quark nooit op zichzelf kan bestaan, een enkele quark kan immers nooit kleurneutraal zijn. De bovengenoemde mesonen en baryonen zijn wel kleurneutraal (respectievelijk kleur+anti-kleur en driekleurig).

De kleurentheorie heeft een puur theoretische basis en is nooit waargenomen (alle waarneembare deeltjes zijn immers kleurneutraal). De rechtvaardiging van de theorie is dan ook dat deze een consistent model opbouwt van de kerndeeltjes.

In 2003 meldden wetenschappers de mogelijke ontdekking van een nieuw soort deeltje: het pentaquark, bestaande uit vier quarks en een antiquark. Op dit moment gelooft men echter niet meer dat deze pentaquarks bestaan.

Modellen van quarks

De kracht die quarks bij elkaar houdt in het samengestelde deeltje heet de sterke kernkracht. De quarks wisselen onderling krachtvoerende deeltjes uit. De krachtvoerende deeltjes heten *gluonen*, naar het Engelse woord 'glue'. Hoe verder weg twee quarks uit elkaar gaan, hoe meer energie in dit krachtveld gaat zitten. Hierdoor komt een quark nooit alleen voor, want als je bijvoorbeeld de twee quarks van een meson uit elkaar trekt, dan gaat daar zoveel energie inzitten dat deze energie in massa wordt omgezet en weer twee quarks vormt. Je krijgt dan dus weer mesonen en nog steeds geen losse quark.

De quarks en gluonen zijn onderdeel van de theorie van de sterke kernkracht: de kwantumchromodynamica (chromo- betekent kleur-). Deze theorie uit de jaren 60 en 70 is onderdeel van het standaardmodel van de deeltjesfysica.

De sterke kernkracht is zo sterk dat hij ook buiten het samengestelde deeltje merkbaar is. Dit is de zogenaamde residuele kernkracht. Dit is de kracht die ervoor zorgt dat protonen in een atoomkern ondanks hun afstotende kracht (door elektrische lading) toch bij elkaar blijven.

Eigenschappen van de quarks

Hier een tabel met alle bekende quarks. Tussen haakjes staat hun lading met als eenheid de lading van het elektron. Hierbij moet bedacht worden dat van iedere quark drie varianten voorkomen (de drie kleuren), die overigens steeds in elkaar overgaan: de gluonen dragen kleurlading van de ene naar de andere quark. Ook heeft iedere variant een antideeltje. In totaal zijn er dus 18 quarks en 18 antiquarks. Voor meer eigenschappen van de quarks, zie de lijst van elementaire fermionen.

Generatie	Zwak Isospin	Flavour	Naam	Symbool	Lading (e)	Massa (MeV.c ⁻²)
1	+ 1/2	I _z =+1/2	<i>up</i>	u	+2/3	1,5 tot 4,0
	- 1/2	I _z =-1/2	<i>down</i>	d	-1/3	4 tot 8
2	- 1/2	S=-1	<i>strange</i>	s	-1/3	80 tot 130
	+ 1/2	C=1	<i>charm</i>	c	+2/3	1150 tot 1350
3	- 1/2	B'=-1	<i>bottom</i>	b	-1/3	4100 tot 4400
	+ 1/2	T=1	<i>top</i>	t	+2/3	172 500 ± 2300

- Massa van de *top*-quark volgens Tevatron Electroweak Working Group ^[1]
- Massa's van de andere quarks volgens Particle Data Group ^[2].

Naast quarks zijn er nog andere elementaire (ondeelbare) deeltjes: de leptonen en de krachtoverbrengende bosonen.

Herkomst en uitspraak van het woord *quark*

Toen Gell-Mann in 1963 het woord *quark* bedacht had hij wel een uitspraak in gedachten, maar wist hij nog niet hoe het woord gespeld moest worden. Wat hem betrof had het net zo goed *kwork* kunnen zijn. Later, tijdens het herlezen van een passage uit de roman *Finnegans wake* van de Ierse schrijver James Joyce kwam hij het woord *quark* tegen, in de zin *Three quarks for Muster Mark*. Het woord *quark* was duidelijk bedoeld door de auteur om te rijmen op *Mark* en *bark*, wat niet overeenkwam met de door Gell-Mann gewenste uitspraak. Om toch zijn keuze te rechtvaardigen stelt hij dat de zin mogelijk betekent *Three quarts for mister Mark*, omdat er wel vaker passages in het boek voorkomen waarin drank besteld wordt. De uitspraak van het woord *quark* ligt dicht bij de door Gell-Mann beoogde klank van *quark*. Ook het feit dat er sprake is van drie quarks kwam goed uit, omdat baryonen zoals protonen en neutronen uit drie quarks bestaan. ^[3]

Bronnen, noten en/of referenties

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Quark-gluonplasma

Een **quark-gluonplasma** (QGP) is een (vermoedelijke) fase van materie die ontstaat bij extreem hoge temperaturen en dichtheid. Men vermoedt dat deze voorkwam in de eerste 20 tot 30 microseconden na de oerknal.

Theoretische beschrijving

Het bestaan van het quark-gluonplasma wordt gepostuleerd op grond van de kwantumchromodynamica. Deze theorie beschrijft hoe hadronische materie is opgebouwd uit quarks en gluonen. Deze laatste deeltjes zorgen voor de wisselwerking tussen quarks, en zouden de oorzaak zijn van het feit dat er bij "normale" omstandigheden geen "vrije" quarks worden waargenomen: quarks komen voor ófwel als quark-antiquarkpaar (mesonen), ófwel als deeltjes bestaande uit drie quarks of drie antiquarks (baryonen). Deze eigenschap staat bekend als confinement. Alleen bij "extreme" omstandigheden (zoals botsingen van elementaire deeltjes bij hoge energieën) voorspelt de kwantumchromodynamica dat quarks en gluonen niet in hadronen gebonden zijn en "vrij" voorkomen.

Experimenteel onderzoek

Experimenten aan CERN in Genève (Super Proton Synchrotron) poogden reeds in de jaren 1980 en 1990 om QGP's te produceren. Deze eerste experimenten waren slechts gedeeltelijk succesvol. Meer informatie zou moeten komen van de Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) van het Brookhaven National Laboratory. Drie nieuwe experimenten gepland voor de Large Hadron Collider (LHC) van het CERN (ALICE, ATLAS en CMS) zullen het onderzoek naar de eigenschappen van quark-gluonplasma's voortzetten.

Externe link

- [Quark-gluon plasma](#) ^[1]

Referenties

[1] <http://www.nikhef.nl/pub/pr/alice.html>

Qubit

Een **qubit** of **qbit** (ook: **kwantumbit** of **quantum bit** (*Engels*)) is een eenheid van kwantuminformatie. Die informatie wordt beschreven door een toestand in een kwantummechanisch systeem met twee niveaus, dat formeel equivalent is aan een tweedimensionale vectorruimte over de complexe getallen. De twee basistoestanden (of vectorruimtes) worden gewoonlijk geschreven als $|0\rangle$ en $|1\rangle$ (uitspraak: 'ket 0' en 'ket 1'), volgens de gebruikelijke bra-ketnotatie voor kwantumtoestanden. Een qubit kan dus worden gezien als een kwantummechanische versie van een klassieke databit.

Beschrijving

Een pure qubittoestand is een lineaire kwantumsuperpositie van deze twee toestanden. Dat betekent dat elke qubit kan worden weergegeven als een lineaire combinatie van $|0\rangle$ en $|1\rangle$:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle,$$

waar α en β complexe waarschijnlijkheidsamplitudes zijn. Voor α en β geldt de randvoorwaarde

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1.$$

De kans dat de qubit gemeten wordt in de toestand $|0\rangle$ is $|\alpha|^2$ en de kans dat hij gemeten wordt in de toestand $|1\rangle$ is $|\beta|^2$.

De totale kans van het geobserveerde systeem in elke toestand $|0\rangle$ of $|1\rangle$ is dus 1.

Dit verschilt sterk van de toestand van een klassieke bit, die alleen 0 of 1 kan zijn.

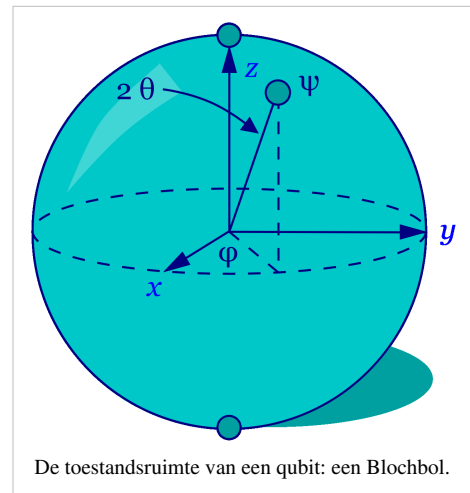
Een belangrijke eigenschap die de qubit onderscheidt van een klassieke bit is dat meerdere qubits kwantumverstrengeling kunnen vertonen. Verstrengeling is een niet-lokale eigenschap die het mogelijk maakt dat een verzameling qubits superposities van verschillende binaire tekenreeksen (01010 en 11111, bijvoorbeeld) tegelijkertijd uitdrukt. Verstrengeling is een noodzakelijk bestanddeel van elke kwantumberekening op een klassieke computer. Het gebruik van verstrengeling in kwantumcomputing wordt wel "quantum parallelism" genoemd en biedt een mogelijk verklaring voor de kracht van kwantumcomputers: aangezien een computer zich kan bevinden in een toestand die een kwantumsuperpositie is van veel verschillende klassieke computationele paden, kunnen deze paden alle tegelijkertijd worden bewandeld.

Een aantal qubits tezamen vormen een qubitregister. Kwantumcomputers voeren hun berekeningen uit door qubits te manipuleren.

Analoog aan *qubit* en het klassieke begrip trit heet een eenheid van kwantuminformatie in een kwantumsysteem met drie niveaus een qutrit.

Benjamin Schumacher heeft een wijze ontdekt waarop kwantumtoestanden als informatie kunnen worden geïnterpreteerd. Hij ontwikkelde een manier om de informatie in een toestand te comprimeren, en in een kleiner aantal toestanden op te slaan. Dit staat nu bekend als Schumachercompressie. Schumacher wordt ook beschouwd als de bedenker van de term qubit.

De toestandsruimte van een enkele qubit kan meetkundig worden gerepresenteerd door de Blochbol. Dit is een tweedimensionale ruimte met een onderliggende geometrie van het oppervlak van een bol. Dit betekent in essentie dat de enkelequbitregisterruimte twee lokale vrijheidsgraden heeft. Een n -qubit registerruimte heeft $2^{n+1} - 2$ vrijheidsgraden. Dit is veel groter dan $2n$, wat men klassiek, zonder verstrengeling, zou verwachten.



Ontwikkelingen

Op 17 augustus 2006 zijn onderzoekers van de Technische Universiteit (TU) Delft er als eerste in de wereld in geslaagd een elektron te 'temmen'. Ze waren hierbij in staat de richting van een elektron waarin deze spint te bepalen, waardoor de eerste praktische stappen naar een kwantumcomputer zijn gezet. Meer informatie is hier ^[1] te vinden, op de site van de TU Delft.

Ruim anderhalf jaar later, op 14 juni 2007, is het onderzoekers van de TU Delft gelukt bewerkingen uit te voeren met twee qubits. De onderzoekers voerden een zogenoemde controlled-notbewerking uit met behulp van supergeleidende ringetjes. Met deze bewerking kan elke kwantumberekening worden gerealiseerd. Meer informatie is te vinden op de site van de TU Delft ^[2].

In september 2010 hebben onderzoekers van de TU Delft een manier gevonden om de spintoestand van een enkel elektron af te schermen van omgevingsinvloeden. De vinding is belangrijk voor de ontwikkeling van een quantumcomputer. Het onderzoek vond plaats aan het Kavli Institute of Nanoscience van de Technische Universiteit Delft.

Externe links

- An update on qubits in the Jan 2005 ^[3] nummer van Scientific American
- An update on qubits in the Oct 2005 ^[4] nummer van Scientific American
- De organisatie ^[5] mede-opgericht door een van de pioniers op het gebied van kwantumcomputing, David Deutsch

Eenheden van informatie (veelvouden van bytes)
Machten van 1000: kilobyte · megabyte · gigabyte · terabyte · petabyte · exabyte · zettabyte · yottabyte
Machten van 1024: kibibyte · mebibyte · gibibyte · tebibyte · pebibyte · exbibyte · zebibyte · yobibyte
Andere eenheden of benamingen: bit · nibble/tetrade · byte/octet · phit · qubit · qutrit · trit

Referenties

[1] <http://www.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=4b3e55d0-1a34-4388-b3ca-acbe48c87696&lang=nl>

[2] <http://www.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=0bf5ce40-8fa5-45c7-9347-a8b73542ecde&lang=nl>

[3] <http://www.sciam.com>

[4] <http://www.sciam.com/article.cfm?chanID=sa006&colID=5&articleID=000D4372-A8A9-1330-A54583414B7F0000>

[5] <http://www.qubit.org/>

Regel van Hund

De **regel van Hund** is een regel in de scheikunde die opgesteld is door Friedrich Hund (1896 - 1997), een Duitse fysicus.

In een subniveau van een hoofdniveau van de energietoestand van een elektron, worden de elektronen over de orbitalen verdeeld zodanig dat er zoveel mogelijk ongepaarde elektronen voorkomen. Het is immers zo dat 2 elektronen in eenzelfde orbitaal meer repulsie ondervinden dan 2 elektronen in 2 orbitalen.

In de atoomfysica wordt deze regel vertaald op de volgende manier: wanneer het niet centrale deel van de coulombinteractie tussen de elektronen in rekening is gebracht, zijn de energieniveaus van de grondtoestandselektronenconfiguratie opgesplitst in termen. De term met het hoogste spinimpulsmoment heeft de laagste energie. Wanneer er hiervan meerdere termen zijn, dan is het van deze termen die met het hoogste baanimpulsmoment.

Renormalisatie

Renormalisatie is een techniek die wordt gebruikt in de kwantumveldentheorie en in de statistische mechanica wanneer een continuümlimiet moet worden genomen.

Als men tijd en ruimte beschrijft als een continuüm, gebeurt het vaak dat bepaalde statistische of kwantummechanische constructies slecht gedefinieerd zijn. Hierom moet de continuümlimiet met zorg worden genomen. Renormalisatie bepaalt dan de relatie tussen de parameters van de theorie wanneer de parameters die grote schalen en die die kleine schalen beschrijven, verschillend zijn.

Renormalisatie is oorspronkelijk ontwikkeld in de kwantumelektrodynamica (QED) om een zin te geven aan de divergente integralen in de perturbatietheorie. Oorspronkelijk werden deze techniek als verdacht beschouwd door enkele van haar uitvinders, maar uiteindelijk is ze algemeen aanvaard als een belangrijk en zelf-consistent deel van verscheidene velden in de natuurkunde en in de wiskunde.

Zelfinteracties in de klassieke natuurkunde

Het probleem van oneindigheden werd eerst tegengekomen in de klassieke elektrodynamica van puntdeeltjes in de 19e en vroege 20e eeuw.

Het elektrische veld van een elektron bevat elektrostatische energie, en door de equivalentie tussen massa en energie betekent dit dat dit veld zou bijdragen tot de effectieve massa van het elektron. Nu is de energie van het veld rond een geladen holle sfeer van lading q en met straal r_e gelijk aan

$$E_{\text{em}} = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r_e}.$$

Nu is een elektron een puntdeeltje, zodat de straal r_e nul is. De energie wordt dan oneindig.

De totale effectieve massa van het elektron bestaat uit de som van de massa zonder de elektrische energie (de "naakte massa") plus de bijdrage van het elektrische veld. Indien we postuleren dat de naakte massa negatief is, zou het mogelijk worden ervoor te zorgen dat de limiet $r_e \rightarrow 0$ de juiste waarde uitkomt. Dit wordt **renormalisatie** genoemd, en Lorentz en Abraham hebben hier een klassieke theorie van het elektron op gebaseerd. Dit vroege werk vormde de inspiratie voor latere pogingen tot regularisatie en renormalisatie van kwantumveldentheorieën.

Wanneer men elektromagnetische interacties van geladen deeltjes berekent, is het verleidelijk de *terugslag* van het veld van het deeltje zelf te negeren. Deze terugslag is nodig om de wrijving te verklaren die een geladen deeltje ondervindt bij het uitstralen van straling. Indien een elektron een punt wordt verondersteld te zijn, zal de waarde van

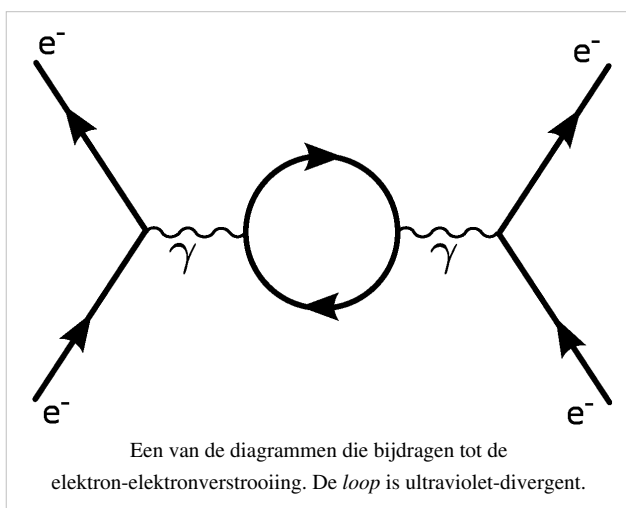
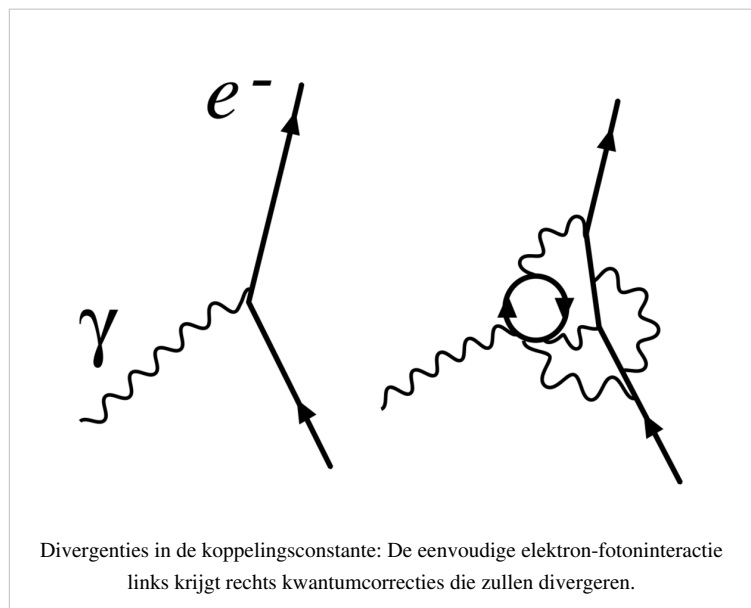
de terugslag divergeren om dezelfde reden als dat de massa divergeert: het veld dicht bij het elektron wordt onbeperkt groot.

De Abraham-Lorentzkracht bevatte een niet-causale "voorversnelling". Soms zou een elektron beginnen met bewegen vóórdat er enige kracht op inwerkt. Dit is een teken dat de puntlimiet niet consistent is. Een lichaam met eindige grootte zal beginnen bewegen als een kracht wordt uitgeoefend binnen één straal van het massamiddelpunt.

Het probleem was erger in klassieke veldentheorie dan in kwantumveldentheorie, omdat een geladen deeltje in kwantumveldentheorie kan fluctueren in een antideeltje. Dit antideeltje heeft een tegengestelde lading, en de fluctuaties worden uitgesmeerd over een regio met grootte van ongeveer de Compton-golflengte. In kwantumelektrodynamica zal, bij voldoende kleine koppeling, de elektromagnetische massa slechts divergeren als de logaritme van de straal van het deeltje. Heel wat fysici geloven dat, indien de fijnstructuurconstante veel groter was dan één en dat de klassieke elektronstraal groter is dan de kwantummechanische golflengte, dat dezelfde problemen van de klassieke theorie nog steeds in de kwantumversie zullen optreden.

Divergenties in kwantumelektrodynamica

Toen de kwantumelektrodynamica werd ontwikkeld in de 30-er jaren, ontdekten Born, Heisenberg, Jordan en Dirac dat heel wat integralen in de perturbatiereeks divergeerden.



Stueckelberg en later ook Schwinger, Feynman en Tomonaga vonden een manier om deze divergenties te beschrijven, wat later werd gesystematiseerd door Dyson. De divergenties komen voor in berekeningen met Feynmandiagrammen waarin gesloten lussen van virtuele deeltjes voorkomen.

Hoewel virtuele deeltjes aan de wetten van behoud van impuls en energie gehoorzamen, zijn hun energie en impuls willekeurig en kunnen ze zelfs waarden aannemen die niet in overeenstemming zijn met hun massa (zodat $E^2 - |p|^2 c^2$ niet gelijk is aan $m^2 c^4$). Zulke deeltjes heten *off-shell* te zijn. Wanneer er de virtuele deeltjes in een reactie een lus vormen, wordt de impuls

in deze lus niet meer uniek bepaald door de inkomende en uitgaande deeltjes. Zo zal elk verandering van impuls van één deeltje in de lus exact kunnen worden gecompenseerd door de andere deeltjes in de lus, zodat de nodige

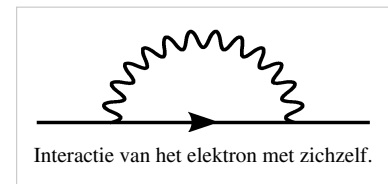
behoudswetten nog steeds blijven gelden. Om de volledige bijdrage van het diagram te vinden, moet worden geïntegreerd over alle mogelijke combinaties van energie en impuls die in de lus kunnen stromen. Deze integralen zijn vaak divergent — ze geven oneindig als resultaat.

Er zijn nu twee soorten divergenties:

- Infrarood-divergenties: treden op als de integralen in kwestie divergent zijn voor kleine energie en impuls. Dit kan gebeuren als massaloze deeltjes (zoals fotonen) optreden. Elk proces waarbij geladen deeltjes een rol spelen, gaat gepaard met het uitzenden van oneindig veel coherente fotonen van oneindige lange golflengte (dus oneindig kleine energie). Bij fotonen zijn deze divergenties goed verstaan en leveren ze geen grote problemen.
- Ultraviolet-divergenties: treden op als de integralen in kwestie divergeren voor grote energie en impuls. Deze moeten, op de een of andere manier, worden geregulariseerd en gerenormaliseerd voordat enige zinnige informatie uit de berekening kan worden gehaald.

Gerেনormaliseerde en naakte grootheden

Een belangrijk feit in renormalisatie is dat de grootheden die voorkomen in de theoretische formules (zoals de uitdrukking voor de Lagrangiaan) en die dingen voorstellen als de elektrische lading en massa van het elektron, niet daadwerkelijk de grootheden zijn die men in een laboratorium meet. De grootheden zoals men ze neerschrijft zijn "naakte" grootheden — de grootheden zonder rekening te houden met de bijdragen van lussen van virtuele deeltjes. De effecten van *loops* bevatten onder andere de interacties van de elektronen met zichzelf — diezelfde interactie die in de klassieke theorie voor elektromagnetisme net zo moeilijk te behandelen was. In het algemeen zullen deze effecten net zo hard divergeren als de dingen die men wil bestuderen. Hierom impliceren eindige *gemeten* grootheden oneindige *naakte* grootheden.



Om de link te leggen met de werkelijkheid, moeten de formules worden herschreven in termen van de meetbare, "gerenormaliseerde" grootheden. Zo zal men, bijvoorbeeld, de lading van het elektron definiëren bij een zeker *renormalisatie-* of *subtractiepunt* (dat meestal wordt gegeven door een zekere energieschaal te specificeren, en die dus ook vaak *renormalisatieschaal* wordt genoemd). Het verschil tussen de naakte en de gerenormaliseerde Lagrangiaan kan dan worden afgezonderd en wordt geïnterpreteerd als *tegentermen* die divergeren en die de divergenties in loopdiagrammen opheffen.

Running van constanten

Bij het hele procedé van renormalisatie, moet men een energieschaal kiezen. In theorie is deze schaal willekeurig en zullen de exacte resultaten van de hele perturbatiereeks niet van de schaal afhangen. In de praktijk berekent men echter slechts de eerste termen van de reeks, en in dat geval geeft de benadering de beste resultaten indien de schaal dichtbij de energieën en impulsen van de interactie wordt gekozen.

De effectieve parameters van de theorie hangen af van de schaal die wordt gekozen, zodat het waargenomen gedrag van de theorie afhangt van de interactie waarbij men haar bestudeert. De variatie van de parameters met de energie wordt beschreven door de renormalisatiegroep.

De koppelingsconstante van kwantumchromodynamica wordt, bijvoorbeeld, kleiner bij hogere energie. Dit zorgt ervoor dat, indien quarks worden onderworpen aan zeer hoog-energetische botsingen, dat ze nauwelijks met elkaar zullen interageren. Dit noemt men asymptotische vrijheid. In theorie zou men dezelfde interactie kunnen beschrijven door een lagere renormalisatieschaal te gebruiken, maar in dat geval zal de zwakte van de interactie pas tot uiting komen door het tegen elkaar wegvallen van een heleboel Feynmandiagrammen uit de perturbatiereeks.

Regularisatie

► *Zie regularisatie (natuurkunde) voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Essentieel komt renormalisatie erop neer het verschil te nemen tussen twee divergente grootheden. Aangezien oneindig min oneindig niet bepaald is, moeten de oneindigheden eerst worden "getemd". De conceptueel eenvoudigste manier is door te bepalen dat alle impulsen en energieën boven een zekere *cut-off* Λ niet meedoen. Dan kan men de berekeningen voortzetten (er zijn geen oneindigheden), en aan het eind van de berekening neemt men de limiet $\Lambda \rightarrow \infty$.

Deze werkwijze kan worden geïnterpreteerd als het feit dat de exacte natuurkundige wetten bij hoge energie niet noodzakelijk die zijn die wij kennen, maar dat de ons bekende wetten slechts benaderingen zijn. Dat betekent dat we in berekeningen niet hoger mogen gaan dan een zekere energie Λ , aangezien we niet weten wat daarboven zit. Maar aangezien Λ ongetwijfeld een zeer grote waarde heeft (of we zouden de "nieuwe fysica" érgens wel al hebben opgemerkt), nemen we aan het eind de limietwaarde. Indien de natuurkunde "af" was, dan zouden we de wetten kennen tot op oneindig hoge energie en zouden we ongetwijfeld nooit divergenties vinden.

Er bestaan echter ook andere manieren om divergente grootheden te regulariseren, elk met haar eigen voor- en nadelen. Een tegenwoordig veelgebruikte techniek is dimensionale regularisatie, uitgevonden door 't Hooft en Veltman. Deze houdt in dat het aantal dimensies van de ruimtetijd wordt gelijkgesteld aan een willekeurig complex getal. Aan het eind van de berekeningen neemt men dan de limiet van het aantal dimensies naar vier. Een andere manier is Pauli-Villars-regularisatie, waarbij fictieve deeltjes aan de theorie worden toegevoegd op een zodanige manier dat de divergenties veroorzaakt door deze deeltjes die van de echte deeltjes opheffen.

Een ander belangrijk regularisatieschema is roosterregularisatie, ingevoerd door Wilson. Hierbij wordt de ruimtetijd vervangen door een rooster van punten met een zekere roosterafstand a . Deze lengteschaal zorgt voor een natuurlijke *cut-off* doordat deeltjes met te hoog momentum niet meer op de rooster kunnen propageren. Aan het eind van de berekeningen moet men dan uiteraard de continuümlimiet $a \rightarrow 0$ nemen. Roosterregularisatie wordt vooral gebruikt in computersimulaties.

Renormaliseerbaarheid

Nu is het zo dat niet alle theorieën kunnen worden gerenormaliseerd. Het kan bijvoorbeeld gebeuren dat het invoeren van tegentermen om divergenties te neutraliseren, leidt tot nieuwe divergenties, die nieuwe tegentermen eisen, en zo voorts. Het eindresultaat is dan een theorie met oneindig veel parameters, en elke waarnemen zou van al deze parameters afhangen. Voordat men de theorie kan testen, moeten eerst alle parameters worden bepaald, wat onmogelijk is. Zulk een theorie is dus helemaal waardeloos en wordt "niet-renormaliseerbaar" genoemd.

Het Standaardmodel van de deeltjesfysica bevat enkel renormaliseerbare interacties, maar de algemene relativiteitstheorie wordt niet-renormaliseerbaar indien men haar kwantiseert op de meest voor de hand liggende manier. Dit suggereert dat perturbatietheorie niet werkt voor kwantumzwaartekracht.

In de effectieve veldentheorie, echter, is "renormaliseerbaarheid" een onaccurate benaming. In een niet-renormaliseerbare effectieve veldentheorie zijn er inderdaad oneindig veel termen, maar hun coëfficiënten bevatten steeds negatievere machten van de *cut-off*. Indien deze een echte, fysische grootheid is, dan beschrijven deze oneindig veel tegentermen fysische interacties. Indien de energieën van de interacties niet groot worden, kan men berekeningen ontwikkelen in inverse machten van de *cut-off* om tot benaderde resultaten te komen op basis van een eindig aantal parameters.

De niet-renormaliseerbare interacties in een effectieve veldentheorie worden snel zwakker als de energieschaal veel kleiner wordt dan de *cut-off*. Het klassieke voorbeeld is de Fermi-theorie van de zwakke kernkracht. Dit is een niet-renormaliseerbare effectieve veldentheorie waarvan de *cut-off* van de orde is van de massa van het W-boson. Indien men experimenten doet bij de schaal van de *cut-off*, is de Fermi-interactie niet meer bruikbaar en moet men

overgaan op de volledig theorie: de elektro-zwakke theorie.

Deze kijkt ook waarom bijna alle fundamentele interacties die wij kennen, worden beschreven door renormaliseerbare theorieën. Het zou kunnen dat er andere interacties bestaan die niet-renormaliseerbaar zijn, maar dat zij slechts een rol beginnen te spelen bij, bijvoorbeeld, de Planckschaal. Hierdoor merken wij er niets van. De uitzondering is zwaartekracht, die ongelooflijk zwak is, maar toch merkbaar doordat de gigantische massa's van de hemellichamen het effect ervan versterken.

Meningen en interpretatie

De pioniers van QED en van kwantumveldentheorie in het algemeen waren veelal ontevreden met de situatie zoals ze was. Het leek hen niet werkelijk toegestaan oneindigheden van elkaar af te trekken om eindige resultaten te krijgen. Dirac was bijvoorbeeld een van de grote tegenstanders.^[1]

De meeste fysici zijn heel tevreden met de situatie. Ze zeggen: 'Kwantumelektrodynamica is een goede theorie en we hoeven ons er geen zorgen meer over te maken.' Ik moet zeggen dat ik zeer ontevreden ben met de situatie, want deze zogenaamd 'goede theorie' houdt het verwaarlozen van oneindigheden die voorkomen in haar vergelijkingen in, ze verwaarlozen op een willekeurige manier. Dit is gewoon geen zinnige wiskunde. Zinnige wiskunde is het verwaarlozen van een grootheid als ze klein is – niet het verwaarlozen omdat ze oneindig groot is en je haar niet wil!

En andere belangrijke criticus was Feynman. Ondanks zijn cruciale rol in de ontwikkeling van de kwantumelektrodynamica, schreef hij het volgende:^[2]

Dit dopjesspel dat wij spelen ... wordt technisch 'renormalisatie' genoemd. Maar ongeacht hoe intelligent het woord klinkt, ik noem het nog steeds een geschift proces! Dat we naar zulke hocus pocus moeten grijpen, heeft ons belemmerd te bewijzen dat de theorie van kwantumelektrodynamica wiskundig zelfconsistent is. Het is merkwaardig dat de theorie nog steeds niet op de een of andere manier zelfconsistent is bewezen; ik vermoed dat renormalisatie niet wiskundig toegelaten is.

Terwijl Diracs kritiek zich richtte op de procedure van renormalisatie zelf, was die van Feynman verschillend. Feynman was bezorgd dat alle veldentheorieën die in de jaren '60 gekend waren, de eigenschap bezaten dat de interactie oneindig sterk werd bij voldoende hoge energieën. Door deze eigenschap, Landaupool geheten, was het plausibel dat alle theorieën inconsistent waren. In 1974 toonden Gross, Politzer en Wilczek aan dat een andere theorie, kwantumchromodynamica, geen Landaupool heeft. Feynman aanvaardde, samen met de meeste anderen, dat QCD wel een volledig consistente theorie kon zijn.

Het algemene onbehagen was nagenoeg universeel tot de jaren '70 en '80. Vanaf toen, echter, begonnen de meningen te veranderen —dankzij het werk in de renormalisatiegroep en de effectieve veldentheorie, en ondanks het feit dat de oudere generatie, zoals Dirac, hun kritiek nooit terugnamen. Wilson en anderen toonden aan dat de renormalisatiegroep nuttig is in de statistische veldentheorie toegepast op de vastestoffysica, waar deze zorgt voor belangrijke inzichten in het gedrag van faseovergangen. In de vastestoffysica bestaat er een *échte* regulator voor de kortste afstanden: de materie is niet meer continu op de schaal van de atomen. De divergenties van hoge energieën (of korte afstanden) zorgen in de vastestoffysica niet voor filosofische problemen, aangezien de veldentheorieën daar slechts effectieve voorstellingen zijn van het gedrag van de materie —er zijn geen oneindigheden gezien de *cut-off* steeds eindig is, en het houdt steek dat de naakte grootheden van deze *cut-off* afhangen.

Met de kwantumveldentheorieën zou iets gelijkaardigs kunnen gebeuren: in een analoog scenario zouden de natuurwetten *anders* zijn bij zeer hoge energieën, zodat alle veldentheorieën effectieve benaderingen zijn van de echte natuurwetten. Dit zou dan impliceren dat de divergenties in de kwantumveldentheorieën worden veroorzaakt door de menselijke onwetendheid, en renormalisatie komt dan gewoon neer op het beste maken van de kennis die we hebben. Een gangbare hypothese is, dat er bij de schaal van 10^{15} GeV *iets* zou gebeuren, aangezien de koppelingsconstanten van de tegenwoordig bekende theorieën bij die schaal ongeveer gaan samenvallen. Dit zou

kunnen leiden tot een eerste stap naar de theorie van alles, waarbij alle natuurkrachten worden samengebond tot één enkele kracht.

Verdere literatuur

Algemene inleiding

- Delamotte, Bertrand ; *A hint of renormalization* ^[3], American Journal of Physics 72 (2004) pp. 170-184. Volledige tekst verkrijgbaar op: *hep-th/0212049* ^[4]
- Baez, John ; *Renormalization Made Easy* ^[5], (2005). Een kwalitatieve inleiding.
- Blechman, Andrew E. ; *Renormalization: Our Greatly Misunderstood Friend* ^[6], (2002). Samenvatting van een lezing met meer informatie over specifieke regularisatie- en subtractieschema's.
- Cao, Tian Yu & Schweber, Silvian S. ; *The Conceptual Foundations and the Philosophical Aspects of Renormalization Theory* ^[7], Synthese, 97(1) (1993), 33-108.
- Shirkov, Dmitry ; *Fifty years of the renormalization group*, C.E.R.N. Courier 41(7) (2001). Volledige tekst verkrijgbaar op: *I.O.P Magazines* ^[8]

Kwantumveldentheorie

- Ryder, Lewis H. ; *Quantum Field Theory* (Cambridge University Press, 1985), [ISBN 0-521-33859-X].
- Zee, Anthony ; *Quantum Field Theory in a Nutshell*, Princeton University Press (2003) [ISBN 0-691-01019-6].
- Weinberg, Steven ; *The Quantum Theory of Fields* (3 delen) Cambridge University Press (1995).
- Pokorski, Stefan ; *Gauge Field Theories*, Cambridge University Press (1987) [ISBN 0-521-47816-2].
- 't Hooft, Gerard ; *The Glorious Days of Physics - Renormalization of Gauge theories*, lezing gegeven te Erice (augustus/september 1998). Volledige tekst verkrijgbaar op: *hep-th/9812203* ^[9].
- Rivasseau, Vincent ; *An introduction to renormalization*, Poincaré Seminar (Paris, Oct. 12, 2002), gepubliceerd in : Duplantier, Bertrand; Rivasseau, Vincent (Eds.) ; *Poincaré Seminar 2002*, Progress in Mathematical Physics 30, Birkhäuser (2003) [ISBN 3-7643-0579-7]. Volledig tekst verkrijgbaar in *PostScript* ^[10].
- Rivasseau, Vincent ; *From perturbative to constructive renormalization*, Princeton University Press (1991) [ISBN 0-691-08530-7]. Volledig tekst verkrijgbaar in *PostScript* ^[11].
- Iagolnitzer, Daniel & Magnen, J. ; *Renormalization group analysis*, Encyclopaedia of Mathematics, Kluwer Academic Publisher (1996). Volledig tekst verkrijgbaar in PostScript en pdf *hier* ^[12].
- Scharf, Günter; *Finite quantum electrodynamics: The causal approach*, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York (1995) [ISBN 3-540-60142-2].

Statistische fysica

- Nigel Goldenfeld ; *Lectures on Phase Transitions and the Renormalization Group*, Frontiers in Physics 85, Westview Press (June, 1992) [ISBN 0-201-55409-7]. Vooral inzichtelijk en minder technisch.
- Zinn-Justin, Jean ; *Quantum Field Theory and Critical Phenomena*, Oxford University Press (4th edition - 2002) [ISBN 0-19-850923-5].
- Zinn-Justin, Jean ; *Phase Transitions & Renormalization Group: from Theory to Numbers*, Poincaré Seminar (Paris, Oct. 12, 2002), gepubliceerd in: Duplantier, Bertrand; Rivasseau, Vincent (Eds.) ; *Poincaré Seminar 2002*, Progress in Mathematical Physics 30, Birkhäuser (2003) [ISBN 3-7643-0579-7]. Volledig tekst verkrijgbaar in *PostScript* ^[13].
- Domb, Cyril ; *The Critical Point: A Historical Introduction to the Modern Theory of Critical Phenomena*, CRC Press (March, 1996) [ISBN 0-7484-0435-X].
- Brown, Laurie M. (Ed.) ; *Renormalization: From Lorentz to Landau (and Beyond)*, Springer-Verlag (New York-1993) [ISBN 0-387-97933-6].

Allerlei

- Shirkov, Dmitry ; *The Bogoliubov Renormalization Group*, JINR Communication E2-96-15 (1996). Volledig tekst verkrijgbaar op: hep-th/9602024 ^[14]
- Zinn Justin, Jean ; *Renormalization and renormalization group: From the discovery of UV divergences to the concept of effective field theories*, in: de Witt-Morette C., Zuber J.-B. (eds), *Proceedings van de NAVO ASI over Quantum Field Theory: Perspective and Prospective*, juni 15-26 1998, Les Houches, Frankrijk, Kluwer Academic Publishers, NATO ASI Series C 530, 375-388 (1999). Volledig tekst verkrijgbaar in *PostScript* ^[15].

Referenties

- [1] Kragh, Helge ; *Dirac: A scientific biography*, CUP 1990, p. 184; originele tekst:
Most physicists are very satisfied with the situation. They say: 'Quantum electrodynamics is a good theory and we do not have to worry about it any more.' I must say that I am very dissatisfied with the situation, because this so-called 'good theory' does involve neglecting infinities which appear in its equations, neglecting them in an arbitrary way. This is just not sensible mathematics. Sensible mathematics involves neglecting a quantity when it is small - not neglecting it just because it is infinitely great and you do not want it!
- [2] Feynman, Richard P. ; *QED, The Strange Theory of Light and Matter*, Penguin 1990, p. 128; originele tekst:
The shell game that we play ... is technically called 'renormalization'. But no matter how clever the word, it is still what I would call a dippy process! Having to resort to such hocus-pocus has prevented us from proving that the theory of quantum electrodynamics is mathematically self-consistent. It's surprising that the theory still hasn't been proved self-consistent one way or the other by now; I suspect that renormalization is not mathematically legitimate.
- [3] <http://dx.doi.org/10.1119/1.1624112>
- [4] <http://arxiv.org/abs/hep-th/0212049>
- [5] <http://math.ucr.edu/home/baez/renormalization.html>
- [6] <http://www.pha.jhu.edu/~blechman/papers/renormalization/>
- [7] <http://dx.doi.org/10.1007/BF01255832>
- [8] <http://www.cerncourier.com/main/article/41/7/14>
- [9] <http://fr.arxiv.org/abs/hep-th/9812203>
- [10] <http://parthe.lpthe.jussieu.fr/poincare/textes/octobre2002/Rivasseau.ps>
- [11] <http://cpth.polytechnique.fr/cpth/rivass/book.ps>
- [12] <http://www-spht.cea.fr/articles/t96/037/>
- [13] <http://parthe.lpthe.jussieu.fr/poincare/textes/octobre2002/Zinn.ps>
- [14] <http://arxiv.org/abs/hep-th/9602024>
- [15] <http://www-spht.cea.fr/articles/t98/118/>

Rydberg-formule

De **Rydberg-formule** (of **Rydberg-Ritz-formule**) wordt in de atoomfysica gebruikt om het volledige elektromagnetische spectrum van de lichtemissie van waterstof te bepalen. Later werd deze formule uitgebreid voor "elk" element door gebruik te maken van het Rydberg-Ritz-combinatieprincipe.

Het spectrum is de verzameling golflengtes van fotonen die uitgezonden worden wanneer elektronen tussen twee energieniveaus overspringen, de schillen rond de atomen. Deze ontdekking werd gebruikt als ondersteunend bewijs voor de kwantummechanica.

De formule werd uitgevonden door de Zweedse natuurkundige Johannes Rydberg en gepubliceerd op 5 november 1888.

Rydberg-formule voor waterstof

$$\frac{1}{\lambda_{\text{vac}}} = R_{\text{H}} Z^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

Waarin:

λ_{vac} de golflengte van het uitgezonden licht in vacuüm,

R_{H} de Rydbergconstante voor waterstof,

$$R_{\text{H}} = \frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^3 c} = 1.097\,373\,156\,852\,5\,(73) \times 10^7 \text{ m}^{-1}, \text{ [1]}$$

n_1 en n_2 zijn gehele getallen, zodanig dat $n_1 < n_2$,

Z is het atoomnummer, 1 voor waterstof.

Door n_1 op 1 te zetten en n_2 van 2 naar oneindig te laten lopen, worden de spectraallijnen, bekend als de Lymanserie, verkregen die convergeren naar 91nm, op dezelfde wijze:

n_1	n_2	Naam	Convergeert naar
1	$2 \rightarrow \infty$	Lymanserie	91 nm
2	$3 \rightarrow \infty$	Balmerserie	365 nm
3	$4 \rightarrow \infty$	Paschenserie	821 nm
4	$5 \rightarrow \infty$	Brackettserie	1459 nm
5	$6 \rightarrow \infty$	Pfundserie	2280 nm
6	$7 \rightarrow \infty$	Humphreysserie	3283 nm

De Lymanserie zit in het ultraviolet spectrum, de Balmerserie in het zichtbare spectrum en de Paschen-, Brackett-, Pfund- en Humphreysseries zitten in het infrarode spectrum.

➤ *Zie verder ook het artikel Waterstofspectrum*

Rydberg-formule voor een element lijkend op waterstof

De bovenstaande formule kan worden uitgebreid voor elk element met soortgelijke eigenschappen als die van waterstof.

$$\frac{1}{\lambda_{\text{vac}}} = RZ^2 \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

waar

λ_{vac} de golflengte van het uitgezonden licht in vacuüm,

R de Rydbergconstante voor dit element,

Z het atoomnummer, het aantal protonen in de atoomkern,

n_1 en n_2 zijn gehele getallen, zodanig dat $n_1 < n_2$.

Het is belangrijk te weten dat deze formule alleen kan worden toegepast op elementen die gelijksoortig zijn aan waterstof. Er mag slechts één elektron beschikbaar zijn om over te springen van de ene naar de andere schil. Voorbeelden hiervan zijn He^{+1} , Li^{2+} , Be^{3+} enzovoort.

Ontstaan

Tegen 1890 had Rydberg een formule ontdekt die de relatie tussen de golflengtes in het spectrum van alkalimetalen beschreef en hij merkte op dat de Balmer-vergelijking een bijzonder geval was. Hoewel de Rydberg-formule later onnauwkeurig bleek voor zwaardere atomen, wordt ze nog steeds als nauwkeurig beschouwd voor alle elementen lijkend op waterstof en alkalimetalen met een enkel valentie-elektron ver weg van de binnenste elektronenschillen. Rydberg vereenvoudigde zijn berekeningen door gebruik te maken van het "golfgetal" (het aantal golven dat binnen een lengte-eenheid kan worden gevonden) als meeteenheid. Hij zette de golfggetallen van opeenvolgende spectraallijnen in elke serie uit tegen opeenvolgende integers die de volgorde van de lijnen in die serie voorstelde. Hij merkte op dat de curves gelijkvormig waren en zocht naar een functie die al deze grafieken kon produceren wanneer de juiste constanten werden ingevoerd.

Referenties

[1] Codata

Bron

- Mike Sutton, "Getting the numbers right – the lonely struggle of Rydberg" Chemistry World, Vol. 1, No. 7, juli 2004.

Schrödinger-operator

Een **Schrödinger-operator** is een wiskundig object dat de belangrijkste eigenschappen van een kwantummechanisch systeem samenvat. Technisch is het een lineaire transformatie van een deel van een Hilbertruimte. De diverse oplossingen van de Schrödingervergelijking, en hun onderlinge verband, blijken uit een grondige analyse van de bijbehorende Schrödinger-operator. Zowel de vergelijking als de operator is genoemd naar Erwin Schrödinger.

Verantwoording

De tijdsafhankelijke niet-relativistische Schrödingervergelijking voor een elektrisch geladen deeltje in een elektrostatische potentiaal V (of algemener, voor een stel deeltjes in een willekeurig conservatief krachtveld) luidt

$$-\frac{1}{2}\Delta\psi + V\psi = E\psi$$

Hierin is Δ de Laplace-operator (de som van de tweede partiële afgeleiden in alle ruimtelijke richtingen), ψ de onbekende complexwaardige golffunctie die de meest waarschijnlijke positie van het deeltje aangeeft, en E een eveneens onbekende constante, de totale energie van het deeltje.

Het linkerlid van de vergelijking kan worden opgevat als een lineaire transformatie van de vectorruimte van alle mogelijke oplossingen ψ :

$$H(\psi) = -\frac{1}{2}\Delta\psi + V\psi$$

De lineaire transformatie H wordt meestal zonder haken genoteerd. Men noemt haar de Hamilton-operator van het systeem, naar analogie van de Hamilton-functie in de bijzondere formulering die William Rowan Hamilton aan de klassieke mechanica gaf.

Oplossingen ψ worden a priori gezocht in de Hilbertruimte $\mathcal{H} = L^2(\mathbb{R}^n, \mathbb{C})$ der kwadratisch integreerbare complexwaardige functieklassen in n veranderlijken (zie L^p -ruimte). Een Hilbertruimte is een voorbeeld van een topologische vectorruimte. De studie van lineaire afbeeldingen tussen topologische vectorruimten heet operatorentheorie.

Een belangrijk aspect van de wiskundige definitie van H is haar domein. Afhankelijk daarvan zal H al dan niet kunnen worden opgevat als een zelftoegevoegde operator in een Hilbertruimte. Dat laatste is een vereiste om de oplossingen voor E te kunnen opvatten als fysisch mogelijke waarden van de totale energie van het systeem.

Definitie

Een Schrödinger-operator, in zijn elementaire vorm, is een zelftoegevoegde operator H op een dichte deelvectorruimte D van \mathcal{H} , die minstens de tweemaal differentieerbare functies met compacte drager omvat, en waarbij H voor die functies kan geschreven worden als de som van (min de helft van) de Laplace-operator en de vermenigvuldiging met een gegeven reële functie V .

A priori moet de functie V niet continu of begrensd zijn, maar wel lokaal integreerbaar. In de praktijk zullen sterk positieve waarden van V geen probleem opleveren, maar moeten voorwaarden worden opgelegd aan de mate waarin V negatief wordt.

Interpretatie

In de Schrödinger-formulering van de kwantummechanica komen fysische eigenschappen van het systeem overeen met zelftoegevoegde operatoren op een Hilbertruimte. De Laplace-operator (met voorfactor min één tweede) stelt de kinetische energie van het geladen deeltje voor, de vermenigvuldiging met V stelt de potentiële energie voor.

Door het bestuderen van H als operator wordt de Schrödingervergelijking een eigenwaardeprobleem. We zoeken naar vectoren ψ die door H op een constant veelvoud van zichzelf worden afgebeeld (zogenoeten eigenvectoren). De bijhorende constante, de eigenwaarde, is zoals gezegd de totale energie van het systeem.

Onbegrensde operator

Een Schrödinger-operator is geen continue lineaire transformatie ten opzichte van de topologie van de Hilbertruimte. Het is wel een gesloten operator in de zin dat zijn grafiek

$$\{(x, Hx) | x \in \mathcal{H}\}$$

een gesloten deelverzameling is van het Cartesisch product $\mathcal{H} \times \mathcal{H}$ van de Hilbertruimte met zichzelf.

De eis dat H zelftoegevoegd is, is veel strenger dan alleen maar de symmetrie ten opzichte van het inwendig product van de Hilbertruimte

$$\forall \phi, \psi \in D : \langle \phi, H\psi \rangle = \langle H\phi, \psi \rangle$$

De toegevoegde operator H^* moet namelijk *precies hetzelfde domein* hebben als H . Hoe groter het domein van H , des te kleiner het domein van zijn toegevoegde H^* . De belangrijkste technische moeilijkheid is dus, een precies geschikte domeinverzameling D vastleggen. Fysisch komt dit overeen met het selecteren van de juiste randvoorwaarden bij de Schrödingervergelijking.

De eenvoudigste Schrödinger-operator is de (negatieve) Laplace-operator. Hij is zelftoegevoegd op de verzameling kwadratisch integreerbare functieklassen die bijna overal tweemaal partieel differentieerbaar zijn, en waarvan de eerste en tweede partiële afgeleiden opnieuw kwadratisch integreerbaar zijn (Sobolev-ruimte).

Van sommige andere Schrödinger-operatoren kan worden aangetoond dat ze zelftoegevoegd zijn door ze op te vatten als een *storing* van een bekende operator. Zij T een zelftoegevoegde operator in een Hilbertruimte. Een operator S heet relatief compact ten opzichte van T als hij kan worden opgevat als een compacte operator van de grafiek van T naar de oorspronkelijke Hilbertruimte. In dat geval is $T+S$ opnieuw een zelftoegevoegde operator op het domein van T .

Halfgroepen

Een Schrödinger-operator is de generator (tijdsafgeleide in tijdstip 0) van een eenparameter-halfgroep van operatoren. De leden van de halfgroep geven de oplossing van de zogeheten tijdsafhankelijke Schrödingervergelijking voor imaginaire tijden. Naar deze halfgroepen wordt verwezen als Schrödinger-halfgroepen.

Uitbreidingen

De naam Schrödinger-operator wordt ook nog gebruikt voor andere, meer algemene lineaire transformaties die de energie van een kwantummechanisch systeem uitdrukken in een of andere vorm van de Schrödingervergelijking. Zo bestaat er ook een Schrödingervergelijking (en bijhorende operator) met spin. Een *magnetische Schrödinger-operator* bevat een extra term waarin een vectorpotentiaal optreedt. De toestandsruimte \mathbb{R}^n kan worden vervangen door een algemenere Riemann-variëteit met bijhorende Laplace-operator.

Referenties

- H.L. Cycon, R.G. Froese, W. Kirsch en B. Simon, "Schrödinger Operators," Springer Texts and Monographs in Physics, Heidelberg 1987.
 - M. Reed en B. Simon, "Methods of Modern Mathematical Physics" (4 delen), Academic Service, Londen 1975-1980.
 - B. Simon, "Schrödinger Semigroups," *Bulletin of the American Mathematical Society* **7**, 447-526 (1982).
-

Schrödinger vergelijking

Kwantummechanica
$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
Onzekerheidsrelatie
Algemene inleiding... ^[1]
Achtergrond
Klassieke mechanica Interferentie Hamiltonformalisme
Fundamentele begrippen
Kwantumtoestand · Golffunctie · Postulaten Superpositie · Onzekerheidsprincipe Schrödinger vergelijking · Tunneleffect Uitsluitingsprincipe Diracnotatie
Gevorderde onderwerpen
Interpretatie Klein-Gordon vergelijking Dirac-vergelijking Kwantumveldentheorie Kwantumgravitatie

Experimenten

Schrödingers kat
 Tweespletenexperiment
 Tunneleffect
 Stern-Gerlach-experiment

Wetenschappers

Planck · Einstein · Bohr
 · Sommerfeld · Bose ·
 Kramers · Heisenberg ·
 Born · Jordan · Pauli ·
 Dirac · de Broglie ·
 Schrödinger · von
 Neumann · Wigner ·
 Feynman · Bohm ·
 Everett · Bell

De **Schrödingervergelijking**, aanvankelijk in 1925 als golfvergelijking opgesteld door de Oostenrijkse natuurkundige Erwin Schrödinger, is in de kwantummechanica een partiële differentiaalvergelijking die de basisformule vormt voor het beschrijven van een kwantummechanisch systeem. De toestand van een dergelijk systeem wordt beschreven door de zgn. golf functie ψ en de mechanische eigenschappen door de Hamiltoniaan H van het systeem, een operator die de totale energie van het systeem voorstelt. Voor een systeem van een enkel deeltje luidt de Schrödingervergelijking:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) = H\psi(\vec{r}, t)$$

waarin \vec{r} de driedimensionale plaatsvector is, t de tijd en \hbar de constante van Dirac en i imaginaire eenheid. Gegeven de toestand van het systeem (dat wil zeggen gegeven de golf functie ψ) kan hiermee de evolutie (ontwikkeling in de tijd) van het systeem berekend worden. De kansdichtheid op tijdstip t voor de positie \vec{r} van het deeltje wordt dan gegeven door:

$$|\psi(\vec{r}, t)|^2$$

De complexwaardige golf functie bevat de informatie voor alle eigenschappen van het deeltje, zoals plaats, impuls en energie (interne eigenschappen, zoals spin, daargelaten).

De kwantummechanische tweeledigheid van alle materie komt in deze vergelijking goed tot uiting. Dat wil zeggen dat deeltjes altijd een golfkarakter met zich meedragen en golven omgekeerd altijd een deeltjeskarakter hebben. De schrödingervergelijking beschrijft een deeltje, maar de ontwikkeling van de toestand van dit deeltje is als die van een golf.

Kwantisatie van fysische eigenschappen

Elke meetbare fysische grootheid van het systeem correspondeert met een bepaalde operator \hat{O} , die een bewerking op de golffunctie definieert. Als de golffunctie een eigenfunctie is van de operator, dan heeft die operator het effect van een vermenigvuldiging van die eigenfunctie met de bijbehorende eigenwaarde van de fysische grootheid. Dus als voor operator \hat{O} de golffunctie een eigenfunctie is, dan:

$$\hat{O}\psi(\vec{r}, t) = o_e \psi(\vec{r}, t)$$

De fysische grootheid van het systeem dat verkeert in de toestand die door de eigenfunctie beschreven wordt, heeft dan de bij meting nauwkeurig voorspelbare eigenwaarde o_e . Een operator kan meer dan een eigenfunctie hebben die een (quasi-)stabiele toestand van het systeem beschrijft; bij elke eigenfunctie hoort een eigenwaarde. Het systeem kan sprongsgewijs overgaan van de ene stabiele toestand in de andere, waarbij dus de fysische grootheid sprongsgewijs meeverandert. Dit wordt *kwantisatie* genoemd, waarmee de kwantummechanica zich onderscheidt van de klassieke fysica.

Verkeert het systeem niet in een toestand die met een eigenfunctie van de operator beschreven wordt, dan is de meetwaarde van o niet nauwkeurig voorspelbaar, maar heeft een kansdichtheid met een eindige breedte. De verwachtingswaarde is dan te berekenen volgens:

$$\int \psi^*(\vec{r}, t) \hat{O} \psi(\vec{r}, t) d^3\vec{r}$$

waarbij $\psi^*(\vec{r}, t)$ de complex geconjugeerde is van $\psi(\vec{r}, t)$

Een voorbeeld om dit te verduidelijken: een meetbare waarde van het eendeeltjes-systeem in een eendimensionale ruimte is de impuls van het deeltje. De hiermee corresponderende operator is $-i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$. Dus gegeven de golffunctie $\psi(x, t)$, dan is de verwachtingswaarde voor de impuls gelijk aan:

$$p = \int \psi^*(x, t) \left(-i\hbar \frac{\partial}{\partial x}\right) \psi(x, t) dx$$

Betekenis van de Schrödingervergelijking

De basis voor de vergelijking is de wet van behoud van energie, die stelt dat de totale energie E de som is van de kinetische energie T en de potentiële energie V :

$$E = T + V$$

Deze wet geldt zowel voor deeltjes als golven in de klassieke mechanica. Vermenigvuldigd met ψ krijgen we

$$E\psi = (T + V)\psi$$

Voor een golf bestond al een uitdrukking die het mogelijk maakt de kinetische energie uit te drukken met behulp van tweede afgeleiden van een functie die de golf beschrijft:

$$T = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2$$

waarbij ∇^2 de Laplaceoperator voorstelt. In de golfmechanica spelen dergelijke operatoren een bijzonder grote rol. Zij stellen ons namelijk in staat uit een golffunctie, die we ons als een soort trillingspatroon kunnen voorstellen, bepaalde eigenschappen te berekenen, in dit geval de kinetische energie.

De operator T werd oorspronkelijk alleen voor golven toegepast. Het tweeledigheidsprincipe dat stelt dat deeltjes en golven twee manifestaties van hetzelfde zijn is nu eenvoudig wiskundig vorm te geven door de operator T in de algemene uitdrukking voor E in te vullen.

Als de totale energie E van het systeem constant is, dat wil zeggen dat het 'trillingspatroon' ψ niet met de tijd verandert, luidt de Schrödingervergelijking na invulling van bovenstaande operator T :

$$E\psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi(\mathbf{r}, t) + V(\mathbf{r}, t)\psi(\mathbf{r}, t)$$

Het is ook mogelijk veranderingen van golffunctie met de tijd te beschrijven. In zijn tijdsafhankelijke vorm wordt de vergelijking:

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi(\mathbf{r}, t) + V(\mathbf{r}, t)\psi(\mathbf{r}, t)$$

Opnieuw is hier sprake van het inbrengen van een operator:

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t} = E$$

De Schrödingervergelijking is een differentiaalvergelijking en dat wil zeggen dat er slechts bepaalde golffuncties ψ zijn die eraan voldoen. Welke functies dat zijn wordt in belangrijke mate bepaald door hoe de potentiële energie V eruit ziet als functie van de coördinaten x, y, z van de ruimte.

$V(x, y, z)$ wordt bepaald door de wisselwerking van het systeem (bijvoorbeeld een elektron) met zijn naaste omgeving. Het elektron wordt bijvoorbeeld aangetrokken door een positief geladen atoomkern maar juist weer afgestoten door andere elektronen. Afhankelijk van hoe ingewikkeld dit patroon van wisselwerkingen is, is het mogelijk bij grotere of minder grote benadering te berekenen wat voor functies ψ er aan de Schrödingervergelijking voldoen. Zijn de golffuncties eenmaal bekend dan kunnen daaruit middels operatoren allerlei eigenschappen berekend worden.

De golffunctie die resulteren uit deze berekeningen geven niet aan waar het elektron zich op elk ogenblik bevindt, maar leveren alleen algemene informatie over de trefkans of de waarschijnlijkheid om dit elektron op een bepaalde plaats (orbitalen) in het atoom te treffen.

Tijdsonafhankelijke Schrödingervergelijking voor één deeltje

Als de Hamiltoniaan niet van de tijd afhangt, krijgt men door scheiding van variabelen:

$$\psi(r, t) = \phi(r)\kappa(t)$$

de volgende relaties:

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(r, t) = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\phi(r)\kappa(t) = i\hbar\phi(r)\frac{\partial}{\partial t}\kappa(t)$$

$$H\psi(r, t) = H\phi(r)\kappa(t) = \kappa(t)H\phi(r)$$

zodat uit de Schrödingervergelijking volgt:

$$i\hbar\frac{1}{\kappa(t)}\frac{\partial\kappa(t)}{\partial t} = \frac{H\phi(r)}{\phi(r)}$$

Linker- en rechterlid zijn dus constant, zodat:

$$i\hbar\frac{\partial\kappa(t)}{\partial t} = E\kappa(t)$$

en

$$\hat{H}\phi(r) = E\phi(r)$$

Deze laatste vergelijking, met de operator H en constante E is de tijdsonafhankelijke Schrödingervergelijking. De vergelijking is een eigenwaardevergelijking voor de operator H met eigenwaarde E en eigenfunctie ϕ .

Schrödingers kat

Kwantummechanica
$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
Onzekerheidsrelatie
Algemene inleiding... [1]
Achtergrond
Klassieke mechanica Interferentie Hamiltonformalisme
Fundamentele begrippen
Kwantumtoestand · Golffunctie · Postulaten Superpositie · Onzekerheidsprincipe Schrödingervergelijking · Tunneffect Uitsluitingsprincipe Diracnotatie
Gevorderde onderwerpen
Interpretatie Klein-Gordonvergelijking Dirac-vergelijking Kwantumveldentheorie Kwantumgravitatie

Experimenten

Schrödingers kat
Tweespletenexperiment
Tunneleffect
Stern-Gerlach-experiment

Wetenschappers

Planck · Einstein · Bohr
· Sommerfeld · Bose ·
Kramers · Heisenberg ·
Born · Jordan · Pauli ·
Dirac · de Broglie ·
Schrödinger · von
Neumann · Wigner ·
Feynman · Bohm ·
Everett · Bell

Schrödingers kat is een gedachte-experiment uit de kwantummechanica. Het werd bedacht door de natuurkundige Erwin Schrödinger, ter verkenning van de gevolgen van het niet-determinisme van de kwantummechanica. In principe zou deze onbepaaldheid niet alleen geldig moeten zijn voor subatomaire deeltjes, maar ook voor macroscopische systemen. Die eigenschap levert een aantal vreemde resultaten op, en met zijn gedachten-experiment wilde Schrödinger het logisch mogelijk zijn van deze voorspelling onderzoeken.

Achtergrond

Erwin Schrödinger is een van de wetenschappers die de aanzet gaven tot de kwantummechanica als model van het gedrag van het universum op subatomaire schaal. In 1926 publiceerde Werner Heisenberg zijn onzekerheidsrelatie, die impliceert dat je niet tegelijkertijd de exacte positie en de exacte snelheid van een gegeven deeltje kunt weten (omdat meting van de ene grootte de andere grootte verstoort). Daarmee kwam een einde aan het denkbeeld van natuurkundigen als Laplace, die dachten dat het mogelijk moest zijn om een model van het universum te bouwen dat de toestand van het hele universum op ieder moment kon voorspellen.

Als vervangend model introduceerden de natuurkundigen Werner Heisenberg en Niels Bohr in 1927 de Kopenhaagse interpretatie van het kwantummechanische model, als uitbreiding op de waarschijnlijkheidsinterpretatie van Max Born, waarin ieder deeltje zich in een zogeheten kwantumtoestand bevindt. Een kwantumtoestand is een combinatie van positie en snelheid en is dus geen exacte beschrijving van het gedrag van het deeltje. Sterker nog, in de kwantummechanica is het ook niet mogelijk dergelijk gedrag exact te beschrijven -- de kwantummechanica beschrijft het universum in termen van een gegeven begintoestand en de *mogelijke* toestanden waarin het universum zich vanuit die toestand verder ontwikkelt (waarbij voor iedere toestand een waarschijnlijkheid gegeven wordt).

De kat

De kwantummechanica is sinds haar publicatie als model zeer snel zeer populair geworden, ook buiten het directe vakgebied waarin dit model ontwikkeld is. In de natuurkundige filosofie heeft zich snel een aantal stromingen ontwikkeld aangaande de precieze implicaties van de kwantummechanica voor ons begrip van het universum. Daaronder zijn stromingen waarin gevonden wordt dat het *bestaan* van een deeltje zelfs niet echt zeker is totdat het geobserveerd wordt.

Tegen dit laatste beeld kwam Erwin Schrödinger zelf in hevig verzet. In een (niet erg goed gelukte) poging om de onzinnigheid van dit idee aan te tonen, stelde hij het volgende gedachte-experiment voor:



Visualisatie van het probleem

(Vertaling van de oorspronkelijke tekst van Schrödinger) Een kat wordt in een stalen ruimte opgesloten, samen met de volgende helse machine (die men afschermen moet tegen direct ingrijpen van de kat): in een buisje zit een minuscuul klein beetje van een radioactief element, zo weinig, dat gedurende een uur mogelijk een van de atomen vervalt, maar even waarschijnlijk ook niet. Vervalt een atoom, dan detecteert een geigerteller dat en laat via een relais een hamertje vallen, dat een flesje met blauwzuur stuk slaat. Als men dit systeem een uur lang aan zichzelf heeft overgelaten, dan zal men zeggen dat de kat nog leeft als intussen geen atoom vervallen is. Het eerste atoom dat vervalt zou de kat vergiftigd hebben. De toestandsfunctie van het hele systeem zou dat zo uitdrukken, dat daarin de levende en de dode kat gelijktijdig gemengd voorkomen. Het kenmerkende aan zulke gevallen is, dat een oorspronkelijk tot atomair bereik beperkte onbepaaldheid zich vertaalt in grofzintuigelijke onbepaaldheid, waarover dan door directe waarneming beslist kan worden.

Als het nu waar is dat een deeltje niet noodzakelijk bestaat tot het geobserveerd wordt, dan is het niet zeker of de hamer ooit kan vallen -- wellicht moet hij vallen, wellicht kan hij vallen, wellicht kan hij niet vallen. Totdat de doos open gemaakt wordt, is het dus niet zeker wat er gebeurd is. De uitsmering van mogelijkheden over het veld der waarschijnlijkheid betekent dus dat zolang de doos dicht is, de kat tegelijkertijd zowel in leven als dood kan zijn. Zolang er geen observatie mogelijk is, is het niet anders te zeggen.

Volgens Schrödinger toonde dit aan dat bestaansonzekerheid niet zinnig is als gevolg van de kwantummechanica en dat de kwantummechanica op dit punt inherent een incorrect model is. Volgens anderen is het nou juist een illustratie van de onzekerheid die, als gevolg van de kwantummechanica, in het universum is ingebouwd. Sterker nog, vanuit Schrödingers gedachte-experiment is weer een aantal verschillende stromingen ontstaan in de natuurkundige filosofie en wel rond de vraag wanneer het kwantummechanische systeem met zijn ingebouwde onzekerheid precies overgaat in een deterministisch systeem waarin het lot van de kat exact bepaald is.

De beroemde fysicus Stephen Hawking riep eens uit, "Wanneer ik hoor spreken van Schrödingers kat, dan trek ik mijn revolver," waarbij hij zinspeelt op de beruchte uitspraak van de Nazi-auteur Hanns Johst: "Wenn ich das Wort "Kultur" höre, entsichere ich meinen Browning!".

Het is namelijk zo dat Hawking, en vele andere natuurkundigen met hem, van mening zijn dat in de Kopenhaagse interpretatie van de kwantummechanica het *meer dan verantwoord is dat de nadruk wordt gelegd op de rol van de waarnemer*. Een definitieve consensus op dit punt onder de natuurkundigen lijkt nog buiten bereik te zijn. Logischerwijs is er voor de kat geen enkele onzekerheid of hij nog leeft of dood is. Onzekerheid zit dus alleen in de waarnemer.

Externe links

- Erwin Schrödinger, The Present Situation in Quantum Mechanics (Vertaling) ^[1]

Referenties

- *The Illustrated A Brief History of Time*
Stephen Hawking
1996, Bantam Press
ISBN 0-593-04059-7



Zie de categorie *[/wiki/Commons:Category:Schrödinger's Cat?uselang=nl#mw-subcategories Schrödinger's Cat]* van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.

Referenties

- [1] <http://www.tu-harburg.de/rzt/rzt/it/QM/cat.html>

Snaartheorie

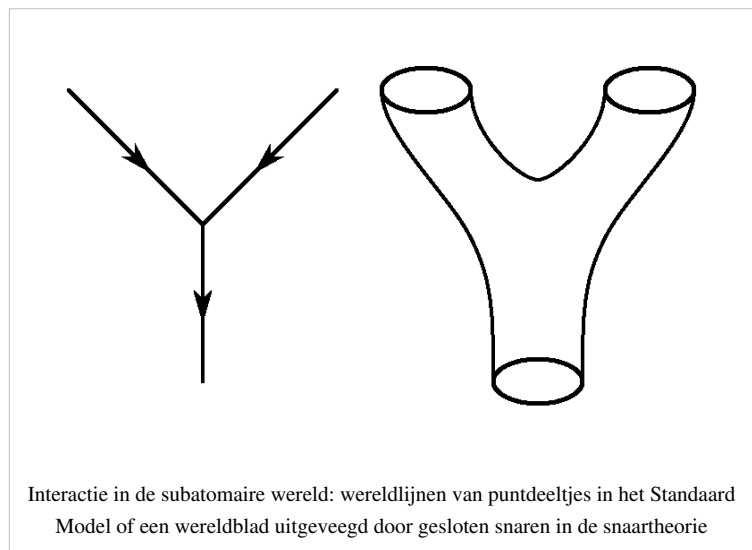
De **snaartheorie** of **stringtheorie** is een theorie die poogt de vier fundamentele natuurkrachten in de natuurkunde (de elektromagnetische kracht, de sterke en zwakke kernkracht en de zwaartekracht) in één universele omvattende theorie onder te brengen. Ze is dus een kandidaat voor de zogenaamde unificatietheorie.

Omschrijving

Op de website van de Universiteit van Amsterdam stond een soort persbericht naar aanleiding van de Spinozapremie, gewonnen door Robbert Dijkgraaf met een omschrijving van de theorie:

Snaartheorie is de extreemste vorm van theoretische fysica en de belangrijkste kandidaat voor een kwantummechanische beschrijving van de zwaartekracht. Dat is nodig omdat de huidige theorieën, in het bijzonder de relativiteitstheorie, onvolledig zijn. Snaartheorie werkt

niet met elektronen of quarks maar met een soort mini-elastiekjes die op allerlei wijzen kunnen trillen. Alle verschillende elementaire deeltjes om ons heen zouden dan ontstaan als de trillingen van één enkele snaar, zoals de boventonen van een vioolsnaar. Op deze wijze is het mogelijk ook de zwaartekracht volgens de wetten van de kwantummechanica te beschrijven. Met dat uitgangspunt kan snaartheorie bijvoorbeeld extreem zware én erg kleine objecten beschrijven, zoals zwarte gaten en het heelal vlak na de oerknal.



Geschiedenis

In 1921 ontwikkelden Theodor Kaluza en Oskar Klein onafhankelijk van elkaar het idee dat elektromagnetisme in een verenigde krachtheorie afgeleid kan worden van zwaartekracht als er vier in plaats van drie ruimtelijke dimensies zijn, en deze vierde opgerold is in een kleine cirkel. Deze theorie staat bekend onder de naam Kaluza-Klein-theorie.

De officiële geboorte van de snaartheorie gaat terug tot 1970, toen drie theoretici op het gebied van elementaire deeltjes (Yoichiro Nambu, Holger Bech Nielsen en Leonard Susskind) zich realiseerden dat de beschrijving van de sterke kernkracht door Gabriele Veneziano uit 1968, ook voor de kwantummechanica van trillende snaren geldt.

Y. Nambu veronderstelde minuscule gespannen snaartjes, met ongeveer de met de huidige techniek kleinst meetbare grootte 10^{-15} meter, een biljoenste deel van een millimeter, de grootte van een proton of neutron. De eigenschappen van de deeltjes worden afgeleid van de verschillende trillingswijzen, de verschillende tonen van de snaar.

Vijf jaar later kon het verklaringsmodel met quarks, de kwantumchromodynamica, heel wat meer experimentele successen boeken en werd het snaarmodel verlaten.

De snaartheorie kwam terug door bevindingen van J. Scherk en J. Schwarz: snaartheorie bevat Einsteins algemene relativiteitstheorie want ze vereist een massaloos deeltje met spin 2 en dat deeltje interageert op universele manier met alle andere materie. Alle deeltjes hebben een spin die gelijk is aan:

- $1/2$ voor elektronen, protonen, en neutronen.
- 1 voor het foton of lichtkwantum, de drager van de elektromagnetische kracht. Deze heeft een rustmassa gelijk aan nul. Die nulmassa is bijzonder: zij komt overeen met een kracht die over grote afstanden voelbaar blijft.
- 2 voor het graviton, de vermoede drager van de zwaartekracht, met eveneens een nulmassa. De spin 2 volgt uit de structuur van Einsteins theorie.

De snaartheorie maakte hierdoor rond 1974 een rentree, toen men zich realiseerde dat deeltjes met spin 2 massa 0 moeten hebben, hetgeen overeenkomt met wat we van het graviton verwachten. Hiermee had de snaartheorie zich gepositioneerd als een "theorie voor alles", dat wil zeggen een verenigde theorie voor de vier elementaire krachten.

Voor de jaren 1990 waren snaartheoretici van mening dat er vijf verschillende supersnaartheorieën waren: het Type I stringtheorie, Type II A stringtheorie en Type II B stringtheorie, en de twee heterotic snaartheorieën (SO (32) stringtheorie en $E 8 \times E 8$ stringtheorie). Men dacht dat van deze vijf theorieën slechts één theorie zou leiden tot de "theorie van alles" en dat de theorie, waarbij de tien dimensies zouden kunnen herleid worden tot onze vier dimensies en die zou overeenkomen met de fysische waarnemingen in onze wereld, de juiste zou zijn.

Nu gaat men ervan uit dat de vijf supersnaartheorieën met elkaar zijn verbonden alsof ze elk een speciaal geval van een meer fundamentele theorie (de M-theorie) zijn. Deze theorieën zijn met elkaar verbonden door wat men noemt dualiteiten. Als twee theorieën met elkaar verbonden zijn door een dualiteitstransformatie, betekent dit dat beide theorieën door middel van een transformatie en een inverse transformatie in elkaar kunnen omgezet worden. Ze beschrijven dus eigenlijk hetzelfde, maar op een andere manier. De twee theorieën hebben dan een dualiteit onder die vorm van transformatie.

Men heeft ook gemerkt dat gesloten snaren zich grotendeels gedragen als open snaren. Hierdoor kan men relatief eenvoudigere berekeningen doen op open snaren, die dan ook geldig zijn op gesloten snaren. Het is mogelijk dat alleen de snaren die verantwoordelijk zijn voor de zwaartekracht gesloten snaren zijn.

Experimentele verifieerbaarheid

Er zijn nog geen experimentele bewijzen die de theorie ondersteunen.^[1] De snaartheorie heeft de reputatie complex te zijn. Het is al moeilijk genoeg om experimenteel toetsbare uitspraken te doen, maar een groot praktisch probleem is dat het energieniveau waarop bepaalde aspecten van de snaartheorie zichtbaar kunnen worden nog erg ver boven de capaciteit van de huidige generatie deeltjesversnellers ligt. Daarom is het voorlopig niet mogelijk deze theorie experimenteel in haar geheel te toetsen. In juni 2009 is een fysisch verschijnsel verklaard met behulp van de snaartheorie door FOM.^[2]

Het is mogelijk dat bepaalde deelaspecten van de snaartheorie in de meer nabije toekomst experimenteel getoetst worden. De meest waarschijnlijk geachte plaats daarvoor is de nieuwe deeltjesversneller in het CERN te Genève, de LHC. De snaartheorie veronderstelt een tien- of elfdimensionale ruimte en supersymmetrie; misschien zou het bestaan van extra dimensies kunnen worden aangetoond: als er energie verdwijnt tijdens een experiment, zou deze energie zich moeten bevinden in een andere dimensie. De LHC zou ook supersymmetrie kunnen aantonen. Als de wereld waarin wij leven inderdaad supersymmetrisch is (zoals vele theoretische fysici denken en hopen), betekent dit dat elk deeltje een supersymmetrische partner heeft. Zo is een squark de super-symmetrische partner van een quark. De supersymmetrische partners zijn echter veel zwaarder. Als die 'partnerdeeltjes' waargenomen worden, is dat dus een ondersteuning van het bestaan van supersymmetrie.

Echter, het bestaan van supersymmetrische partners of extra dimensies wordt ook in andere theorieën voorspeld, en is dus geen bewijs voor de snaartheorie. Tevens is het mogelijk dat deze deeltjes pas ontdekt kunnen worden met veel sterkere deeltjesversnellers.

Er is dus een aantal problemen ten aanzien van de toetsbaarheid van de snaartheorie, maar er zijn ook aspecten die de theorie juist heel aantrekkelijk maken. Ten eerste is de snaartheorie in staat om kwantummechanica op een elegante manier met relativiteitstheorie te verenigen. Met andere woorden, ze legt uit hoe zwaartekracht op de allerkleinste lengteschalen eruit ziet. Dit is een groot voordeel ten opzichte van de meeste andere theorieën. (Een uitzondering is de zogeheten loop-kwantumzwaartekracht.) Bovendien is de snaartheorie in staat om veel ogenschijnlijk verschillende theorieën te beschrijven als verschillende toestanden van één enkele theorie. Er zijn bijvoorbeeld 5 of 6 verschillende versies van de snaartheorie (namelijk, de vijf supersnaartheorieën en M-theorie) maar men weet dat deze in wezen dezelfde theorie zijn, maar op een andere manier beschreven. Een andere uitzonderlijke eigenschap van de snaartheorie is dat die ook eigenschappen van zwarte gaten op microscopische schaal kan beschrijven en verklaren.

Snaartheorie in de natuurkunde

➤ *Zie Unificatietheorie voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

De vier fundamentele natuurkrachten in de natuurkunde (de elektromagnetische kracht, de sterke en zwakke kernkracht en de zwaartekracht) worden beschreven in twee theorieën:

- **De relativiteitstheorie** beschrijft de natuur op grote afstanden, en bij hoge snelheden. Het is dus een macroscopische beschrijving van de gravitatie. (Bij lage snelheden en lage massa's kan men zwaartekracht ook beschrijven met Newton's gravitatie-theorie.)
- **De kwantummechanica** beschrijft het gedrag van de materie op zeer kleine schaal. Deze beschrijft dus hoe fundamentele deeltjes op elkaar inwerken. De sterke-, zwakke- en elektromagnetische kracht moeten dus beschreven worden met een kwantumtheorie. Deze theorie werd gevonden in de tweede helft van de twintigste eeuw, en noemt men nu het Standaardmodel van de deeltjesfysica.

In 'alledaagse' situaties waarin geen sprake is van zeer grote snelheden of massa's, en waarin het gedrag van de materie op zeer kleine schaal te verwaarlozen is, herleiden de bovenstaande theorieën tot klassieke of Newtoniaanse mechanica, en de meer vertrouwde wereld van vloeistoffen, gassen en vaste stoffen. Dit geeft dan aanleiding tot de

beter bekende takken van de fysica, zoals bijvoorbeeld de fysica die in het secundaire onderwijs geleerd wordt.

Meestal hebben kwantummechanica, klassieke mechanica en relativiteitstheorie hun eigen toepassingsgebied, door het verschil in grootte waar ze van toepassing zijn. (Het is bijvoorbeeld duidelijk dat men geen kwantummechanica nodig heeft om het macroscopische gedrag van een gas te beschrijven. Ook heeft men geen relativiteitstheorie nodig om de baan van een vallend voorwerp te verklaren: in deze situatie is de gravitatie theorie van Newton meer dan goed genoeg voor een beschrijving.)

Er zijn echter toepassingen waarbij zowel met kwantummechanica als met relativiteitstheorie rekening moet worden gehouden, bijvoorbeeld de gravitatie op kleine schaal bij zwarte gaten ook als men de tijd vlak na de oerknal wil bestuderen. Deze situaties zijn heel interessant voor een dieper inzicht in ons universum, en het is dus problematisch dat er nog steeds geen omvattende theorie bekend is, die tegelijkertijd relativistische als kwantummechanische effecten kan beschrijven. Reeds lang zoekt men één universele theorie, die dit wél kan, de zogenaamde unificatietheorie.

Het feit dat snaartheorie zowel relativiteitstheorie als kwantummechanica omvat, maakt haar dus een zeer goede kandidaat voor de unificatietheorie (ook wel *Theorie van alles*). Dit is dus de reden waarom de snaartheorie zo ijverig wordt bestudeerd.

Snaren en extra dimensies

Hierboven werd uitgelegd dat snaartheorie erin slaagt Einsteins algemene relativiteitstheorie te combineren met kwantummechanica. Men zegt ook wel dat snaartheorie een consistente kwantumgravitatie-theorie is. De snaartheorie veronderstelt dat deeltjes in werkelijkheid kleine, trillende, eendimensionale snaren zijn. Verschillende trillingswijzen van een snaar worden dan waargenomen als verschillende deeltjes. Zoals een snaar van een viool verschillende tonen kan voortbrengen door de lengte van de snaar te veranderen, kan een snaar verschillende basisdeeltjes vormen, zoals quarks of elektronen. Er is dus nog een extra unificerend aspect aan de snaartheorie: alle verschillende deeltjessoorten worden op een elegante manier verenigd in één enkel fundamenteel geheel. Zoals in de inleiding staat, zijn deze snaren (als ze bestaan) wel erg moeilijk om waar te nemen: ze zouden afmetingen hebben, om en nabij de Plancklengte (10^{-35} meter), terwijl met de huidige techniek de kleinste meetbare afstand 10^{-15} meter is.

Een ander aspect van de snaartheorie is dat wiskundige consistentie een meerdimensionale ruimte vereist. In onze huidige wereld kennen we drie tastbare ruimtedimensies, plus één tijdsdimensie. In het totaal zijn er dus vier ruimtetijd-dimensies. De snaartheorie gaat er echter van uit dat op zeer kleine schaal de ruimte niet vier-, maar tien-, of zelfs elfdimensionaal is. De zes 'extra' dimensies zijn 'opgerold', en daardoor niet waarneembaar. Omdat met de huidige deeltjesversnellers geen extra dimensies gevonden zijn, moeten de extra dimensies kleiner zijn dan de lengteschaal die de deeltjesversnellers kunnen 'zien', ongeveer 10^{-15} meter. Een vergelijking die vaak gebruikt wordt om het begrip van 'opgerolde' (ook wel 'compacte') dimensies uit te leggen, is de volgende: een tuinslang is een object dat er voor 'grote' waarnemers uitziet als een één-dimensionaal object. Een tuinslang heeft immers één richting: zijn lengterichting. Echter, voor een mier die op de tuinslang loopt ziet dit er anders uit. Voor haar is er (naast de lengterichting) ook nog de richting rondom de tuinslang. Een mier ziet dus één dimensie meer dan wat een waarnemer ziet die alleen grote lengteschalen kan waarnemen. Op dezelfde manier zouden wij (als macroscopische waarnemers) kleine dimensies in het dagelijkse leven 'over het hoofd' kunnen zien, terwijl deze kleine richtingen wel zichtbaar zouden kunnen zijn voor heel kleine deeltjes (of snaren), of bij heel hoge energieën (in bepaalde experimenten in toekomstige deeltjesversnellers).

Varianten van de snaartheorie

► *Zie supersnaartheorie voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Zoals hierboven reeds vermeld werd, zijn er verschillende versies van de snaartheorie. In het begin werd dit gezien als een gebrek. Als er verschillende versies van een theorie zijn, is het moeilijker om na te gaan of één daarvan misschien juist is. Het is echter duidelijk geworden dat de verschillende versies eigenlijk dezelfde theorie zijn, maar op een andere manier beschreven. Dit zijn de zogeheten dualiteiten tussen verschillende snaartheorieën. Het feit dat de bestaande versies van snaartheorie dezelfde fysica kunnen beschrijven op een ogenschijnlijk andere manier, wordt vandaag de dag juist gezien als een belangrijk aspect, en niet meer als een gebrek. Deze dualiteiten laten immers toe voor een bepaald probleem de beschrijving te kiezen in dewelke de berekeningen het eenvoudigst zijn. Typisch treedt het volgende op: hoe moeilijker een probleem in één beschrijving, des te gemakkelijker de berekening in een andere beschrijving. Meer technisch wordt de grootte van de koppelingsconstante omgekeerd bij de overgang van één theorie naar haar/een duale. Voorbeelden van veelgebruikte dualiteiten in berekeningen zijn de open/gesloten-dualiteit, S-dualiteit, en T-dualiteit.

Een onderscheid tussen de verschillende versies van snaartheorie is het al dan niet voorkomen van open snaren. Open snaren zijn trillende snaren, met twee eindpunten (zoals een koordje). Dit is in tegenstelling tot de gesloten snaren, die geen eindpunten hebben (zoals een elastiekje). Snaartheorieën met open snaren hebben ook nog een andere soort fundamentele objecten: de zogeheten D-branen (genoemd naar de wiskundige Johann Dirichlet). De D-branen zijn hoger-dimensionale objecten (denk bijvoorbeeld aan een tweedimensionaal oppervlak), waaraan de eindpunten van de open snaren vastgehecht zijn.

D-branen zijn erg belangrijk in pogingen om onze wereld te beschrijven met snaartheorie. Het opzetten van een snaartheoretisch model van onze werkelijkheid blijkt immers geen makkelijke taak. D-branen zijn een belangrijk hulpmiddel voor pogingen om zulke modellen te bouwen. Een veel onderzocht voorbeeld is het volgende. Stel dat onze wereld eigenlijk een driedimensionaal D-braan is. Als alle snaren, met uitzondering van die van de gravitonen, open zijn, zitten de meeste deeltjes en krachten 'vastgeplakt' aan het braan. Zwaartekrachtdeeltjes zijn gesloten, waardoor ze niet langer aan een dimensie vastzitten. Ze kunnen dus onze dimensies verlaten, wat zou verklaren waardoor de zwaartekracht zoals wij deze waarnemen relatief erg zwak is t.o.v. de andere drie krachten. Dat model zou dus meteen een gegronde verklaring geven voor één van de grote vragen van de natuurkunde, namelijk de vraag waarom de zwaartekracht tussen fundamentele deeltjes zo zwak is.

Er zijn verschillende snaartheorieën, waarvan er vijf werken met supersnaren. Deze vijf supersnaartheorieën zijn met elkaar verwant, alsof ze de werkelijkheid vanuit een verschillend standpunt belichten. Tot slot is er ook nog de M-theorie. Deze geeft een samenvattende beschrijving van de vijf snaartheorieën, maar helaas is deze theorie nog niet goed begrepen. De fundamentele objecten van M-theorie zijn bovendien geen snaren maar zogeheten *membranen*, twee- of vijf-dimensionale objecten. In de tabel hieronder wordt een overzicht gegeven van de vijf snaartheorieën en hun typerende eigenschappen.

Snaartheorieën		
Type	Ruimte tijd dimensies	Details
Bosonisch	26	Alleen bosonen, geen fermionen, wat alleen krachten betekent, geen materie, met open en gesloten strings; een deeltje met denkbeeldige massa, het tachyon genoemd, met een snelheid hoger dan de snelheid van het licht is het probleem van deze theorie.
I	10	Supersymmetrie tussen krachten en materie, met open en gesloten strings; geen tachyon; groepsymmetrie is SO(32)
IIA	10	Supersymmetrie tussen krachten en materie, met open en gesloten strings gebonden tot D-braan; geen tachyon; zonder massa fermionen spin in twee richtingen (achiral)
IIB	10	Supersymmetrie tussen krachten en materie, met open en gesloten strings gebonden tot D-braan; geen tachyon; zonder massa fermionen spin in één richting (chiral)
HO	10	Supersymmetrie tussen krachten en materie, met gesloten strings alleen; geen tachyon; heterotisch, wat betekent dat links- en rechtsbewegende strings verschillen; groepsymmetrie is SO(32)
HE	10	Supersymmetrie tussen krachten en materie, met gesloten strings alleen; geen tachyon; heterotisch, wat betekent dat links- en rechtsbewegende strings verschillen; groepsymmetrie is $E_8 \times E_8$

Kritiek

Sommige natuurkundigen zoals Brian Greene geloven dat de snaartheorie in de niet zo verre toekomst tot een universele theorie zou kunnen leiden. Hij schreef: *And a sizeable part of the physics and mathematics community is becoming increasingly convinced that string theory may provide the answer.* (Vrije vertaling: *Een aanzienlijk deel van de natuur- en wiskundige gemeenschap raakt er in toenemende mate van overtuigd dat de snaartheorie mogelijk het antwoord kan geven.*)

Vooraf Edward Witten heeft al veel onderzoek gedaan naar de M-theorie als een mogelijke kandidaat voor de universele unificatietheorie. Andere natuurkundigen echter verzetten zich ertegen omdat na decennia resultaten, in de zin van experimentele bevestigingen of zelfs maar experimentele toetsbaarheid, nog steeds uitblijven. Sheldon Glashow heeft de snaartheorie met middeleeuwse theologie vergeleken, meer op geloof en gedachtespinnerij gebaseerd dan op waarnemingen en proefnemingen, en Richard Feynman deed haar botweg af als 'onzin'. Recent werd kritiek op de snaartheorie geuit in de boeken van Peter Woit: *Not Even Wrong* en Lee Smolin: *The Trouble with Physics*. Woit bekritiseert de wetenschappelijke monocultuur in de theoretische natuurkunde door de dominantie van het snaartheoretisch onderzoek en stelt voor ook te zoeken naar andere kandidaten voor een "theorie van alles" zoals een uitbreiding van de kwantumveldentheorie. Snaartheorie is 'not even wrong' omdat een haalbaar wetenschappelijk experiment dat de theorie bevestigt dan wel ontkracht (nog) niet concipieerbaar is.

Gelijksoortige kritiek is ook in het boek van Smolin te vinden: door de zeer vele mogelijkheden om de 10 dimensies van de snaartheorieën op te vouwen tot de waarneembare 4 (hij citeert 10^{500}), zijn de snaartheorieën toch niet zo elegant als het lage aantal parameters doet vermoeden, en is de voorspellende kracht laag. De enige achteraf experimenteel geteste voorspelling die snaartheoretici ooit gedaan hebben, namelijk dat de uitdijning van het heelal kon vertragen, bleek fout. Ook is de snaartheorie niet achtergrond-onafhankelijk, terwijl ze toch de achtergrond-onafhankelijke algemene relativiteitstheorie met de kwantumfysica zou moeten verenigen. Hoewel de naam snaartheorie algemeen ingang gevonden heeft, mag er eigenlijk hoogstens over een hypothese gesproken worden. Desalniettemin behoeven de uitgangspunten van de snaartheorie voor vele fysici die hun carrière eraan te danken hebben geen discussie meer. Door de grote, zichzelf in stand houdende groep snaartheoretici aan voornamen faculteiten wordt volgens Smolin de zoektocht naar de universele unificatietheorie belemmerd. Hoewel de energieën, nodig voor experimentele verificatie van een universele unificatietheorie voor de mens onhaalbaar hoog zijn, ziet hij toch mogelijkheden in astronomische observaties, bijvoorbeeld van de uitdijning van het heelal (zie donkere energie) of van kosmische straling.

Literatuur

Voor een breed publiek

- (nl) Marcel Vonk, *Snaren en de Snaartheorie*, Veen Magazines 2010. ISBN 9085712483.
- (nl) Algemene uitleg ^[3] over kwantumgravitatie, snaartheorie en zwarte gaten.
- (en) Michael Green. *Superstrings* ^[4]. uit Scientific American (1986). *(In het Engels)*
- (en) Edward Witten. *The Universe on a String* ^[5] (PDF). uit Astronomy Magazine (2002). *(In het Engels)*

Leerboeken

- Zwiebach, Barton: A first course in string theory, Cambridge University Press 2004 (*Op het niveau van een Masterstudent in de fysica, met veel uitleg en een geleidelijke opbouw.*)
- Polchinski, Joseph (1998) *String Theory*. Cambridge University Press. *(Meer technisch, maar een standaard leerboek.)*
 - *Vol. 1: An introduction to the bosonic string*. ISBN 0-521-63303-6.
 - *Vol. 2: Superstring theory and beyond*. ISBN 0-521-63304-4.

Kritiek

- Smolin, Lee: The Trouble with Physics
- Woit, Peter: Not Even Wrong
- Krauss, Lawrence: Hiding in the Mirror ^[6]

Externe links

- (en) Brian Greene in minder dan twintig minuten over de snaartheorie op TED.com ^[7]
- (en) The Elegant Universe ^[8] - Verschillende filmpjes, teksten, animaties en afbeeldingen om de snarentheorie uit te leggen. Gepresenteerd door Brian Greene.
- (nl) Snaartheorie en Robbert Dijkgraaf ^[9]
- (en) Een eenvoudige inleiding tot de snaartheorie ^[10]
- (nl) Een Nederlandse introductie ^[11]

Bronnen, noten en/of referenties



Zie de categorie *[/wiki/Commons:Category:Stringtheory?uselang=nl#mw-subcategories Stringtheory]* van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.

Spin (kwantummechanica)

Spin is een fundamentele eigenschap van atoomkernen, hadronen en elementaire deeltjes. Hoewel de spin eigenschappen heeft die doen denken aan een "gewoon" impulsmoment — en het kort na zijn ontdekking ook zo werd opgevat — heeft spin niet te maken met een daadwerkelijke draaiing van een deeltje om zijn as; het is een intrinsiek kwantummechanische grootheid die op geen enkele wijze met de klassieke mechanica is te beschrijven. Voor deeltjes (elementaire of samengestelde) met een spin ongelijk aan nul is de richting van de spin (doorgaans ook kortweg *spin* genoemd) een belangrijke intrinsieke vrijheidsgraad, die het intrinsieke impulsmoment beschrijft.

Achtergrond

Het concept van een spin, maar niet de naam, werd in 1924 door Wolfgang Pauli voorgesteld. In 1925 gaven Ralph Kronig, George Uhlenbeck en Samuel Goudsmit een natuurkundige interpretatie van deeltjes die om hun eigen as draaien (*to spin* is Engels voor "tollen, om zijn as draaien", vandaar de naam van het verschijnsel). Dit beeld is in zoverre correct dat spin aan dezelfde wiskundige wetten gehoorzaamt als gekwantiseerde impulsmomenten. Aan de andere kant heeft spin een aantal bijzondere eigenschappen die spin onderscheidt van baanimpulsmomenten: spins kunnen halfvallige kwantumgetallen hebben ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$) en de spin van geladen deeltjes levert een magnetisch dipoolmoment op dat onverenigbaar is met de klassieke natuurkunde: de zogeheten *g-factor* is ongelijk aan 1. De wiskundige theorie voor spin werd in 1927 door Pauli in detail uitgewerkt. In 1928 toonde Paul Dirac aan dat de elektronspin op natuurlijke wijze ontstaat binnen de relativistische kwantummechanica.

Toepassingen

Spin heeft belangrijke theoretische implicaties en praktische toepassingen. De spin van het elektron is de sleutel tot het uitsluitingsprincipe van Pauli en tot begrip van het periodiek systeem van de elementen. Spin-baanwisselwerking leidt tot de fijnstructuur van atomaire spectra. Nauwkeurige metingen van de *g-factor* van het elektron hebben een belangrijke rol gespeeld in de ontwikkeling en verificatie van de kwantumelektrodynamica. De spin van het elektron speelt een belangrijke rol in het magnetisme, met bijvoorbeeld toepassingen in computergeheugens. Manipulatie van spins in halfgeleidercomponenten is het onderwerp van het zich nog ontwikkelende gebied van de spintronics. De manipulatie van kernspin door radiofrequente golven (kernspinresonantie) is belangrijk in de chemische spectroscopie en in medische beeldvorming (bijvoorbeeld de MRI-scan). De spin van het foton wordt geassocieerd met de polarisatie van licht.

Spinkwantumgetallen

De grootte van spin (aangeduid met S) wordt aangegeven met twee kwantumgetallen. Dit zijn het spinkwantumgetal en het magnetisch spinkwantumgetal; deze laatste kan, net als het magnetisch kwantumgetal t.o.v. het nevenkwantumgetal, een waarde aannemen volgens $-s \leq m \leq s$, waarbij m net als s halftallig is of net als s heeltallig. Er zijn dus $2s + 1$ verschillende waarden mogelijk voor m .

Een elektron bijvoorbeeld heeft een spinkwantumgetal, $s = 1/2$. Bij dit kwantumgetal hoort dus een magnetisch spinkwantumgetal $m = \pm \frac{1}{2}$.

In een magnetisch veld gebracht, kan het elektron daarom maar twee eigentoestanden aannemen, die meestal met *op* (*up*) en *neer* (*down*) aangeduid worden. Dit zijn dus, in diracnotatie,

$$|s, m\rangle = \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle \text{ en } \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle, \text{ meestal dus aangeduid als } |\uparrow\rangle \text{ respectievelijk } |\downarrow\rangle.$$

Andere deeltjes hebben een andere grootte van de spin. Bijvoorbeeld een deutron (een deuterium-kern) heeft een spin 1. In dit geval zijn er drie toestanden mogelijk, nl. -1, 0 en +1.

Spinkwantumgetallen zijn altijd ofwel half­tallig ($1/2, 3/2, 5/2, \dots$) ofwel heeltallig ($0, 1, 2, 3, \dots$). Deeltjes met een half­­tallige spin worden fermionen genoemd, die met heeltallige bosonen.

Het verschil is belangrijk voor de manier waarop meerdere deeltjes energietoestanden kunnen opvullen. Voor fermionen kan er (inclusief de spin) altijd maar één deeltje in iedere toestand zijn, dit heet het Pauliprincipe. Dat wil bijvoorbeeld zeggen dat er niet meer dan twee elektronen in een bepaalde baan om de kern van een atoom passen, de eerste met spin op en de andere met neer. Voor bosonen echter, kan er een onbeperkt aantal deeltjes in dezelfde toestand zijn. Dit laatste maakt bijvoorbeeld Bose-Einsteincondensatie mogelijk.

Spin is te vergelijken met het kwantummechanische impulsmoment, L . De som van deze twee is het totale impulsmoment

$$J = L + S.$$

Magnetisch moment

Wanneer een deeltje een spin en lading heeft, gedraagt het zich als een magneetje. Het intrinsieke magnetisch moment μ van een deeltje met lading q , massa m , en spin S , is

$$\mu = g \frac{q}{2m} S$$

waarin de dimensieloze grootheid g de gyromagnetische verhouding of g -factor is.

Het elektron bezit een magnetisch moment dat ongelijk nul is. Een van de successen van de kwantumelektrodynamica is de accurate voorspelling van de g -factor van het magnetisch moment van het elektron. De g -factor heeft een waarde van 2.0023193043768(86), waarvan de eerste 12 cijfers zeker zijn.

Stelling van Bell

Bells theorema of de **stelling van Bell**^[1] is een naar John Bell genoemde stelling, die vereenvoudigd zegt dat kwantummechanica niet kan verklaard worden door verborgen *lokale* variabelen. Nauwkeuriger: iedere 'klassieke' theorie die gebruikmaakt van lokale, realistische (dat wil zeggen niet-stochastische) variabelen geeft meetbare resultaten die onverenigbaar zijn met de uitkomsten van de kwantummechanica.

De stelling maakt in principe experimentele toetsing van de EPR-paradox mogelijk, maar er is tot op heden nog geen experiment geweest dat aan *alle* voorwaarden voor de stelling voldoet, al komt het experiment van Alain Aspect uit 1982 dicht in de buurt.^[2]

Inleiding

Volgens de kwantummechanica kunnen twee experimenten die tot in alle details dezelfde opzet hebben toch verschillende uitkomsten geven. Een voorbeeld is het sturen van een verticaal gepolariseerd lichtdeeltje door een polarisatiefilter dat een hoek van 45 graden met de verticaal maakt. Als we dit experiment uitvoeren zal in 50% van de gevallen blijken dat het lichtdeeltje wordt doorgelaten, terwijl in de overige 50% van de gevallen het lichtdeeltje wordt geabsorbeerd. Volgens de kwantummechanica is het niet mogelijk te voorspellen wat het lot van een individueel lichtdeeltje zal zijn, omdat alle lichtdeeltjes voor ze het filter bereiken volstrekt identiek zijn. Ze hebben geen onderscheidende eigenschap die bepaalt of ze al dan niet worden doorgelaten. Vooral in de beginjaren van de kwantummechanica zagen veel natuurkundigen dit als een teken dat de theorie niet volledig is. Zij stelden dat de uitkomsten van experimenten wel van tevoren vast moesten liggen, en bepaald werden door tot dan toe verborgen gebleven variabelen, de zogenaamde *hidden variables*. In de jaren 30 bedachten en publiceerden Einstein, Podolsky en Rosen een gedachte-experiment^[3] waarmee zij de absurditeit van het kwantummechanische wereldbeeld aan het licht wilden brengen.

In de jaren 60 leidde de Britse wis- en natuurkundige Bell^[1] voor een later te bespreken experimentele opzet een ongelijkheid af, waaraan voldaan moest worden als de uitkomst van het experiment daadwerkelijk van te voren vastgelegd was door verborgen variabelen. In 1982 is een dergelijk experiment door de natuurkundige Alain Aspect^[2] op dusdanig zorgvuldige wijze uitgevoerd dat de hypothese van de verborgen variabelen nu als verworpen mag worden beschouwd (strikt genomen schijnt er nog een redding mogelijk te zijn, maar deze vereist tamelijk vergezochte aannames).

Gepolariseerd licht

Licht is een transversale golf, hetgeen betekent dat de trillingsrichting loodrecht op de voortbewegingsrichting staat. Als we de z -richting definiëren als de richting waarin het licht zich beweegt, dan ligt de trillingsrichting in het xy -vlak. Bij het licht afkomstig van de zon of van een gloeilamp, zijn er trillingen in alle richtingen. Als we dit licht door een polarisatiefilter sturen, dan zal één trillingsrichting worden geselecteerd. Het uitkomende licht is dan gepolariseerd. De intensiteit van het doorgelaten licht is de helft van dat van het invallende licht, de andere helft wordt door het filter geabsorbeerd. Als een tweede filter achter het eerste filter wordt geplaatst, dan zal dit alle licht dat het eerste filter heeft weten te passeren doorlaten, mits het tweede filter dezelfde oriëntatie heeft als het eerste filter. Als het tweede filter echter loodrecht op het eerste filter staat, dan zal het alle licht dat het eerste filter heeft weten te passeren, blokkeren. Algemeen geldt dat als het tweede filter een hoek φ met het eerste filter maakt, dat dan de intensiteit van het licht bij doorgang door het tweede filter met een factor $\cos^2\varphi$ wordt gereduceerd.

Licht bestaat uit een stroom van lichtdeeltjes, de zogenaamde fotonen. Ook individuele fotonen hebben een polarisatie-richting. Als twee polarisatiefilters achter elkaar worden geplaatst onder een onderlinge hoek van φ , dan blijkt de kans dat het foton door het tweede filter wordt doorgelaten op voorwaarde dat het door het eerste filter is doorgelaten gelijk te zijn aan $\cos^2\varphi$.

Verstrengelde fotonen

Verstrengelde fotonen zijn twee fotonen die zich in precies dezelfde kwantumtoestand bevinden. Het is mogelijk onder experimentele condities dergelijke paren te produceren en in tegenovergestelde richting (zeg naar links en naar rechts) weg te schieten. Als we zowel aan de linkerkant als aan de rechterkant een polarisatiefilter opstellen, zodat beide fotonen op hun pad een filter tegenkomen, dan zullen de fotonen, indien de filters parallel zijn georiënteerd, ofwel beide worden tegengehouden, ofwel beide worden doorgelaten. Als de filters echter loodrecht op elkaar staan, zal steeds één der fotonen worden doorgelaten, terwijl de andere wordt tegengehouden. In het algemene geval dat de filters een onderlinge hoek van φ met elkaar maken is er een kans van $\cos^2\varphi$ dat beide fotonen hetzelfde lot ondergaan, en een kans van $\sin^2\varphi$ dat ze een tegenovergesteld lot ondergaan.

Einstein-Podolsky-Rosenparadox

In theorie is het mogelijk twee verstrengelde deeltjes ruimtelijk gezien willekeurig ver van elkaar te scheiden zonder de verstrengeling ongedaan te maken. Stel dat de verstrengelde fotonen zich op lichtjaren afstand van elkaar bevinden (ten opzichte van het laboratorium waarin ze zijn geproduceerd). Veronderstel nu dat een geleerde de polarisatie-richting van het linker foton meet door het door een polarisatiefilter te sturen. Op hetzelfde moment (wederom ten opzichte van het laboratorium) meet zijn collega de polarisatie-richting van het rechter foton door het door een filter met dezelfde oriëntatie te sturen. Volgens de kwantummechanica zullen beide metingen hetzelfde resultaat laten zien. Aangezien de fotonen zich zover uit elkaar bevinden dat ze geen tijd hebben om aan elkaar door te geven aan welke proeve zij zijn blootgesteld, is het lastig om zich voor te stellen hoe de fotonen tot hetzelfde gedrag komen (dat wil zeggen, doorgelaten of tegengehouden worden) als het hier inderdaad, zoals de kwantummechanica beweert, gaat om een puur kansproces en hun toekomstige gedrag niet reeds bij hun gezamenlijk ontstaan was ingeprent. Dit gedachte-experiment is door Einstein, Podolsky en Rosen^[3] bedacht om aan te tonen dat

de kwantummechanische visie niet correct kan zijn. Zij stelden hier de hypothese van de verborgen variabelen tegenover.

Volgens deze hypothese hebben de twee verstrengelde fotonen reeds op het moment van hun gezamenlijk ontstaan samen "afgesproken" hoe ze zullen reageren als ze een filter tegenkomen dat onder een hoek φ met de verticaal staat, voor iedere waarde van φ . Op het eerste gezicht lijkt dit een bevredigende verklaring te bieden voor het feit dat de fotonen schijnen te weten hoe hun partner op het filter reageert, zelfs als vanwege de afstand geen contact meer mogelijk is. Deze verklaring komt echter met een prijs, want er volgt een restrictie uit voor de mogelijke uitkomsten van experimenten.

Experimentele opzet

Met de letters A , B en C duiden we in het vervolg standen van een polarisatiefilter aan. A correspondeert met de verticale stand, B met een stand die een hoek van $22,5$ graden met de verticaal maakt, en C met een stand die een hoek van 45 graden met de verticaal maakt. We voeren een experiment uit waarbij we achtereenvolgens N verstrengelde paren fotonen produceren. We gaan in onze redeneringen uit van de waarheid van de hypothese van de verborgen variabelen. Deze hypothese zegt dat voor ieder paar reeds bij zijn ontstaan vastligt of het al dan niet tegengehouden wordt door een filter in de stand A , B of C . Op basis hiervan kunnen de paren worden ingedeeld in acht categorieën. In de eerste categorie zitten de paren die door geen van de drie filters worden tegengehouden. In de tweede categorie zitten alle paren die alleen door filter C worden tegengehouden; enzovoort, tot en met de achtste categorie waar de paren in zitten die door alle drie filters worden tegengehouden.

Het is belangrijk om te beseffen dat het voor een gegeven paar niet mogelijk is experimenteel vast te stellen tot welke categorie het behoort. Dit komt doordat de toestand van het foton verandert als het foton door een filter heen gaat. Wat we willen weten is of het foton door filter X heen gaat als het dit filter als eerste op zijn pad tegenkomt. Als we het foton echter eerst door filter Y sturen en dan pas door filter X dan zal het resultaat anders kunnen zijn. Uit experimenten blijkt ook dat dit het geval is; zo is de kans dat een foton dat een polarisatierichting van -45 graden heeft door filter C komt gelijk aan nul, maar als ditzelfde foton eerst door filter A gaat (kans 50% dat het erdoor komt) dan is daarna de kans dat het door C gaat 50% geworden. Er zijn dus fotonen die niet door filter C heen gaan als ze deze als eerste op hun pad tegenkomen, maar wel als ze eerst door filter A zijn gegaan. Hieruit volgt dat de verborgen variabelen van waarde (kunnen) veranderen als het foton door een filter heen gaat. Bij gewone (niet-verstrengelde) fotonen kunnen we daardoor experimenteel slechts de waarde van één van de drie verborgen variabelen a , b of c bepalen (waarbij variabele x beschrijft of het foton door filter X heen gaat). Voor fotonen die een tweelingbroer hebben in de vorm van een foton waarmee ze verstrengeld zijn kunnen we de waarden van twee van de drie genoemde verborgen variabelen bepalen.

Op het eerste gezicht lijkt het alsof de bovenstaande argumentatie nodeloos ingewikkeld is. Uit het feit dat een foton geabsorbeerd wordt (en dus verdwijnt) als het niet door een filter heen gaat volgt ook al dat het niet mogelijk is voor alle fotonen experimenteel te bepalen welke waarden de verborgen variabelen a , b en c hebben. Dit eenvoudige argument gaat echter niet op als we de fotonen vervangen door elektronen en polarisatie door spin, want elektronen blijven gewoon bestaan als hun spin wordt gemeten, ongeacht de uitkomst van de meting. Het ingewikkelder argument uit de vorige paragraaf is echter wel van toepassing op elektronen, zodat de conclusie dat van de drie beschouwde verborgen variabelen er experimenteel slechts twee bepaald kunnen worden ook in het algemene geval overeind blijft.

Ongelijkheid van Bell

Dit neemt echter niet weg dat het volgens de hypothese van de verborgen variabelen wel degelijk vastligt wat een gegeven foton zou doen als het een filter met stand A , B of C zou tegenkomen, zodat het wel degelijk zinvol is te praten over een categorisering in de acht bovengenoemde groepen, ook al kunnen we deze groepen niet bepalen. We duiden nu met $|ABC|$ het aantal paren aan dat door alle drie de filters heen zou gaan, met $|A\sim B|$ het aantal paren dat wel door filters A en B heen zou gaan maar niet door C , enzovoort. Aangezien we voor ieder paar slechts de reactie op twee filters experimenteel kunnen bepalen is het handig ook grootheden als $|A\sim B|$ te definiëren. Dit is het aantal paren dat wel door A en niet door B heen gaat ongeacht wat het zou doen als het filter C zou tegenkomen. Er geldt

$$|\overline{AB}| = |\overline{ABC}| + |\overline{ABC}|.$$

De ongelijkheid van Bell is geformuleerd in termen van deze grootheden. Zij luidt

$$|\overline{AB}| + |\overline{BC}| \geq |\overline{AC}|.$$

De beste (eenvoudigste, elegantste) manier om dit te bewijzen is door middel van een Venn-diagram. Teken drie elkaar overlappende cirkels, elk corresponderend met een grens tussen X en $\sim X$ (voor $X = A, B$ en C). Het platte vlak is aldus opgedeeld in acht deelgebieden, elk corresponderend met één van de bovenvermelde categorieën. Men zou in principe de fotonenparen in deze figuur kunnen intekenen. Arceer nu het gebied dat correspondeert met de linkerzijde van de vergelijking van Bell, en dubbelarceer het gebied dat correspondeert met de rechterzijde. De ongelijkheid volgt nu uit het feit dat het dubbelgearceerde gebied een deelverzameling is van het enkelgearceerde gebied.

We gaan nu proberen de componenten van de ongelijkheid van Bell experimenteel vast te stellen. Daartoe verdelen we de groep verstrengelde fotonen in drie subgroepen. Voor de eerste subgroep zetten we het linker filter in stand A en het rechter in stand B (of vice versa, dat maakt niet uit), voor de tweede subgroep zetten we het linker in stand A en het rechter in stand C , voor de derde subgroep zetten we het linker in stand B en het rechter in stand C . Vervolgens tellen we voor iedere subgroep hoeveel fotonen door beide filters gaan, hoeveel wel door het linker gaan maar niet door het rechter, enzovoort.

Op het eerste gezicht lijkt het alsof het aantal $|AB|$ wordt verkregen door voor de eerste subgroep te tellen hoeveel fotonen door beide filters gaan. Dit is echter niet het geval, want van fotonen uit de tweede subgroep die door filter A heen gaan zal er wellicht een aantal zijn dat ook door filter B heen zou zijn gegaan (al zullen we dat nooit te weten komen), en deze moeten worden meegenomen bij de bepaling van $|AB|$. Onze experimentele opstelling stelt ons dus niet in staat om de componenten van de ongelijkheid van Bell te bepalen. Het blijkt überhaupt onmogelijk te zijn om dit te doen, en daarom gaan we de ongelijkheid van Bell herformuleren in een wat zwakkere (probabilistische) vorm door beide zijden van de vergelijking te delen door het totale aantal verstrengelde paren. De ongelijkheid wordt dan

$$P(\overline{AB}) + P(\overline{BC}) \geq P(\overline{AC})$$

De stilzwijgende aanname is dat bij de productie van de verstrengelde fotonen de verborgen variabelen worden gekozen uit een kansverdeling die voor ieder paar dezelfde is. Er zijn kleine (toevallige) variaties in de omstandigheden waaronder de fotonen worden geproduceerd, en deze zullen ertoe leiden dat ieder paar andere waarden meekrijgt voor zijn verborgen variabelen. De productie van de paren kan het best worden vergeleken met het opgooien van een munt, waarvan de uitkomst (kop of munt) dan analoog is aan de waarden die de verborgen variabelen meekrijgen bij de productie van de fotonen. Kleine onwillekeurige variaties in de wijze waarop de munt wordt opgegooid hebben een grote impact op de uitkomst, maar als de munt vaak wordt opgegooid kan het resultaat beschreven worden in termen van een kansverdeling.

De kans $P(A\sim B)$ wordt nu geschat door voor de eerste subgroep (waarvoor het linker filter op stand A stond en het rechter filter op stand B) te tellen voor hoeveel paren het linker foton door wordt gelaten terwijl het rechter wordt tegengehouden, en dit aantal te delen door het aantal fotonen in deze subgroep. De andere twee kansen worden op analoge wijze geschat.

Voorspelling door de kwantummechanica

Laten we gaan kijken wat de kwantummechanica zegt over de grootte van deze kansen. Beschouw twee assen x en y die beide loodrecht op de voortbewegingsrichting van het foton staan, en die loodrecht op elkaar staan. De toestand van een foton dat gepolariseerd is langs de x -richting duiden we aan met $|x\rangle$, de toestand van een foton dat gepolariseerd is langs de y -richting duiden we aan met $|y\rangle$. Iedere polarisatietoestand kan dan worden geschreven als een lineaire combinatie van beide (ook superpositie genoemd), namelijk

$$|s\rangle = |x\rangle \cos \varphi + |y\rangle \sin \varphi$$

Dit correspondeert met een polarisatierichting die een hoek φ met de x -as maakt. Als nu een foton dat zich in toestand $|s\rangle$ bevindt wordt afgestuurd op een filter dat in de x -richting georiënteerd is, dan zal het worden doorgelaten met kans $\cos^2\varphi$, en het zal worden geabsorbeerd met kans $\sin^2\varphi$. Als de polarisatierichting van het foton een hoek van 45 graden met het filter maakt dan is er dus 50% kans dat het foton wordt doorgelaten. Als het foton door het filter is doorgelaten, dan is daarna zijn polarisatierichting altijd parallel aan het filter, ongeacht zijn oorspronkelijke polarisatietoestand. Het filter verandert dus de polarisatie van het foton.

Stel dat we twee filters achter elkaar zetten, en één foton achtereenvolgens door beide filters heen proberen te sturen. Als de twee filters een hoek φ met elkaar maken dan volgt uit het bovenstaande dat als het foton door het eerste filter heenkomt, dat het dan een kans van $\cos^2\varphi$ heeft om ook door het tweede filter heen te komen. Beschouw nu twee verstrengelde fotonen die elk op een filter worden afgestuurd. De filters maken een hoek φ met elkaar. Volgens de kwantummechanica zal ook in dit geval de (conditionele) kans dat het ene foton door zijn filter wordt doorgelaten onder de voorwaarde dat het andere wordt doorgelaten gelijk zijn aan $\cos^2\varphi$. Als de opzet waarmee de verstrengelde paren worden geproduceerd geen ingebakken voorkeursrichting heeft dan zal de onconditionele kans dat een foton wordt doorgelaten gelijk zijn aan 50%. We zullen aannemen dat hiervoor gezorgd is (deze aanname kan eenvoudig experimenteel getest worden).

We kunnen nu de kansen die voorkomen in de vergelijking van Bell gaan berekenen (onder de aanname dat de kwantummechanica correct is). We beginnen met $P(A\sim B)$. Dit is de onconditionele kans dat een foton door filter A wordt doorgelaten (50%), vermenigvuldigd met de conditionele kans dat het door filter B niet wordt doorgelaten als het door filter A wel is doorgelaten. De hoek tussen beide filters is 22.5 graden, dus de conditionele kans is $\sin^2(45/2) = 1/2 (1 - 1/\sqrt{2}) = 14.6\%$. Hieruit volgt

$$P(A\bar{B}) = 7.3\%$$

Aangezien filters B en C dezelfde hoek met elkaar maken als filters A en B geldt eveneens

$$P(B\bar{C}) = 7.3\%$$

We berekenen nu het rechterlid van de ongelijkheid, te weten $P(A\sim C)$. De filters A en C maken een hoek van 45 graden met elkaar, zodat de conditionele kans dat het ene foton door filter C wordt doorgelaten op voorwaarde dat het andere door filter A wordt doorgelaten gelijk is aan $\sin^2(45) = 50\%$. We zien dus dat volgens de kwantummechanica.

$$P(A\bar{C}) = 25\%.$$

Deze drie kansen voldoen niet aan de ongelijkheid van Bell. Uit experimenten is gebleken dat de kwantummechanica de kansen correct voorspelt. Hieruit volgt dat de aanname die leidde tot de ongelijkheid van Bell, namelijk het bestaan van verborgen variabelen die van tevoren vastleggen hoe de fotonen zullen reageren als ze een filter tegenkomen, onjuist is. Dit betekent echter dat het ons door Einstein, Podolsky en Rosen voorgelegde raadsel hoe de fotonen van elkaar weten of ze al dan niet door het filter zijn doorgelaten onopgelost blijft. We kunnen niet anders dan de woorden van Richard Feynman te onderschrijven: "I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics".

Referenties

- [1] Bell, John. *On the Einstein Podolsky Rosen Paradox*, *Physics* **1** 3, 195-200, Nov. 1964
- [2] Aspect, A, P. Grangier, G. Roger (1982). *Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities*. *PRL* **49** (2): 91-94. DOI: 10.1103/PhysRevLett.49.91 (<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.91>).
- [3] Einstein, A, B. Podolsky, N. Rosen (1935-05-15). *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*. *Physical Review* **47** (10): 777-780. DOI: 10.1103/PhysRev.47.777 (<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>).

Stern-Gerlach-experiment

Dit artikel is in bewerking voor de Schrijfwedstrijd.



Wil je een grotere wijziging in dit artikel doorvoeren, dan is het misschien beter deze eerst op de overlegpagina voor te stellen. Voor uitleg hierover zie hier.

Kwantummechanica

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Onzekerheidsrelatie

Algemene inleiding... ^[1]

Achtergrond

Klassieke
mechanica
Interferentie
Hamiltonformalisme

Fundamentele begrippen

Kwantumtoestand ·
Golffunctie ·
Postulaten
Superpositie ·
Onzekerheidsprincipe
Schrödingervergelijking
· Tunneleffect
Uitsluitingsprincipe
Diracnotatie

Gevorderde onderwerpen

Interpretatie
Klein-Gordonvergelijking
Dirac-vergelijking
Kwantumveldentheorie
Kwantumgravitatie

Experimenten

Schrödingers kat
Tweespletenexperiment
Tunneleffect
Stern-Gerlach-experiment

Wetenschappers

Planck · Einstein · Bohr
· Sommerfeld · Bose ·
Kramers · Heisenberg ·
Born · Jordan · Pauli ·
Dirac · de Broglie ·
Schrödinger · von
Neumann · Wigner ·
Feynman · Bohm ·
Everett · Bell

Het **Stern-Gerlach experiment** is een experiment in 1922 uitgevoerd door Otto Stern en Walther Gerlach. Een bundel deeltjes, zoals bijvoorbeeld atomen, wordt gebundeld met enkele spleetvormige openingen en beweegt dan door een ongelijkmatig magneetveld. Het ongelijkmatig magneetveld ontstaan bijvoorbeeld door een magneet met een vlakke pool en een spitse pool. De uitkomst is, dat de bundel deeltjes door dit experiment opgesplitst wordt in een geheel aantal bundels. Als er maar 1 bundel is, dan spreken we van spin (natuurkunde) 0, bij 3 bundels van spin 1, bij 5 bundels van spin 2 enzoverder. Dit zijn de bosonen met heeltallige spin. Bij twee bundels spreken we van spin 1/2, bij 4 bundels van spin 3/2 enzovoort. Dit zijn de fermionen met halftallige spin.

Externe links

- (en) Interactieve illustratie van het *Stern-Gerlach experiment* ^[1] (flash)

Referenties

[1] http://phet.colorado.edu/sims/stern-gerlach/stern-gerlach_en.html

Stralingswet van Wien

De **stralingswet van Wien** werd in 1896 opgesteld door de Duitse natuurkundige Wilhelm Wien. Het was een poging om een uitdrukking te vinden voor de tot dan toe onbekende universele spectrale verdelingsfunctie van de zwarte straling. Eerder had Wien al zijn verschuivingswet opgesteld die door het experiment voldoende werd bevestigd. De stralingswet van Wien luidt

$$u_\lambda = \frac{C}{\lambda^5} \cdot e^{-c/\lambda T}$$

met

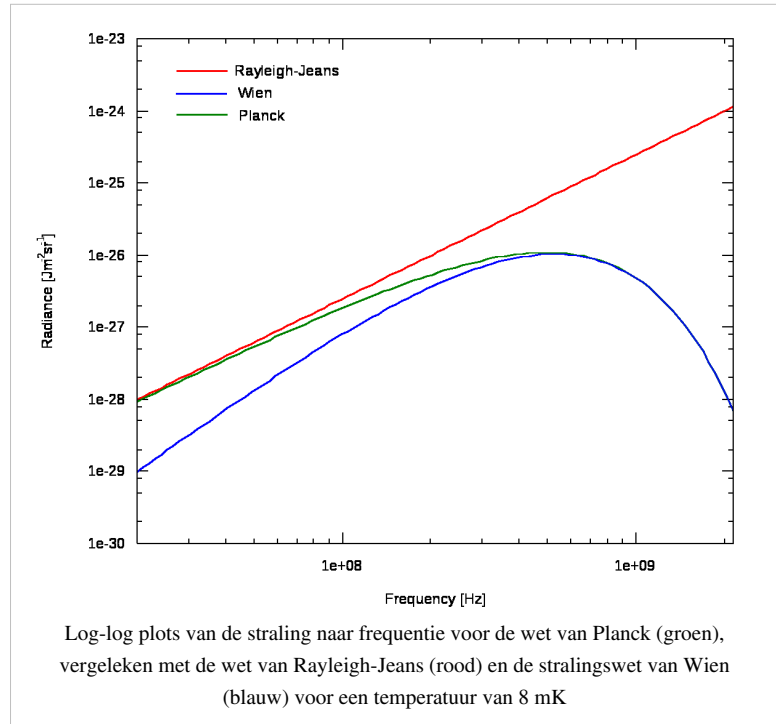
u_λ de stralingsdichtheid

C en c twee constanten (met c wordt hier *niet* de lichtsnelheid bedoeld)

λ golflengte in meter

e het grondgetal van de natuurlijke logaritme

T temperatuur in Kelvin



Log-log plots van de straling naar frequentie voor de wet van Planck (groen), vergeleken met de wet van Rayleigh-Jeans (rood) en de stralingswet van Wien (blauw) voor een temperatuur van 8 mK

Historische ontwikkeling

Als resultaat van zijn verschuivingswet vond Wien een uitdrukking voor de stralingsintensiteit waarin nog een onbekende functie $\varphi(\lambda T)$ voorkwam. De stralingsintensiteit kon dan worden geschreven als

$$u_\lambda = \text{constante} \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \varphi(\lambda T)$$

Over hoe de functie $\varphi(\lambda T)$ er zou moeten uitzien kon men op basis van de wetten van de toenmalige thermodynamica niet achterhalen. Wien kende echter de inhoud van het in 1887 gepubliceerde werk van de Russische natuurkundige Wladimir Michelson die een stralingswet had opgesteld voor stralende vaste stoffen op grond van een statistische behandeling van een groot aantal om hun evenwichtspositie trillende atomen. Hiermede trachtte hij een verklaring te geven voor het verloop van de stralingskrommen die door de Amerikaanse natuurkundige Samuel Pierpont Langley waren gepubliceerd. Michelson ging ervan uit dat de perioden waarmee de atomen trillen terug te vinden zijn in de golven van de straling die deze atomen teweeg brengen. Alle atomen waarvan de ogenblikkelijke snelheid gelijk is aan v stralen met een periode $\tau = \frac{4\rho}{v}$ waarin ρ een constante is. De golflengte λ van de straling wordt op die manier omgekeerd evenredig met de ogenblikkelijke snelheid v van deze trillende atomen. Het aantal atomen dat een snelheid bezit tussen v en $v + dv$ wordt nu gegeven door de snelheidsverdelingswet van Maxwell-Boltzmann en is evenredig met

$$v^2 e^{-\frac{v^2}{\alpha^2}} dv$$

waarbij α^2 evenredig is met de absolute temperatuur T . De intensiteit van de straling in het golflengtegebiedje $d\lambda$ moet dus evenredig zijn met dit aantal en met een functie van zowel de kinetische energie van de atomen en als van de absolute temperatuur.

Op deze manier komt er in de uitdrukking van de stralingswet van Michelson een exponentiële factor voor van de vorm

$$e^{-\frac{c}{T\lambda^2}}.$$

Wien zag dat de zo verkregen intensiteit niet voldeed aan de verschuivingswet, maar de exponentiële factor bracht hem tot de volgende twee hypothesen. Ook bij een gas zal de golflengte van de uitgestraalde energie uitsluitend een functie zijn van v . Deze hypothese is niet gebaseerd op een bepaald model van de moleculen dat als basis zou kunnen dienen om het stralingsmechanisme te begrijpen. In algemene termen wordt ervan uitgegaan dat de bewegende elektrische ladingen aanwezig in de gasmoleculen de oorzaak zijn van de straling. De tweede hypothese zegt dat gas in thermisch evenwicht zal zijn met de straling in een holle ruimte met temperatuur T omgeven door spiegellende wanden. De verdeling van Maxwell-Boltzmann verlangt nu dat de stralingsintensiteit tussen λ en $\lambda+d\lambda$ evenredig is met het aantal moleculen waarvan de snelheid overeenkomt met dit golflengtegebiedje en een functie van de snelheid of wat op hetzelfde neerkomt een functie van λ

$$u_\lambda = F(\lambda)e^{-\frac{f(\lambda)}{T}}$$

Vervolgens neemt Wien twee eisen in aanmerking. De verschuivingswet eist dat

$$\frac{f(\lambda)}{T} = \frac{c}{\lambda T}$$

met c een constante, en de wet van Stefan-Boltzmann eist nu dat

$$F(\lambda) = \frac{C}{\lambda^5}$$

met C een constante. Daarmee wordt

$$u_\lambda = \frac{C}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c}{\lambda T}}$$

Confrontatie met het experiment

Al snel kwam er kritiek van enkele bekende natuurkundigen in Duitsland. In 1900 publiceerden Otto Lummer en Eugen Jahnke een artikel waarin ze zowel hun kritiek op de theoretische afleiding van Wien alsook het gebrek aan overeenkomst tussen de theorie en de tot dan toe beschikbare meetgegevens van de zwarte straling bekend maakten. Tot dezelfde conclusies kwamen Lummer en Ernst Pringsheim toen ze de resultaten van uitgebreidere metingen openbaar maakten. De wet van Wien komt goed overeen in het gebied van de korte golflengten van de zwarte straling alhoewel steeds een fractie te klein. Maar voor de grote golflengten in het infrarood ontstaan er afwijkingen die steeds groter worden voor de langste golflengten bij de staart van de stralingskromme. Men had het gevoel dat de correcte functie $\varphi(\lambda T)$ nog niet gevonden was.

De toestand rond de eeuwwisseling

Ongeveer op hetzelfde moment kwam Max Planck op grond van thermodynamische en elektromagnetische beschouwingen toegepast op gedempte resonatoren tot een vorm van de stralingswet die een sterke overeenkomst vertoonde met de stralingswet van Wien. Hij vond dat

$$u_\lambda = \frac{C}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{c}{\lambda\theta}}$$

hierin werd θ gedefinieerd als een 'elektromagnetische temperatuur', die niet zonder meer gelijk te stellen was aan de gebruikelijke thermodynamische temperatuur T . Planck bewees hiermee echter dat Wien op het goede spoor was.

In 1905 verscheen er een nieuwe stralingswet, dit keer opgesteld door de Engelse natuurkundigen Lord Rayleigh en James Jeans en deze keer op basis van zuivere elektromagnetische beschouwingen over het stralingsveld. Het gaf een uitdrukking voor de stralingsintensiteit van een zwarte straling in een holle ruimte die helemaal is omsloten door

volledig zwarte en elektrisch geleidende wanden. Zij vonden dat

$$u_{\lambda}d\lambda = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}d\lambda \left(= \frac{8\pi f^2}{c^3}kTdf \right)$$

waarin:

k de Boltzmannconstante en

c de lichtsnelheid

het product kT afkomstig is van het equipartitiebeginsel

Het probleem met deze stralingswet was dat bij zeer korte golflengten λ dus bij zeer hoge frequenties f de intensiteit oneindig groot wordt. Dit gedrag werd door Paul Ehrenfest de ultravioletcatastrofe genoemd.

Het was duidelijk, de natuurkunde bevond zich rond de eeuwwisseling in een diepe crisis. Men kon noch met behulp van de bekende wetten van de mechanica of de dynamica, noch met die van de thermodynamica of het elektromagnetisme het probleem van de zwarte straling ontrafelen. Nochtans had Max Planck in 1900 de kern van het probleem al opgelost door de invoering van de hypothese van het energiekwantum in zijn bekende stralingswet. Alleen de wereld en de ontdekker zelf wisten het nog niet.

Bronnen, noten en/of referenties

- *Ueber die Energievertheilung im Emissionsspectrum eines schwarzen Körpers*, Willy Wien, *Annalen der Physik*, vol. 294, nr. 8, 1896, pp. 662-669
- *Essai théorique sur la distribution de l'énergie dans les spectres des solides*, Wladimir Michelson, *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, vol.2, nr. 6, 1887, pages 467-479
- *Ueber die Spectralgleichung des schwarzen Körpers und des blanken Platins*, O. Lummer en E. Jahnke, *Annalen der Physik*, (1900), vol. 308, nr.10, pp. 283-297
- *Die Vertheilung der Energie im Spectrum des schwarzen Körpers*, O. Lummer en E. Pringsheim, *Verhandlungen der Deutsche Physikalische Gesellschaft*, 1, 1899, pp. 23-41
- *Ueber eine Verbesserung der Wien'schen Spectralgleichung*, Max Planck, *Verhandlungen der Deutsche Physikalische Gesellschaft*, vol. 2, nr.13, (1900), pp. 202-204
- *The Theory of Heat Radiation*, Max Planck, Translation by M. Masius, P. Blakiston's Son & Co., Philadelphia, 1914
- *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*, Thomas S. Kuhn, *The University of Chicago Press*, Reprint 1987, ISBN 0-226-45800-8

Subschil

Een **elektronensubschil** of **onderschil** is de benaming voor een aspect van de elektronenconfiguratie van een atoom zoals dat door het nevenkwantumgetal bepaald wordt.

De verdeling van de elektronen rond een atoom wordt bepaald door vier kwantumgetallen.

- het hoofdkwantumgetal n , een hoofdverdeling van de energieniveaus, de (hoofd)schillen genoemd.
- het nevenkwantumgetal l (kleine L), "der Drehimpuls", verdeelt de (hoofd)schillen in subschillen. De subschillen worden aangegeven door een letter uit de reeks s,p,d,f,g,h,i,j,k, ... toe te voegen aan het hoofdkwantumgetal n . Voor een hoofdkwantumgetal n kan l de waarden $0,1,2,\dots,n-1$ bezitten.
- het magnetische kwantumgetal m , verdeelt iedere subschil in $2 * l + 1$ banen, m loopt van $-l$ tot $+l$. (In deze formule is l , het nevenkwantumgetal 0 tot 7 , een kleine letter L).
- Ten slotte is er nog het spinkwantumgetal s van het elektron zelf, naast deze drie baan-kwantumgetallen. Dit getal is $s=1/2$ en heeft een magnetisch spinkwantumgetal met twee waarden: $-1/2$ en $+1/2$ (spin *up* en spin *down*)

➤ Voor verdere informatie: *Elektronenschil en Kwantumgetal*

Super-Kamiokande

Super-Kamiokande is een neutrino-detector in Japan. Hij was ontworpen voor de studie van de neutrino's afkomstig van de zon, de zogenaamde zonneneutrino's, en neutrino's die ontstaan in onze atmosfeer. Er werd ook onderzoek gedaan naar de neutrino's afkomstig van supernova-explosies in onze Melkweg. Ook het protonverval werd er onderzocht. Voor dit werk ontving professor Masatoshi Koshiba in 2002 de Nobelprijs voor Natuurkunde.

Super-Kamiokande bevindt zich 1000 m onder de grond in de Mozumi-mijn van de Kamioka Mining and Smelting Co. in Hida (voorheen Kamioka), Gifu, Japan. Hij is gevuld met 50.000 ton zeer zuiver water, omgeven door 11.000 fotomultiplicatoren. De cilindrische structuur is 40 m hoog en heeft een diameter van 40 m. Wanneer een neutrino reageert met een atoomkern of een elektron van het water kan een deeltje gegenereerd worden dat in water sneller beweegt dan de lichtsnelheid in water. Dit creëert een blauwe lichtkegel door het Tsjererkov-effect. Het specifieke patroon van deze lichtflits verschaft informatie over de richting van het inkomende neutrino. In geval van een atmosferisch neutrino kan men hieruit ook het type neutrino afleiden.



Maquette van de Super-Kamiokande

Fysische deeltjes

Atomaire deeltjes: Molecuul · Atoom · Ion

Subatomaire deeltjes: Nucleon · Atoomkern

Bosonen: Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson

Fermionen: Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Supergeleiding

Supergeleiding (vroeger ook wel *suprageleiding* genoemd) is het verschijnsel dat de elektrische weerstand van sommige materialen beneden een bepaalde (meestal zeer lage) temperatuur opeens helemaal verdwijnt. Het verschijnsel is ontdekt door Heike Kamerlingh Onnes in Leiden op 8 april 1911^{[1][2][3]} bij zijn baanbrekende werk op het gebied van de extreem lage temperaturen. In de jaren '80 en '90 van de twintigste eeuw vond men ook supergeleiding bij veel hogere temperaturen in keramische materialen.

Supergeleiding wil zeggen dat als er stroom op gang gebracht wordt in een gesloten kring die bestaat uit een supergeleidend materiaal, deze stroom ook zonder aangelegde elektrische spanning zal blijven rondlopen.

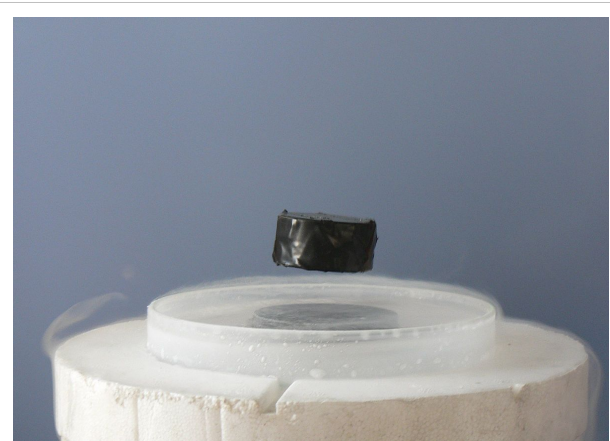
Doordat een kringstroom een magnetisch veld opwekt kan men op deze manier een permanent magnetisch veld opwekken. Supergeleidende magneten vinden daarom veel toepassing, maar een groot nadeel is dat supergeleiding in de meeste materialen slechts bij bijzonder lage temperaturen optreedt, enkele graden boven het absolute nulpunt. Supergeleidende magneten moeten dus met grote en kostbare installaties worden gekoeld, meestal met vloeibaar helium.

'Warme' supergeleiders

➤ *Zie hogetemperatuursupergeleiding voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Er zijn sinds een aantal jaren enkele cupraten (verbindingen met Cu_nO_m , zoals yttrium-borium-koperoxide, bismuth-strontium-calcium-koperoxide en kwik-barium-calcium-koperoxide) die bij temperaturen tot 135 kelvin ($-138,15$ graden Celsius) supergeleidend zijn,^[4] maar zij hebben weer andere nadelen; het zijn keramische materialen die zich moeilijk tot een draad laten vormen en zij verdragen vaak niet zulke hoge stromen (lees: magnetische velden).

De benaming "warme supergeleider" moet natuurlijk relatief worden gezien. Een temperatuur van $-138,15^\circ\text{C}$ is laag, maar het is zeer warm vergeleken bij de temperaturen waarop supergeleiding aanvankelijk optrad.



Als gevolg van het Meissner-effect kan een magneet zweven boven een supergeleider.

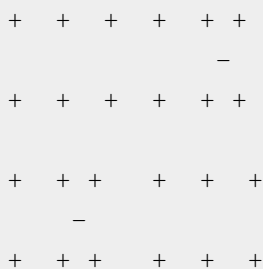
Theorieën voor supergeleiding

Sinds de ontdekking door Kamerlingh Onnes zijn er veel pogingen tot verklaring gedaan. In de jaren vijftig vonden theoretisch natuurkundigen een bevredigende verklaring van de "klassieke" supergeleiding met de beschrijvende ("fenomenologische") Ginzburg-Landau theorie (1950) van de Russische natuurkundigen Vitali Ginzburg en Lev Landau, en de microscopische BCS-theorie (1957) van de Amerikanen Bardeen, Cooper en Schrieffer. Dit trio kreeg in 1972 de Nobelprijs voor hun theorie. Voor supergeleiding bij hoge temperaturen is nog geen bevredigende theoretische verklaring gevonden.

Verklaring volgens BCS-theorie

Supergeleiders zijn geleiders die geen weerstand hebben voor elektronenstromen. Dit komt door de vorming van Cooperparen, een kwantumeffect dat intuïtief als volgt beschreven kan worden:

Beschouw twee vrije elektronen in een rooster met positieve ionen:



In zijn geheel gezien is het volledige rooster neutraal geladen. De twee elektronen hebben een negatieve lading en verzamelen daardoor positieve ionen rond zich. Dit heeft als gevolg dat op een redelijke afstand een elektron als lichtjes positief beschouwd wordt door het andere elektron. Andersom is dit ook waar. De elektronen worden dus lichtjes tot elkaar aangetrokken. Dit gebeurt alleen als de trillingen van de ionen niet te groot zijn. Als deze te groot zouden zijn, worden de positieve ladingen van de ionen over een groter gebied verspreid en worden de Cooperparen niet gevormd. Dit is de oorzaak waardoor supergeleiding voorlopig alleen maar kan optreden bij relatief lage temperaturen. De temperatuur waarbeneden supergeleiding optreedt, noemt men de kritische temperatuur; deze is sterk afhankelijk van de stroomdichtheid en het omliggende magnetische veld. Bij te grote magnetische velden verliezen veel materialen hun supergeleidende eigenschap.

Als elektronen zich in een Cooperpaar schikken is hun gezamenlijk energieniveau kleiner dan wanneer ze apart voorkomen. Dit wil zeggen dat, indien mogelijk, elektronen zich altijd in Cooperparen gaan schikken. Als de elektronen zich in paren schikken, wil dit zeggen dat ze ook zo gaan bewegen. Doordat de ionen weinig trillen is bovendien de kans op verstrooiing ("botsingen") zeer klein. Dit verklaart dat er geen elektrische weerstand is in supergeleidingstoestand.

Toepassingen

Supergeleidende materialen worden vooral toegepast waar het gunstig is om absoluut geen elektrische verliezen te hebben. Door de ontdekking van 'warme' supergeleiders kan dit nu in principe bij de temperatuur van vloeibaar stikstof, een relatief makkelijk te hanteren koelmiddel. De eigenschappen van de betreffende materialen zijn echter niet zo gunstig: het zijn keramische, nogal brosse materialen, die bovendien geen sterke magnetische velden kunnen verdragen zonder hun supergeleiding te verliezen.

In praktische toepassingen vinden we daarom nog voornamelijk supergeleidende metalen, die met vloeibaar helium gekoeld moeten worden. Het bekendste voorbeeld is wellicht de MRI-scanner die men in grote ziekenhuizen aantreft. Om de grote magnetische velden op te wekken zonder enorm warmteverlies en de daarmee gepaard gaande verhitting, gebruikt men supergeleidende spoelen als elektromagneet. Supergeleidende spoelen worden ook gebruikt

als stuurmagneet in deeltjesversnellers.

Supergeleidende spoelen worden ook gebruikt in tokamaks voor kernfusie: ze worden daar gebruikt om het krachtige magnetische veld op te wekken waarmee het plasma wordt opgesloten. Dat laatste moet wel in een magnetisch veld omdat het plasma een extreme temperatuur van 100 tot 150 miljoen kelvin heeft.

In de experimentele natuurkunde gebruikt men wel SQUIDs, kleine supergeleidende stroomkringen om minuscule elektromagnetische velden te detecteren, bijvoorbeeld velden ten gevolge van één deeltje. Het is ook mogelijk om met behulp van zogenaamde Josephson-juncties logische schakelingen te maken.

Voor toekomstige toepassingen kan men denken aan supergeleidende hoogspanningsleidingen om transportverliezen ten gevolge van elektrische weerstand te minimaliseren. Ook Maglev-treinen zouden van supergeleidende technologie gebruik kunnen gaan maken.

Referenties

- [1] Martijn van Calmthout (28 januari 2011). *Ontdekking supergeleiding was geen geluk bij een ongeluk* (<http://www.volkskrant.nl/vk/nl/2672/Wetenschap-Gezondheid/article/detail/1828881/2011/01/28/Ontdekking-supergeleiding-was-geen-geluk-bij-een-ongeluk.dhtml>). *De Volkskrant*. Geraadpleegd op 26 juli 2011.
- [2] D. van Delft, P. Kes (september 2010). *The discovery of superconductivity* (http://ilorentz.org/history/cold/DelftKes_HKO_PT.pdf). *Physics Today*: p. 38. Geraadpleegd op 26 juli 2011.
- [3] T. Können (29 april 2011). *Cryostaatkunst*. *De Ingenieur* **123** (7): p. 28—31.
- [4] B. Moes (29 april 2011). *Geen weerstand meer*. *De Ingenieur* **123** (7): p. 18—25.

Supersymmetrie

Supersymmetrie, dikwijls afgekort **SUSY** is een theorie in de theoretische natuurkunde, die op het moment geldt als een van de meest kansrijke uitbreidingen van het standaardmodel voor elementaire deeltjes.

In supersymmetrie heeft ieder elementair deeltje een zogenaamde superpartner. De partner van een boson is een fermion, en dat van een fermion is een boson.

De LSP (Lightest Supersymmetric Partner) is het lichtste van de supersymmetrische deeltjes die aan het systeem moeten worden toegevoegd. Deze LSP geldt als een belangrijke kandidaat voor de identiteit van de donkere materie: In tegenstelling tot de andere supersymmetrische deeltjes kan het niet spontaan vervallen (daarbij zouden weer nieuwe, nog lichtere, supersymmetrische deeltjes worden gevormd), en het heeft behalve door zijn massa mogelijk geen of bijna geen interactie met de ons bekende materie.

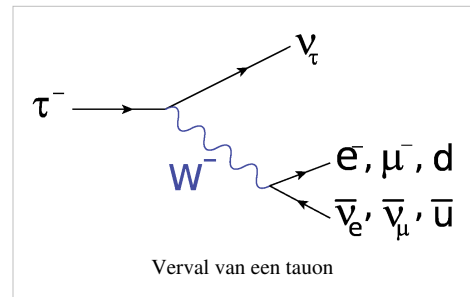
Indien men SUSY uitbreidt tot een lokale symmetrie (op dezelfde manier als het uitbreiden van een globale- naar een lokale ijktheorie), volgt daaruit op elegante manier de relativiteitstheorie. De theorie die hier het resultaat van is omvat zowel supersymmetrie als gravitatie en noemt men dus supergravitatie. Deze theorie komt ook voort uit snaartheorie, als de effectieve theorie bij lage energieën.

Tau (lepton)

Het **tau**-lepton is het derde generatie-equivalent van het elektron en het muon. Het is een subatomair deeltje of meer bepaald een elementair deeltje. Het hoort in het standaardmodel. Het heeft lading -1. Het heeft spin 1/2 en is dus een fermion.

Het behoort tot de familie van de leptonen, zijn massa is gelijk aan $1777,1 \text{ MeV}/c^2$ (ongeveer 3477 keer zoveel als het elektron). Zijn wetenschappelijke notatie is τ^- en van zijn antideeltje τ^+ . Het is een instabiel deeltje, met een gemiddelde levensduur van $2,9 \times 10^{-13}$ seconde leeft het dus maar kort in deeltjesversnellers.

Het werd in 1976 ontdekt door Martin Lewis Perl en zijn medewerkers bij het Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) en leverde hem in 1995 de Nobelprijs voor de Natuurkunde op. Het was het eerste deeltje van de derde generatie quark-leptonfamilie dat werd ontdekt.



Fysische deeltjes	
Atomair deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomair deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Theorema van Koopmans

Het **theorema van Koopmans** is in de kwantumchemie bekende stelling. De Nederlander Tjalling Koopmans definieerde het in de jaren dertig van de twintigste eeuw.

In dit theorema wordt gesteld dat de verwachtingswaarde van de Hamiltoniaan $\langle H \rangle$ van een geïoniseerd veeldeeltjessysteem gelijk is aan de energie E_v van het ongeïoniseerde systeem minus de ionisatie-energie ϵ_k :

$$\langle H \rangle = E_v - \epsilon_k$$

Dit theorema is van belang voor de computationele chemie, zoals bij de Hartree-Fock-methode.

Theoretische chemie

De **theoretische chemie** is het deelgebied van de chemie of scheikunde dat zich bezig houdt met het verklaren en voorspellen van chemische verschijnselen, aan de hand van (tegenwoordig grotendeels kwantummechanische) berekeningen. Er is (daarom) een grote overlap met de kwantumchemie.

De complexiteit van kwantummechanische berekeningen, uitgevoerd aan de atoomkernen en elektronen, neemt snel toe met de grootte van het probleem. Als het systeem twee keer zoveel elektronen heeft, is de berekening ruwweg 16 keer zo groot (wiskundig gezegd: de berekening heeft orde N^4). Met de berekeningen kunnen de volgende zaken bepaald worden:

- Vibratie-spectra zoals gemeten in de Infraroodspectroscopie en Ramanspectroscopie
- Reactiepaden voor chemische reacties
- Reactiesnelheden voor chemische reacties

De berekening

De kwantummechanische berekening bestaat uit het oplossen van de Schrödinger-vergelijking: in zijn simpele vorm $H\Psi = E\Psi$. Dit komt neer op het bepalen van de eigenwaarden en eigenvectoren van de energie-operator (H) van het systeem. De eigenwaarden zijn de mogelijke energieniveaus van het systeem, en de eigenvectoren geven aan welke golf functie voor de deeltjes in het systeem gelden.

De exacte oplossing van de Schrödingervergelijking is alleen te bepalen als het systeem slechts één elektron heeft, bijvoorbeeld voor een waterstofatoom. Zelfs bij twee elektronen (bijvoorbeeld een negatief geladen waterstof ion of een waterstof molecuul) zijn de wisselwerkingen tussen deze twee al zo ingewikkeld dat het alleen mogelijk is om de integralen numeriek op te lossen.

In de praktijk bestaat de berekening daardoor uit het uitrekenen van heel veel (miljoenen) conditionele integralen over golf functies.

Deze bepaling van de oplossing van de Schrödinger vergelijking wordt ook wel een *ab-initio* methode genoemd.

Benadering met orbitalen

In plaats van de benadering te laten beginnen met totaal willekeurige functies wordt uitgegaan van zogenaamde orbitalen: gestandaardiseerde (maar ingewikkelde) golf functies voor de elektronen die normaal gesproken zijn gecentreerd op de atoomkernen. Voor elk elektron in het atoom moet ten minste één orbitaalfunctie worden gebruikt. In de praktijk echter worden de resultaten pas betrouwbaar als er veel meer functies worden meegenomen. Toch zijn de orbitalen een relatief efficiënte manier om functies te gebruiken, van willekeurige functies moeten er veel meer worden gebruikt om dezelfde nauwkeurigheid te krijgen; dit resulteert door de N^4 karakteristiek in verschrikkelijk veel langere rekentijden en veel meer benodigde geheugenruimte.

Er zijn standaard sets van orbitalen beschikbaar die vaak bij naam worden genoemd als men een berekening beschrijft. Van deze standaard sets is vrij goed bekend voor welke eigenschappen ze goede benaderingen geven in de berekeningen.

Born-Oppenheimer benadering

In theorie moeten zowel de elektronen als de atoomkernen worden beschreven met golf functies. In de praktijk echter zijn elektronen veel lichter en sneller dan atoomkernen. De berekeningen worden dan ook vaak uitgevoerd op golf functies uitsluitend voor de elektronen in een systeem. Er kunnen dan verschillende berekeningen worden uitgevoerd als functie van de positie van de atoomkernen. Deze benadering wordt de Born-Oppenheimer benadering genoemd, naar de twee wetenschappers die hem voor het eerst beschreven.

De met behulp van de Born-Oppenheimer benadering berekende energieniveaus kunnen dan als potentiaal worden meegenomen in de berekening van de Schrödinger vergelijking voor de atoomkernen. Hiermee kunnen reactiesnelheden worden voorspeld.

Eén en ander wordt uitgewerkt in de Computatieve chemie.

Semi-empirische methoden

De zogenaamde semi-empirische methoden vormen een extrapolatie van de boven beschreven techniek. Hierin wordt gebruikgemaakt van een *krachtveld* zoals in de moleculaire mechanica, maar het krachtveld bestaat uit constanten die uit theoretisch-chemische berekeningen komen. Een en ander wordt toegepast in de Computatieve chemie.

Toepassingsmogelijkheden voor Bose-Einsteincondensaten

De **toepassingsmogelijkheden voor Bose-Einsteincondensaten** doen zich voor in vele gebieden, zoals:

- De mogelijkheid om een Bose-Einsteincondensaat van cesium te realiseren kan een grote bijdrage leveren tot het verhogen van de precisie van cesiumatoomklokken.
- Cesium is vanwege zijn grote massa ook zeer geschikt om ultraprecieze metingen van onder andere het zwaartekrachtsveld te doen.
- De ontwikkeling van atoomlasers en fasecoherente versterkers van materiegolven op basis van Bose-Einsteincondensaten kan leiden tot materiegolf-interferometrie, die de prestaties van de bestaande optische interferometers zal overtreffen. Deze worden gebruikt bij zwaartekrachtmetingen.
- De atoomlaser zou allerlei toepassingen mogelijk maken, waaronder het creëren van structuren op nanometerschaal. (Zie nanotechnologie).
- Bose-Einsteincondensaten zouden als studiemodellen voor astrofysische fenomenen zoals neutronensterren en zwarte gaten kunnen gebruikt worden.
- De mogelijkheid van Bose-Einsteincondensaten om licht (fotonen) te vertragen tot volledige stilstand, opent perspectieven voor mogelijk toepassingen in kwantumcomputers.
- Bose-Einsteincondensaten zouden kunnen gebruikt worden bij de creatie van superstrings in laboratoria

Enkele van deze toepassingsmogelijkheden worden hieronder nader beschreven.

Versterking van materiegolven

Een van de basisconcepten van de kwantumfysica is de dualiteit van golven en materie deeltjes. Golfffenomenen kunnen als deeltjes beschreven worden (bijvoorbeeld fotonen, fononen, en dergelijke) en materiedeeltjes kunnen als golven met een de Broglie-golflengte λ_{DB} beschreven worden. Dit heeft tot gevolg dat kan verwacht worden dat met materie (golven) dezelfde zaken kunnen gedaan worden als met elektromagnetische golven. Het versterken van golven is een van die zaken die overal rondom ons in het dagelijkse leven gebeurt, denk bijvoorbeeld aan de versterker in de radio. Dit is ook mogelijk met materiegolven (Ref. [22] en [23]). Versterking van materiegolven bestaat er uit dat de kwantumtoestand van de atomen uit het actieve medium wordt veranderd, zodat deze hetzelfde is als deze van de deeltjes die de inkomende materiegolf vormen. Het actieve medium voor een materiegolfversterker moet dus ook een reservoir zijn.

In een Bose-Einsteincondensaat is de De Broglie-golflengte van de deeltjes groot (orde μ m) en er is een zeer kleine spreiding in de snelheidsdistributie van de deeltjes. Daarom is dit een geschikte kandidaat om materiegolfversterking mee aan te tonen. De versterking die Inouye et al. (Ref. [22]) wist te bekomen, varieerden tussen 10 en 100. Indien een versterker een output signaal kan creëren dat niet enkel versterkt is, maar waarbij ook de vorm van het output signaal identiek is aan deze van het input signaal, dan wordt deze fase-coherent genoemd. De versterking in het geval van fasecoherente versterking werd door Inouye et al. op 4 geschat, veel minder dus dan bij gewone versterking het geval is. Deze, veel moeilijkere, fase-coherente versterking is bijvoorbeeld van belang voor atoomgolfinterferometrie, de tegenhanger van optische interferometrie. De materiegolf-interferometer zou gyroscopen, die gebruikt worden om de zwaartekracht nauwkeurig te meten, nog kunnen verbeteren (Ref. [23]).

Atoomlaser

Bij coherente versterking van licht wordt ook meteen gedacht aan de laser. Evenals een Bose-Einsteincondensaat is een laser een systeem dat bestaat uit deeltjes die zich in dezelfde kwantummechanische toestand bevinden. Het idee van een atomair analogon voor de laser liet dan ook niet lang op zich wachten. Reeds in 1997 bouwden fysici aan het MIT (Ref. [24]) een eerste atoomlaser. Twee jaar later zijn er al vier groepen (MIT, München, Yale en NIST) die een atoomlaser ontwikkeld hebben. Hoewel de technologie van atoomlasers nog in zijn kinderschoenen staat gaat deze met rasse schreden vooruit. In zijn meest eenvoudige vorm bestaat een atoomlaser uit een Bose-Einsteincondensaat en een 'output coupler', waarmee gecontroleerd een fractie van het condensaat uit de val kan geplukt worden. De atoomlaserbundel wordt dan gevormd door deze weggeplukte deeltjes die onder invloed van de zwaartekracht naar beneden vallen. Het belangrijkste verschil tussen deze atoombundels en degene die voorheen beschikbaar waren is het feit dat bij een atoomlaser alle deeltjes zich in één en dezelfde kwantumtoestand bevinden, waar er voorheen een spreiding over een zeer ruim interval aan kwantumtoestanden was.

In tegenstelling tot licht kan een atoomlaser niet ver door lucht bewegen. Dat komt onder andere, omdat men hier te maken heeft met ultrakoude atomen en botsing met deeltjes op kamertemperatuur verstoort hun toestand. Verder is de intensiteit van de bundel ook zeer klein in vergelijking met wat mogelijk is voor een optische laser. Coherente materiegolfversterking zou deze intensiteit kunnen verbeteren.

Een ander beperkend aspect van een atoomlaser is de eindigheid van het condensaat. Hoewel tegenwoordig gemakkelijk condensaten met 10^7 deeltjes kunnen gecreëerd worden, is dit verre van een continue bron. In 2002 werd het mogelijk om een continue bron van Bose-gecondenseerde atomen te creëren (Ref. [26]) dankzij de ontwikkeling van een **optisch pincet** (optical tweezers). Met zo'n optisch pincet was het mogelijk een condensaat over grote afstanden (Ref. [25]) te verplaatsen. Dit gebeurde door het in de 'wetenschapskamer' opgeslagen condensaat steeds opnieuw aan te vullen met een vers gecreëerd condensaat uit de 'valkamer'. Het condensaat in de wetenschapskamer had een korte halflevensduur van 22 seconden, maar omdat de aanvulcyclus kon gereduceerd worden tot 18 seconden kon men een condensaat onderhouden dat te allen tijde minstens 10^6 deeltjes bevatte. Een nadeel van het gewoon samenvoegen van het oude condensaat en het nieuwe aanvulcondensaat is dat de fase van het condensaat willekeurig verandert telkens het condensaat wordt aangevuld. Fasecoherente versterking zou ook hier

een oplossing kunnen bieden. Gebruik makend van een dergelijke continue bron van Bose-Einsteingecondenseerde atomen zou een werkelijk continue atoomlaser kunnen gebouwd worden.

De toepassingsmogelijkheden voor de atoomlaser zijn veelvuldig en variëren van het creëren van ingewikkelde nanostructuren op oppervlakken tot het verbeteren van atoominterferometrie en het verhogen van de precisie van atoomklokken.

Astrofysica in een klein glazen doosje

Hoewel de omstandigheden in sterren zeer sterk verschillen van die in een Bose-Einsteincondensaat, treden er verschijnselen op die een zekere overeenkomst vertonen met die in een Bose-Einsteincondensaat. Daarom kunnen onderzoeken aan Bose-Einsteincondensaten bijdragen aan het beter verstaan van processen die zich voordoen in sterren.

Neutronensterren

Neem bijvoorbeeld neutronensterren. Aan de buitenkant hebben we een metalen mantel en daarbinnen een neutronenzie. Deze neutronenzie wordt verondersteld supervloeibaar te zijn net zoals een Bose-Einsteincondensaat. Omdat neutronensterren zeer snel om hun eigen as draaien zou dit er voor moeten zorgen dat er vortices in de supervloeibare zee van neutronen ontstaan. Doordat men tegenwoordig de mogelijkheid heeft vortices in Bose-Einsteincondensaten te creëren (zie voorgaande paragraaf) heeft men op deze wijze een manier gevonden om te zien wat er binnenin een neutronenster aan de gang is (Ref. [27]).

Bosenova

Een andere fascinerende connectie is gevonden toen Wieman en zijn collega's een Bose-Einsteincondensaat lieten inklappen onder aantrekkende interacties. Eerst kromp het condensaat, zoals verwacht, maar daarna explodeerde het, totaal onverwacht. Een grote fractie van de deeltjes vloog weg in bolvormige schillen en in nauwe jets. Wat overbleef was een kleine koude kern op de plaats van het originele condensaat. Omdat dit gedrag zo een gelijkenis vertoont met een supernova werd het **bosenova** gedoopt (Ref. [28]). Hoewel de energie die bij deze bosenova's vrijkomt is voldoende om de temperatuur van het condensaat met ongeveer 200nK te verhogen (hou er rekening mee dat een Bose-Einsteincondensaat een temperatuur heeft van de orde van enkele nK of minder), is dit nog steeds 10^{75} keer zo weinig als bij een echte supernova.

Een van de eigenaardigheden van een bosenova is dat de hoeveelheid deeltjes die men ziet wegvliegen altijd hetzelfde is. Er is echter ook een fractie deeltjes waarvan men niet weet waar deze heen is. Mogelijk hebben ze zoveel energie dat ze te snel zijn en bevinden ze zich reeds buiten het bereik van de detectieapparatuur op het moment van opname. Het zou ook zo kunnen zijn, dat de atomen zich tot moleculen hebben gekoppeld en hierdoor niet meer gedetecteerd worden.

Zwarte gaten en meer

Het lijstje eindigt hier zeker niet. Het zou namelijk ook mogelijk zijn zwarte gaten te simuleren met vortices en Braggexplosies te beschrijven aan de hand van vergelijkingen die gewoonlijk worden gebruikt in het statistisch onderzoek naar de verspreiding van melkwegstelsels. Er wordt ook onderzocht wat de invloed van Bose-Einsteincondensatie van anti-kaonen op zeer dichte kernen van compacte sterren (Ref. [30]) is, enzovoort.

Interacties met licht

Het uiterlijk van een Bose-Einsteincondensaat

Bose-Einsteincondensaten zijn groot genoeg om met een gewone microscoop zichtbaar te zijn. Een interessante vraag die dan kan gesteld worden is: Hoe ziet zo een Bose-Einsteincondensaat eruit?

In het begin van de jaren '90, voor het succes van Cornell, Wieman, Ketterle en Hulet, waren de meningen hierover verdeeld. Sommigen meenden dat een condensaat gitzwart zou zijn, omdat het al het licht zou absorberen, anderen waren van mening dat het transparant zou zijn, en nog anderen voorspelden dat het licht zou reflecteren zodat het zou glanzen als een spiegel.

Intussen is het antwoord op deze vraag bekend, het is een beetje van alles. Alles hangt af van de omstandigheden waarbij men werkt. De standaard technieken voor de observatie van een Bose-Einsteincondensaat zijn gebaseerd op de absorptie of verstrooiing van laserlicht. Wanneer het laserlicht ver van de resonantie gekozen is zal de absorptie zeer klein zijn en zal het Bose-Einsteincondensaat het licht afbuigen, hier hebben we dus te maken met een transparant condensaat. Omgekeerd, als het licht op de resonantie gekozen wordt en er met een voldoende dicht condensaat gewerkt wordt zal het pikzwart zijn.

Verder is er ontdekt dat, indien gebruik wordt gemaakt van een hoge laser intensiteit, het licht niet zomaar willekeurig kan verstrooid worden. Bij een uitgerekt condensaat wordt het opnieuw uitgestuurd langs de as van het condensaat, wat resulteert in het reflecteren van licht (Ref. [12]).

Vertragen van licht

In de situatie dat het condensaat transparant is, heeft het zoals alle transparante media een bepaalde brekingsindex. Deze brekingsindex kan voor een Bose-Einsteincondensaat willekeurig groot gemaakt worden, waardoor je licht enorm kan vertragen. Dit is wat Dr. Lene Hau en haar medewerkers dan ook hebben gedaan. Tegen februari 2000 waren ze er reeds in geslaagd licht af te remmen tot een snelheid van minder dan 1,6 km/h.

Nog geen jaar later, in januari 2001, brachten ze licht zelfs volledig tot stilstand. De methode die ze hiervoor gebruikten kan als volgt beschreven worden: Een Bose-Einsteincondensaat dat normaal ondoorzichtig is voor een bepaalde frequentie licht werd transparant gemaakt voor deze frequentie door het met een andere laser (coupling beam) te bestralen. Deze coupling beam werd afgezet op het moment dat een lichtpuls, van de frequentie waarvoor het condensaat normaal ondoorzichtig is, zich in het condensaat bevond. Hierdoor werd deze puls op zijn plaats vastgepind. Wanneer de coupling beam een tijdje later terug werd aangezet kwam de puls terug tevoorschijn uit het condensaat alsof er niets gebeurd was.

Dit laatste is wat het geheel zo interessant maakt voor kwantumcomputers en kwantuminformatie, het levert een methode om kwantuminformatie op te slaan.

Zelf superstrings maken

In juni 2005 stelden vier natuurkundigen, van de universiteit van Utrecht, een methode voor waarmee in laboratoria een niet-relativistische superstring zou kunnen worden gecreëerd (Ref.[32]). Een van de eigenschappen van snarentheorie is supersymmetrie. Deze symmetrie verbindt bosonen met fermionen. Het voorstel van de vier bestaat eruit een ultrakoud gas van fermionen te vangen in de kern van een gekwantiseerde vortex in een Bose-Einsteincondensaat. Het bosonisch deel van de snaar zou dan gevormd worden door de vortexlijn (lijn die door het centrum van de draaikolk gaat) van een Bose-Einsteincondensaat (bijvoorbeeld van Rubidium-87 atomen), dat in een ééndimensionaal optisch rooster is gecreëerd (zie lager dimensionale condensaten). Nadat nu het gas van ultrakoude fermionen (bijvoorbeeld Kalium-40 atomen) in de kern van de vortex is gevangen zou het mogelijk moeten zijn om de supersymmetrie te observeren door zeer zorgvuldig de interacties tussen de twee soorten atomen (het Rubidium van het condensaat en het Kalium van het fermionengas) met een laser te tunen.

Indien men in deze opstelling zou slagen, zou men voor het eerst de mogelijkheid hebben bepaalde aspecten van de snarentheorie te onderzoeken in een labo-opstelling.

Tunneleffect

Kwantummechanica
$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
Onzekerheidsrelatie
Algemene inleiding... ^[1]
Achtergrond
Klassieke mechanica Interferentie Hamiltonformalisme
Fundamentele begrippen
Kwantumtoestand · Golffunctie · Postulaten Superpositie · Onzekerheidsprincipe Schrödingervergelijking · Tunneleffect Uitsluitingsprincipe Diracnotatie
Gevorderde onderwerpen
Interpretatie Klein-Gordonvergelijking Dirac-vergelijking Kwantumveldentheorie Kwantumgravitatie

Experimenten

Schrödingers kat
Tweespletenexperiment
Tunneleffect
Stern-Gerlach-experiment

Wetenschappers

Planck · Einstein · Bohr
· Sommerfeld · Bose ·
Kramers · Heisenberg ·
Born · Jordan · Pauli ·
Dirac · de Broglie ·
Schrödinger · von
Neumann · Wigner ·
Feynman · Bohm ·
Everett · Bell

Tunneleffect of **tunneling** is het effect in de kwantummechanica waarbij een deeltje door een barrière heen gaat, terwijl het niet voldoende energie heeft om over de barrière heen te gaan. Dit heet het tunneleffect, omdat de energiebarrière is voor te stellen als een hoge berg. Het deeltje dat te weinig energie heeft om over de berg heen te komen, gaat als het ware door een tunnel naar de andere zijde.

De oorzaak van tunneling is de overlap tussen de golf functies aan weerszijden van de energiebarrière die elk in de barrière een zeer kleine waarde hebben, maar niet nul zijn.

Het verschijnsel houdt verband met de onzekerheidsrelatie van Heisenberg: als men precies weet hoeveel energie een deeltje heeft, kan men onmogelijk weten waar (aan welke zijde van de barrière) het zich precies bevindt en als men precies weet waar het deeltje is, kan men onmogelijk precies weten hoeveel energie het heeft.

Het tunneleffect wordt op verschillende wijzen waargenomen en toegepast:

- Zo kunnen alfadeeltjes (twee neutronen en twee protonen) zich alleen op deze manier aan de sterke kracht binnen de atoomkern onttrekken. Hiermee wordt de alfastraling in radioactieve stoffen (alfaverval) verklaard.
- De werking van de tunneldiode is gebaseerd op het tunneleffect.
- Scanning tunneling microscopie gebruikt de stroom die door de naald en object vloeit als de golf functies van naald en object overlappen. Door de zeer sterke afhankelijkheid van stroomsterkte en afstand kan een zeer gedetailleerd beeld van een oppervlak gevormd worden.

Tweespletenexperiment

Kwantummechanica
$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
Onzekerheidsrelatie
Algemene inleiding... [1]
Achtergrond
Klassieke mechanica Interferentie Hamiltonformalisme
Fundamentele begrippen
Kwantumtoestand · Golffunctie · Postulaten Superpositie · Onzekerheidsprincipe Schrödingervergelijking · Tunneleffect Uitsluitingsprincipe Diracnotatie
Gevorderde onderwerpen
Interpretatie Klein-Gordonvergelijking Dirac-vergelijking Kwantumveldentheorie Kwantumgravitatie

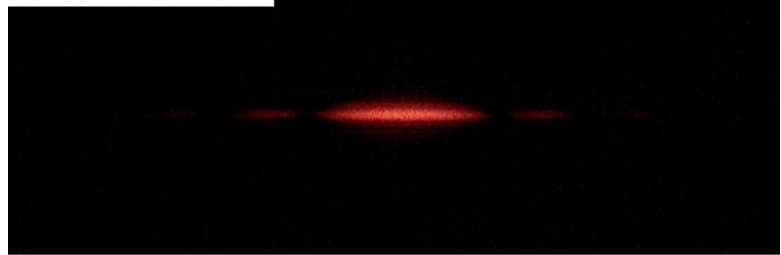
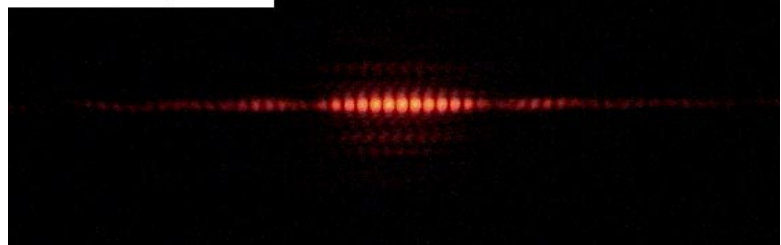
Experimenten

Schrödingers kat
Tweespletenexperiment
Tunneleffect
Stern-Gerlach-experiment

Wetenschappers

Planck · Einstein · Bohr
· Sommerfeld · Bose ·
Kramers · Heisenberg ·
Born · Jordan · Pauli ·
Dirac · de Broglie ·
Schrödinger · von
Neumann · Wigner ·
Feynman · Bohm ·
Everett · Bell

Bij het **tweespletenexperiment** of **dubbele spleten experiment** vindt diffractie van licht plaats door twee spleten en wordt een golfachtig patroon vertoond op een erachter gelegen scherm. Dit interferentiepatroon heeft zowel lichte als donkere gebieden, welke corresponderen met lichtgolven die respectievelijk constructieve en destructieve interferentie hebben ondergaan. Het experiment kan ook uitgevoerd worden met elektronen of atomen in plaats van licht, waarbij een soortgelijk patroon ontstaat; dit wordt gezien als bewijs voor de golf-deeltje-dualiteit, zoals voorspeld door de kwantummechanica. Maar merk op dat het tweespletenexperiment ook uitgevoerd kan worden met golven in een bak water, en dat in dat geval voor de uitleg van het waargenomen golffeneen geen kwantummechanica nodig is. Het fenomeen is alleen kwantummechanisch als deeltjes, zoals atomen, elektronen of fotonen, zich als golven manifesteren.

Single-slit pattern**Double-slit pattern**

Dezelfde tweespleten-opstelling (0.7mm tussen de spleten). In de bovenste afbeelding is 1 spleet afgesloten. Merk op dat het diffractie-patroon -de donkere plekken aan beide kanten van het midden- ook met twee spleten optreden, maar met een dubbele intensiteit en met de toevoeging van veel kleinere interferentieplekken.

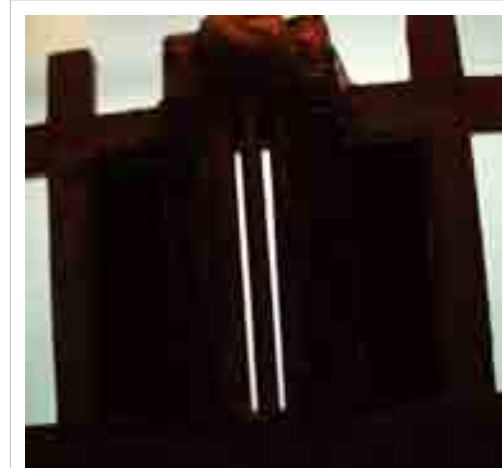
Belang voor de fysica

Alhoewel het tweespletenexperiment heden ten dage vooral genoemd wordt in verband met de kwantummechanica, is het experiment oorspronkelijk uitgevoerd door de Engelse wetenschapper Thomas Young rond 1805 in een poging de vraag op te lossen of licht uit deeltjes bestond of uit golven die door een of andere ether reizen, net als geluidsgolven door de lucht.

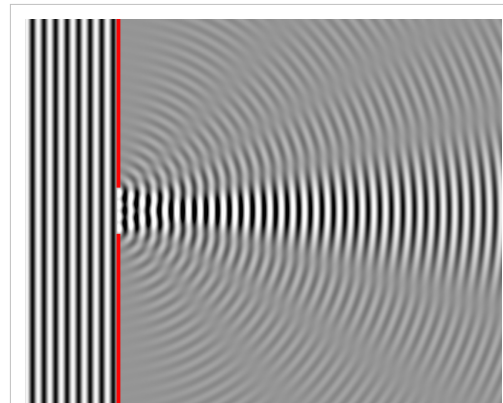
De interferentiepatronen die tijdens het experiment werden geobserveerd, leken de deeltjestheorie tegen te spreken, en de golftheorie van licht bleef de enige geaccepteerde theorie tot aan het begin van de 20e eeuw, toen het bewijs zich begon op te hopen waaruit zou blijken dat licht zich soms als deeltje en soms als golf gedraagt.

Het tweespletenexperiment, en variaties hierop, werden toen een bekend gedachte-experiment vanwege zijn helderheid in het weergeven van de centrale vraagstukken binnen de kwantummechanica, hoewel het experiment nog niet met deeltjes (anders dan fotonen) was uitgevoerd tot 1961, toen Claus Jönsson van de Universiteit van Tübingen het experiment met elektronen uitvoerde. In 1974 voerden onderzoekers onder leiding van Pier Giorgio Merli aan de Universiteit van Milaan het experiment uit door de elektronen een voor een uit te zenden.

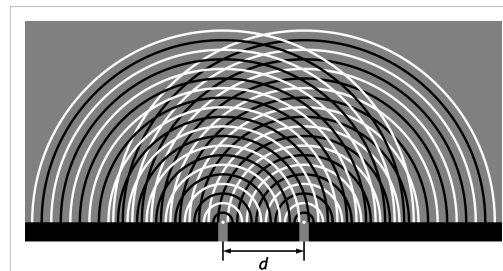
De resultaten van het experiment uit 1974 werden gepubliceerd, maar kregen geen brede aandacht. In 1989 werd het experiment herhaald door Tonomura en anderen bij Hitachi in Japan met verbeterde apparatuur. Tevens was hun methode nauwkeuriger en eleganter en waren hun resultaten in overeenstemming met die van Merli's groep. Alhoewel Tonomura claimde dat het Italiaanse experiment de elektronen niet een voor een had gedetecteerd, een sleutel tot het tonen van de golfdeeltjesparadox, is de detectie van enkele elektronen op de foto's die door de Italiaanse groep zijn gemaakt wel mogelijk.^{[1][2]}



Een tweespleten-opstelling voor in een laboratorium.
De afstand tussen de twee bovenste uitsteeksels bedraagt ongeveer 2,5 cm.



DiffRACTIE met een enkele spleet



DiffRACTIE en interferentie met een dubbele spleet

In september 2002 werd het tweespletenexperiment van Claus Jönsson benoemd tot het mooiste experiment door de lezers van Physics World.^[3]

Verklaring van het experiment van Young

Bij het oorspronkelijke experiment van Young, gaat zonlicht eerst door een enkele spleet en dan door twee dunne verticale spleten, en wordt het vervolgens afgebeeld op een achterliggend scherm. Als een van beide spleten wordt afgedekt, zodat al het licht door de andere spleet moet, wordt er een enkele golf op het scherm waargenomen. Maar als beide spleten open zijn, is niet een som van twee afzonderlijke pieken te zien, zoals men zou verwachten als licht uit deeltjes zou bestaan, maar wordt in plaats daarvan een patroon van lichte en donkere plekken geobserveerd.

Dit patroon kan het beste uitgelegd worden als de interferentie van twee lichtgolven als zij samenkomen nadat zij door de spleten zijn gegaan. Net zoals golven in het water kunnen combineren tot pieken. Op de heldere plaatsen is sprake van constructieve interferentie, omdat hier de twee pieken van twee lichtgolven combineren tot een hogere piek. Op de donkere plaatsen is sprake van destructieve interferentie omdat hier een dal van de ene golf combineert met een piek van een andere golf, waardoor de piek wordt uitgedoofd.

Om het experiment wat gemakkelijker uit te voeren wordt tegenwoordig gebruikgemaakt van laserlicht, in plaats van zonlicht.

Voorwaarden voor interferentie

Een noodzakelijke voorwaarde voor het verkrijgen van interferentie bij het tweespletenexperiment behelst het verschil in weglengte tussen de twee paden die het licht kan nemen om een gebied van constructieve interferentie op het scherm te bereiken. Het verschil in weglengte moet gelijk zijn aan de golflengte van het licht of een veelvoud hiervan. Als een bundel zonlicht binnen wordt gelaten en direct op de dubbele spleet valt, degradeert het feit dat de zon geen puntbron is het interferentiepatroon. Het licht van een bron die geen puntbron is, gedraagt zich namelijk als licht dat komt van veel puntbronnen naast elkaar. Elke puntbron kan een eigen interferentiepatroon creëren, maar de interferentiepatronen van vele naast elkaar liggende puntbronnen vallen niet samen op het scherm, zodat ze elkaar uitmiddelen en er geen interferentie op het scherm te zien is.

De aanwezigheid van de eerste spleet is nodig op te verzekeren dat al het licht dat de twee spleten krijgen afkomstig is vanuit een enkele puntbron. De weglengte van de ene spleet tot de andere spleet is net zo belangrijk voor het verkrijgen van een interferentiepatroon als de weglengte van de twee spleten tot het scherm.

Newtonringen laten zien dat licht niet coherent hoeft te zijn om een interferentiepatroon te kunnen produceren. Newtonringen kunnen eenvoudig worden verkregen uit zonlicht. Er worden meer ringen waargenomen als licht van bijvoorbeeld een natriumlamp wordt gebruikt, omdat licht van een natriumlamp een kleiner spectrum heeft en niet coherent is. Andere voorbeelden van interferentiepatronen van niet-coherent licht zijn de kleuren van zeepbellen en olielams op water.

Over het algemeen zijn de interferentiepatronen duidelijker als monochromatisch of bijna monochromatisch licht wordt gebruikt. Laserlicht is het meest monochromatisch licht dat er bestaat en daarom produceert laserlicht een bijzonder duidelijk interferentiepatroon.

Als de twee spleten worden verlicht door coherente golven, maar met loodrecht op elkaar staande polarisaties, zal het interferentiepatroon verdwijnen.

Formule voor constructieve interferentie

Constructieve interferentie vindt plaats als:

$$n\lambda = \frac{xd}{L}$$

waarbij:

λ de golflengte is van het licht;

d de afstand tussen de twee spleten is;

n de orde is van de geobserveerde maxima (het centrale maximum heeft $n=0$);

x de afstand tussen een maximum en het centrale maximum is;

L de afstand van de spleten tot het scherm is.

Deze formule is een benadering en hangt af van een aantal condities.

Kwantumversie van het experiment

In de jaren 1920 werden er diverse andere experimenten uitgevoerd waaruit bleek dat licht alleen interactie vertoont met materie in discrete, gekwantiseerde pakketjes die fotonen worden genoemd. Als zonlicht bij het tweespletenexperiment wordt vervangen door een lichtbron die de mogelijkheid heeft om slechts één foton per keer uit te zenden en het scherm gevoelig genoeg is om één enkele foton te detecteren, kan het experiment van Young, in theorie, uitgevoerd worden met één foton per keer, met identieke resultaten. Als een van de twee spleten wordt bedekt, creëren de individuele fotonen samen het patroon van een enkele piek, maar als beide spleten open gelaten worden, is op het scherm weer een interferentiepatroon zichtbaar. Dit resultaat lijkt de golftheorie zowel te bevestigen als tegen te spreken. Aan de ene kant bevestigt het interferentiepatroon dat licht zich als een golf gedraagt, alhoewel we per keer maar één deeltje uitzenden. Maar aan de andere kant wordt elke keer als er een foton met een bepaalde energie wordt uitgezonden, dit foton met dezelfde energie op het scherm gedetecteerd. Volgens de Kopenhaagse interpretatie van de kwantumtheorie wordt het individuele foton gezien als iets dat door beide spleten tegelijkertijd gaat en met zichzelf interfereert, om zodoende een interferentiepatroon te veroorzaken.

Een opmerkelijk resultaat volgt uit een variatie op het tweespletenexperiment waarbij bij elk van de twee spleten detectoren worden geplaatst, in een poging om te achterhalen door welke spleet het foton gaat voordat hij op het scherm komt. Maar alleen al het plaatsen van een detector bij een van de twee spleten resulteert in het verdwijnen van het interferentiepatroon. De detectie van een foton gaat gepaard met een fysische interactie tussen het foton en de detector, hetgeen resulteert in een fysische verandering van de detector (als er niets verandert in de detector, wordt er niets gedetecteerd). Als twee fotonen met dezelfde frequentie op hetzelfde tijdstip worden uitgezonden, zullen ze coherent zijn. Als ze door de twee spleten gaan, dan zullen ze coherent blijven en op hetzelfde tijdstip op het scherm aankomen, maar dan lateraal verplaatst van elkaar of ze zullen interferentie ondergaan. Maar, als een van hen een detector zou tegenkomen, dan zouden ze met elkaar uit fase gaan lopen (ze zouden decoherent worden). Ze zouden dan op verschillende tijden op het scherm aankomen en ze zouden niet kunnen interfereren, omdat de eerste al eerder interactie vertoont met het scherm dan de tweede. Als het maar een elektron betreft, moet deze bij de ene of bij de andere detector gedetecteerd worden, en gaat zijn vervolgpad alleen verder vanuit de plaats waar hij was gedetecteerd.

De Kopenhaagse interpretatie poneert het bestaan van waarschijnlijkheidsgolven die de kans om het deeltje op een bepaalde plaats aan te treffen beschrijven. Totdat het deeltje op een plaats langs de waarschijnlijkheidsgolf wordt gedetecteerd, is hij in feite op ieder punt op de waarschijnlijkheidsgolf. Dus, wanneer een deeltje door een van beide spleten zou kunnen, zal hij door beiden gaan en zodoende een interferentiepatroon vertonen. Maar als het deeltje bij een van beide spleten wordt gedetecteerd, kan hij niet langer door beide spleten passeren en wordt zijn aanwezigheid door een van beide bepaald, en is er dientengevolge geen interferentiepatroon zichtbaar.

Dit is gelijk aan de padintegraal-formulering van de kwantummechanica, zoals hij door Richard Feynman is geleverd (alhoewel Feynman onderstreept dat dit een zuiver mathematische beschrijving is en geen poging om een reëel proces te beschrijven dat we niet kunnen zien), waarin een deeltje zoals een foton iedere mogelijke weg neemt door de ruimtetijd om van punt A naar punt B te gaan. In het tweespletenexperiment is punt A de stralingsbron en is punt B het scherm waarop de interferentie verschijnt, en neemt een deeltje elke mogelijke route (door beide spleten tegelijkertijd) om van A naar B te gaan. Als een detector bij een van de spleten wordt geplaatst, verandert de situatie en hebben we nu een ander punt B. Punt B is nu de detector en er gaat een nieuw pad vanuit de detector naar het scherm. In dit geval is er geen sprake van een dubbele spleet op de weg en verschijnt er zodoende geen interferentiepatroon.

Referenties

- [1] Physicsworld.com (<http://physicsworld.com/cws/article/indepth/9745>). Inloggen noodzakelijk.
- [2] Videoclip 1 van Tonomura (<http://www.hitachi.com/rd/research/em/doubleslit.html>)
- [3] "The most beautiful experiment" (<http://physicsworld.com/cws/article/print/9746>). Physics World 2002.

Uitsluitingsprincipe van Pauli

Kwantummechanica
$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
Onzekerheidsrelatie
Algemene inleiding... ^[1]
Achtergrond
<ul style="list-style-type: none"> Klassieke mechanica Interferentie Hamiltonformalisme
Fundamentele begrippen
<ul style="list-style-type: none"> Kwantumtoestand · Golffunctie · Postulaten Superpositie · Onzekerheidsprincipe Schrödingervergelijking · Tunneleffect Uitsluitingsprincipe Diracnotatie
Gevorderde onderwerpen
<ul style="list-style-type: none"> Interpretatie Klein-Gordonvergelijking Dirac-vergelijking Kwantumveldentheorie Kwantumgravitatie

Experimenten

Schrödingers kat
 Tweespletenexperiment
 Tunneleffect
 Stern-Gerlach-experiment

Wetenschappers

Planck · Einstein · Bohr
 · Sommerfeld · Bose ·
 Kramers · Heisenberg ·
 Born · Jordan · Pauli ·
 Dirac · de Broglie ·
 Schrödinger · von
 Neumann · Wigner ·
 Feynman · Bohm ·
 Everett · Bell

Het **uitsluitingsprincipe van Pauli** is een kwantummechanisch principe dat stelt dat twee identieke fermionen niet dezelfde kwantumtoestand mogen bezetten. Het principe is geformuleerd door Wolfgang Pauli in 1925 en wordt ook wel *uitsluitingsprincipe*, *exclusieprincipe*, *Pauliprincipe* of *Pauliverbod* genoemd. Het zegt dat er in een atoom geen twee elektronen kunnen zijn met vier identieke kwantumgetallen. Door het invoeren van het spinkwantumgetal kunnen twee elektronen zich in één orbitaal (hetzelfde magnetisch, hoofd-, nevenkwantumgetal) bevinden, mits ze verschillen in hun spinkwantumgetal.

Het Pauliprincipe geldt alleen voor fermionen, deeltjes die antisymmetrische kwantumtoestanden vormen^[1] en halfvullige spin hebben. Onder fermionen vallen onder andere protonen, neutronen, de quarks waaruit die bestaan, en elektronen – alle soorten elementaire deeltjes waaruit materie is opgebouwd. Het principe heeft grote invloed op veel van de karakteristieke eigenschappen van materie. Deeltjes als het foton en het graviton gehoorzamen het uitsluitingsprincipe niet, omdat het bosonen zijn (ze vormen symmetrische kwantumtoestanden en hebben heeltallige spin) in plaats van fermionen.

Met informatie over identieke deeltjes in het achterhoofd, kan het principe gemakkelijk afgeleid worden. Fermionen van dezelfde soort vormen totaal antisymmetrische toestanden, wat in het geval van twee deeltjes betekent dat

$$|\psi\psi'\rangle = -|\psi'\psi\rangle.$$

Als beide deeltjes dezelfde kwantumtoestand $|\psi\rangle$ bezetten, is de toestand van het hele systeem $|\psi\psi\rangle$. Dan

$$|\psi\psi\rangle = -|\psi\psi\rangle = 0 \text{ (nul-ket)}$$

dus komt zo'n toestand niet voor. Dit kan men uitbreiden naar het geval van meer dan twee deeltjes.

Gevolgen

Het uitsluitingsprincipe speelt een rol in een groot aantal natuurkundige verschijnselen. Een van de belangrijkste, waarvoor het principe oorspronkelijk geformuleerd is, is de elektronenschilstructuur van atomen. Een elektrisch neutraal atoom bevat evenveel gebonden elektronen als er protonen in de kern zitten. Aangezien elektronen fermionen zijn, verbiedt het uitsluitingsprincipe dat ze dezelfde kwantumtoestand bezetten.

Beschouw bijvoorbeeld een neutraal heliumatoom, dat twee gebonden elektronen heeft. Deze kunnen beide de laagste energietoestand (1s) bezetten door tegengestelde spins aan te nemen. Dit is niet in tegenspraak met het uitsluitingsprincipe omdat spin een deel is van de kwantumtoestand van het elektron, dus de twee elektronen bezetten verschillende kwantumtoestanden. Spin kan echter slechts twee verschillende waarden (eigenwaarden) aannemen. In een lithiumatoom, dat drie gebonden elektronen bevat, past het derde elektron niet in een 1s-toestand

en daardoor moet het in de hogere energietoestand 2s gaan zitten. Op dezelfde manier maken volgende elementen steeds hogere energieschillen. De chemische eigenschappen van een element hangen grotendeels af van het aantal elektronen in de buitenste schil, wat aanleiding geeft tot het periodiek systeem der elementen.

Het Pauliprincipe is ook verantwoordelijk voor de stabiliteit van materie op grote schaal. Moleculen kunnen niet willekeurig dicht bij elkaar worden geduwd, doordat de gebonden elektronen in elk molecuul niet dezelfde toestand in een ander molecuul binnen mogen gaan; dit is de oorzaak van de afstotende r^{-12} -term in de Lennard-Jones-potentiaal. Zonder het Pauliprincipe zouden we door de vloer zakken.

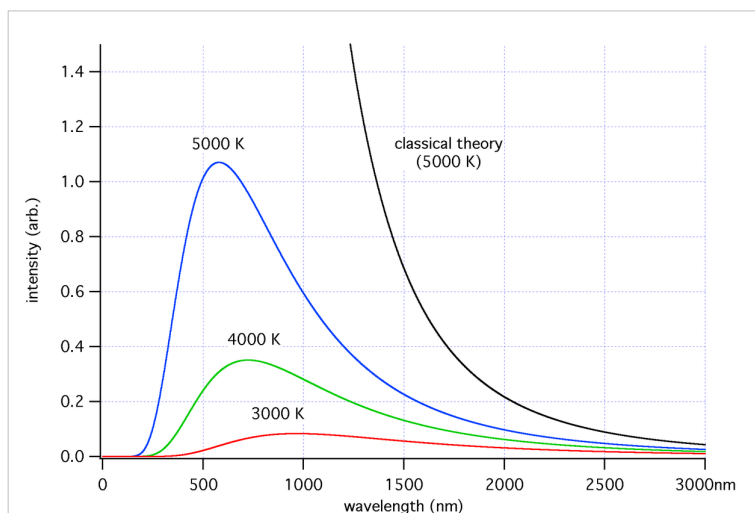
De astronomie geeft ons de spectaculairste demonstraties van dit effect, in de vorm van witte dwergen en neutronensterren. In beide objecten worden de normale atoomstructuren verstoord door grote gravitatiekrachten. De deeltjes worden dan alleen nog ondersteund door een "ontaardingsdruk" geproduceerd door het Pauliprincipe. Deze exotische vorm van materie staat bekend als ontaarde materie. In witte dwergen worden de atomen uit elkaar gehouden door de ontaardingsdruk van de elektronen. In neutronensterren, die nog grotere gravitatiekrachten vertonen, zijn de elektronen met de protonen samengegaan, zodat er neutronen zijn gevormd. De neutronen produceren een grotere ontaardingsdruk. Bij zeer extreme ontaardingsdruk zijn neutronen nog verder samengevormd en vallen ze verder uiteen in quarks die één groot nucleon vormen, een quarkster.

Noot

[1] In termen van golffuncties voor twee deeltjes betekent dit dat $\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = -\psi(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_1)$

Ultravioletcatastrofe

De **ultravioletcatastrofe**, ook wel de Rayleigh-Jeans-catastrofe, was een paradox van de laat-19e-eeuwse klassieke natuurkunde, waarbij uit het equipartitiebeginsel zou volgen dat een ideaal zwart lichaam in thermisch evenwicht straling met oneindige kracht uitzendt. Deze werd opgelost met de introductie van kwantummechanica.

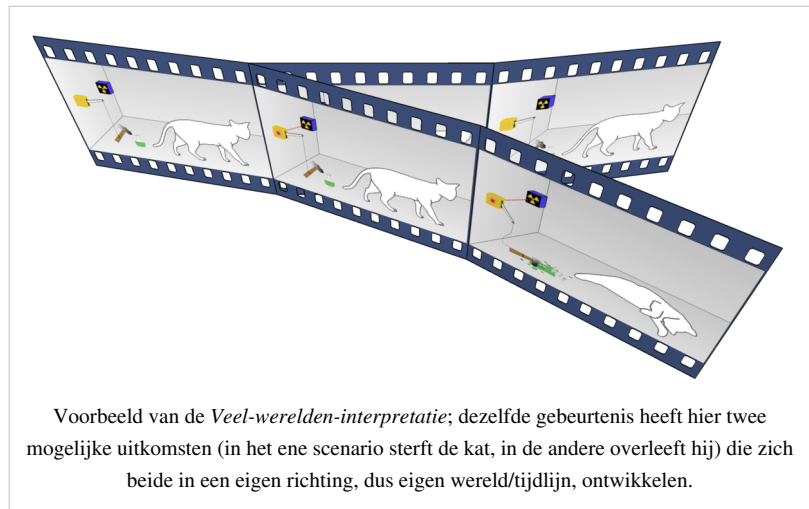


De Ultravioletcatastrofe is de fout bij korte golflengten in de wet van Rayleigh-Jeans voor uitgestraalde energie door een ideaal zwart-lichaam. De fout, die veel meer uitgesproken is voor korte golflengten, is het verschil tussen de zwarte kromme (de verkeerde kromme die wordt voorspeld door de wet van Rayleigh-Jeans) en de blauwe kromme (de correcte kromme die wordt voorspeld door de wet van Planck).

Veel-werelden-interpretatie

De **veel-werelden-interpretatie** ook wel de **interpretatie van Everett**, de **theorie van de universele golffunctie** of de **theorie van de parallelle universa** is een interpretatie van de kwantummechanica, die de objectieve werkelijkheid van de universele golffunctie verdedigt, maar die de realiteit van het instorten van de golffunctie ontkent. Deze zienswijze impliceert dat alle mogelijke alternatieve geschiedenissen en toekomsten reëel zijn -ieder daarvan representeert een werkelijke "wereld"

(of "universum"). Of in andere woorden; de tijdlijn is niet 1 vast gegeven waarin alle gebeurtenissen zich op maar 1 manier voltrekken, maar bij iedere gebeurtenis splitst de lijn in meerdere alternatieve tijdlijnen die elk een mogelijke uitkomst van die gebeurtenis bevatten. Dan zou bij iedere situatie waarbij potentieel meer dan een uitkomst mogelijk is iedere uitkomst verwezenlijkt worden in een nieuw universum.



Implicaties

Behalve in de natuurkunde heeft deze interpretatie ook gevolgen voor o.a. de filosofie en zelfs ethiek zoals de definitie van wat vrije wil is. Zelfs theologische definities over zaken als predestinatie moeten dan heroverwogen worden.

Veld (natuurkunde)

Met het begrip **veld** beschrijft de natuurkunde een situatie waar deeltjes een kracht zouden ondervinden of waar op de een of andere manier energie in de ruimte aanwezig is.

In de klassieke mechanica waren de enige bekende velden *krachtvelden*. Bij iedere kracht kon men zich een veld denken: zo was er een *zwaartekrachtsveld*, een *elektrisch veld* en een *magnetisch veld*. Na de invoering van de kwantummechanica ontstond de kwantumveldentheorie. Die ging verder dan de klassieke veldentheorie en verklaarde alle deeltjes als aangeslagen toestanden van allerlei velden. Daarmee zijn velden de basis van de materiële wereld geworden; ze zijn in de moderne natuurkunde een fundamenteeler begrip dan elementaire deeltjes.

Klassieke veldentheorie

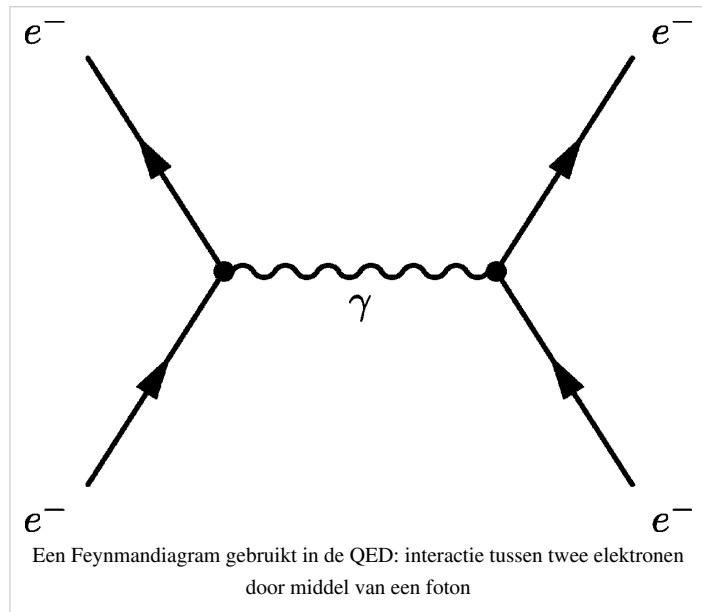
In de klassieke natuurkunde (in de zin van niet-kwantummechanisch, tot 1920) is een veld *de situatie waarin eventueel aanwezige deeltjes een kracht zouden ondervinden*. Zo is er het elektrische veld: wanneer een elektrisch geladen deeltje zich ergens bevindt waar een elektrisch veld is, werkt er een elektrische kracht op. De grootte van het veld is de kracht die op een eenheid lading (1 coulomb) zou werken; de richting van het veld is de richting die de kracht zou hebben – het veld heeft dus de vorm van een vectorveld. Uiteraard wordt zo'n veld veroorzaakt door dezelfde dingen die de bijbehorende kracht veroorzaken: de aanwezigheid van elektrische ladingen in de omgeving ('krachtbronnen' ofwel 'veldbronnen').

Zo heeft iedere kracht een bijbehorend veld. Er is een zwaartekrachtsveld, veroorzaakt door (grote) massa's in de omgeving, en een magnetisch veld, veroorzaakt door magneten. Deze velden leken alleen maar een wiskundige constructie te zijn (kracht gedeeld door lading), totdat Hans Christian Ørsted ontdekte dat het elektrische veld het magnetische veld beïnvloedt. Het formuleren van die relatie tussen verschillende velden, een prestatie van James Clerk Maxwell uit 1864, leidde tot het inzicht dat velden gezien moeten worden als zelfstandige fysische verschijnselen, die *veroorzaakt* worden door veldbronnen. Zo kunnen het elektrische en het magnetische veld (samen het elektromagnetische veld genoemd) een gezamenlijk golfgedrag vertonen dat zich zelfstandig, zonder tussenkomst van de bron, voortplant door de lege ruimte: elektromagnetische straling zoals licht. Velden bevatten veldenergie; zo kan licht energie overbrengen, bijvoorbeeld van de zon naar de aarde.

Kwantumveldentheorie

► Zie *Kwantumveldentheorie voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Na het ontstaan van de kwantummechanica in de jaren 20 heeft Paul Dirac pogingen gedaan de nieuwe theorie met de speciale relativiteitstheorie te verenigen. Na enig spoorwerk bleek dat hij het bestaan van antideeltjes moest veronderstellen en dat er een veldentheorie uitkwam. Dit houdt onder andere in dat het totaal aantal deeltjes niet constant en vastomlijnd is. Een veld, beschreven in kwantumtermen, kent een toestand van laagste energie (de grondtoestand) en kan op allerlei manieren aangeslagen (men zegt ook wel 'geëxciteerd') worden. Verschillende trillingsmogelijkheden van het veld kunnen in verschillende mate aangeslagen zijn. Iedere trillingsmodus correspondeert met een mogelijke bewegingstoestand van een deeltje. Zo vertegenwoordigt een veld dus een onzeker aantal deeltjes met allerlei mogelijke bewegingstoestanden.



In de jaren 40 lukte het Richard Feynman, Shinichiro Tomonaga, Julian Schwinger en Freeman Dyson de kwantumtheorie van het elektromagnetische veld op te stellen. Deze kwantumelektrodynamica (QED) bleek zeer nauwkeurige voorspellingen te doen. Feynman maakte het rekenwerk in kwantumveldentheorieën eenvoudiger met de uitvinding van zijn Feynmandiagrammen.

Een theorie waarin ook het veld van de zwakke kernkracht opgenomen was, werd rond 1970 door Sheldon Glashow, Abdus Salam en Steven Weinberg gevonden. Na enkele noodzakelijke aanpassingen door Gerard 't Hooft en Martin Veltman deed deze elektrozwakke theorie ook voorspellingen, bijvoorbeeld van het bestaan van nog nooit waargenomen deeltjes. In de loop van de jaren zeventig volgde het veld van de sterke kernkracht, vervat in de kwantumchromodynamica (QCD), en nadat die bij de andere veldentheorieën was gevoegd, was het standaardmodel geboren. Het standaardmodel is een kwantumveldentheorie van al deze velden en de deeltjes die eraan onderhevig zijn.

Het opstellen van een geünificeerde kwantumveldentheorie, waarin ook het zwaartekrachtsveld wordt beschreven, is tot nu toe niet gelukt.

Voorbeelden van velden in de natuurkunde

- elektrisch veld
- magnetisch veld
- elektromagnetisch veld, zie elektromagnetisme
- zwaartekrachtsveld
- Higgsveld

Verschuivingswet van Wien

De **verschuivingswet van Wien** is een door Wilhelm Wien opgestelde wet die zegt dat de energiedichtheid t.o.v. golflengte van de warmtestraling van een zwarte straler bij elke absolute temperatuur hetzelfde is, afgezien van schaling van de golflengte zodanig dat

$$\lambda \cdot T = \text{constante}$$

en schaling van de functiewaarden; nauwkeuriger gezegd: het vermogen per oppervlakte-eenheid per golflengte-eenheid is het product van een functie van T en een functie van λT . Dit komt erop neer dat een dubbellogaritmische grafiek van dit vermogen als functie van golflengte bij verandering van T alleen maar horizontaal en verticaal verschuift, en dat de horizontale verschuiving per vertienvoudiging van T één decade naar links is.

De wet kan ook geformuleerd worden in termen van het vermogen per frequentie-eenheid: per oppervlakte-eenheid is dit het product van een functie van T en een functie van ν/T .

Piek in het spectrum

Er zijn verschillende centrummaten voor het spectrum, maar als gevolg van de verschuivingswet geldt steeds dat de betreffende golflengte omgekeerd evenredig is met de absolute temperatuur en de frequentie dus recht evenredig met de absolute temperatuur.

De golflengte waarbij het vermogen per eenheid golflengte maximaal is wordt gegeven door:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

met

λ_{max} golflengte in meter

b constante van Wien: $2,897\ 77 \times 10^{-3} \text{ K}\cdot\text{m}$ ^[1]

T temperatuur in Kelvin

Wien heeft deze wet uit proeven afgeleid en nadien theoretisch bewezen. De wet volgt ook rechtstreeks uit de wet van Planck. Toepassingen van de wet zijn: stralingspyrometers, infrarood-thermografie, temperatuur van een hemellichaam, kosmische achtergrondstraling.

Theoretische afleiding

Bij de analyse van de experimentele stralingscurven die op dat moment beschikbaar waren, had Wien al gemerkt dat er een verband bestond tussen de golflengten behorende bij de maxima van de stralingscurven en de temperaturen. Als λ_1 en λ_0 de maxima aanduiden bij curven behorende bij de temperaturen T_1 en T_0 dan vond hij steeds dat $\lambda_1 T_1 = \lambda_0 T_0$ waaruit hij concludeerde dat het product λT constant is.

In een publicatie van 1893 stelde Wien dat twee onafhankelijke processen resulteren in eenzelfde energieverdeling over de golflengten, als de eindtemperatuur van beide processen maar dezelfde is. Het eerste proces was de toe- of afname in temperatuur als de stralingsdichtheid toeneemt of afneemt, en het tweede de overeenkomstige adiabatistische volumeverkleining of -vergroting van de holle ruimte die de straling bevat. De redenering van Wien was de volgende: als we in een compleet geëvacueerde ruimte met volkomen reflecterende wanden een hoeveelheid zwarte stralingsenergie hebben en die ruimte adiabatisch en zeer traag laten expanderen, zal de straling het karakter van zwarte straling behouden. Op basis van deze redenering en de overeenkomstige transformatie heeft Wien zijn verschuivingswet theoretisch kunnen bewijzen. Het bewijs berust o.a. op de volgende twee voorwaarden:

- Er is geen afvoer of toevoer van warmte zodat de transformatie adiabatisch zal verlopen ($dQ = 0$).

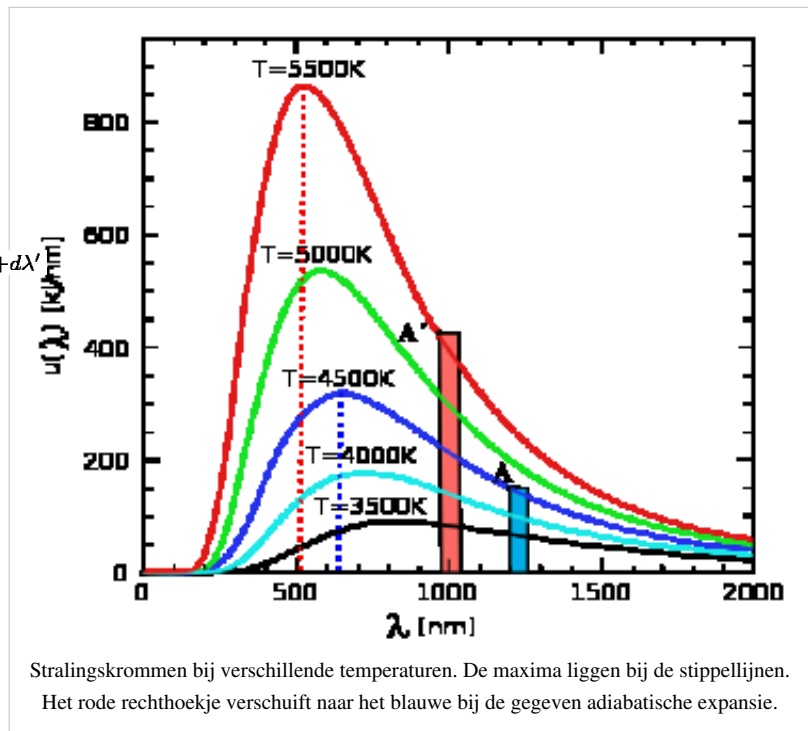
- De virtuele transformatie zal zo langzaam geschieden dat de wet van Stefan-Boltzmann nog altijd blijft bestaan daarmee is steeds $u = aT^4$, waarin a een constante is. Deze voorwaarde is niet evident als men bedenkt dat om tijdens de expansie of compressie thermodynamisch evenwicht te behouden men een absorberend medium nodig heeft. Aangezien de wanden volkomen reflecterend zijn, is een dergelijk medium niet meer voorhanden. Planck argumenteert dat dit geen probleem is aangezien de aanwezigheid van een enkel koolstofdeeltje in het beschouwde volume voldoende is om dit evenwicht na een beperkte tijd te bereiken. In het bewijs wordt rekening gehouden met het Dopplereffect voor lichtstralen, die op de bewegende wand reflecteren. Wien stelt vast dat de transformatie twee invarianten bevat:

$$f/T = \text{constante} \quad \text{en} \quad u_f/f^3 = \text{constante}$$

waarin f de frequentie van de beschouwde monochromatische golf voorstelt en u_f de stralingsdichtheid van die golf. Het is dus door toepassing van de algemene wetten van de thermodynamica en het elektromagnetisme op het stralingsfenomeen dat Wien in staat was om zijn verschuivingswet te bewijzen. Dit bewijs werd later door Planck nog veralgemeend.

Naamgeving en eerder gevonden waarde van de constante

Het begrip verschuivingswet werd in een publicatie van 1899 voor het eerst ingevoerd door Otto Lummer en Ernst Pringsheim. Ze benadrukten dat de energie bij een temperatuur T' , die eerst aanwezig was in het golflengtegebiedje λ' en $\lambda'+d\lambda'$ tijdens de expansie naar een lagere temperatuur T , verschuift naar een andere energie in het golflengtegebiedje λ en $\lambda+d\lambda$. Uit de door hen gemeten stralingscurven konden ze ook de waarde voor het constante product van de temperatuur en de golflengte van de maximale intensiteit bepalen. Zij vonden $\lambda_{max}T = b = 2,94 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$ en dit wordt de constante van Wien genoemd, de tegenwoordig bepaalde waarde bedraagt zoals gezegd $2,89777 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$.



Kleur van de zon

Als de zon straalt als een zwarte straler met een oppervlaktetemperatuur van 5777 °K dan bereikt ze haar maximale intensiteit in het golflengtegebiedje rond $\lambda_{\odot max} = 501 \text{ nm}$ en dit is in het groene gedeelte van het zichtbare spectrum. De zon straalt echter ook in het rood tot in het verre infrarood en daarom nemen we eerder het witte licht van deze ster waar. Kleuren zien is het kunnen waarnemen van verschillen in de golflengte van licht. In het menselijk oog komen vier soorten lichtgevoelige cellen voor: naast staafjes drie verschillende soorten kegeltjes. De kegeltjes zijn onmisbaar voor kleurwaarneming. De kegelcellen in het oog van een mens bij voldoende daglicht zijn het gevoeligst in het gebied rond 555 nm. Bij zwak licht zijn de staafjes verantwoordelijk voor het zicht en die hebben een maximale gevoeligheid rond 500 nm. De gevoeligheid van onze ogen is blijkbaar goed afgestemd op de

eigenschappen van het licht van de zon.

Vorm van de stralingswet

Aangezien de twee invarianten in het bewijs van Wien zich herleiden tot constanten zijn ze ook functies van elkaar zodat

$$\frac{u_f}{f^3} = \varphi(f/T) \text{ of } u_f df = f^3 \cdot \varphi(f/T) df$$

en dit is de uitdrukking van de spectrale stralingsintensiteit in functie van de frequenties. De oppervlakte van een rechthoekje in de figuur is gelijk aan

$$E_{z\lambda} = u_\lambda d\lambda$$

en representeert de energie aanwezig in het golflengtegebiedje tussen

$$\lambda \text{ en } \lambda + d\lambda.$$

De totale stralingsenergie kan zowel als integraal van frequentie als van golflengte worden geschreven:

$$\int_0^\infty u_f df = \int_0^\infty u_\lambda d\lambda$$

Om de stralingsintensiteit te kennen in functie van de golflengte moeten we bedenken dat $f = \frac{c}{\lambda}$ en daarmee wordt

$$df = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda,$$

waarin c de lichtsnelheid voorstelt, zodat

$$u_\lambda d\lambda = -u_f df = u_f \frac{c}{\lambda^2} d\lambda = cte \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \varphi(\lambda T) d\lambda$$

De spectrale stralingsdichtheid in functie van de golflengte wordt dan

$$u_\lambda = cte \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \varphi(\lambda T)$$

waarin $\varphi(\lambda T)$ voorlopig een onbekende functie blijft van het product λT . Na 1893 is er door de natuurkundigen koortsachtig gezocht om een uitdrukking voor deze functie te vinden.

Implicaties van de verschuivingswet

- Een belangrijk gevolg van de verschuivingswet is dat, eenmaal men een stralingscurve heeft opgemeten bij een bepaalde temperatuur T , men ook de curven kent voor elke andere temperatuur. Dit wordt in de figuur verduidelijkt als men de punten A en A' van de blauwe en rode rechthoekjes in beschouwing neemt. Wil men de stralingscurve nu kennen bij de nieuwe temperatuur $T' = \alpha T$ dan moet wegens $\lambda T = \text{constante}$, $\lambda' = \frac{\lambda}{\alpha}$ en $d\lambda' = \frac{d\lambda}{\alpha}$ daardoor wordt de nieuwe stralingsdichtheid

$$u'_\lambda d\lambda' = \alpha^5 u_\lambda \frac{d\lambda}{\alpha} = \alpha^4 u_\lambda d\lambda \text{ of}$$

$$E'_{z\lambda} = \alpha^4 E_{z\lambda} = \frac{T'^4}{T^4} E_{z\lambda}$$

wat in overeenstemming is met de wet van Stefan-Boltzmann. Men kent dus de spectrale stralingsintensiteit behorende bij de nieuwe temperatuur.

- De verschuiving in frequentie waarbij de stralingsintensiteit een maximum bereikt is belangrijk voor het aanwenden van zonne-energie in bv. serres. Het glas moet de zonnestraling doorlaten maar de warmtestraling tegen houden. Dit wordt mogelijk omdat de twee stralingsgebieden in verschillende frequentiegebieden liggen, de ene straling is afkomstig van een lichaam van 5700 K en de andere van een lichaam van bv. 300 K. Er zijn materialen die transparant zijn voor licht maar opaak voor infraroodstraling. Het broeikaseffect is enkel mogelijk omdat f_{max} varieert met de temperatuur. Dit geldt ook voor het broeikaseffect van de aardse atmosfeer.

- Om de maximale emissiesterkte te kennen bij een bepaalde temperatuur T voeren we de waarde $\lambda_{max} = \frac{b}{T}$ in u_λ en bekomen

$$E_{\lambda_{max}} = \frac{cte}{\lambda_{max}^5} \cdot \varphi(\lambda_{max}T) = \frac{cte}{b^5} T^5 \cdot \varphi(b) = cte' \cdot T^5$$

m.a.w. de maximale spectrale emissiesterkte is evenredig met de vijfde macht van de absolute temperatuur.

Referenties

- [1] $2,897\,7721(26) \times 10^{-3}$ K·m; de nauwkeurigheid van de constante wordt bepaald door die van de constante van Boltzmann, want de constante van Planck is met grotere nauwkeurigheid bekend. Zie Wien wavelength displacement law constant (<http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?bwien>).

Virtueel deeltje

Energie en tijd zijn verbonden grootheden volgens het onzekerheidsprincipe van Heisenberg. Dit betekent dat het mogelijk is dat een systeem extra energie heeft, onder voorwaarde dat deze energie weer 'teruggegeven' wordt na een korte periode van tijd, korter naarmate de extra energie groter is. Als deze energie groot genoeg is, kan deze gebruikt worden om een systeem van een deeltje en zijn antideeltje te laten ontstaan, die elkaar dan binnen de beschikbare tijd weer annihileren. Dergelijke deeltjes noemt men **virtuele deeltjes**, en het bestaan van deze virtuele deeltjes zorgt ervoor dat ook het vacuüm in de kwantummechanica nog energie heeft (de kosmologische constante).

Hoewel virtuele deeltjes niet direct kunnen worden gemeten, hebben ze wel een aantal interessante effecten:

- Het Casimir-effect, waarbij twee ongeladen, geleidende platen elkaar aantrekken.
- Moderne theorieën geven aan dat het tijdelijk mogelijk is dat er ergens een negatieve hoeveelheid energie is. Dit betekent dat er minder virtuele deeltjes ontstaan dan in een normaal vacuüm. Dan moet er wel een minstens even grote stoot positieve energie volgen.
- Indien het mogelijk zou zijn van een geladen deeltje, zoals een elektron, van zeer dichtbij de lading te meten, zou men een kleinere waarde krijgen dan normaal. Oorzaak is, dat als er een geladen virtueel deeltjespaar gevormd wordt nabij het virtuele deeltje, het positief geladen deeltje zich gemiddeld iets dichterbij het elektron zal bevinden dan het negatief geladen deeltje.
- De hawkingstraling van zwarte gaten.

Virtuele deeltjes komen ook in Feynman-diagrammen voor: alle lijnen in een Feynman-diagram kunnen beschouwd worden een deeltje weer te geven, echter alleen die deeltjes die het diagram in of uit gaan zijn waarneembaar. De andere deeltjes zijn virtueel. Op deze wijze kunnen ook bij een botsing tussen deeltjes, deeltjes ontstaan die zwaarder zouden zijn dan de totale energie van de deeltjes zou toelaten - maar alleen als zeer tijdelijk tussenproduct.

Vreemdheid

Vreemdheid (Engels: *strangeness*) is een grootte in de kwantummechanica.

De vreemdheid van de gewone baryonen: proton en neutron is nul. Ook de pionen hebben vreemdheid 0. Van de kaonen hebben K^0 en K^+ een vreemdheid 1 en hun antideeltjes K^0 streep en K^- een vreemdheid -1. Ook sigma-baryonen en het lambda-baryon hebben vreemdheid -1. De ksi-baryonen hebben vreemdheid -2.

De vreemdheid blijft in de meeste reacties behouden. De zwakke wisselwerking laat wel reacties toe die de vreemdheid niet behouden. Zo kan een K^0 met vreemdheid 1 overgaan in een K^0 streep met vreemdheid -1.

De drager van de vreemdheid is de strange quark.

Waarschijnlijkheidsamplitude

Kwantummechanica
$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
Onzekerheidsrelatie
Algemene inleiding... [1]
Achtergrond
<ul style="list-style-type: none"> Klassieke mechanica Interferentie Hamiltonformalisme
Fundamentele begrippen
<ul style="list-style-type: none"> Kwantumtoestand · Golffunctie · Postulaten Superpositie · Onzekerheidsprincipe Schrödingervergelijking · Tunneffect Uitsluitingsprincipe Diracnotatie
Gevorderde onderwerpen
<ul style="list-style-type: none"> Interpretatie Klein-Gordonvergelijking Dirac-vergelijking Kwantumveldentheorie Kwantumgravitatie

Experimenten

Schrödingers kat
 Tweespletenexperiment
 Tunneleffect
 Stern-Gerlach-experiment

Wetenschappers

Planck · Einstein · Bohr
 · Sommerfeld · Bose ·
 Kramers · Heisenberg ·
 Born · Jordan · Pauli ·
 Dirac · de Broglie ·
 Schrödinger · von
 Neumann · Wigner ·
 Feynman · Bohm ·
 Everett · Bell

In de kwantummechanica, bedoelt men met de term **waarschijnlijkheidsamplitude** de kans dat men het systeem (bij een meting) in een bepaalde toestand aantreft. In de klassieke mechanica is een meetproces éénduidig: als antwoord krijgt men de waarde van de grootheid die men meet. In de kwantummechanica is de uitkomst van een meting echter statistisch van aard. Het is precies dit statistisch karakter dat wordt uitgedrukt door de waarschijnlijkheidsamplitude. Voor een systeem met golf functie ψ , wordt de waarschijnlijkheidsamplitude gegeven door

$$|\Psi|^2$$

Dit laatste is het kwadraat van de modulus van de golf functie. De kans om een deeltje op positie x aan te treffen wordt dus gegeven door

$$|\Psi(x)|^2$$

oftwel

$$\Psi(x)^* \cdot \Psi(x)$$

met $\Psi(x)^*$ de complex geconjugeerde van de golf functie $\Psi(x)$.

Het verband tussen waarschijnlijkheidsamplitudes en golf functies werd voor het eerst gelegd door Max Born. De zogeheten Born-regel legt het verband tussen waarschijnlijkheidsdichtheden en golf functies.

Waarschijnlijkheidsinterpretatie van Born

De **waarschijnlijkheidsrelatie van Born** (ook Born-regel, regel van Born of waarschijnlijkheidsregel genoemd) is een beginsel in de kwantummechanica om de interpretatie van de kwantummechanische golf functie (de Schrödingervergelijking) uit te leggen.

De waarschijnlijkheidsinterpretatie beschijft met welke waarschijnlijkheid een bepaalde meetwaarde optreedt bij het uitvoeren van een meting aan een kwantumsysteem. De waarschijnlijkheidsregel is vernoemd naar de Duitse natuurkundige Max Born, die deze interpretatie in 1926 voorstelde. De waarschijnlijkheidsinterpretatie van Born is een wezenlijk onderdeel van de Kopenhagense interpretatie van de kwantummechanica.

Er zijn vele pogingen geweest om de Born-regel af te leiden uit andere aannames van de kwantummechanica, met onbeslechte resultaten.^[1]

Voetnoten

[1] (en) N.P. Landsman, "The conclusion seems to be that no generally accepted derivation of the Born rule has been given to date, but this does not imply that such a derivation is impossible in principle." (<http://www.math.ru.nl/~landsman/Born.pdf>), in *Compendium of Quantum Physics* (eds.) F.Weinert, K. Hentschel, D.Greenberger and B. Falkenburg (Springer, 2008), ISBN 3540706224

Waterstofatoom

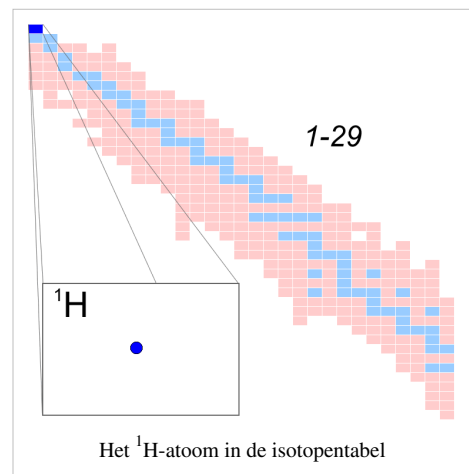
Een **waterstofatoom** is een atoom van het chemische element waterstof. Het elektrisch neutrale atoom bevat een positief geladen proton en een negatief geladen elektron, dat aan de kern wordt gebonden door de Coulombkracht. De meest voorkomende isotoop, protium (ook waterstof-1 of lichte waterstof genoemd), bevat geen neutronen; andere isotopen van waterstof, zoals deuterium en tritium, bevatten respectievelijk één en twee neutronen.

Waterstofatoom als modelsysteem in de kwantummechanica

Het waterstofatoom is het eenvoudigste realistische systeem dat zich laat behandelen met de kwantummechanica. Omdat het een tweedeeltjesprobleem is, en de twee deeltjes (het elektron en het proton waar het omheen "cirkelt") op de schaal van het atoom als puntmassa's kunnen worden beschouwd, kan onder die (in de praktijk alleszins redelijke) aanname een exacte oplossing gegeven worden voor de Schrödingervergelijking (het waterstofatoom is daarmee ook het enige atoom waarvoor men de Schrödingervergelijking exact kan oplossen). Op die manier heeft men nauwkeurige kwantitatieve voorspellingen kunnen doen die een van de redenen vormen dat de kwantummechanica als succesvolle natuurkundige theorie ingang heeft gevonden.

Onder meer de frequenties van verschillende series spectraallijnen (met name de Balmerreeks en de Lymanreeks) kunnen op deze manier worden berekend uit "eerste beginselen", waar voorheen alleen empirische formules voorhanden waren.

De orbitaalstructuur van waterstof is in de theoretische chemie en computationele chemie nog steeds een belangrijk theoretisch en praktisch hulpmiddel bij het beschrijven van de elektronenstructuur van andere atomen en van



moleculen (al kan men de vergelijkingen voor dergelijke systemen niet meer exact oplossen, zelfs niet in de Born-Oppenheimerbenadering).

Wentzel-Kramers-Brillouin-benadering

De **Wentzel-Kramers-Brillouin-benadering** (WKB), of **Wentzel-Kramers-Brillouin-Jeffreys-benadering** (WKBJ) is in de natuurkunde het meest voorkomende voorbeeld van een semiklassieke berekening in de kwantummechanica. De golf functie wordt eerst geschreven als een exponentiële functie, met een langzaam veranderende amplitude of fase.

De methode werd voor het eerst in 1923 door de wiskundige Harold Jeffreys ontwikkeld. Drie jaar daarna, in 1926, werd precies dezelfde methode ontwikkeld voor de tweede keer, maar dan door de natuurkundigen Wentzel, Kramers, en Brillouin, waarvan de naam WKB komt. Het blijkt dat Wentzel, Kramers en Brillouin het werk van Jeffreys niet kenden, waardoor het werk van Jeffreys vaak niet erkend wordt.

In de eerste jaren van de ontwikkeling van de kwantummechanica werden, in plaats van "WKB", diverse afkortingen door elkaar gebruikt, zoals WBK, BWK, WKBJ en BWKJ.

Afleiding

De Schrödingervergelijking

De ééndimensionale, tijdsafhankelijke Schrödingervergelijking is

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \Psi(x) + V(x)\Psi(x) = E\Psi(x)$$

of

$$\frac{d^2}{dx^2} \Psi(x) = \frac{2m}{\hbar^2} (V(x) - E) \Psi(x)$$

De golf functie kan geschreven worden als exponentiële functie, met argument Φ

$$\Psi(x) = e^{\Phi(x)}$$

en dus

$$\Phi''(x) + [\Phi'(x)]^2 = \frac{2m}{\hbar^2} (V(x) - E).$$

De afgeleide $\Phi'(x)$ kan afzonderlijk geschreven worden als reële en imaginaire delen door het gebruik van de reële functies A and B :

$$\Phi'(x) = A(x) + iB(x)$$

Reële en imaginaire delen

De golffunctieamplitude is dus $e^{A(x)}$, de fase is $B(x)$. De Schrödingervergelijking wordt

$$A'(x) + A(x)^2 - B(x)^2 = \frac{2m}{\hbar^2} (V(x) - E)$$

De rechter kant van de differentiaalvergelijking voor Φ is reëel, en dus

$$B'(x) + 2A(x)B(x) = 0.$$

Als volgende stap wordt de semiklassieke benadering gebruikt. Dit betekent dat elke functie als een machtreeks in \hbar geschreven wordt. Om de reële delen te kunnen vergelijken, moet men de machtreeks ten minste met graad min 1 (orde \hbar^{-1}) laten beginnen.

Om een goede klassieke limiet te kunnen bereiken is het nodig met een zo hoog mogelijk orde van de constante van Planck te beginnen

$$A(x) = \frac{1}{\hbar} \sum_{n=0}^{\infty} \hbar^n A_n(x)$$

$$B(x) = \frac{1}{\hbar} \sum_{n=0}^{\infty} \hbar^n B_n(x).$$

Tot de eerste orde kunnen de voorwaarden op A en B als

$$A_0(x)^2 - B_0(x)^2 = 2m(V(x) - E)$$

en

$$A_0(x)B_0(x) = 0$$

geschreven worden.

De golffunctie

Als de amplitude voldoende langzaam verandert in vergelijking met de fase ($A_0(x) = 0$) dan volgt:

$$B_0(x) = \pm \sqrt{2m(E - V(x))},$$

wat alleen geldt als de totale energie groter is dan de potentiële energie, zoals bijna altijd is het geval voor klassieke beweging. Na dezelfde procedure op de volgende orde volgt het dat

$$\Psi(x) \approx C_0 \frac{e^{i \int dx \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(E - V(x))} + \theta}}{\sqrt[4]{\frac{2m}{\hbar^2}(E - V(x))}}$$

Als het de fase is die langzaam varieert (in vergelijking met de amplitude) ($B_0(x) = 0$) volgt dat

$$A_0(x) = \pm \sqrt{2m(V(x) - E)},$$

wat alleen geldt als de potentiële energie groter is dan de totale energie (het regime van het tunneleffect). De volgende orde geeft:

$$\Psi(x) \approx \frac{C_+ e^{+\int dx \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(V(x) - E)}} + C_- e^{-\int dx \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(V(x) - E)}}}{\sqrt[4]{\frac{2m}{\hbar^2}(V(x) - E)}}$$

Globale benadering en Besselfuncties

Het blijkt uit de noemer dat die twee benaderingen in de regio van het klassieke stationaire punt niet toegepast kunnen worden, want daar geldt $E = V(x)$. Deze benaderingen gelden ver van de potentiële heuvel en ook daar beneden. Ver van de heuvel lijkt het deeltje als een vrije golf (namelijk, de fase oscilleert). Beneden de potentiële heuvel varieert de amplitude van het deeltje als een exponentiële functie.

Om een globale benadering te kunnen vinden moeten we overal lokale benaderingen kunnen vinden, dus ook in het gebied van de klassieke stationaire punten waar $E = V(x)$.

Voor een stationair punt x_1 en dichtbij $E = V(x_1)$, $\frac{2m}{\hbar^2}(V(x) - E)$ mag geëxpandeerd worden als machtreeks.

$$\frac{2m}{\hbar^2}(V(x) - E) = U_1(x - x_1) + U_2(x - x_1)^2 + \dots$$

Een eerste-orde-benadering wordt gevonden als:

$$\frac{d^2}{dx^2}\Psi(x) = U_1(x - x_1)\Psi(x).$$

Deze differentiaalvergelijking staat bekend als de vergelijking van Airy. Zijn oplossing kan in termen van Airyfuncties geschreven worden (een Airyfunctie is een bepaalde soort Besselfunctie). Het kan getransformeerd worden in een Besselse differentiaalvergelijking met fractionele orde, met oplossing:

$$\Psi(x) = \sqrt{x - x_1} \left(C_{+\frac{1}{3}} J_{+\frac{1}{3}} \left(\frac{2}{3} \sqrt{U_1} (x - x_1)^{\frac{1}{3}} \right) + C_{-\frac{1}{3}} J_{-\frac{1}{3}} \left(\frac{2}{3} \sqrt{U_1} (x - x_1)^{\frac{1}{3}} \right) \right)$$

Met deze oplossing kan men een verbinding maken tussen de ver- en dichtbij-oplossingen. Gegeven de twee coëfficiënten aan één kant van het klassieke stationaire punt, kunnen de twee aan de andere kant berekend worden. Daardoor wordt een relatie tussen C_0 , θ en C_+ , C_- gevonden.

Gelukkig worden de Airy- of Bessel-functieoplossingen asymptotisch sinus-, cosinus- en exponentiële functies in de juiste limieten. De relaties kunnen als volgt worden gevonden (deze worden vaak "verbindingsformules" genoemd):

$$C_+ = \frac{1}{2} C_0 \cos \left(\theta - \frac{\pi}{4} \right)$$

$$C_- = -\frac{1}{2} C_0 \sin \left(\theta - \frac{\pi}{4} \right)$$

Nu kunnen de globale benaderingen geconstrueerd worden.

Referenties

- Razavy, Moshen. *Quantum Theory of Tunneling*, World Scientific. ISBN 981-238-019-1, 2003
- Griffiths, David J.. *Introduction to Quantum Mechanics (2nd ed.)*, Prentice Hall. ISBN 0-13-111892-7, 2004
- Liboff, Richard L.. *Introductory Quantum Mechanics (4th ed.)*, Addison-Wesley. ISBN 0-8053-8714-5, 2003
- Sakurai, J. J.. *Modern Quantum Mechanics*, Addison-Wesley. ISBN 0-201-53929-2, 1993

Externe links

- Richard Fitzpatrick, *The W.K.B. Approximation* ^[1] (2002). (een toepassing van de WKB-benadering voor de verstrooiing van radiogolven.)

Referenties

[1] <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/jk1/lectures/node70.html>

Wereldkristal

Het **wereldkristal** is een alternatief theoretisch model dat het universum beschrijft, dat uitgaat van het feit dat kristallen met defecten dezelfde niet-euclidische geometrie hebben als gekromde ruimten en torsievelden zoals die zijn beschreven in de Einstein-Cartanzwaartekrachttheorie (in overeenstemming met Einsteins relativiteitstheorie). Dit model illustreert dat de wereld op de schaal van de Plancklengte heel andere eigenschappen zou kunnen hebben dan voorspeld door de snaartheoretici.

Het wereldkristal wordt ook wel *Planck-Kleinertkristal* genoemd (zie referenties onder Literatuur). In dit model creëert massa defecten in de ruimtetijd, welke op hun beurt effecten zoals o.a. kromming veroorzaken.

Bronnen, noten en/of referenties

- Hagen Kleinert, *Gravity as Theory of Defects in a Crystal with Only Second-Gradient Elasticity*, Annalen der Physik, Bd.44, 1987, S.117 (online here ^[1]).
- Hagen Kleinert and Jan Zaanen, *World nematic crystal model of gravity explaining the absence of torsion*, Physics Letters A 324, 2004, S.361 (online here ^[2])
- Hagen Kleinert, *Multivalued Fields in in Condensed Matter, Electrodynamics, and Gravitation*, World Scientific (Singapore, 2008) ^[3] (online here ^[4]). See Chapter 12.
- Marek Danielewski: *Defects and diffusion in the Planck-Kleinert Crystal: The matter, gravity and electromagnetism*, 2005 (online here ^[5]).
- Gerardus 't Hooft, *Crystalline Gravity*, Erice Lectures ^[6] 2008 and 3rd Stueckelberg Workshop ^[7] at ICRA Net Center ^[8], Pescara 2008.

Referenties

[1] <http://www.physik.fu-berlin.de/~kleinert/172/172.pdf>

[2] <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0307033>

[3] <http://www.worldscibooks.com/physics/6742.html>

[4] <http://www.physik.fu-berlin.de/~kleinert/re.html#B9>

[5] <http://ceram.agh.edu.pl/~icmmagh/artykuly/237%20PLANCK%20CRYSTAL%20DSL%20final.pdf>

[6] http://www.csem.infn.it/ef/emfcsc2008/pdf/Poster_ISSP2008.pdf

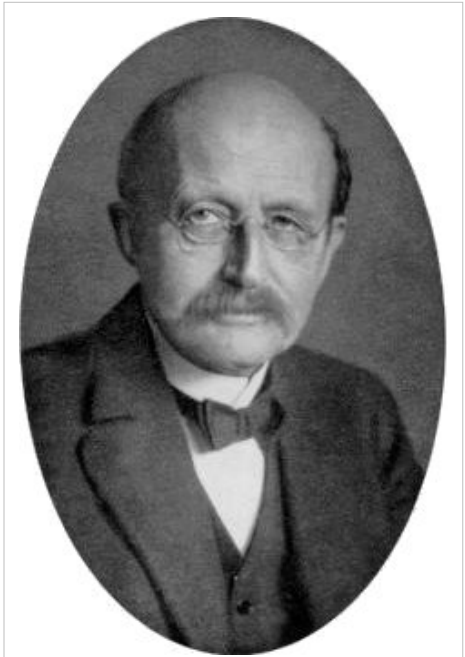
[7] http://www.icra.it/ICRA_Networkshops/INW25_Stueckelberg3/Welcome.htm

[8] <http://www.icranet.org/>

Wet van Planck

De **wet van Planck**, ook wel **stralingswet van Planck** genoemd, beschrijft de intensiteitsverdeling van de straling respectievelijk de dichtheidsverdeling van de fotonen, als functie van de golflengte respectievelijk van de frequentie, van de door een zwarte straler – een ideale stralingsbron – bij een bepaalde temperatuur uitgestraalde elektromagnetische golven.

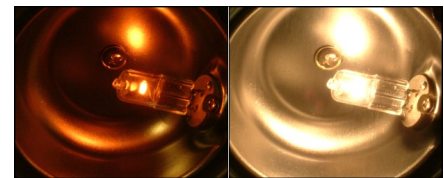
Toen Max Planck in 1900 de stralingswet afleidde, bleek dat een beschrijving vanuit de klassieke natuurkunde niet mogelijk is.^[1] Het bleek nodig, een nieuw postulaat in te voeren, dat stelt dat energie-uitwisseling tussen oscillatoren en het elektromagnetische veld niet continu, maar in de vorm van kleine energiepakketjes (later *kwanta* of *kwanten* genoemd) plaatsvindt. Plancks afleiding van de stralingswet wordt wel gezien als de geboorte van de kwantummechanica en wordt gerekend tot de "oude" kwantumtheorie.



Max Planck, naamgever van de Wet van Planck.

Achtergrond en betekenis

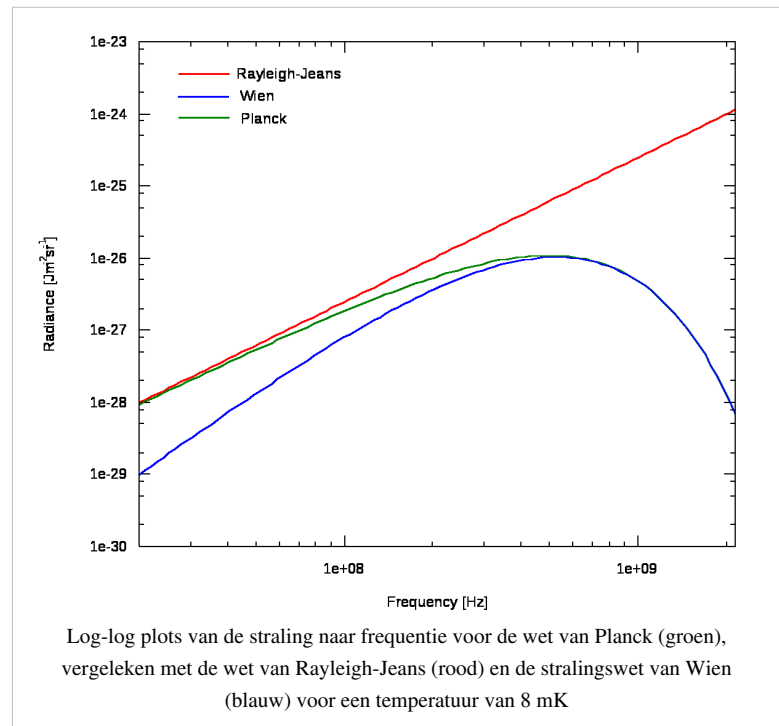
Volgens de stralingswet van Kirchhoff zijn voor ieder lichaam en voor iedere golflengte het absorptievermogen en het emissievermogen voor warmtestraling onderling evenredig. Een zwart lichaam is een hypothetisch lichaam dat invallende straling bij elke golflengte en intensiteit volledig absorbeert. Daar zijn absorptievermogen voor iedere golflengte de maximale waarde heeft, zal ook zijn emissievermogen bij elke golflengte de maximale waarde hebben. Een reëel lichaam kan bij geen enkele golflengte meer straling uitzenden dan een zwart lichaam, zodat deze laatste als model voor een ideale stralingsbron geldt. Daar het spectrum van het zwarte lichaam van geen enkele andere parameter dan de temperatuur – in het bijzonder niet van de materiaaleigenschappen – afhangt, is het een voor talloze doeleinden nuttige *referentiebron*.



Een gloeispiraal straalt bij ca. 700 °C rood licht uit, en oranje-geel bij 2500 °C.

Naast de grote praktische betekenis van het zwarte lichaam, geldt de ontdekking van stralingswet van Planck in 1900 tegelijk als de start van de kwantummechanica, aangezien Planck ter verklaring van zijn aanvankelijk slechts empirisch gevonden vergelijking moest aannemen dat licht – en elektromagnetische straling in het algemeen – niet continu maar alleen discreet in zogenaamde *kwanta* wordt opgenomen en afgegeven.

Verder combineerde de stralingswet van Planck wetmatigheden die reeds voor zijn ontdekking deels empirisch en deels op grond van thermodynamische beschouwingen waren gevonden:



- De wet van Stefan-Boltzmann, die zegt dat het uitgestraalde vermogen van een zwart lichaam evenredig is met de vierde macht van de temperatuur.
- De wet van Rayleigh-Jeans, die de spectrale energieverdeling bij lange golflengtes beschrijft.
- De stralingswet van Wien, die de spectrale energieverdeling bij korte golflengtes beschrijft.
- De verschuivingswet van Wien, in 1893 door Wilhelm Wien (1864-1928) geformuleerd, die het verband tussen het emissiemaximum van ene zwart lichaam en zijn temperatuur beschrijft.

Afleiding en geschiedenis

Als vereenvoudigd voorbeeld kan men uitgaan van een kubusvormige holle ruimte met ribbe L en volume L^3 , waarbinnen zich elektromagnetische straling in thermisch evenwicht bevindt. In deze evenwichtssituatie kunnen alleen staande golven optreden. De toegestane golven kunnen in willekeurige richtingen lopen, maar moeten daarbij wel voldoen aan de randvoorwaarde dat er tussen twee tegenover elkaar staande wanden steeds een geheel aantal halve golflengtes moet passen. Dit vanwege het feit dat er zich binnenin het wandmateriaal geen elektromagnetische golven kunnen bevinden, zodat op het oppervlak van de wanden de elektrische en magnetische veldsterkte nul moeten zijn. Op de wanden moeten de golven dus knopen hebben. Er zijn dus alleen bepaalde discrete trillingstoestanden toegestaan; de totale straling in de holle ruimte is dus samengesteld uit deze staande golven.

De toestandsdichtheid

Het aantal toegestane trillingstoestanden neemt bij hogere frequentie toe, omdat er voor golven met kortere golflengte meer mogelijkheden zijn om zich zo in de ruimte in te passen dat alle x -, y - en z -componenten op elk oppervlak een knoop hebben. Het aantal toegestane trillingstoestanden in het frequentie-interval tussen $\nu + d\nu$ en ν per volume-eenheid heet de *toestandsdichtheid* $g(\nu) d\nu$ en bedraagt

$$g(\nu)d\nu = \frac{8\pi}{c^3}\nu^2 d\nu$$

De ultravioletcatastrofe

Men kan elk van deze trillingstoestanden per frequentie-interval opvatten als een harmonische oscillator met frequentie ν . Als al deze oscillatoren in thermisch evenwicht bij een temperatuur T trillen, dan zou men volgens het equivalentieprincipe uit de klassieke thermodynamica verwachten dat elk van deze oscillatoren gemiddeld een kinetische energie $kT/2$ en een potentiële energie $kT/2$ heeft, dus in totaal kT . De energiedichtheid van de zwarte straling in het frequentie-interval tussen ν en $\nu + d\nu$ zou dus het product zijn van de toestandsdichtheid van de toegestane trillingstoestanden $g(\nu) d\nu$ en de gemiddelde energie per *klassieke* trillingstoestand $kT/2$, zodat

$$U_\nu^{RJ}(\nu, T)d\nu = \frac{8\pi}{c^3} kT\nu^2 d\nu.$$

Dit is de stralingswet van Rayleigh en Jeans. Deze geeft de gemeten energiedichtheid bij lage frequenties goed weer, maar voorspelt bij hogere frequenties een met toenemende frequentie kwadratisch stijgende energiedichtheid, zodat de holte over alle frequenties geïntegreerd een oneindig grote hoeveelheid energie zou moeten bevatten. Dit wordt wel de ultravioletcatastrofe genoemd.^[2] Het probleem is dat elke aanwezige trillingstoestand weliswaar gemiddeld *slechts* de energie kT bevat, maar dat er oneindig veel van dergelijke trillingstoestanden geëxciteerd zijn.

De empirische oplossing

Planck hanteerde bij het afleiden van zijn stralingswet niet de uitgangspunten van Rayleigh, maar ging uit van de entropie en voegde in de vergelijking proberenderwijs enkele termen toe die volgens de toenmalige natuurkundige inzichten weliswaar niet te begrijpen waren, maar er ook niet mee in tegenspraak waren. Heel eenvoudig was een extra term, die tot een formule leidde die de reeds gemeten spectra zeer goed beschreven (1900).^[3] Daarmee bleef deze formule zuivere empirie, maar hij beschreef de bekende meetresultaten over het gehele frequentiespectrum correct. Maar Planck was daarmee niet tevreden. Hij slaagde erin de stralingsconstanten C en c uit de formule van Wien te vervangen door natuurconstanten; er bleef alleen een factor h („help”) over.

De kwantumhypothese

Uitgaande van de verbeterde empirische stralingsformule, kwam Planck binnen enkele maanden tot een baanbrekend resultaat, dat het begin van de kwantummechanica zou worden: Hij moest, zelfs tegen zijn eigen overtuiging in, toegeven dat de energieafgifte niet continu plaatsvond, maar alleen in veelvouden van kleinste h -eenheden, die later naar hem de *constante van Planck* genoemd werd. Volgens deze door Planck ingevoerde kwantumhypothese kan een oscillator met frequentie ν niet willekeurige hoeveelheden energie opnemen of afgeven, maar alleen gehele veelvouden van de minimale energie $h\nu$. In het bijzonder heeft hij een minimale energie $h\nu$ nodig om überhaupt te worden geëxciteerd. Trillingstoestanden waarvan de minimale energie $h\nu$ duidelijk boven de thermisch beschikbare energie kT ligt, kunnen niet worden geëxciteerd, zij blijven *bevroren*. Trillingstoestanden waarvan de minimale energie $h\nu$ slechts weinig boven kT ligt, kunnen met een bepaalde waarschijnlijkheid worden geëxciteerd, zodat een zekere fractie van hen aan de totale energie in de holte bijdraagt. Alleen trillingstoestanden met een lage minimale energie $h\nu$, dus met lage frequentie, kunnen den aangeboden thermische energie volledig opnemen en worden (gemiddeld) met zekerheid geëxciteerd.

Gekwantiseerde trillingstoestanden

De statistische thermodynamica laat zien dat door toepassing van de kwantumhypothese en de Bose-Einsteinstatistiek een trillingstoestand met frequentie ν gemiddeld aan energie bevat:

$$E(\nu, T) = \frac{h\nu}{e^{(h\nu/kT)} - 1}$$

Deze relatie betekent dat hogerefrequente elektromagnetische trillingstoestanden, die volgens de meetkundige criteria in de holte kunnen bestaan, vanwege hun hoge excitatiedrempel niet door de beschikbare thermische energie kunnen worden geëxciteerd en daardoor niet aan de energiedichtheid in de holte kunnen bijdragen.

De stralingswet

Het product van de toestandsdichtheid van de toegestane trillingstoestanden $g(\nu) d(\nu)$ en de gemiddelde energie per gekwantiseerde trillingstoestand $E(\nu, T)$ levert de energiedichtheid volgens Planck:

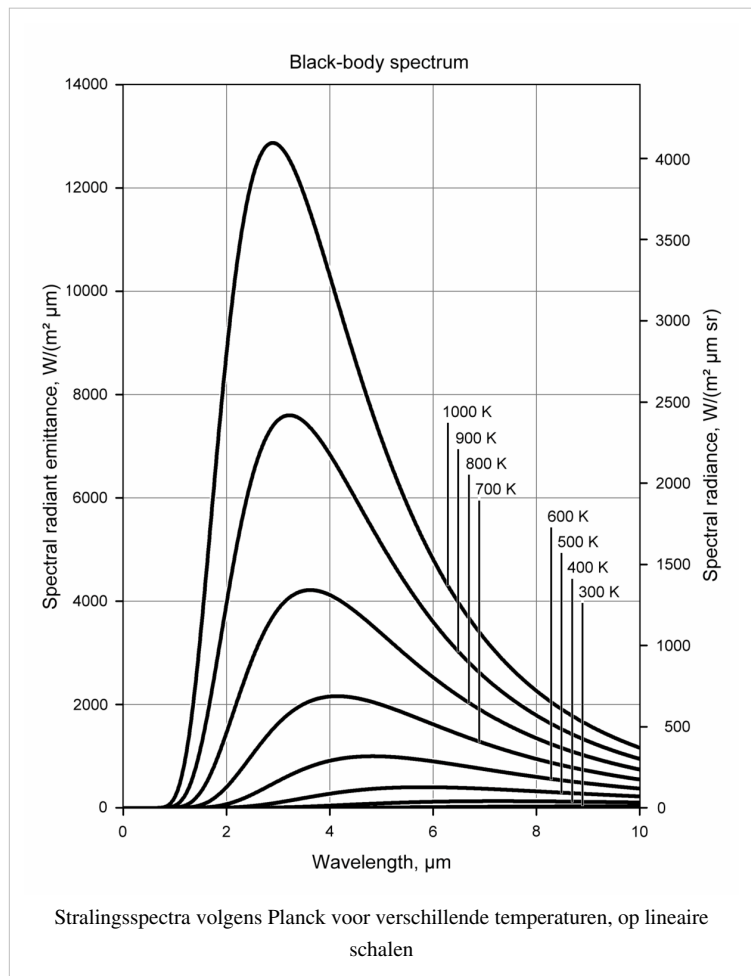
$$U_\nu^o(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{(h\nu/kT)} - 1}$$

Omdat de gemiddelde energie bij hoge frequenties sneller afneemt dan de toestandsdichtheid toeneemt, neemt de spectrale energiedichtheid – die immers hun product is – naar hogere frequenties weer af nadat hij een maximum heeft doorlopen, zodat de totale energie eindig blijft. Zo verklaarde Planck vanuit zijn kwantumhypothese waarom de op grond van de klassieke thermodynamica voorspelde ultravioletcatastrofe in werkelijkheid niet optreedt.

Belangrijke toepassingen van de stralingswet

De stralingswet van Planck wordt op verschillende manieren weergegeven, die grootheden voor intensiteiten, stroomdichtheden en spectrale verdelingen gebruiken die voor de te beschrijven situatie relevant zijn. Al deze verschillende vormen zijn slechts varianten van deze ene wet.

De eerste nevenstaande afbeelding toont de stralingsspectra volgens Planck voor temperaturen tussen 300 K en 1000 K op een lineaire schaal. Men herkent de typische klokvorm met een duidelijk maximum, een steile daling naar de korte golflengten en een langzame daling naar de langere golflengten. De ligging van het maximum verschuift bij toenemende temperatuur naar de kortere golflengtes, conform de verschuivingswet van Wien. Tegelijk neemt, volgens de wet van Stefan-Boltzmann, de totale uitstraling toe met de vierde macht van de temperatuur. Door deze sterke toename van de stralingsintensiteit bij stijgende temperatuur is het moeilijk, curves voor een groot temperatuurbereik in één diagram weer te geven.

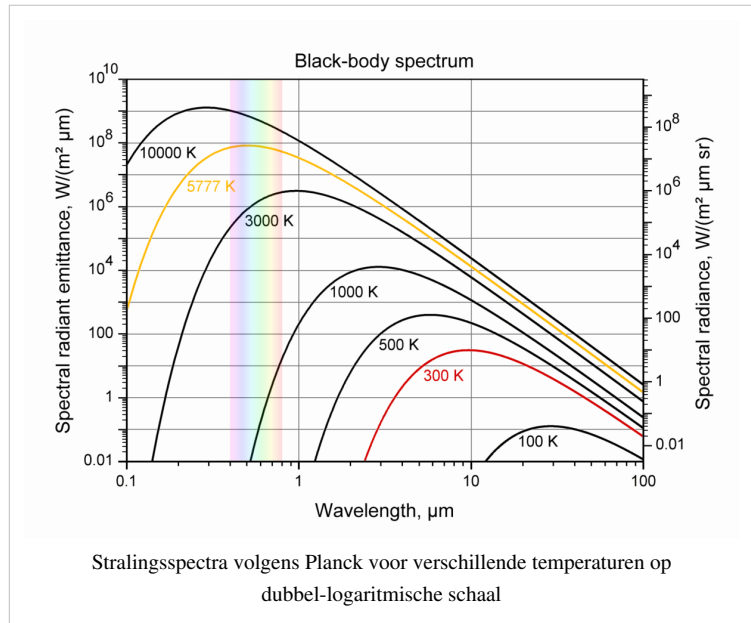


De tweede afbeelding heeft daarom langs beide assen een logaritmische schaal. Getoond worden de spectra voor temperaturen tussen 100 K en 10.000 K.

De curve voor 300 K is rood weergegeven; dit komt overeen met typische omgevingstemperaturen. Het maximum van deze curve ligt bij 10 μm; in dit golflengtegebied, het langgolvig infrarood, vindt dan ook de stralingsuitwisseling plaats van voorwerpen op kamertemperatuur. Typische infraroodthermometers en thermografiecamera's werken in dit gebied.

De curve voor 3000 K komt overeen met het typische stralingsspectrum van een gloeilamp. Hierbij wordt reeds een deel van de straling in het zichtbare deel van het spectrum uitgezonden. Het maximum ligt echter nog in het nabije infrarood.

Geel weergegeven is de curve voor 5777 K, de gemiddelde temperatuur van de zon. Het stralingsmaximum ligt nu midden in het zichtbare deel van het spectrum.



Veelgebruikte formules en eenheden

Voor de wiskundige voorstelling van de wet van Planck bestaan er talloze varianten, afhankelijk van de vraag of de wet als functie van de frequentie of van de golflengte moet worden geformuleerd, of de stralingsintensiteit in een bepaalde richting of de uitstraling in alle richtingen moet worden beschreven, of de stralingsgrootheden, energiedichtheden dan wel aantallen fotonen moeten worden beschreven.

Vaak gebruikt men de formule voor de *specifieke spectrale uitstraling* $M_\nu^\circ(\nu, T)$ van een zwart lichaam met absolute temperatuur T :

in frequentievorm:

$$M_\nu^\circ(\nu, T)dA d\nu = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{(h\nu/kT)} - 1} dA d\nu \quad (\text{SI-eenheid voor } M_\nu^\circ(\nu, T): \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1})$$

en in golflengteform:

$$M_\lambda^\circ(\lambda, T)dA d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{(hc/\lambda kT)} - 1} dA d\lambda \quad (\text{SI-eenheid voor } M_\lambda^\circ(\lambda, T): \text{ W m}^{-2} \text{ m}^{-1})$$

$M_\nu^\circ(\nu, T) dA d\nu$ is het stralingsvermogen dat door een oppervlakte-element dA in het frequentiebereik tussen ν en $\nu + d\nu$ in de volledige halvebolruimte wordt uitgestraald. Verder is h de constante van Planck, c de lichtsnelheid en k de constante van Boltzmann.

Bij het omrekenen van de frequentievorm naar de golflengteform en terug dient er rekening mee te worden gehouden dat vanwege

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

geldt

$$|d\lambda| = \frac{c}{\nu^2} |d\nu| \quad \text{en} \quad |d\nu| = \frac{c}{\lambda^2} |d\lambda|.$$

zie ook

- Max Planck

Noten

- [1] M. Planck: *Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum*, Verhandlungen der Deutschen physikalischen Gesellschaft 2 (1900) Nr. 17, p. 245; Berlijn, 14 december 1900) (Engelse vertaling) (<http://dbserv.ihep.su/~elan/src/planck00b/eng.pdf>)
- [2] In tegenstelling tot wat vaak wordt beweerd, hebben de wet van Rayleigh-Jeans en de ultravioletcatastrofe geen rol gespeeld bij Plancks ontdekking van zijn stralingswet. De fysisch onzinnige divergentie van de wet van Rayleigh-Jeans bij hoge stralingsfrequenties werd voor het eerst in januari 1905 onafhankelijk van elkaar door Einstein, Rayleigh en Jeans beschreven. Het begrip *ultravioletcatastrofe* werd voor het eerst in 1911 gebruikt door Paul Ehrenfest (Ehrenfest, P: “*Welche Züge der Lichtquantenhypothese spielen in der Theorie der Wärmestrahlung eine wesentliche Rolle?*” *Annalen der Physik*, vol. 341, issue 11 (1911), 91–118.
- [3] Giuliani, D en N. Straumann, N.: „... *ich dachte mir nicht viel dabei ...*” *Plancks ungerader Weg zur Strahlungsformel*, Oktober 2000 arXiv:quant-ph/0010008 (http://arxiv.org/PS_cache/quant-ph/pdf/0010/0010008v1.pdf)

Externe links



Wikibooks heeft een studieboek over dit onderwerp: *Formelsammlung plancksches Strahlungsgesetz (de)* .

- (de) Stralingsformule van Planck (<http://www.mikomma.de/planck/planck1.html>)
- (de) Over de geschiedenis van de ontdekking van de stralingswetten (<http://www.ing-buero-ebel.de/strahlung/index.htm>)

Deeltje

Deeltje

Een **deeltje** is een kleine hoeveelheid materie. De benaming wordt zowel voor ondeelbare (elementaire) deeltjes als voor systemen van meerdere deeltjes gebruikt. Enkele typen deeltjes, van groot naar klein:

- Stofdeeltjes zijn maximaal 500 micrometer (0,5 mm) in diameter. Huisstof bestaat uit een mengsel van huidcellen, textielvezeltjes en stof van buiten.
 - Roetdeeltjes zijn maximaal 5 micrometer. Ze bestaan voornamelijk uit koolstof en ontstaan bij onvolledige verbranding.
 - Rookdeeltjes zijn 0,01 tot 1 micrometer in diameter. Het zijn verbrandingsproducten die als aerosol in de lucht hangen. Hoewel een rookdeeltje niet met het blote oog zichtbaar is, bestaat het toch nog uit ongeveer een miljard atomen.
 - Moleculen zijn de kleinste hoeveelheden van stoffen: als een molecuul verder opgedeeld wordt, is het niet meer van die stof (een watermolecuul dat wordt gesplitst, is geen water meer). Een molecuul bestaat uit twee of meer atomen, die aan elkaar gebonden zijn doordat enkele van hun elektronen in een gezamenlijke toestand verkeren. Het kleinste molecuul is waterstof (H_2) met een lengte van 1,5 ångström ($1,5 \times 10^{-10}$ m ofwel 150 miljoenste micrometer). De meeste moleculen zijn een paar tot enkele tientallen ångström in doorsnee. Een DNA-molecuul is in zijn opgerolde vorm als chromosoom 0,2 tot 20 micrometer lang. Er is in principe geen limiet aan de grootte van een molecuul. Zo is een diamant bijvoorbeeld 1 molecuul. De Cullinan, de grootste gevonden diamant van 621,2 gram, is dus een molecuul van $3,12 \times 10^{25}$ koolstofatomen. Ook ver gecrosslinkte plastics kunnen als een molecuul worden opgevat.
 - Atomen zijn de bouwstenen van moleculen. Het kleinste atoom is het heliumatoom (He) met een middellijn van 0,6 ångström, het grootste is francium (Fr) met een doorsnee van 5,4 ångström. Een atoom bestaat uit een kern met positieve lading, waar een of meer elektronen omheen bewegen.
 - De atoomkern is het binnenste deel van een atoom. Hij is positief geladen; de lading bepaalt met welk atoom we te maken hebben. Een atoomkern is ongeveer 10^{-14} m (10 femtometer ofwel een-tienduizendste ångström) groot.
 - Subatomaire deeltjes zijn kleiner dan het atoom en de atoomkern. Sommige zijn elementair (ondeelbaar), andere bestaan uit een aantal elementaire deeltjes tezamen. Ze zijn minder dan 1 femtometer (10^{-15} m) in middellijn. Er zijn er meer dan 250 experimenteel waargenomen; het proton, het neutron en het foton zijn enkele voorbeelden.
 - Elementaire deeltjes zijn niet verder op te delen. Volgens de huidige inzichten, vervat in het standaardmodel, zijn bijvoorbeeld elektronen, fotonen en quarks elementaire deeltjes. De deeltjes zijn zeer klein, en van sommige elementaire deeltjes is niet met zekerheid te zeggen of ze wel ruimte innemen – het zouden ook puntdeeltjes kunnen zijn. Volgens de onbevestigde snaartheorie zijn elementaire deeltjes ten minste 10^{-35} m groot.
-

Deeltjesfysica

De **deeltjesfysica** is een tak van de natuurkunde of fysica die subatomaire deeltjes bestudeert waaruit alle materie en straling bestaat. Ook de interacties tussen deze deeltjes zijn onderwerp van onderzoek. Het vakgebied wordt ook wel **hoge-energiefysica** genoemd, omdat veel van de bestudeerde deeltjes onder gewone omstandigheden niet in de natuur voorkomen; ze kunnen wel worden voortgebracht en gedetecteerd na hoogenenergetische botsingen met andere deeltjes. Dit onderzoek vindt plaats in deeltjesversnellers, zoals de nieuwe Large Hadron Collider, op de grens van Frankrijk en Zwitserland, die inmiddels in september 2008 door het CERN in gebruik is genomen.

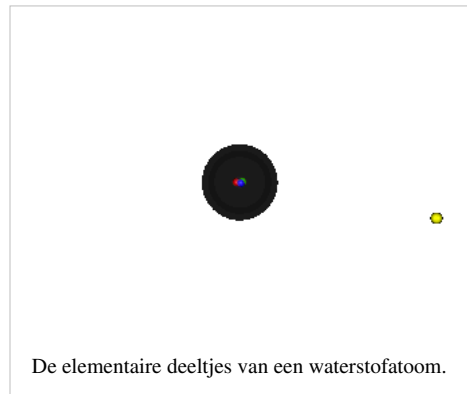


De installatie van de Large Hadron Collider van het CERN.

Subatomaire deeltjes

De moderne deeltjesfysica houdt zich bezig met de deeltjes die zich binnen een atoom bevinden, en die minder structuur bezitten dan het atoom zelf. Dit zijn bijvoorbeeld de deeltjes die samen een atoom maken, zoals elektronen, protonen en neutronen. De laatste twee zijn deeltjes die samengesteld zijn uit quarks. De andere deeltjes die bestudeerd worden zijn afkomstig van stralings- en verstrooiingsprocessen, zoals fotonen, neutrino's en muonen. Daarbuiten bestaan nog een groot aantal exotische deeltjes.

De term *deeltje* is eigenlijk een verkeerd woord. De objecten die door de deeltjesfysica worden bestudeerd gedragen zich volgens de wetten van de kwantummechanica, en vertonen daarom een dualiteit. In sommige experimenten gedragen zij zich als golven, maar in andere als deeltjes (kleine biljartballen). Volgens de theoretische beschrijvingen zijn het echter noch deeltjes, noch golven, maar slechts een wiskundige formulering van een kwantumtoestand in een abstracte Hilbertruimte. In het navolgende wordt wel over deeltjes gesproken, maar men dient daarbij in het achterhoofd te houden dat deze deeltjes ook een golfkarakter kunnen manifesteren.



De elementaire deeltjes van een waterstofatoom.

Standaardmodel

Alle deeltjes die tot nu zijn geobserveerd hebben een plaats gekregen in het standaardmodel, dat vaak wordt beoordeeld als de beste prestatie van de deeltjesfysica. Het model kent 47 soorten elementaire deeltjes. Sommigen daarvan kunnen zich met elkaar combineren om samengestelde deeltjes te vormen. Deze verklaren de honderden andere deeltjessoorten die sinds de jaren zestig van de twintigste eeuw zijn ontdekt. Het standaardmodel blijkt in overeenstemming te zijn met bijna alle experimenten die zijn uitgevoerd. Echter, de meeste deeltjesfysici geloven dat het model een incomplete beschrijving is van de natuur, en dat een meer fundamentele theorie nog op ontdekking wacht. Recentelijk hebben metingen aan de massa van het neutrino de eerste afwijkingen van het standaardmodel aangetoond.

Het standaardmodel beschrijft de sterke, zwakke en de elektromagnetische krachten, waarbij de krachten worden overgebracht via bosonen. De betreffende bosonen zijn het foton, het gluon, het Z-boson en het W-boson. Het model kent ook $2 \times 12 = 24$ fundamentele fermiondeeltjes: drie generaties van quarks en leptonen en hun antideeltjes, die de samenstellende delen van alle materie zijn. Tenslotte voorspelt het model het Higgs boson vermoedelijk ontdekt in 2012 en het graviton, waarvan het bestaan nog niet experimenteel is aangetoond.

Three generations of matter (fermions)				
	I	II	III	
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge	2/3	2/3	2/3	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	-1/3	-1/3	-1/3	0
	1/2	1/2	1/2	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	1/2	1/2	1/2	1
	ν _e electron neutrino	ν _μ muon neutrino	ν _τ tau neutrino	Z ⁰ Z boson
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	±1
	1/2	1/2	1/2	1
	e electron	μ muon	τ tau	W [±] W boson

Gauge bosons

De deeltjes van het standaardmodel.

Geschiedenis van de deeltjesfysica

Het idee dat de materie uit elementaire deeltjes bestaat dateert uit de 6e eeuw voor Christus. Het atomisme werd bestudeerd door hellenistische filosofen zoals Leucippus, Democritus en Epicurus. Hoewel Isaac Newton in de 17e eeuw ook al dacht dat materie uit deeltjes moest bestaan, duurde het tot 1802 dat John Dalton formeel poneerde dat alle materie uit kleine atomen zou bestaan. *Atoom* is een Grieks woord, dat *niet deelbaar* betekent. Later bleek dat de atomen uit nog kleinere deeltjes bestaan.

Het eerste periodiek systeem, opgesteld in 1869 door Dmitri Mendelejev hielp het idee van het bestaan van atoom hecht te vestigen. J.J. Thomson stelde vast dat de atomen bestonden uit lichte elektronen, en zwaardere protonen. Ernest Rutherford stelde vast dat de protonen zich in een compacte atoomkern bevinden. Oorspronkelijk werd gedacht dat deze kern bestond uit protonen en gevangen elektronen. Deze theorie was nodig om het verschil te verklaren tussen de kernlading en het atomaire massagetal. Later bleek de atoomkern echter uit protonen en de elektrisch neutrale neutronen te bestaan.

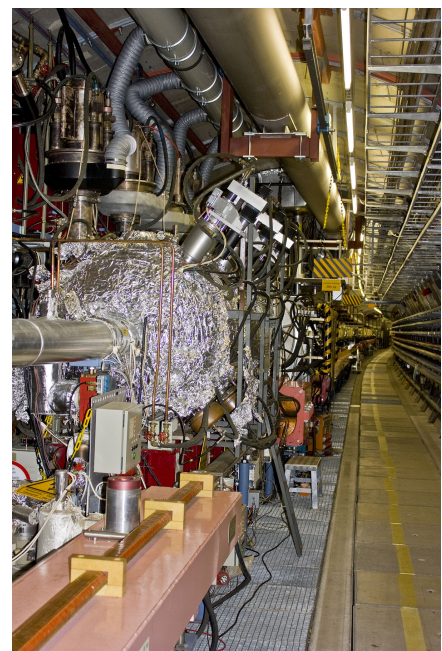
Verkennde kernfysische onderzoeken in de 20e eeuw toonden aan dat transmutatie van elementen mogelijk was, onder meer door kernsplijting en kernfusie, wat doet denken aan het ideaal uit de alchemie om goud uit lood te maken. Deze natuurkunde leidde uiteindelijk tot de productie van kernwapens en kernreactoren, maar ook tot de productie van radio-isotopen met behulp van kernreactoren of deeltjesversnellers.

In de jaren 50 en 60 van de twintigste eeuw, werd een enorm groot aantal deeltjes gevonden in botsingsexperimenten. Deze *deeltjesdierentuin* werd ingetoomd met het formuleren van het standaardmodel in de jaren zeventig, waarmee met name de veelheid aan hadronen kon worden verklaard door ze te zien als uit quarks samengestelde deeltjes.

Experimentele deeltjesfysica

Onderzoek naar deeltjesfysica is niet mogelijk in een eenvoudig en kleinschalig laboratorium. Er zijn grote internationale organisaties opgezet waarin onderzoekers samenwerken en gebruikmaken van de kostbare machines. De belangrijkste daarvan zijn:

- CERN, op de Frans-Zwitserse grens bij Genève. De voornaamste faciliteiten zijn de LEP (Large Electron Positron collider waarin elektronen en positronen tegen elkaar werden geschoten; deze is inmiddels ontmanteld) en de Large Hadron Collider (LHC), waarin protonen worden afgeschoten.
- DESY in Hamburg, Duitsland. Dit instituut bevat HERA, waar elektronen of positronen tegen protonen worden geschoten.
- SLAC bij Palo Alto. Hier staat PEP-II, waar elektronen en positronen met elkaar botsen.
- Fermilab bij Chicago. Hier staat het Tevatron waar protonen en antiprotonen tegen elkaar in vliegen.
- Brookhaven National Laboratory op Long Island in de USA. Hier staat de Relativistic Heavy Ion Collider, waar zware ionen zoals goud botsen met protonen.
- Het Budker Institute of Nuclear Physics te Novosibirsk in Rusland
- De High Energy Accelerator Research Organization van Japan in Tsukuba. Hier vindt een experiment K2K plaats aan de oscillatie van neutrinos en een experiment genaamd Belle, dat de asymmetrie bepaalt van het B-meson.

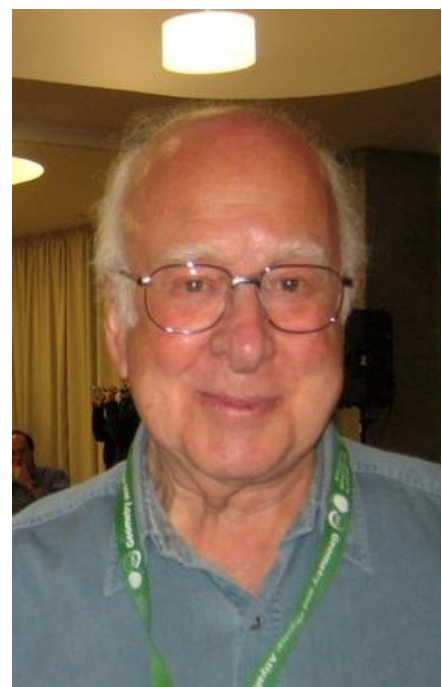


DESY in Hamburg

Theoretische deeltjesfysica

Naast de experimentele deeltjesfysica wordt ook theoretisch onderzoek verricht. Het doel daarvan is met name om theoretische en wiskundige hulpmiddelen te ontwikkelen waarmee de fysische fenomenen in de verre toekomst wellicht beschreven kunnen worden. Het doel om de huidige experimenten te kunnen begrijpen is secundair. De meeste theoretici werken aan het raamwerk van de snaartheorie.

Anderen houden zich wel bezig met het ontwikkelen van een beschrijving van de experimentele resultaten. Deze worden aangeduid met *fenomenologen*, of *modelbouwers*. Zij worden soms geïnspireerd door de snaartheorie, maar hun belangrijkste wiskundige formuleringen worden gevonden in de effectieve-veldentheorie. Zij bestuderen onder andere een fenomeen als supersymmetrie, het Higgsmechanisme, het Randall-Sundrummodel en andere modellen met meerdere dimensies.



Peter Higgs

De toekomst van de deeltjesfysica

Deeltjesfysici zijn het internationaal eens over de belangrijkste doelstellingen van het toekomstige onderzoek in de fysica. In de eerste plaats kijkt men uit naar de zoektocht naar het Higgs boson en supersymmetrische deeltjes in de LHC. Een tussendoel is de constructie van de International Linear Collider ILC. Een besluit over de te gebruiken technologie in dit instrument is genomen in augustus 2004, maar men is het nog niet eens over de locatie. De ILC zou de LHC moeten aanvullen. Terwijl de LHC vooral nieuwe deeltjes zou moeten ontdekken, kunnen met de ILC de exacte eigenschappen van die deeltjes worden bepaald.

Andere belangrijke doelstellingen in de deeltjesfysica zijn de bepaling van de massa van het neutrino en een verhelderend inzicht in het bètaverval van het proton. Voor deze metingen zijn echter geen grote botsingsexperimenten nodig.

Literatuur

- Gerard 't Hooft: De bouwstenen van de schepping - een zoektocht naar het allerkleinste
- Martinus Veltman: Feiten en mysteries in de deeltjesfysica

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Antimuon

Een **antimuon** is het antideeltje van een muon.

Een antimuon is dus een elementair deeltje of subatomair deeltje, meer bepaald een lepton. Het heeft spin $1/2$ en is dus een fermion. Het heeft precies dezelfde eigenschappen als het muon, maar dan gespiegeld. De twee zijn dus antimaterie en materie en annihileren elkaar dus als ze elkaar ontmoeten. Het antimuon (2e generatie) is een neef van het positron (1e generatie, eerst ontdekt, lichtst, meest stabiel) en het antitau (3e generatie, laatst ontdekt, zwaarst, minst stabiel). Zie het standaardmodel voor meer gegevens.

Antineutrino

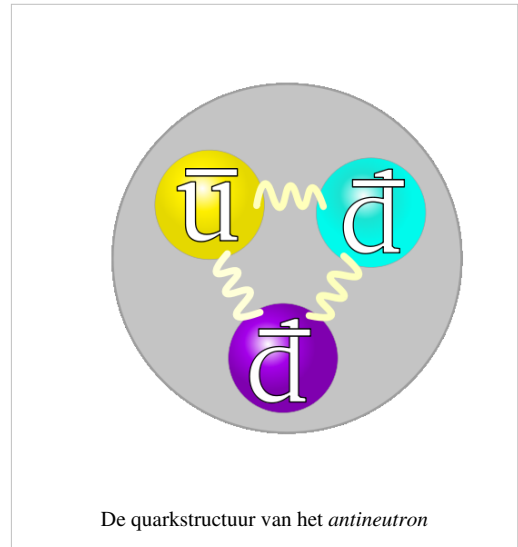
Een **antineutrino** is het antideeltje van een neutrino. Antineutrino's komen vrij bij bètaverval van een neutron. Er bestaan drie antineutrino's: het elektron-antineutrino, het muon-antineutrino en het tau-antineutrino. Antineutrino's die vrijkomen door de natuurlijke radioactieve processen die zich in de Aarde afspelen worden **geoneutrino's** genoemd.

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Antineutron

Een **antineutron** is het antideeltje van het neutron. Het antineutron werd in 1956 ontdekt door de Amerikaanse natuurkundige Bruce Cork met de deeltjesversneller in het *Lawrence Berkeley National Laboratory* van de Universiteit van Californië - Berkeley.

Het antineutron heeft dezelfde massa en spin als de neutron, maar met een Baryongetal van -1 in plaats van +1. Een normaal neutron is opgebouwd uit 2 down-quarks en 1 up-quark, maar het antineutron is opgebouwd uit antideeltjes, dus 2 anti-down-quarks en 1 anti-up-quark. Een antineutron vervalt tot een antiproton en een positron, terwijl een neutron tot een proton en een elektron vervalt.

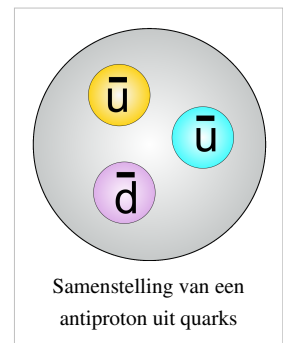


Antiproton

Een **antiproton** is het antideeltje van het proton. Dit is hetzelfde deeltje, maar met de omgekeerde lading. Ook de massa van het antiproton is anders dan die van het proton. Het proton heeft een lading van +1, dus het antiproton van -1. Een normaal proton is opgebouwd uit 2 up-quarks en 1 down-quark, maar het antiproton is opgebouwd uit hun antivarianten.

Ontstaan

Antiprotonen worden gemaakt in deeltjesversnellers, de hoogste productie gebeurt in de deeltjesversneller van het CERN. Er worden protonen afgeschoten met zeer hoge snelheid op een plaat van iridium. Hieruit ontstaan dan antiprotonen die wegschieten van de plaat met een snelheid die de snelheid van het licht benadert. Om verdere studie te doen, worden de antiprotonen afgeremd in magnetische velden die miljoenen malen per seconde wisselen van sterkte (de wisselingen van sterkte gebeuren door een wisseling van radiofrequentie). Nadat ze zijn afgeremd, worden ze gevangen in een speciale opslagring. Het CERN is erin geslaagd om enkele antiprotonen te vangen voor 57 dagen.



Botsingen

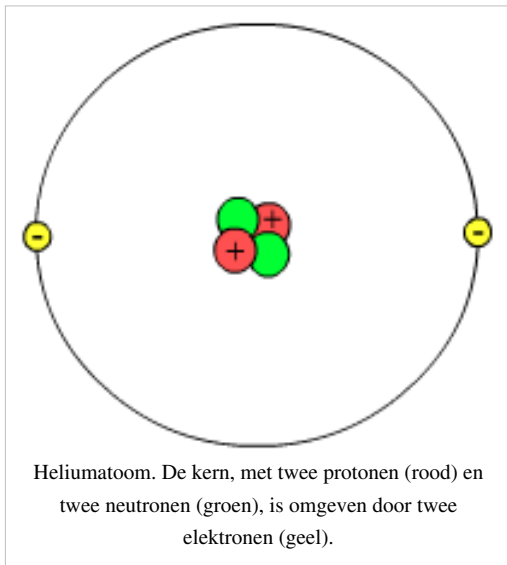
Botsen protonen en antiprotonen, dan komt er een heel grote hoeveelheid energie vrij en vernietigen ze elkaar. De energie is niet alleen de energie van de rustmassa ($E = mc^2$), maar er komt ook energie vrij die van de bewegingsenergie komt. Er is geen anti-energie, energie is de bouwstof voor zowel materie als antimaterie.

Antitau

Een **antitau**-lepton is het antideeltje van het tau-lepton.

Het antitau is dus een elementair deeltje of subatomair deeltje meer bepaald een fermion, lepton met precies dezelfde eigenschappen als het tau, maar dan gespiegeld. De twee zijn dus antimaterie en materie en vernietigen elkaar dus als ze elkaar ontmoeten. Het antitau is een neef van het positron en het antimuon. Zie het standaardmodel voor meer gegevens.

Atoom



Beluister

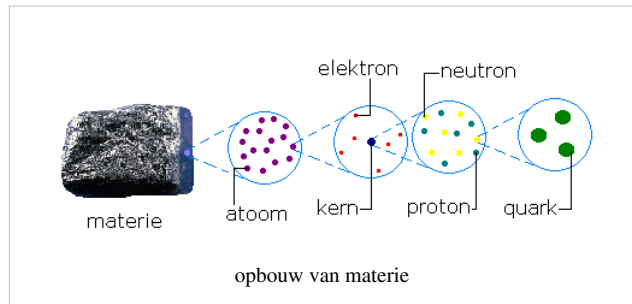
Een **atoom** is van ieder scheikundig element de kleinste nog als zodanig herkenbare bouwsteen. Er bestaan echter nog kleinere elementaire deeltjes waar de atomen weer uit bestaan, bijvoorbeeld quarks.

Vrijwel alle scheikundige en natuurkundige eigenschappen van de op aarde voorkomende materie zijn gekoppeld aan de eigenschappen van atomen. Het is daarom een sleutelbegrip in deze beide wetenschappen. De eigenschappen van atomen als geheel worden bestudeerd in de atoomfysica.

In bijvoorbeeld sterren, neutronensterren en zwarte gaten komt echter ook materie voor die niet uit atomen is opgebouwd. De studie van deze -vanuit aards perspectief bijzondere- vormen van materie is het terrein van de plasmafysica en de astrofysica.

Componenten van het atoom

Een atoom bestaat uit een uiterst kleine, positief geladen atoomkern die is opgebouwd uit protonen (het proton is positief geladen) en neutronen (neutraal geladen); met daaromheen een wolk van negatief geladen elektronen. De elektronenwolk blijft rondom de kern zitten door de elektrische aantrekking tussen de positief geladen kern en de negatief geladen elektronen, kernbinding genoemd. Een sterk vereenvoudigd model van een atoom (het zogenaamde planeetmodel van Hantaro Nagaoka) wordt weergegeven in de bovenstaande illustratie.



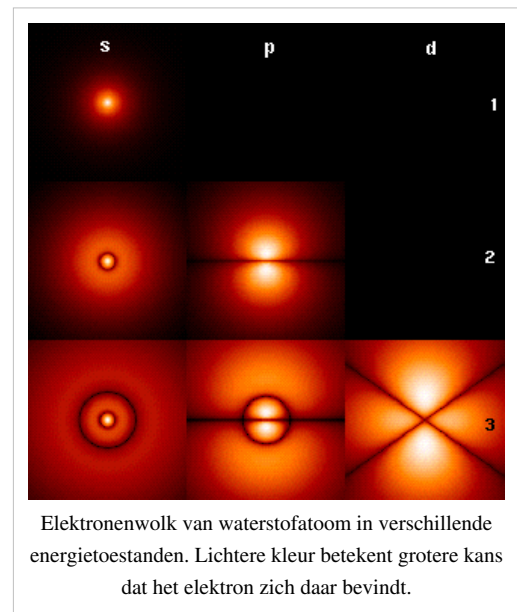
Een atoom is onvoorstelbaar klein – er gaan meer atomen in een glas water dan er glazen water in alle oceanen op aarde gaan.

De studie van de atoomkernen is het terrein van de kernfysica. Het is mogelijk de bouwstenen van de kern nog verder te splijten in nog kleinere subatomaire deeltjes. Dit is het terrein van de hoge-energiefysica.

De elektronenwolk

De grootte van een atoom wordt bepaald door de elektronenwolk. Afhankelijk van het atoomnummer varieert de straal van een atoom van circa 60 (helium) tot 275 (francium) pm. Sinds begin jaren 80 is dat groot genoeg om met behulp van atomic force microscopy (AFM) en scanning tunneling microscopy (STM) te visualiseren.

De elektronenwolk wordt het best beschreven als een kansverdeling, waarbij een elektron zich niet op een exact bepaalde plaats bevindt. Men kan slechts spreken van een bepaalde kans een elektron binnen een eindig volume aan te treffen. Elk elektron van het atoom heeft een andere kansverdeling, hetgeen beschreven wordt met de kwantummechanica. Deze kansverdelingen worden vaak "schillen" genoemd (de juiste naam voor de omgeving waarin het elektron zich kan bevinden is "orbitaal"), omdat de elektronen met de hoogste energie zich over het algemeen verder van de kern, in de "buitenste schil", zullen bevinden.



De elektronen in de "buitenste schil" bepalen vooral de scheikundige eigenschappen van de atomen. Sommige natuurkundige eigenschappen (bijvoorbeeld de geleiding van een stof) worden ook door de buitenelektronen bepaald. Andere natuurkundige eigenschappen hebben echter meer met de binnenelektronen te maken, zoals het opwekken van röntgenstraling.

De kern

Veel natuurkundige eigenschappen (bijvoorbeeld de massa of het radioactief gedrag van het atoom) hebben niets met de elektronen te maken, daar speelt juist de atoomkern met zijn protonen en neutronen een grote rol.

De kern is bijzonder klein: de diameter ligt tussen 1,6 en 15 femtometer, dat is ongeveer 20 000 keer zo klein als het atoom. Doordat elektronen in vergelijking met protonen en neutronen vrijwel geen massa hebben, bevindt vrijwel alle massa van een atoom zich in deze piepkleine kern. De protonen en neutronen worden bij elkaar gehouden door de sterke kernkracht. Het aantal protonen wordt het atoomnummer genoemd. Het bepaalt de chemische eigenschappen van het atoom. Het aantal neutronen is bijna altijd groter dan het aantal protonen. Atomen met een gelijk aantal protonen kunnen als gevolg van een verschillend aantal neutronen verschillen in massa. Ze worden isotopen genoemd. Deze isotopen zijn chemisch identiek, maar hun fysische eigenschappen kunnen verschillen.

Ionen

De elektromagnetische kracht houdt de elektronen rondom de kern. Bij een neutraal atoom is het aantal protonen gelijk aan het aantal elektronen. Wanneer een atoom een verschillend aantal protonen en elektronen bevat, en dus niet elektrisch neutraal is, spreekt men van een ion. Ionen met een tekort aan elektronen worden kationen genoemd; ionen met overschot aan elektronen worden anionen.

Een ion is in principe instabiel als het los voorkomt; het zal proberen een elektron uit de omgeving aan te trekken, of een elektron proberen los te laten. Ionen met gelijke lading stoten elkaar af. Met tegengestelde lading trekken zij elkaar aan. Men treft daarom altijd tegengestelde ionen bij elkaar in de buurt zodat gemiddeld gesproken de materie weer neutraal is (wet van behoud van lading).

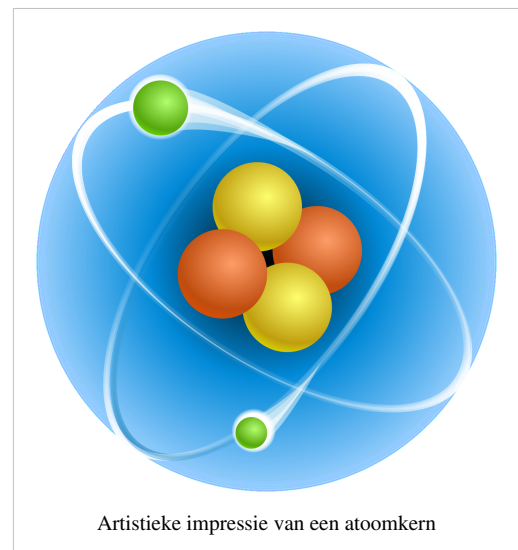
Ionen kunnen bij hoge temperaturen gevormd worden in een gas, men spreekt dan van een plasma. Bij lagere temperaturen worden ionen ook in oplossingen aangetroffen. Ionen van tegengestelde lading kunnen ook uit oplossing neerslaan en een vaste stof vormen die men uit ionen opgebouwd kan beschouwen. Deze stoffen noemt men zouten.

Elementen

Atomen kunnen onderscheiden worden naar het aantal protonen in de kern. Dit aantal heet het atoomnummer. Een stof die bestaat uit atomen met hetzelfde atoomnummer heet een element. Er zijn anno 2006 meer dan 118 verschillende elementen bekend, waarvan een aantal echter niet op aarde voorkomt. De elementen worden gerangschikt in het periodiek systeem.

Isotopen

Het is mogelijk dat de atomen van een element niet hetzelfde aantal neutronen in de kern bezitten. Men spreekt dan van isotopen. Isotopen hebben dezelfde chemische maar andere fysische eigenschappen. Van vrijwel alle elementen is meer dan één isotoop bekend. Daarnaast is het mogelijk om met behulp van kernsplijting en kernfusie nieuwe atomen te produceren, maar deze zijn vaak instabiel en ondergaan radioactief verval.



Artistieke impressie van een atoomkern

Moleculen

Er zijn gassen die uit losse atomen bestaan, dit zijn voornamelijk de edelgassen, zoals argon, maar het geldt ook voor de damp van bijvoorbeeld kwik. Meerdere atomen kunnen zich echter ook organiseren in moleculen en veel gassen en dampen bestaan uit losse moleculen. Waterdamp bijvoorbeeld bestaat uit watermoleculen die zijn opgebouwd uit twee waterstofatomen en één zuurstofatoom.

Geschiedenis

In het oude Griekenland speculeerden filosofen al over atomen (het atomisme). Eén van de grootste vragen was of materie eendeloos deelbaar was in kleinere deeltjes of niet. Bekende filosofen als Plato dachten van wel. Democritus was het daar duidelijk niet mee eens. Hij stelde dat atomen eigenschappen zoals grootte, vorm en massa hadden. Alle andere eigenschappen die aan materie werden toegeschreven (zoals kleur of smaak) zouden worden veroorzaakt door interacties tussen atomen. De naam *atoom* die door Democritus is bedacht komt van het Griekse *atomos*, dat *ondeelbaar* betekent. Later zijn er nog vele atoomtheorieën opgesteld; deze waren niet alle even onomstreden.

In de negentiende eeuw werd ontdekt dat materie uit deeltjes bestaat - dat waren dus de atomen waarover in de oudheid gefilosofeerd werd. In die periode werd het atomisme in wetenschappelijke kringen opgenomen en onder de noemer atoomtheorie geschaard.

Spoedig bleek dat atomen tóch deelbaar zijn. Ze bevatten elektronen die gemakkelijk verwijderd worden, de kern kan in de kernfysica gescheiden worden in protonen en neutronen, en die kerndeeltjes gelden thans ook niet meer als elementair (zie quark).

Het idee van de grens aan de deelbaarheid is echter onaangetast gebleven en het valt te verdedigen dat wat nu kwanta genoemd worden de atomen van Democritus zijn.

Wat het begrip *ondeelbaar* betreft, moeten we wel voor ogen houden dat in vroegere tijden de begrippenkaders anders waren, en wetenschap en religie niet zo onderscheiden waren als heden. De term *individu* betekent ook: *niet deelbaar*. Als we een individu in stukken hakken dan verliezen we de karakteristieke eigenheid van het individu. Indien we aannemen dat een hiërarchisch opgebouwd stelsel een eenheid is (bijvoorbeeld een atoom, molecule, cel, orgaan, plant, dier, mens) dan kunnen we over het interne organiserende leven van zo'n stoffelijk stelsel spreken als een soort geestelijk atoom, door sommigen *ziel* of *geest* genoemd.

Slechts enkele eeuwen geleden (1714) nog heeft Leibniz een soort atoomtheorie het licht doen zien: de zogenaamde monadologie. Een monade is vergelijkbaar met een atoom, maar de theorie gaat veel verder dan de huidige opvattingen van een stoffelijk/energetisch atoom. Een monade is de kern, de wezenseenheid van elke materiële eenheid, of het nu een atoom is of een mens of welk ander georganiseerde hiërarchische eenheid van ook.

In 1808 publiceerde de Engelse wetenschapper John Dalton een nieuwe theorie:

1. Elementen bestaan uit kleine deeltjes, *atomen* genaamd.
2. Elk element wordt gekarakteriseerd door de massa van het atoom; atomen van hetzelfde element hebben dezelfde massa en atomen van verschillende elementen hebben een verschillende massa.
3. Bij het ontstaan van nieuwe stoffen verandert alleen de manier waarop atomen met elkaar verbonden zijn; de atomen zelf veranderen niet.

Een belangrijke vraag waar Dalton geen antwoord op kon vinden, was waar atomen zelf uit bestaan. Aan het einde van de 19e eeuw voerden verschillende wetenschappers experimenten uit met kathodestraalbuizen en langzaam kwamen zij tot het besef dat er zich daarin negatief geladen subatomaire deeltjes bevonden. Joseph John Thomson was in 1897 een van de eersten die daarover publiceerde. Hij gaf de negatieve deeltjes de naam *corpuscles*. Later zouden zij bekend worden als elektronen. In 1906 kreeg Thomson een Nobelprijs voor zijn ontdekking.


Na de bekendwording van de elektronen bood zich een nieuw probleem aan: atomen waren neutraal en als elektronen negatief waren, zouden er zich in atomen ook nog positief geladen deeltjes moeten bevinden.

In 1911 beschreef Ernest Rutherford hoe hij experimenten met goudfolie en α -deeltjes had uitgevoerd (zie: atoommodel van Rutherford) en daaruit concludeerde dat een atoom bestond uit een kleine massieve positief geladen kern met daaromheen de negatief geladen elektronen. Latere experimenten, uitgevoerd door Rutherford en anderen, toonden aan dat de atoomkern twee verschillende deeltjes bevatte: positieve protonen en neutrale neutronen.

In 1914 stelde de Deense wetenschapper Niels Bohr dat de elektronen rondcirkelden rondom de atoomkern en dat zij zich in bepaalde banen met eigen energieniveaus bevonden (zie: atoommodel van Bohr). Omdat er met het model van Bohr nog steeds een aantal zaken niet verklaard konden worden, kwam Erwin Schrödinger in 1926 met een kwantummechanisch model waarbij elektronen niet als deeltjes, maar als golfverschijnsel werden voorgesteld. Een jaar later kwam Werner Heisenberg met het onzekerheidsprincipe van Heisenberg, waarmee hij aangaf dat het inderdaad niet mogelijk was van een elektron de precieze plaats in een atoom aan te geven.

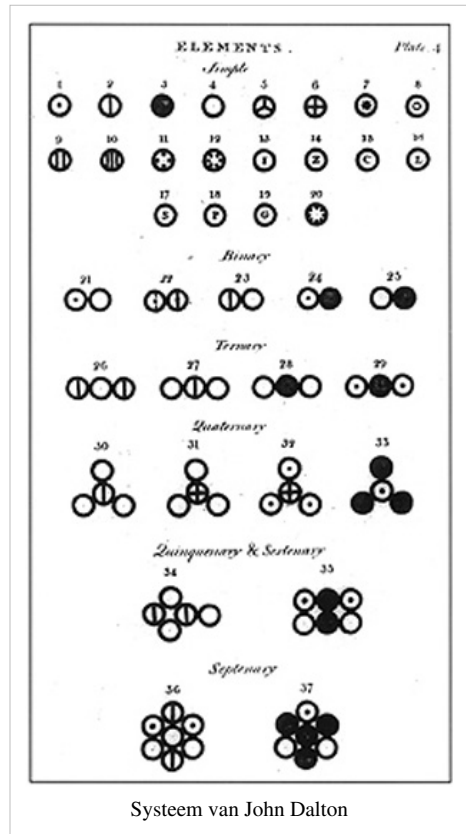
Externe links

- Geschiedenis van het atoommodel ^[1]
- Modern atoommodel ^[2]

 Zoek **atoom** op in het WikiWoordenboek.



Meer mediabestanden die bij dit onderwerp horen, zijn te vinden op de pagina *[/wiki/Commons:Atom?uselang=nl Atom]* op Wikimedia Commons.



Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

W

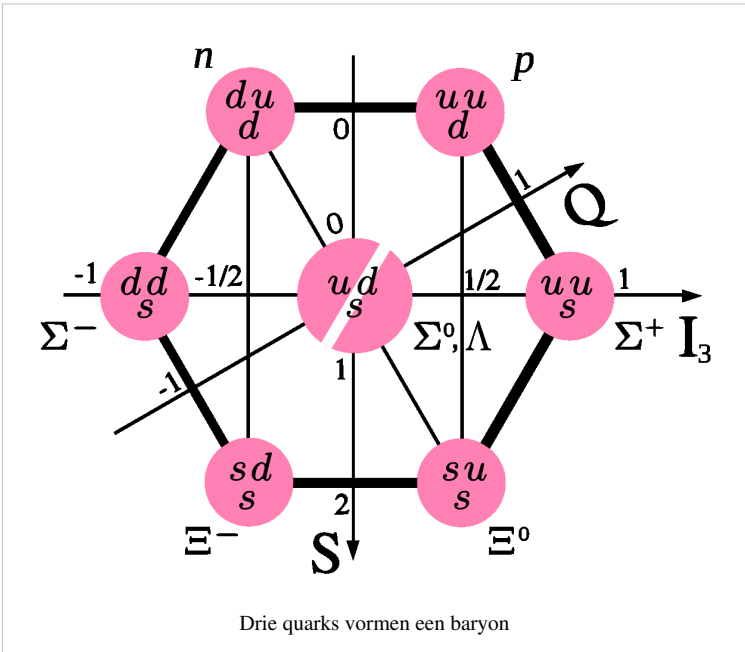
Referenties

- [1] <http://www.esrac.ele.tue.nl/~koen/huiswerk/huiswerk/atoom.PDF>
- [2] http://www.xs4all.nl/~adcs/Deeltjes/atom_model.html

Baryon

Een **baryon** is een subatomair deeltje dat bestaat uit drie quarks. Bekende voorbeelden zijn het proton en het neutron. De naam "baryon" komt van het Griekse woord voor "zwaar" (βαρύς, barys), omdat ten tijde van hun naamgeving de meeste bekende deeltjes lagere massa's hadden dan de baryonen.

Baryonen verschillen van mesonen die bestaan uit een quark en een antiquark. De baryonen en de mesonen vormen samen de familie van de *hadronen*, de verzameling van deeltjes die uit quarks bestaan (losse quarks lijken niet voor te komen, zie confinement). Baryonen zijn fermionen en voldoen aan het uitsluitingsprincipe van Pauli. Mesonen daarentegen zijn bosonen.



Aangezien baryonen zijn opgebouwd uit quarks nemen zij deel aan de sterke wisselwerking, in tegenstelling tot bijvoorbeeld leptonen, die niet uit quarks zijn opgebouwd. De bekendste baryonen zijn de protonen (p) en de neutronen (n) die samen het grootste deel van de massa van de zichtbare materie in het heelal vormen, terwijl elektronen (de andere belangrijke component van atomen), leptonen zijn. Elk baryon heeft een corresponderend antideeltje (antibaryon), waar quarks zijn vervangen door hun overeenkomstige antiquarks. Een proton bestaat bijvoorbeeld uit twee up-quarks en één down-quark en het bijbehorende antideeltje, het antiproton, bestaat uit twee up-antiquarks en één down-antiquark.

Naast het proton en het neutron (met een halveringstijd van respectievelijk meer dan 10^{32} jaar en 920 seconden voor vrije neutronen) zijn meer baryonen bekend, die echter een zeer korte halveringstijd hebben van in de orde van grootte van 10^{-23} tot 10^{-10} seconde.

Baryongetal

Het aantal baryonen in een systeem noemt men het baryongetal. Dit is een behouden grootte, wat wil zeggen dat het aantal baryonen minus het aantal anti-baryonen bij alle (bekende) reacties constant blijft.

Pentaquarks

In 2003 leken enkele experimenten het bestaan aan te tonen van zogeheten pentaquarks, "exotische" baryonen bestaande uit vijf quarks; enige jaren later was de consensus echter dat hun bestaan op grond van experimenteel bewijs zeer onwaarschijnlijk was.

Externe link

- (en) Baryons ^[1], www.thingsmadethinkable.com

Fysische deeltjes
Atomaire deeltjes: Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes: Nucleon · Atoomkern
Bosonen: Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen: Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Referenties

- [1] <http://www.thingsmadethinkable.com/item/baryons.php>

Boson (deeltje)

Een **boson** (genoemd naar Satyendra Nath Bose) is een deeltje dat een heeltallige spin bezit (0, 1, 2, ...). Dit in tegenstelling tot een fermion, dat een *half*tallige spin heeft (1/2, 3/2, 5/2, ...).

De volgende deeltjes zijn bosonen:

- de ijkbosonen die de vier fundamentele natuurkrachten dragen:
 - Voor het elektromagnetisme het foton
 - Voor de zwakke kernkracht het W-boson en het Z-boson
 - Voor de sterke kernkracht het gluon
 - Voor de zwaartekracht het (nog niet aangetoonde) graviton
- samengestelde deeltjes met een even aantal fermionen, bijvoorbeeld mesonen.

Een bijzonder boson is het higgsboson, een boson dat onderdeel is van het standaardmodel van de deeltjesfysica, en dat verantwoordelijk zou zijn voor de massa van elementaire deeltjes.

Bosonen kunnen zich, in tegenstelling tot fermionen, in dezelfde kwantumtoestand bevinden en blijken niet te voldoen aan het uitsluitingsprincipe van Pauli. Bosonen voldoen aan de Bose-Einsteinstatistiek en hebben daardoor bijzondere eigenschappen, zoals het kunnen vormen van een Bose-Einsteincondensaat.

Een voorbeeld hiervan is het ⁴heliumatoom. Dit is een boson, want het bestaat uit een even aantal fermionen. Bij zeer lage temperatuur wordt het helium supervloeibaar. In deze merkwaardige toestand heeft de vloeistof geen viscositeit en geen oppervlaktespanning. Een bekertje met supervloeibaar helium kan daardoor zonder ogenschijnlijke aanleiding leeglopen doordat het helium over de rand kruipt om de toestand met laagste energie op te zoeken.

Bosonen spelen ook een rol in supergeleiding, waar twee elektronen samen een boson vormen, een Cooperpaar.

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Elektron-antineutrino

Een **elektron-antineutrino** of **e-antineutrino** (symbool $\bar{\nu}_e$) is het neutrino dat optreedt als de isospin partner van het positron.

Het elektron-antineutrino is een ongeladen lepton. Het is dus een elementair deeltje, meer algemeen een subatomair deeltje. Het heeft spin 1/2 en is daarom een fermion.

Het elektron-antineutrino is het antideeltje van het elektron-neutrino. Het is dus een neutrino met eigenschappen precies dezelfde als die van het elektron-neutrino, maar dan gespiegeld. De twee zijn dus antimaterie en materie en als ze botsen kunnen ze elkaar annihileren en een Z-boson vormen.

Het elektron-antineutrino is een neef (1e generatie, eerst ontdekt, lichtst, meest stabiel) van het muon-antineutrino (2e generatie) en het tau-antineutrino (3e generatie, laatst ontdekt, zwaarst, minst stabiel).

Een elektron-antineutrino ontstaat bij bètaverval. Het is nog niet bekend, of het elektron-antineutrino een massa bezit of niet, maar als het er één bezit, dan is die kleiner dan 3 eV.

Het elektron-antineutrino zou een Majorana-deeltje kunnen zijn. Dat houdt in dat het gelijk zou zijn aan zijn anti-deeltje, het elektron-neutrino. Of dit het geval is, is nog niet vastgesteld. Dit kan worden vastgesteld met experimenten die zoeken naar twee beta-vertallen waarbij twee elektronen gevormd worden, maar geen elektron-antineutrino's.

Zie ook het standaardmodel van de deeltjesfysica voor meer gegevens.

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Elektron-neutrino

Een **elektron-neutrino** of **e-neutrino** (symbool ν_e) is het neutrino dat optreedt als de isospin partner van het elektron.

Het is een ongeladen lepton. Het is dus een elementair deeltje of meer algemeen een subatomair deeltje. Het heeft spin $1/2$ en is dus een fermion. Het elektron-neutrino ontstaat bij bètaverval. Het is zeker dat het elektron-neutrino een massa bezit, maar deze is kleiner dan $3 \text{ eV}/c^2$.

Het elektron-neutrino is een neef (1e generatie, eerst ontdekt, lichtst, meest stabiel) van het muon-neutrino (2e generatie) en het tau-neutrino (3e generatie, laatst ontdekt, zwaarst, minst stabiel). Net als de andere twee neutrino's heeft ook het elektron-neutrino een antideeltje – het elektron-antineutrino. Zie het standaardmodel van de deeltjesfysica voor meer gegevens.

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Exotisch deeltje

Een **exotisch deeltje** is een bepaald soort theoretisch deeltje dat door sommige gebieden van moderne fysica wordt gezegd te bestaan, en waarvan de aangenomen eigenschappen uiterst ongewoon zijn.

Het bekendste voorbeeld is waarschijnlijk een tachyon, een deeltje dat altijd sneller dan het licht reist.^[1]

Een ander voorbeeld hiervan is supersymmetrie. Een theoretische reeks van superzware varianten van bekende deeltjes (dit is ook één van de voorgestelde kandidaten voor donkere materie).^[2]

Exotische deeltjes komen vaak voor in sciencefiction, zowel deze die door wetenschappers worden verondersteld te bestaan, als volledig fictieve exotische deeltjes.

Noten

- [1] G. Feinberg, Possibility of Faster-Than-Light Particles, in *Physical Review* 159 (1967), pp. 1089–1105, G. Feinberg, art. Tachyon, in *Encyclopedia Americana* 26 (1997), p. 210.
- [2] J.D. Lykken, *Introduction to Supersymmetry*, arXiv.org (1996). (<http://arxiv.org/abs/hep-th/9612114>)

Referentie

- Dit artikel of een eerdere versie ervan is (gedeeltelijk) vertaald vanaf de Engelstalige Wikipedia (http://en.wikipedia.org/wiki/En:exotic_particle?oldid=454798398), die onder de licentie Creative Commons Naamsvermelding/Gelijk delen (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>) valt. Zie deze pagina (http://en.wikipedia.org/wiki/En:exotic_particle?offset=20111010&action=history) voor de bewerkingsgeschiedenis.

Gluon

Een **gluon** is een elementair deeltje dat verantwoordelijk is voor het overbrengen van de sterke kernkracht. Het woord komt van het Engelse woord *glue*, dat lijm betekent. Zonder de sterke kernkracht zouden de positief geladen protonen in de atoomkern door hun onderlinge elektrische afstoting uit elkaar vliegen.

Gluonen zijn bosonen. Zij binden de quarks samen zodat ze protonen, neutronen en andere hadronen vormen. De elektrische lading van de gluonen is gelijk aan nul, hun spin is gelijk aan 1. Men neemt algemeen aan dat gluonen geen massa hebben, hoewel een kleine massa van enkele MeV niet uitgesloten kan worden. Er zijn acht verschillende soorten gluonen.

De kwantumchromodynamica (QCD), de momenteel, in 2011, algemeen geaccepteerde theorie voor de beschrijving van de sterke kernkracht, beschrijft dat gluonen worden uitgewisseld als deeltjes met een kleurlading en interactie met elkaar hebben. Als twee quarks een gluon uitwisselen, zal hun kleurlading daardoor veranderen. Het gluon draagt een anti-kleurlading om te compenseren voor het veranderen van de kleurlading van beide betrokken quarks. Omdat gluonen zelf een kleurlading hebben, kunnen zij ook met andere gluonen uitwisseling vertonen. Dit maakt de wiskundige analyse van de sterke kernkracht erg ingewikkeld en moeilijk.

De eerste experimentele bewijzen van het bestaan van gluonen werden gevonden in de jaren 1980 in het PETRA-apparaat in het Duitse onderzoekscentrum DESY in Hamburg.

Waarom zijn er slechts 8 gluonen?

Gezien vanuit het standpunt van een leek, zijn er in theorie negen kleurcombinaties; één voor elke combinatie van kleur (rood, groen en blauw) en anti-kleur:

$$r\bar{r}, r\bar{g}, r\bar{b}, g\bar{r}, g\bar{g}, g\bar{b}, b\bar{r}, b\bar{g}, b\bar{b}.$$

In wiskundige termen bestaat er echter een oneindig aantal gluonen, waarbij elk gluon kan worden beschreven als een genormaliseerde lineaire superpositie van het aantal dat hierboven is opgesomd. Een willekeurig voorbeeld is:

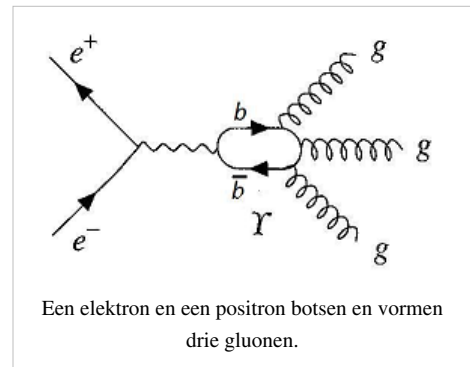
$$(r\bar{r} - g\bar{g})/\sqrt{2}$$

Experimenten tonen echter aan dat kleurloze baryonen geen interactie via de sterke kernkracht met elkaar hebben, zodat de volgende eigenschap juist moet zijn:

$$r\bar{r} + g\bar{g} + b\bar{b} = 0$$

Als deze uitdrukking niet juist zou zijn, zouden baryonen wel in staat moeten zijn deze gluonen uit te zenden.

Er bestaan geen andere lineair onafhankelijke relaties tussen gluonen. Dit toont aan dat er slechts acht lineair onafhankelijke gluonen bestaan. Deze uitdrukking wordt meestal vereenvoudigd tot "er zijn slechts 8 gluonen".



Atomaire deeltjes: Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes: Nucleon · Atoomkern
Bosonen: Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen: Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Graviton

Het **graviton** is een *hypothetisch* elementair deeltje dat de zwaartekracht overbrengt in de meeste kwantumzwaartekrachtssystemen.

Om dit te doen moeten gravitonen altijd aantrekken (zwaartekracht stoot nooit af); ze moeten over elke afstand aantrekken (zwaartekracht is universeel) en ze moeten in oneindige aantallen voorkomen (om de sterke zwaartekracht van sterren te verklaren).

Tot nu toe zijn gravitonen niet waargenomen.

Gravitonen zouden de lege ruimte innemen en ook verantwoordelijk kunnen zijn voor de donkere materie.

De snaartheorie voorspelt het bestaan van gravitonen.

Fysische deeltjes
Atomaire deeltjes: Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes: Nucleon · Atoomkern
Bosonen: Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen: Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Hadron

Een **hadron** is een subatomair deeltje dat uit quarks bestaat. Deze quarks worden door onderlinge uitwisseling van gluonen bijeen gehouden. De naam is afgeleid van het Griekse *hadros*, dat *sterk* betekent. Dit omdat de gluonen de sterke kernkracht vertegenwoordigen.

Er zijn twee categorieën hadronen:

- Baryonen (zoals protonen en neutronen). Deze bestaan uit drie quarks en zijn dus fermionen.
- Mesonen (zoals pionen en kaonen). Deze bestaan uit een quark en een anti-quark en zijn dus bosonen.

Het grootste gedeelte van de massa van een hadron bestaat uit potentiële en kinetische energie. Zo bevat een proton (invariante massa $938 \text{ MeV}/c^2$) twee up-quarks ($2 \times 3 \text{ MeV}/c^2$) en een down-quark ($6 \text{ MeV}/c^2$). De overige massa is energie volgens Einsteins formule $E = mc^2$.

Vier procent van de massa van het heelal bestaat uit hadronen, 23% donkere materie en 73% donkere energie, aldus resultaten van de WMAP.

Ijkboson

In de deeltjesfysica is een **ijkboson** een boson dat fungeert als drager van één van de fundamentele natuurkrachten. Elementaire deeltjes oefenen krachten op elkaar uit door de uitwisseling van ijkbosonen, meestal als virtuele deeltjes. Zij ontleen hun naam aan het feit de theorieën die deze krachten beschrijven, ijktheorieën zijn; de ijkbosonen zijn de kwanta van het ijkveld.

Ijkbosonen in het standaardmodel

Het standaardmodel bevat drie soorten ijkboson:

1. fotonen (voor de elektromagnetische wisselwerking),
2. W- en Z-bosonen (voor de zwakke wisselwerking),
3. gluonen (voor de sterke wisselwerking).

Door confinement is het niet mogelijk geïsoleerde gluonen waar te nemen bij lage energieën. Dit zou kunnen resulteren in massieve glueballs, die nog niet experimenteel zijn waargenomen.

Multipliciteit van ijkbosonen

In een gekwantiseerde ijktheorie zijn ijkbosonen de kwanta van het ijkveld. Hierom zijn er evenveel ijkbosonen als er generatoren van het ijkveld zijn. In kwantumelektrodynamica is de ijkgroep $U(1)$; in dit eenvoudige geval is er slechts één ijkboson, het foton. Kwantumchromodynamica wordt beschreven door de ingewikkeldere groep $SU(3)$, welke acht generatoren bezit. Dit leidt tot acht gluonen. De twee W- en het Z-boson komen (ruwweg) overeen met de drie generatoren van $SU(2)$, die de zwakke wisselwerking beschrijft.

Massa van ijkbosonen

Om technische redenen die te maken hebben met ijk-invariantie worden ijkbosonen beschreven door massaloze velden. Hierdoor zou men kunnen verwachten dat alle ijkbosonen massaloos zijn, en dat de krachten die erdoor worden overgedragen, oneindige dracht hebben. Dit blijkt voor de sterke en de zwakke wisselwerking het geval echter niet te zijn, en de verklaring ligt in diepere theoretische inzichten.

Volgens het standaardmodel krijgen de W- en Z-bosonen een massa via het Higgsmechanisme. In dit mechanisme koppelen de vier ijkbosonen van de geünificeerde elektrozwakke wisselwerking (beschreven door groep $SU(2)\times U(1)$) aan een Higgsveld. Dit veld ondergaat spontane symmetriebreking, waardoor het veld een van nul verschillende vacuümverwachtingswaarde krijgt. Deze vacuümverwachtingswaarde koppelt aan de drie bosonen van de zwakke wisselwerking (de W's en het Z), waarna deze een massa krijgen. Het resterende boson (het foton) blijft massaloos. Op 4 juli 2012 werd door het CERN het bestaan van een nieuw boson bekend gemaakt: de spin is in ieder geval ongelijk 1 (de spin moet nul zijn) en de massa ongeveer $125 \text{ GeV}/c^2$: een perfecte kandidaat voor het Higgsboson.

Het feit dat de sterke wisselwerking geen lange dracht heeft, ligt aan confinement. Gluonen dragen een zekere kleurlading, en worden dus, net zoals quarks, gebonden in objecten met totale kleurlading nul. Hierdoor kunnen gluonen niet op lange afstand interageren en is de dracht van de sterke wisselwerking beperkt.

Buiten het standaardmodel

Zwaartekracht

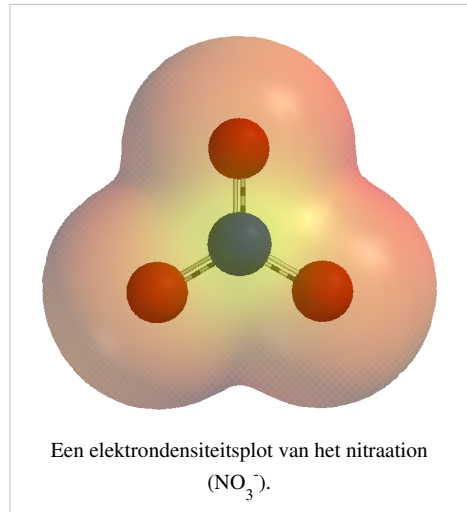
De vierde fundamentele wisselwerking, de zwaartekracht, zou eveneens door een boson worden overgebracht. Dit heet het graviton. Het is echter nog nooit waargenomen, en aangezien er nog geen wiskundig consistente theorie voor kwantumzwaartekracht bestaat, is het ook niet zeker of dit werkelijk een ijkboson is of niet. In de algemene relativiteitstheorie wordt de rol van ijk-invariantie gespeeld door invariantie onder coördinatentransformaties.

Unificerende theorieën

In *grand unified theories* (GUT's) zouden extra ijkbosonen bestaan, X en Y genaamd. Deze zouden interacties tussen quarks en leptonen overbrengen, waardoor het baryongetal geen behouden grootheid meer is, en bijvoorbeeld het proton zou kunnen vervallen. Deze bosonen noch het protonverval zijn echter ooit waargenomen.

Ion (deeltje)

Een **ion** is een elektrisch geladen atoom, molecuul of andere groep gebonden atomen. Een ion kan positief of negatief geladen zijn door respectievelijk een gebrek of een overschot aan een of meer elektronen. In de natuur- en de sterrenkunde beschouwt men meestal geïsoleerde atomen of moleculen; in de scheikunde en de biologie bevinden de geladen atomen en moleculen zich doorgaans in een waterige oplossing (elektrolyten). In het geval dat een groep van meerdere atomen een lading draagt, wordt gesproken van een samengesteld ion of een polyatomisch ion, zoals het ammonium-ion (NH_4^+) en het zuurrestion SO_4^{2-} . Wanneer in een bepaald proces ionen gevormd worden spreekt men van *ionisatie*.



Geschiedenis

Het woord 'ion' is afkomstig van het Griekse *iov* (*gaande*). Het werd in 1834 ingevoerd door de Engelse natuur- en scheikundige Michael Faraday voor een toen onbekend deeltje dat van de ene elektrode naar de andere ging in een waterige oplossing. Faraday kende de aard van zo'n deeltje niet, maar wist wel dat in een elektrische stroom een of andere stof zich door de oplossing bewoog van de ene plek naar de andere, aangezien metaal aan de ene elektrode in oplossing ging en aan de andere elektrode nieuw metaal uit de oplossing tevoorschijn kwam. Faraday introduceerde ook de termen anion voor een negatief geladen ion dat wordt aangetrokken door de positieve anode, en kation voor een positief geladen ion dat door de negatieve kathode wordt aangetrokken.

Natuur- en sterrenkunde

Geïoniseerde atomen worden veel bestudeerd in de natuurkunde en sterrenkunde. De bekendste voorbeelden zijn het proton (een waterstofatoom zonder zijn elektron, H^+ of *p*) en het α -deeltje (een heliumkern zonder elektronen, He^{2+} of α). Deze deeltjes komen in de natuur voor in de zonnewind.

In een gas kan ionisatie plaatsvinden door energie toe te voeren met behulp van bijvoorbeeld elektrische stroom. Bliksem is een voorbeeld van een heftige ionisatie in de natuur; hierbij vormen geïoniseerde gasatomen een geleidend kanaal voor een stroom die tot miljoenen ampères kan oplopen. Hoog in de atmosfeer kunnen deeltjes van de zon ionisatie van gasatomen veroorzaken, wat de oorzaak is van het noorderlicht. De elektrische lasboog is mogelijk door ionisatie van het gas tussen elektrode en werkstuk.

Deeltjes afkomstig uit een deeltjesversneller kan men van elektronen ontdoen door ze door een kamer te leiden waarin zich een zogeheten *strippergas* bevindt, dat gemakkelijk extra elektronen opneemt.

Scheikunde en biologie

In de scheikunde en biologie beschouwt men doorgaans "ionen" die zich in een waterige oplossing bevinden. Is het ion *positief* geladen, dan spreekt men van een **kation**, is het *negatief* geladen, van een **anion**. Hun namen ontlene[n] zich aan het feit dat bij in de oplossing geplaatste elektroden het negatieve anion zich naar de positieve anode beweegt en het positieve kation naar de negatieve kathode. Doordat de massa van een elektron gering is, is de massa van een ion vrijwel gelijk aan de atoom- of molecuulmassa.

Zouten die in water oplosbaar zijn, vormen daarin vaak ionen, en wel in paren: een positief geladen (metaal)ion en een negatief geladen zuurrestion (niet-metaal). Een voorbeeld is keukenzout in water: de vaste stof NaCl valt uiteen in Na^+ en Cl^- . Een uitzondering op het feit dat positief geladen ionen van metalen afkomstig zijn, is het positief

geladen ammonium-ion (NH_4^+). Ammonium bestaat uit de niet-metalen stikstof (N) en waterstof (H). In tegenstelling tot de meeste geladen combinaties van niet-metalen, is dit ion positief geladen. Het ammonium-ion is een bijzonder ion omdat het bestaat uit een basisch ammoniakmolecuul (NH_3) dat een proton, zuur deeltje, (H^+) heeft opgenomen.

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon



Zie de categorie [\[/wiki/Commons:Category:Ions?uselang=nl#mw-subcategories Ions\]](#) van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.

Kaon

Een **kaon** is een subatomair deeltje, een zogenaamd K-meson.

Het bestaat in 4 versies: K^+ , K^- , K^0 en $\bar{\text{K}}^0$. K^- en K^+ zijn elkaars antideeltje, dus materie en antimaterie, die elkaar annihileren als ze elkaar ontmoeten. K^- heeft een lading $-e$ en K^+ een lading $+e$. Hierin is e de elementaire lading: $1,6 \times 10^{-19}$ C. Ze hebben een massa van $494 \text{ MeV}/c^2$. MeV staat voor megaelektronvolt, dus miljoen elektronvolt. Dit is een massa-eenheid van $1,782 \times 10^{-30}$ kg, gebruikt in de hoge energie fysica. Volgens de relativiteitstheorie zijn massa en energie hetzelfde. Een MeV/c^2 is dus de massa die overeenstemt met de energie waarbij een lading van één elektron wordt versneld door een potentiaalverschil van een miljoen volt. K^0 en $\bar{\text{K}}^0$ zijn elkaars antideeltjes, dus materie en antimaterie, die elkaar annihileren als ze elkaar ontmoeten. Ze zijn ongeladen en hebben een massa van $498 \text{ MeV}/c^2$. Zowel K^0 als $\bar{\text{K}}^0$ vervallen tot een π^+ en een π^- . Ze kunnen dus in elkaar overgaan. Toch zijn ze verschillend. Als een $\bar{\text{K}}^0$ botst op een proton, dan kan een Λ^0 en een π^+ ontstaan. Een K^0 doet dat niet. De kaonen hebben een vreemdheid S (Engels: strangeness) van $+1$ of -1 . Een meson is een subatomair deeltje met middelmatige massa, zwaarder dan de meeste leptonen zoals een elektron of een neutrino, maar lichter dan een baryon zoals een neutron of een proton. Mesonen en baryonen behoren tot de hadronen.

Het kaon bestaat zoals de andere mesonen uit een quark en een antiquark, terwijl baryonen uit drie quarks of drie antiquarks bestaan. Kaonen komen in de natuur niet zomaar voor, omdat de levensduur te kort is. Ze komen wel voor als kortstondig tussenproduct bij kernreacties of botsingen. Wanneer bijvoorbeeld twee neutronen botsen, dan kan een neutron, een proton, een K^- en een K^0 ontstaan.

Kaonen zijn historisch belangrijk, omdat uit hun verval voor het eerst de schending van CP-symmetrie is aangetoond. Dit leverde de Nobelprijs voor natuurkunde op in 1980.

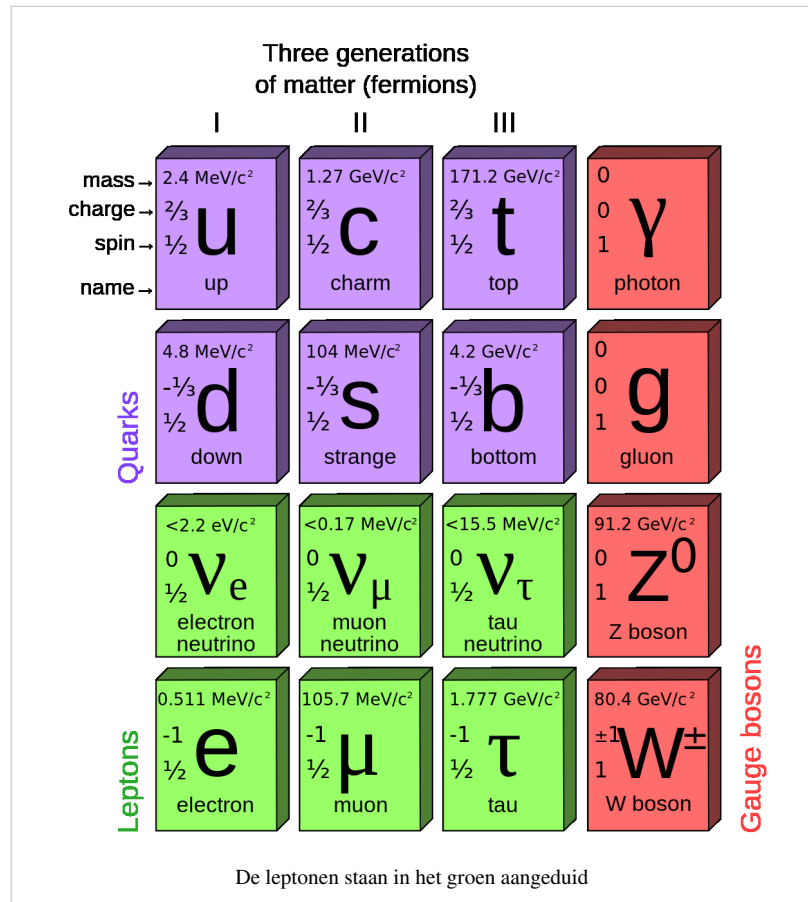
Lepton (subatomair deeltje)

Een **lepton** (Grieks voor 'klein' of 'fijn') is een van de drie typen subatomaire deeltjes uit het standaardmodel. Zowel quarks als leptonen zijn fermionen. Een hadron bestaat uit quarks, een lepton niet. Volgens de huidige kennis kan een lepton niet worden gesplitst en is daarom een elementair deeltje.

Verschillende soorten

Er zijn 12 leptonen bekend: drie deeltjes met materie, drie corresponderende neutrino's en hun zes respectievelijke antideeltjes.

De massa van de antideeltjes is gelijk aan de massa van de deeltjes. De lading van de antideeltjes, is, zoals altijd, het tegengestelde van de lading van de deeltjes. Is de lading nul, dan betekent dat niet dat deeltje en antideeltje identiek zijn.



Deeltjes				Antideeltjes			
naam	symbool	lading	massa	naam	symbool	lading	massa
Elektron	e^-	-1	511 keV	Positron	e^+	+1	511 keV
Muon	μ^-	-1	105,6 MeV	Antimuon	μ^+	+1	105,6 MeV
Tau	τ^-	-1	1,777 GeV	Antitau	τ^+	+1	1,777 GeV
Elektron-neutrino	ν_e	0	<2,5 eV	Elektron-antineutrino	$\bar{\nu}_e$	0	<2,5 eV
Muon-neutrino	ν_μ	0	<170 keV	Muon-antineutrino	$\bar{\nu}_\mu$	0	<170 keV
Tau-neutrino	ν_τ	0	<18 MeV	Tau-antineutrino	$\bar{\nu}_\tau$	0	<18 MeV

Leptonen behoren tot de fermionen die gevoelig zijn voor alle fundamentele natuurkrachten, uitgezonderd de sterke kernkracht. Zoals alle fermionen bezitten leptonen een halfvallige spin van in hun geval 1/2 en voldoen zij aan het uitsluitingsprincipe van Pauli.

De ladingen die bij leptonen voorkomen zijn altijd -1, 0 of +1. De geladen leptonen (elektron, muon, tau en hun respectievelijke antideeltjes) hebben een rustmassa. Het elektron is het lichtst. Het muon heeft ongeveer een 200 maal zo grote massa als het elektron en het tau heeft de grootste massa van ongeveer 3700 maal die van een elektron. Elke geladen lepton is geassocieerd met een neutraal neutrino. De antileptonen hebben een massa die gelijk is aan die van het lepton, alleen is de lading tegenovergesteld.

Zie ook de lijst van elementaire fermionen voor meer eigenschappen.

Trivia

Het lepton is genoemd naar Griekse woord *leptos* dat 'klein' betekent. De Griekse euromunt van 1 cent wordt ook een *lepton* of *lepto* genoemd.

Majorana-deeltje

Een **Majorana-deeltje** of **Majorana-fermion** is een type fermion dat zijn eigen anti-deeltje is. Het andere type fermion heet Dirac-fermion, dat verschilt van zijn anti-deeltje. Tot dusver zijn alle fermionen in het standaardmodel van de deeltjesfysica Dirac-fermionen, behalve eventueel de neutrino's. Deze zijn wellicht Majorana-fermionen. In dat geval zou het elektron-antineutrino gelijk zijn aan het elektronneutrino. Of het neutrino een Majorana-fermion is, is niet bekend. Er zijn wel verschillende bosonen die hun eigen anti-deeltje zijn, zoals het Z-boson en het foton. In de supersymmetrische theorie is het neutralino zijn eigen anti-deeltje.

De term wordt ook wel gebruikt wanneer men het heeft over quasideeltjes. Dat wil zeggen dat vele deeltjes zich collectief zodanig gedragen dat zij de eigenschappen van een enkel deeltje bezitten.

Theorie

De Italiaanse natuurkundige Ettore Majorana stelde deze deeltjes in 1937 voor.^[1] Ongeladen spin-1/2 deeltjes kunnen beschreven worden door een reële golfvergelijking (de Majorana-vergelijking, een aanpassing van de Dirac-vergelijking), en zouden daarom gelijk zijn aan hun antideeltje (omdat de golffunctie van deeltje en antideeltje in elkaar overgaan door complexe conjugatie).

Het verschil tussen Majorana-fermionen en Dirac-fermionen kan wiskundig worden uitgedrukt met behulp van creatie- en annihilatie-operatoren (tweede kwantisatie). De creatie-operator γ_j^\dagger schept een fermion in de kwantumtoestand j , terwijl de annihilatie-operator γ_j het vernietigt (ofwel het corresponderende antideeltje schept, dat komt op hetzelfde neer). Voor een Dirac-fermion verschillen de operatoren γ_j^\dagger en γ_j , maar voor een Majorana-fermion zijn ze identiek.

Quasideeltjes

In supergeleiders kunnen (niet-elementaire) quasideeltjes opduiken die zich gedragen als Majorana-fermionen en daarom - enigszins verwarrend - ook wel als "Majorana-fermionen" worden aangeduid.^[2] De supergeleider legt een elektron/gat-symmetrie op aan de aangeslagen toestanden van het quasideeltje, zodat een verband ontstaat tussen de creatie-operator $\gamma(E)$ bij energie E en de annihilatie-operator $\gamma^\dagger(-E)$ bij de negatieve energie $-E$. Op het Fermi-niveau $E=0$ geldt dat $\gamma=\gamma^\dagger$ (beide operatoren zijn identiek) zodat de aangeslagen toestand net als een Majorana-fermion beschreven kan worden. Omdat het Fermi-niveau midden in de supergeleidende bandkloof (*band gap*) ligt, liggen deze toestanden eveneens midden in de band gap. Een kwantumvortex in sommige supergeleiders of supervloeistoffen kan deze toestanden 'vangen', zodat dit een bron van Majorana-fermionen is.^{[3][4] [5] [6]} Shockley-toestanden aan het oppervlak van de uiteinden van de supergeleidende draden of lijn defecten vormen andere, zuiver elektrische bronnen van Majorana-deeltjes.^[7]

Al eerder werd voorspeld dat Majorana-fermionen in supergeleiders gebruikt konden worden als bouwsteen voor een (niet-universele) topologische kwantumcomputer vanwege hun niet-Abelse anyonische statistiek.^[8]

Experimentele ontdekking van het quasideeltje

Een intensieve speurtocht om Majorana-fermionen in supergeleiders experimenteel waar te nemen ^{[9][10]} leidde in 2012 tot de eerste resultaten. ^[11] In april 2012 publiceerde een Nederlandse onderzoeksgroep, het Kavli Institute of Nanoscience aan de TU Delft onder leiding van Leo Kouwenhoven, in *Science* een geslaagd experiment met een transistorschakeling. Nanodraden van indiumantimonide (InSb) zijn verbonden met twee contacten, de ene van goud en de andere een supergeleidend laagje van NbTiN. In een matig sterk magnetisch veld van 100 mT wordt bij een nulspanning een piek in de elektrische geleidbaarheid gevonden die te verklaren is met de vorming van een paar van quasi-Majorana-deeltjes, elk aan een uiteinde van de nanodraad die in verbinding staat met de supergeleider. De gebonden toestanden blijven stabiel als het magneetveld en de spanning sterk gevarieerd worden. ^[12] Het gaat hier niet om elementaire deeltjes, maar om zogeheten quasideeltjes, een groep deeltjes (hier elektronen en elektronengaten) die zich in bepaalde opzichten als een enkel deeltje gedraagt. Deze Majorana-quasideeltjes zouden zeer stabiel kunnen zijn, en daardoor goed geschikt kunnen zijn voor het bouwen van een zogenoemde kwantumcomputer. Die zou veel sneller zijn dan de huidige computers. ^[13]

Externe links

- Kennislink: Exotisch majorana-deeltje duikt op in Delft ^[14]
- (en) Blog van Frolov, co-auteur van Kouwenhoven, geeft achtergrond ontdekking ^[15]

Noten

- [1] E. Majorana, *Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone*, Nuovo Cimento **14**, 171 (1937). Engelse vertaling (<http://www2.phys.canterbury.ac.nz/editorial/Majorana1937-Maiani2.pdf>)
- [2] F. Wilczek, *Majorana returns*, Nature Physics **5**, 614 (2009). doi:10.1038/nphys1380 Fulltext (http://ctp.lns.mit.edu/Wilczek_Nature/Majorana_return434.pdf)
- [3] N.B. Kopnin and M.M. Salomaa, *Mutual friction in superfluid ³He: Effects of bound states in the vortex core*, Phys. Rev. B **44**, 9667 (1991).
- [4] G.E. Volovik, *Fermion zero modes on vortices in chiral superconductors*, JETP Lett. **70**, 609 (1999).
- [5] N. Read and D. Green, *Paired states of fermions in two dimensions with breaking of parity and time-reversal symmetries and the fractional quantum Hall effect*, Phys. Rev. B **61**, 10267 (2000).
- [6] L. Fu and C.L. Kane, *Superconducting proximity effect and Majorana fermions at the surface of a topological insulator*, Phys. Rev. Lett. **100**, 096407 (2008).
- [7] A. Yu. Kitaev, *Unpaired Majorana fermions in quantum wires*, Phys. Usp. (suppl.) **44**, 131 (2001).
- [8] C. Nayak, S. Simon, A. Stern, M. Freedman, and S. Das Sarma, *Non-Abelian anyons and topological quantum computation*, Rev. Mod. Phys. **80**, 1083 (2008).
- [9] J. Alicea, *New directions in the pursuit of Majorana fermions in solid state systems*. arXiv:1202.1293 (<http://arXiv.org/abs/1202.1293>)
- [10] C.W.J. Beenakker, *Search for Majorana fermions in superconductors*. arXiv:1112.1950 (<http://arXiv.org/abs/1112.1950>)
- [11] E.S. Reich, *Quest for quirky quantum particles may have struck gold*. Nature Breaking News, 28 February 2012. doi:10.1038/nature.2012.10124
- [12] V. Mourik, K. Zuo, S.M. Frolov, S.R. Plissard, E.P.A.M. Bakkers, and L.P. Kouwenhoven, *Signatures of Majorana fermions in hybrid superconductor-semiconductor nanowire devices*. Science, 12 April 2012. doi:10.1126/science.1222360 arXiv:1204.2792 (<http://arXiv.org/abs/1204.2792>)
- [13] Robert F. Service, *Physicists Discover New Type of Particle — Sort Of* (<http://news.sciencemag.org/sciencenow/2012/04/majorana-fermions-found.html>), *ScienceNOW*, 12 april 2012
- [14] <http://www.kennislink.nl/publicaties/exotisch-majorana-deeltje-duikt-op-in-delft>
- [15] <http://sergeyfrolov.wordpress.com/2012/04/12/background-information-for-our-majorana-fermion-paper/>

Meson

Mesonen (zoals pionen en kaonen) zijn kernfysische deeltjes die bestaan uit een quark en een anti-quark.

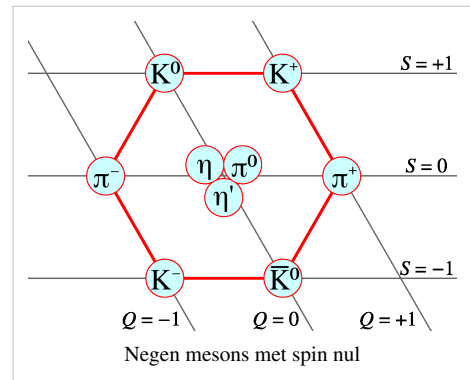
In 1935 voorspelde Hideki Yukawa het bestaan van **mesonen**, deeltjes zwaarder dan een elektron, maar lichter dan een proton.

Zijn theorie bleek uiteindelijk incompleet, maar in 1947 werden er wel degelijk zulke deeltjes ontdekt in kosmische straling. Ze bleken de eigenschappen te hebben die Yukawa had voorspeld. Het nieuw ontdekte deeltje werd *pi-meson* of pion genoemd en komt in drie soorten voor: positief, negatief of ongeladen. De massa is ongeveer gelijk aan 270 maal die van het elektron.

Anno 2005 zijn er 15 soorten mesonen bekend, waaronder ook een paar met massa's groter dan die van het proton.

Externe links

- <http://www.xs4all.nl/~adcs/Deeltjes/mesons.html>



Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Moleculaire entiteit

Volgens het Gold Book van IUPAC is een **moleculaire entiteit** elk chemisch deeltje (aatom, molecuul, ion of ionenpaar, radicaal, complex, conformer, ...) dat als afzonderlijke onderscheidbare entiteit herkenbaar is.^[1] Een belangrijk kenmerk van moleculaire entiteiten is dat ze een chemische reactie kunnen aangaan.

Afhankelijk van de context kan een moleculaire entiteit op verschillende manieren worden beschreven. In sommige gevallen volstaat bijvoorbeeld voor een bepaalde moleculaire entiteit de definitie waterstof, terwijl voor dezelfde moleculaire entiteit in andere gevallen verdere specificaties zoals de elektronentoestand en/of vibratoire toestand en de spin nodig zijn.

Chemische soorten zijn de tegenhangers van moleculaire entiteiten op macrosocopisch niveau.

Bronnen, noten en/of referenties

Molecuul

Een **molecuul** of **molecule** is het kleinste deeltje van een moleculaire stof dat nog de chemische eigenschappen van die stof bezit. Wanneer een molecuul opgedeeld zou worden in nog kleinere deeltjes zouden de chemische eigenschappen veranderen.

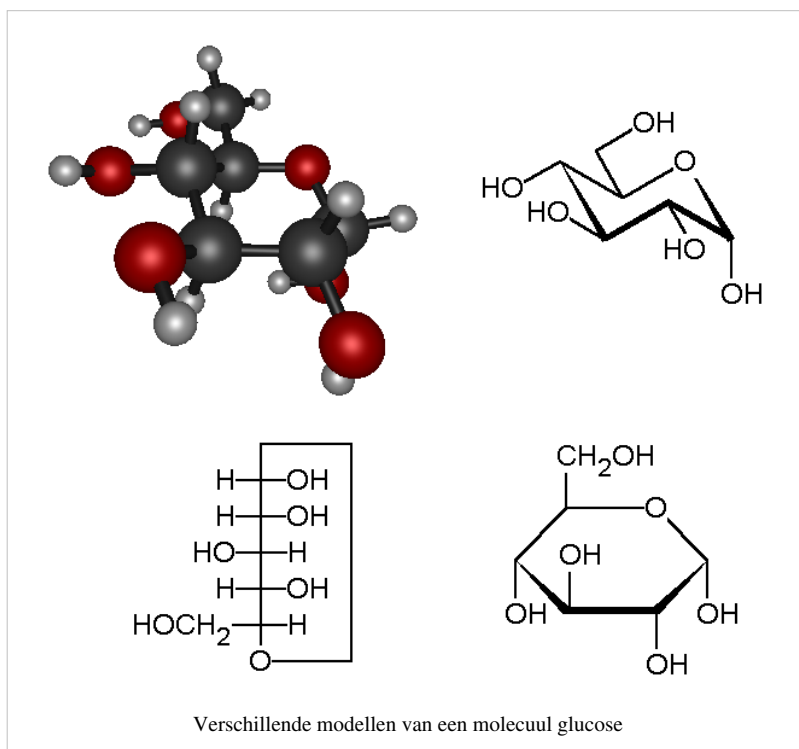
Een molecuul is opgebouwd uit atomen die in een vaste rangschikking van chemische bindingen met elkaar verbonden zijn. Een chemische stof is gedefinieerd door de atomen waaruit het molecuul bestaat en de onderlinge scheikundige verbindingen die tussen de atomen bestaan.

De massa van een molecuul of molecuulmassa, is gelijk aan de gezamenlijke massa van de atomen waaruit het molecuul bestaat. De molecuulmassa wordt uitgedrukt in atomaire massa-eenheden (weergegeven als u (unit)). Uitgedrukt in kilogram is dat:

$$1 \text{ u} \approx 1,6605402 \times 10^{-27} \text{ kg.}$$

De afmetingen van moleculen liggen in de orde van nanometers. ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$, één miljoenste millimeter).

Het woord *molecuul* is afgeleid van het Latijnse *molecula* ('kleine massa').



Bindingen in een molecuul

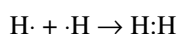
► Zie *Covalente binding* voor het hoofdartikel over dit onderwerp.

Ieder scheikundig element heeft een vaststaand aantal bindingen dat atomen van dat element aan kunnen gaan, de valentie. De valentie van een atoom, het aantal bindingen dat een atoom kan aangaan, wordt bepaald door de elektronen van de buitenste elektronenschil (de valentie-elektronen).

De elektronenconfiguratie van de elektronen rond de atoomkern is verdeeld in verschillende energieniveaus of elektronenschillen. In iedere schil bevindt zich een vaststaand aantal elektronen. Het is energetisch het meest gunstig wanneer de buitenste schil, de valentieschil, bestaat uit twee of acht elektronen, naargelang de plaats van het element in het periodiek systeem. Dit noemt men de edelgasconfiguratie of octetstructuur.

Deze energetisch meest gunstige situatie wordt bereikt wanneer een atoom een binding aangaat met één of meer andere atomen, waarbij de beide valentieschillen in elkaar opgaan. Bijvoorbeeld waterstof:

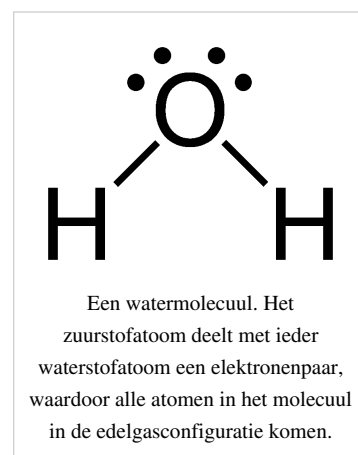
Een waterstofatoom heeft één elektron. Wanneer twee waterstofatomen een binding aangaan ontstaat er een situatie waarin beide atomen in de energetisch gunstige situatie van twee elektronen komen:



In een waterstofmolecuul, H_2 , hebben de twee waterstofatomen één gedeeld elektronenpaar.

Wanneer twee atomen één gedeeld elektronenpaar hebben spreken we van een *enkele covalente binding*, wanneer twee atomen twee gedeelde elektronenparen hebben spreken we van een *dubbele covalente binding*. Er bestaat ook een drievoudige binding waarbij twee atomen drie gedeelde elektronenparen hebben.

Stoffen waarvan de moleculen één of meer dubbele covalente bindingen hebben worden onverzadigde verbindingen genoemd. Stoffen waarvan de moleculen alleen enkele covalente bindingen bevatten worden verzadigde verbindingen genoemd.



Valentie

De valentie is het aantal bindingen dat een atoom aan kan gaan met andere atomen.

Het aantal valentie-elektronen van een atoom is in grote mate bepalend voor het aantal elektronenparen dat een atoom kan vormen en dus voor het aantal bindingen dat een atoom aan kan gaan, de valentie.

Element	Aantal valentie-elektronen	Valentie
Waterstof	1	1
Koolstof	4	4
Zuurstof	6	2
Stikstof	5	3
Chloor	7	1
Helium	2	0

Merk op dat het aantal valentie-elektronen en de valentie opgeteld altijd acht of twee zijn.

Radicalen

Wanneer niet alle valentie-elektronen benut zijn, wanneer een molecuul dus *vrije elektronen* heeft, spreken we van een radicaal. De energetische configuratie van radicalen is zeer ongunstig en deze deeltjes zijn dan ook zeer reactief.

Zie ook

- Lewistheorie
- Aromatische verbinding
- Ionaire binding

Molecuulformule

➤ *Zie molecuulformule voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

De samenstelling van een molecuul wordt weergegeven met een molecuulformule. In een molecuulformule wordt van elk element dat in het molecuul voorkomt het aantal atomen gegeven.

De elementen hebben symbolen die bestaan uit één hoofdletter, eventueel gevolgd door één of twee kleine letters. Het juiste gebruik van hoofdletters en kleine letters is van groot belang: Pb geeft het element lood aan terwijl PB zou duiden op een verbinding van fosfor en boor.

Voorbeelden van molecuulformules:

Water	H ₂ O
Koolstofdioxide	CO ₂
Ethanol	C ₂ H ₅ OH
Boterzuur	C ₄ H ₈ O ₂

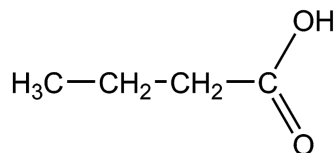
Het is gebruikelijk dat de elementen C, H, O, N en S als eerste genoemd worden, gevolgd door de overige elementen op alfabetische volgorde, zoals te zien is bij de molecuulformule van mosterdgas (C₄H₈SCl₂).

Structuurformule

➤ *Zie Structuurformule voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Een molecuulformule geeft alleen een opsomming van de atomen in een molecuul, maar om weer te geven hoe die atomen met elkaar verbonden zijn wordt een structuurformule gebruikt. Een structuurformule is een schema waarin alle atomen staan waaruit het molecuul bestaat en de verbindingen tussen die atomen.

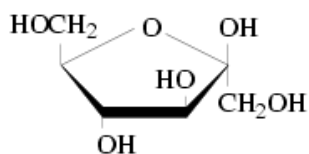
Als voorbeeld nemen we de structuurformule van boterzuur:



Op deze afbeelding is te zien dat de vier koolstofatomen op een rij met elkaar verbonden zijn, dat de twee zuurstofatomen beide verbonden zijn met hetzelfde koolstofatoom, dat het tegenoverliggende koolstofatoom verbonden is met drie waterstofatomen, dat er één waterstofatoom verbonden is met een zuurstofatoom en dat de resterende waterstofatomen twee aan twee verbonden zijn met de twee middelste koolstofatomen.

Merk op dat deze structuurformule alleen de bindingen weergeeft, het is niet mogelijk om aan de hand van deze formule een uitspraak te doen over de ruimtelijke vorm van het molecuul.

Om in een structuurformule de ruimtelijke vorm van een molecuul weer te geven kan gebruikgemaakt worden van lijnen met verschillende diktes, zoals in onderstaande structuurformule van fructose:



In deze structuurformule is onder andere te zien dat twee OH-groepen zich aan dezelfde kant van de ring bevinden en dat de derde OH-groep zich aan de tegenovergestelde kant bevindt.

Isomerie

➤ *Zie Isomeer voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Twee moleculen die uit dezelfde atomen bestaan in een andere rangschikking worden isomeren genoemd. Als van twee isomeren zelfs alle paarsgewijze bindingen tussen de atomen gelijk zijn en de verschillen liggen in de ruimtelijke indeling wordt gesproken van stereo-isomeren.

De enige overeenkomst die isomeren hebben is het molecuulgewicht, alle andere eigenschappen zijn vaak totaal anders. Een voorbeeld van twee isomeren met totaal verschillende eigenschappen zijn diethylether en butanol.

Stereo-isomeren hebben in de meeste gevallen dezelfde of vergelijkbare chemische eigenschappen maar andere biologische eigenschappen, zoals glucose en galactose. Beide suikers komen voor in het menselijk lichaam maar ze hebben een andere biologische functie.

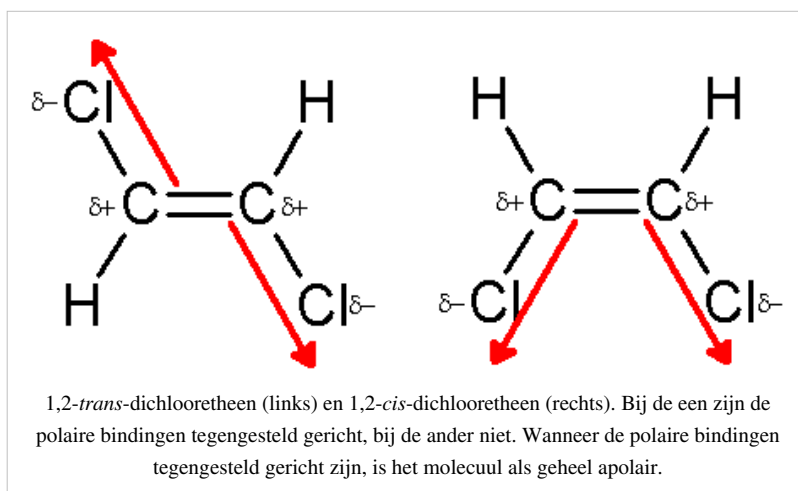
Zie ook

- Cis-trans-isomerie
- Optische isomerie
- Enantiomeer

Polariteit

➤ *Zie Polaire verbinding voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Wanneer twee atomen met een sterk verschillende elektronegativiteit een binding hebben in een molecuul, zal die binding een asymmetrische ladingsverdeling hebben: de statistische kans dat de bindingselektronen zich op het elektronegatiev atoom bevinden is groter dan de statistische kans dat de bindingselektronen zich op het minder elektronegatiev atoom bevinden. Wanneer een sterk elektronegatief element een binding heeft met een minder sterk elektronegatief element ontstaat een polaire binding.



Voorbeelden van sterk elektronegatiev elementen zijn zuurstof, stikstof en chloor. Typische voorbeelden van polaire bindingen zijn C=O, H-O en C-Cl.

Wanneer een molecuul polaire bindingen bevat hoeft dat niet te betekenen dat het molecuul als geheel polair is. Een molecuul is polair wanneer:

- Het molecuul bindingen tussen elektronegatieve en niet-elektronegatieve elementen bevat
- Deze polaire bindingen niet tegengesteld gericht zijn.

Als voorbeeld nemen we de stereo-isomeren 1,2-*trans*-dichlooretheen en 1,2-*cis*-dichlooretheen (zie afbeelding). De eerste is apolair en de tweede is polair. Dat komt doordat in het eerste molecuul de twee polaire bindingen tegengesteld gericht zijn waardoor ze elkaar opheffen.

De mate van polariteit van een molecuul wordt het dipoolmoment genoemd. In structuurformules wordt de polariteit van bindingen aangegeven met de Griekse letter δ (delta). Stoffen met een min of meer gelijke polariteit zijn over het algemeen mengbaar: polaire stoffen mengen goed met polaire stoffen, apolair stoffen mengen goed met apolair stoffen.

Intermoleculaire krachten

➤ *Zie Vanderwaalskracht voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

In vaste stoffen en vloeistoffen worden moleculen bijgehouden door vanderwaalskrachten.

In een vloeistof bewegen de moleculen vrij binnen een vast volume, in een vaste stof trillen de moleculen alleen zonder van positie te veranderen. In een gas kunnen de moleculen onafhankelijk van elkaar bewegen. De kinetische energie van de moleculen is bepalend voor de temperatuur van de stof, en daarmee voor de fase waarin die zich bevindt.

Waterstofbruggen

Een waterstofbrug is een aantrekkingskracht tussen een sterk elektronegatief atoom van het ene molecuul en een zure waterstof van een ander molecuul. Waterstofatomen die een binding met een elektronegatief element hebben worden *zure waterstofatomen* genoemd, bijvoorbeeld waterstofatomen die een binding hebben met zuurstof zoals in water of in alcoholen.

Waterstofbruggen zorgen ervoor dat er in polaire stoffen sterkere intermoleculaire krachten aanwezig zijn dan in apolair stoffen. Daardoor hebben polaire stoffen vaak een hoger kook- en smeltpunt dan op grond van hun molecuulgewicht te verwachten zou zijn. Apolair stoffen met een molecuulgewicht dat in dezelfde orde van grootte ligt als dat van water zijn bij kamertemperatuur gasvormig, zoals methaan.

Zie ook

- Londonkracht

Geschiedenis van de molecuultheorie

Oudheid

De Griekse wijsgeer Leucippus was de grondlegger van het atomisme, de theorie die zegt dat alle materie is opgebouwd uit niet-deelbare, onvernietigbare deeltjes, atomen genaamd. Deze theorie is verder uitgewerkt door zijn leerling Democritus. Daarmee waren zij de eerste geleerden die stelden dat materie uit deeltjes bestaat, waarmee zij ook de basis voor de molecuultheorie legden.

Renaissance

Moleculen die opgebouwd waren uit atomen zijn een vinding uit de 17e eeuw, hoewel de begrippen niet 1 op 1 vertaald moeten worden met wat we daar nu onder verstaan. Het atoom-idee werd onafhankelijk van elkaar door de Nederlander Isaac Beeckman (1620) en de Fransman Sébastien Basson (1621) verder ontwikkeld. Beeckman vroeg zich af waarin metalen van elkaar verschillen. Hij zag een klomp goud als een verzameling onzichtbaar kleine individuen, goudwezentjes, die hij homogenea noemde. Die waren opgebouwd uit vier atoomsoorten: water, vuur, aarde en lucht. De homogenea van verschillende metalen hadden verschillende aantallen van die atoomsoorten, en dat gaf ze specifieke eigenschappen. Tot dan toe meenden onderzoekers dat de verschillende metalen in elkaar konden overgaan via een soort evolutie van onedel naar edel. Maar die 'evolutietheorie' kon niet verklaren hoe legeringen, mengsels van verschillende metalen, dan waren opgebouwd. Beeckmans theorie kon dat wel. De inzichten van Beeckman kregen invloed via zijn leerlingen Descartes en Huygens, en ze leidden tot de **monades** van Leibniz, de **molecule** van Stahl, de **corpuscules** van Boyle evenals de **particulae ultimae compositionis** van Newton.



Amedeo Avogadro

Negentiende eeuw

In 1808 werd de atoomtheorie opnieuw leven ingeblazen door de Britse schei- en natuurkundige John Dalton. In zijn werk *A new system of chemical philosophy* stelde hij dat materie is samengesteld uit kleine, ondeelbare deeltjes. De Italiaanse geleerde Amedeo Avogadro maakte vervolgens in 1811 het onderscheid tussen atomen en moleculen. Hij publiceerde zijn inzicht in het *Journal de Physique* dat niet breed werd opgemerkt. In de gehele eerste helft van de negentiende eeuw was er onder chemici grote verwarring over het molecuulbegrip, samenhangend met het feit dat in een enkelvoudige stof als bijvoorbeeld zuurstofgas een molecuul opgebouwd is uit twee identieke atomen. Dalton kon dat niet accepteren; voor water kwam hij daarom bijvoorbeeld uit op de molecuulformule HO, voor ammoniak op NH. Pas na het grote congres van chemici in Karlsruhe in 1860 vonden door de pleidooien van de jonge Italiaanse chemicus Cannizzaro de inzichten van Avogadro langzamerhand algemeen ingang.

1857 was het jaar waarin Friedrich Kekulé ontdekte dat koolstof vierwaardig is, zonder meer een mijlpaal gezien het feit dat de hedendaagse organische chemie grotendeels op die ontdekking gebaseerd is.

Twintigste eeuw

In de eerste helft van de twintigste eeuw is door onder andere Ernest Rutherford en Niels Bohr de inwendige structuur van het atoom opgehelderd. Dankzij hun werk konden ook veel vragen over de ruimtelijke vorm van moleculen beantwoord worden.

Bronnen

H. Kubbinga, De molecularisering van het wereldbeeld, Deel I, (Hilversum: Verloren 2003) ISBN 90-6550-731-0

Externe links

- Deze ^[1] website geeft een goede indruk van grootteverhoudingen op moleculair en kleiner niveau.

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon



Zie de categorie *[/wiki/Commons:Category:Molecules?uselang=nl#mw-subcategories Molecules]* van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.



Zoek **molecuul** op in het WikiWoordenboek.

Referenties

[1] <http://www.falstad.com/scale/>

Muon-antineutrino

Een **muon-antineutrino** of **mu-antineutrino** (symbool $\bar{\nu}_\mu$) is het neutrino dat optreedt als de isospin partner van het antimuon.

Het muon-antineutrino is een ongeladen lepton. Het is dus een elementair deeltje of meer algemeen een subatomair deeltje. Het heeft spin 1/2 en is dus een fermion. Het muon-antineutrino is het antideeltje van het muon-neutrino. Het heeft net dezelfde eigenschappen als het muon-neutrino, maar dan gespiegeld. De twee zijn dus antimaterie en materie en annihileren elkaar dus als ze elkaar ontmoeten. Het muon-antineutrino is een neef (2e generatie) van het elektron-antineutrino (1e generatie, eerst ontdekt, lichtst, meest stabiel) en het tau-antineutrino (3e generatie, laatst ontdekt, zwaarst, minst stabiel). Het is nog niet zeker, of het muon-antineutrino een massa bezit of niet, maar als het er één heeft, dan is die kleiner dan 0,19 MeV.

Zie ook het standaardmodel van de deeltjesfysica voor meer gegevens.

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Nucleon

Nucleon is het woord dat wordt gebruikt om een neutron of een proton aan te duiden, de deeltjes die samen de atoomkern vormen. Het woord *nucleon* is gebaseerd op het Latijnse *nucleus*, dat kern betekent. Het totale aantal nucleonen in de kern van een atoom is het massagetal. Beide nucleonen hebben een massa die dicht bij een atomaire massa-eenheid ligt.

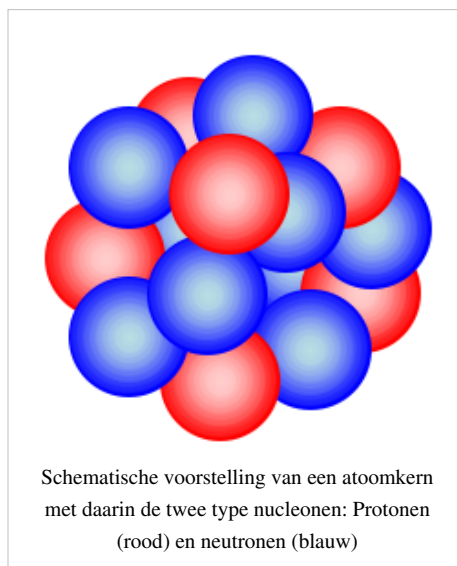
In bredere zin worden ook het antiproton en het antineutron tot de nucleonen gerekend.

Ieder atoom, met uitzondering van waterstof (1 proton) en het helium-3 isotoop (2 protonen en 1 neutron), heeft minstens evenveel neutronen als protonen in zijn kern. Hoe zwaarder een atoomkern is, des te groter is de verhouding tussen het aantal neutronen en protonen.

Nucleonen zijn geen elementaire deeltjes, omdat zij een inwendige structuur hebben. Ieder nucleon bestaat uit drie quarks, die interactie met elkaar hebben via de gluonen.

Proton: 2 Up Quarks met elk een lading van +2/3 + 1 Down Quark met een lading van -1/3

Neutron: 1 Up Quark met een lading van +2/3 + 2 Down Quarks met een lading van -1/3



Fysische deeltjes

Atomaire deeltjes: Molecuul · Atoom · Ion

Subatomaire deeltjes: Nucleon · Atoomkern

Bosonen: Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson

Fermionen: Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Pion (natuurkunde)

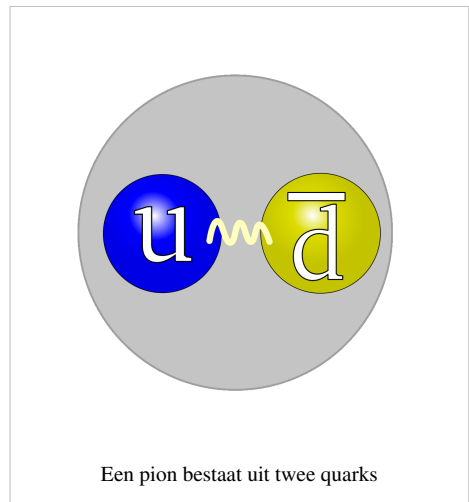
Het **pion** of **π -meson** is een subatomair deeltje, meer bepaald een hadron, nog meer bepaald een meson. Het bestaat uit twee quarks en is dus een boson. Het komt in drie varianten voor: +, - en ongeladen.

Eigenschappen

De drie pionen worden onderscheiden door hun elektrische lading. Ook is er een klein verschil in massa; in alle andere eigenschappen zijn ze gelijk. Het neutrale pion π^0 heeft de laagste massa, $134,9766 \pm 0,0006$ MeV, terwijl het positief geladen pion π^+ en het negatieve π^- zwaarder zijn: $139,57018 \pm 0,00035$ MeV (gegevens van de Particle Data Group ^[1], januari 2005). De massa ligt dus tussen die van een lepton (bijvoorbeeld het elektron met 0,5 MeV) en die van een baryon (zoals het neutron van 940 MeV); dit is de reden waarom men de naam meson (grieks voor *midden*) voor deze deeltjes heeft ingevoerd. De pionen zijn de lichtste mesonen.

Het pion wordt gezien als een samengesteld deeltje, bestaand uit een quark en een anti-quark. Alleen de lichtste twee typen quark, het up-quark **u** en het down-quark **d**, komen in het pion voor: π^+ is te beschrijven als een gebonden toestand van **u** en anti-**d**, π^- is anti-**u** met **d**, en π^0 is een gemengde toestand van **u**+anti-**u** en **d**+anti-**d**. Het neutrale pion is zijn eigen antideeltje, terwijl de geladen pionen elkaars antideeltje zijn.

Het pion heeft spin 0 en is dus een boson. Het blijft niet lang bestaan: de vervaltijd van π^+ en π^- is $(2,6033 \pm 0,0005) \times 10^{-8}$ seconde; π^0 vervalt zelfs al na gemiddeld $(8,4 \pm 0,6) \times 10^{-17}$ seconde. De geladen pionen vallen (in 99,99% van de gevallen) uiteen in een (anti-)muon en een (anti-)muon-neutrino. De neutrale pionen vallen in 98,8% van de gevallen uiteen in twee fotonen en in bijna alle resterende gevallen als een elektron, een positron en een foton.



Een pion bestaat uit twee quarks

Geschiedenis

Het pion werd in 1935 voorspeld door Hideki Yukawa als overbrenger van de sterke kernkracht. Het werd dus aangenomen als de veroorzaker van de Yukawa-potentiaal. In 1947 werden de geladen pionen experimenteel aangetoond door Cecil Powell. Drie jaar later werd ook het neutrale pion waargenomen.

Referenties

[1] <http://pdg.lbl.gov>

Proef van Millikan

De **proef van Millikan** was een experiment dat in 1909 werd uitgevoerd door Robert Millikan en Harvey Fletcher.

Het doel het experiment van Robert Millikan en Harvey Fletcher in 1909 was het bepalen van de lading van een enkel elektron. Zij deden dit door een kleine oliedruppel zwevend te houden tussen twee condensatorplaten. Als men dan de elektrische veldsterkte weet, én de massa van de oliedruppel dan is men in staat de lading van de druppel zeer nauwkeurig te bepalen. Door dit voor een groot aantal van deze kleine druppeltjes te doen vonden zij dat de gemeten waarden altijd veelvoud van dezelfde lading waren. Zij interpreteerden dit als lading op één enkel elektron: $1,602 \times 10^{-19}$ coulomb.

Achtergrond

Vanaf 1909, toen hij professor aan de Universiteit van Chicago was, werkte Millikan - met veel inbreng van Fletcher - aan het oliedruppelexperiment. Sindsdien hebben generaties natuurkundestudenten het experiment herhaald - met wisselend succes. Na publicatie in 1910 werd de gevonden waarde voor de elektronlading in twijfel getrokken door Felix Ehrenhaft. Een controverse tussen de twee fysici was het gevolg. Na het verbeteren van zijn opstelling publiceerde hij zijn resultaten in 1913. De zogenoemde elementaire lading is één van de fundamentele fysieke constanten en de nauwkeurige bepaling ervan is van groot belang. Dit experiment mat de kracht op uiterst kleine geladen druppeltjes olie die tegen de zwaartekracht in tussen twee geladen metaalplaten zwevend gehouden worden. Als de elektrische veldsterkte, de afmeting van de druppel en de soortelijke massa van de olie bekend zijn, dan kan daarmee de lading op het druppeltje worden bepaald. Door het experiment te herhalen voor grote aantallen druppeltjes toonde Millikan aan dat de gevonden lading telkens een veelvoud was van een "elementaire" waarde ($1,602 \times 10^{-19}$ coulomb). Dit kan verklaard worden als dat de lading is van één enkel elektron.



Robert A. Millikan in 1891

Hoewel er rond 1891 wel een vermoeden bestond dat er subatomaire deeltjes zouden bestaan, was lang niet iedereen daarvan overtuigd. Door proeven met kathodestralen in 1897 had Joseph John Thomson negatief geladen "lichaampjes" ontdekt, zoals hij ze noemde, met een massa 1000 keer zo klein als die van een waterstofatoom. Vergelijkbare resultaten waren gevonden door George FitzGerald en Walter Kaufmann. Vrijwel alles wat toen over elektriciteit en magnetisme bekend was kon worden verklaard met als basis dat lading een ongebroken grootheid is. De charme van dit experiment is dat het met eenvoudige middelen een vrij nauwkeurige bepaling van een

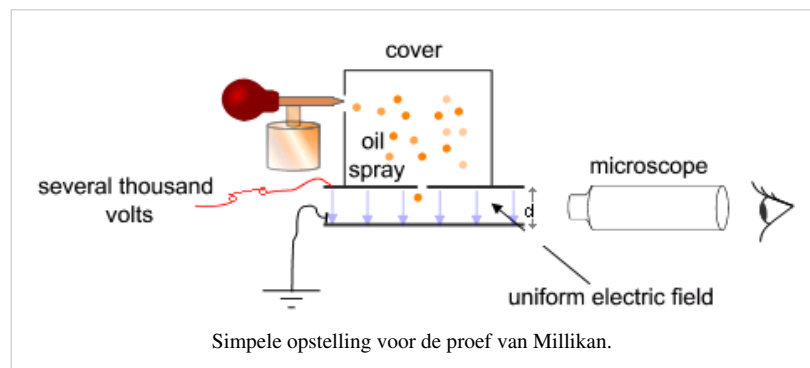
fundamentele constante mogelijk maakt en tegelijk een demonstratie geeft van het gekwantiseerd zijn van lading. Thomas Edison had eerder gedacht dat de lading een oneindig deelbare grootte was maar werd overtuigd van het tegendeel na met de apparaten van Millikan en van Fletcher gewerkt te hebben.

In latere jaren is er ophef ontstaan over het "selectieve" gebruik van resultaten door Millikan. De historicus Gerald Holton was het opgevallen dat metingen nogal selectief werden behandeld. Holton (1978) wees erop dat Millikan een grote reeks meetwaarden negeerde zonder duidelijke reden. Latere experts hebben dit genuanceerd, maar dat er enige "cosmetische chirurgie" op de resultaten werd uitgevoerd wordt nu wel geaccepteerd. Het doel hiervan was om te kunnen stellen dat er een meting van e met een nauwkeurigheid van $\pm 0,5\%$ had plaatsgevonden, terwijl de werkelijke nauwkeurigheid binnen $\pm 2\%$ lag, wat nog steeds nauwkeuriger was dan ieder ander, maar Millikan bepaalde dat dit tot "onnodige discussie" in fysicakringen zou hebben geleid.

In 1923 won Millikan de Nobelprijs voor natuurkunde - voor een deel wegens dit experiment. Het experiment is inmiddels herhaald door generaties fysicastudenten, waarbij het hen telkens opvalt hoe moeilijk het is om ook maar eens in de buurt van de echte waarde van e en binnen Millikans foutmarge uit te komen.

Experimentele procedure

Het diagram toont een eenvoudige versie van Millikans proef. Een elektrisch veld wordt in stand gehouden door twee horizontale parallelle condensatorplaten met een hoog potentiaalverschil. Oliedruppeltjes worden er tussen losgelaten door een verstuiwer. Door de spanning te variëren, kunnen de druppels omhoog of omlaag bewegen.



De platen worden samengehouden door een ring van isolerend materiaal met gaten waardoor licht naar binnen kan vallen. Een microscoop kijkt door een ander gat. De oliedruppels lichten op als heldere punten op een donkere achtergrond. De microscoop heeft een gekalibreerde schaal in de lens waarmee de snelheid van een druppel gemeten kan worden. De olie is een type siliconenolie dat gewoonlijk in vacuümapparaten wordt gebruikt. De reden is dat dit type olie een uiterst lage dampdruk heeft. Gewone olie zou onder de hitte van de lichtbron verdampen, zodat de massa van de oliedruppel niet constant zou blijven gedurende het experiment. Sommige oliedruppels zullen een lading krijgen door wrijving met de buis op het moment van inspuiten en andere kunnen worden geladen door een ioniserende stralingsbron (zoals een röntgenbron) in te bouwen.

Opstelling

Bij het originele Millikan-apparaat werden de oliedruppels eerst ingespoten tussen de platen met het elektrische veld uitgeschakeld. Zij bereiken dan een eindsnelheid door wrijving met de lucht. Het veld wordt dan ingeschakeld en als het groot genoeg is, zullen enkele druppels (de geladen druppels) gaan stijgen. Dit komt doordat de opwaartse elektrische kracht F_e groter is dan de naar beneden gerichte zwaartekracht F_z . Een van de druppels wordt geselecteerd en in het midden van het meetgebied gehouden door de spanning in en uit te schakelen tot alle andere druppels zijn gevallen. Het experiment wordt dan voortgezet met deze ene druppel.

Men laat de druppel vallen en zijn eindsnelheid v_1 zonder elektrisch veld wordt berekend. De remkracht die op de druppel werkt kan dan berekend worden met de Wet van Stokes: waar

$$F_w = 6\pi r\eta v_1$$

- v_1 = de eindsnelheid is van de vallende druppel

- η = de viscositeit van de lucht, en
- r = de straal van de druppel.

De massa M is volume V dat met de dichtheid wordt vermenigvuldigd en de versnelling is de zwaartekrachtsversnelling g .

Wat berekend moet worden is de neerwaartse kracht van de druppel. Dat is het ware gewicht min de opwaartse drijfkraft (het gewicht van de verplaatste lucht). Voor een volkomen bolvormig druppeltje kan deze kracht worden geschreven als:

$$F_{opwaarts} = \frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho_{olie} - \rho_{lucht})$$

Bij de eindsnelheid versnelt de oliedruppel niet. Dan moet de totale kracht nul zijn, dus compenseren de twee krachten F_z en $F_{opwaarts}$ elkaar. Zodra r wordt berekend, kan $F_{opwaarts}$ gemakkelijk worden uitgewerkt.

Nu wordt het elektrische veld ingeschakeld. Q is de lading op de oliedruppel en E het elektrische veld tussen de platen.

Voor parallelle platen waar V het potentiaalverschil is en D de afstand tussen de platen. Eén manier om Q te vinden is V aan te passen tot de oliedruppel stil hangt. Dan zijn F_E met F_z aan elkaar gelijk. In de praktijk is het uiterst moeilijk om dit exact te doen. Een praktischere benadering is om V lichtjes te verhogen zodat de oliedruppel met een nieuwe eindsnelheid v_2 omhoog beweegt.

Subatomair deeltje

Een **subatomair deeltje** is een deeltje dat kleiner is dan het atoom. Sommige subatomaire deeltjes kunnen deel uitmaken van atomen, andere worden alleen in het laboratorium, in sterren of in andere buitengewone omstandigheden gevormd. De deeltjes zijn kleiner dan 1 fm (10^{-15} m). Ze worden bestudeerd door de deeltjesfysica.

Inleiding

We kunnen de subatomaire deeltjes indelen in samengestelde en elementaire deeltjes. Elementaire deeltjes zijn voor zover bekend niet verder op te delen. Een samengesteld deeltje is opgebouwd uit twee of meer elementaire deeltjes.

Ook kunnen we de deeltjes verdelen in bosonen en fermionen. Fermionen (met halftallige spin) zijn de materiedeeltjes waaruit het universum is opgebouwd, bosonen (met heeltallige spin) hebben een tijdelijk bestaan voor het overbrengen van krachten (interacties, wisselwerkingen) tussen de fermionen. Deze twee typen deeltjes gedragen zich verschillend. Bosonen kunnen zich met een ongelimiteerd aantal in een en dezelfde kwantumtoestand bevinden (bijvoorbeeld fotonen: er is geen limiet aan de sterkte van een laserstraal, dat wil zeggen het aantal fotonen waar de straal uit bestaat). Fermionen moeten altijd alleen zijn in hun kwantumtoestand. Het heliumatoom kan slechts twee elektronen bevatten, één met de spin omhoog en één met de spin omlaag. Die eigenschap van fermionen noemt men het uitsluitingsprincipe van Pauli. De energieverdeling van een hoeveelheid bosonen volgt de Bose-Einsteinstatistiek, bij fermionen is dit de Fermi-Diracverdeling.

Hieronder volgt een overzicht van subatomaire deeltjes en hun eigenschappen. Bij alle deeltjes moet worden aangetekend dat ook hun antideeltje bestaat, met dezelfde massa en spin, maar met de overige eigenschappen (namelijk de behouden grootheden) precies omgekeerd. Dus het *anti-elektron* (ook positron genoemd) heeft massa

Three generations of matter (fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge	2/3	2/3	2/3	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Quarks				
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	1/2	1/2	1/2	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson
Leptons				
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	±1
	1/2	1/2	1/2	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson
				Gauge bosons

De deeltjes van het standaardmodel.

0,511 MeV, spin $\frac{1}{2}$, maar leptongetal -1 en elektrische lading $+1$. Materie en antimaterie annihileren elkaar. Onder normale omstandigheden kan antimaterie maar kortstondig bestaan, doordat een antideeltje spoedig in contact zal komen met een normaal deeltje.

Elementaire deeltjes

De elementaire deeltjes zijn de bouwstenen van alle materie. Het zijn de componenten van het standaardmodel van materie en krachten, dat in de jaren 70 in de deeltjesfysica is ontwikkeld om de tot dan toe bekende deeltjes te verklaren. Het model voorspelde nog meer deeltjes, waarvan het merendeel sindsdien ontdekt is. Slechts één elementair deeltje uit het model, het higgsboson, is nog niet met zekerheid aangetoond. Ook het graviton, een boson dat volgens kwantumgravitatie-theorieën de zwaartekracht zou moeten overbrengen, is nog niet waargenomen.

In de loop van de tijd is veranderd welke deeltjes men beschouwt als elementair. Tot het begin van de twintigste eeuw meende men dat atomen elementaire deeltjes waren, vandaar hun naam, Grieks voor ondeelbaren. In 1911 ontdekte Ernest Rutherford dat het atoom samengesteld was. Dat nucleonen uit quarks bestaan, is pas in de jaren 60 door Murray Gell-Mann voorgesteld. Sindsdien worden ook nucleonen niet meer beschouwd als elementaire deeltjes. Hoewel het niet uitgesloten is dat ook een quark uit kleinere deeltjes bestaat, heeft men hiervoor nog geen aanwijzingen gevonden.

Fermionen

De fermionen uit het standaardmodel zijn quarks en leptonen (*leptos* is Grieks voor 'fijn': fijne deeltjes). Allemaal hebben ze spin $\frac{1}{2}$ (halfvallige spin). Ze komen voor in drie zogeheten generaties (groepen). De deeltjes uit de eerste generatie zijn de 'normale', meest voorkomende deeltjes. De overige zijn aanzienlijk zwaarder en ontstaan in hoogenergetische botsingen; zij zijn instabiel en vervallen tot deeltjes van de eerste generatie. Ondanks veel experimenten heeft men niet méér generaties van elementaire fermionen ontdekt.

Elementaire fermionen

Generatie		Deeltje	Symbol	Spin J	Lading Q	Leptongetal L	Baryongetal B	Massa (MeV)	Vervaltijd (s)
Eerste generatie	Quarks	up	u	$\frac{1}{2}$	$+2/3$	0	$+1/3$	1,5 – 4	
		down	d	$\frac{1}{2}$	$-1/3$	0	$+1/3$	4 – 8	
	Leptonen	elektron	e^-	$\frac{1}{2}$	-1	$+1$	0	0,511	$> 1,5 \times 10^{34}$
		elektron-neutrino	ν_e	$\frac{1}{2}$	0	$+1$	0	$< 2,2 \times 10^{-9}$	
Tweede generatie	Quarks	charm	c	$\frac{1}{2}$	$+2/3$	0	$+1/3$	1150 - 1350	
		strange	s	$\frac{1}{2}$	$-1/3$	0	$+1/3$	80 – 130	
	Leptonen	muon	μ^-	$\frac{1}{2}$	-1	$+1$	0	105,7	$2,197 \times 10^{-6}$
		muon-neutrino	ν_μ	$\frac{1}{2}$	0	$+1$	0	$< 0,17$	
Derde generatie	Quarks	top (truth)	t	$\frac{1}{2}$	$+2/3$	0	$+1/3$	172500	
		bottom (beauty)	b	$\frac{1}{2}$	$-1/3$	0	$+1/3$	4100 - 4400	
	Leptonen	tau	τ^-	$\frac{1}{2}$	-1	$+1$	0	1777	$2,91 \times 10^{-13}$
		tau-neutrino	ν_τ	$\frac{1}{2}$	0	$+1$	0	$< 15,5$	

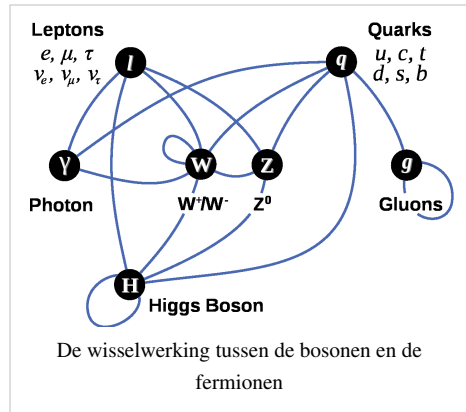
Hier zijn de massa's uitgedrukt in mega-elektronvolt (MeV), de ladingen in de elementaire lading e , en de spin in het elementaire impulsmoment \hbar . Naast de bovengenoemde elektrische lading (Q), leptongetal (L) en baryongetal (B) bestaan er nog meer (gedeeltelijk) behouden grootheden, maar die zijn voor bijna alle deeltjes gelijk aan 0:

- Charm (C) is $+1$ voor het c -quark en 0 voor andere deeltjes

- Strangeness (S) is -1 voor het s -quark en 0 voor andere deeltjes
- Top is $+1$ voor het t -quark en 0 voor andere deeltjes
- Bottom is -1 voor het b -quark en 0 voor andere deeltjes

Bosonen

De bosonen uit het standaardmodel brengen drie van de vier fundamentele natuurkrachten over: de sterke kernkracht, de zwakke kernkracht en de elektromagnetische kracht. Bij iedere kracht hoort één of meer wisselwerkingsdeeltjes. Zo brengt het foton (lichtdeeltje) de elektromagnetische kracht over; men ziet het foton als een bepaalde energietoestand van het elektromagnetische veld. Zo is het ook met de overige wisselwerkingsbosonen. Het Z-boson en de W-bosonen zijn voorspeld door het standaardmodel en later aangetoond door Simon van der Meer en zijn medewerkers. Het voorspelde higgsboson is verantwoordelijk voor de massa van deeltjes. Het graviton zou de zwaartekracht over moeten brengen maar heeft nog steeds de status "hypothetisch".



Elementaire bosonen

Kracht	Deeltje	Symbool	Spin J	Lading Q	Massa (GeV)
Elektromagnetische kracht	foton	γ	1	0	0
Sterke kernkracht	gluon	g	1	0	0
Zwakke kernkracht	W-boson (positief)	W^+	1	+1	80,4
	W-boson (negatief)	W^-	1	-1	80,4
	Z-boson	Z	1	0	91,2
Overig (standaardmodel)	Higgsboson (positief)	H^+	0	+1	125,3
	Higgsboson (negatief)	H^-	0	-1	125,3
	Higgsboson (neutraal)	H^0	0	0	125,3
Zwaartekracht	graviton	-	2	0	$< 7 \times 10^{-41}$

Naast de hier genoemde zijn er nog allerlei hypothetische bosonen, volgend uit ideeën over supersymmetrie, theorie van alles of andere amendementen op het standaardmodel.

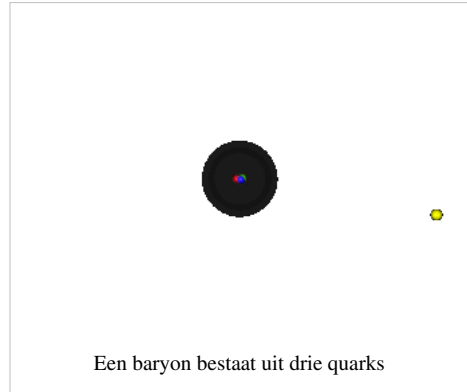
Samengestelde deeltjes: hadronen

De overige subatomaire deeltjes zijn opgebouwd uit twee of meer quarks (en de gluonen die de quarks bij elkaar houden). De sterke kernkracht zorgt dat de quarks niet los kunnen komen uit de deeltjes. We noemen deze deeltjes hadronen (Grieks voor *sterk*). Een even aantal quarks levert een boson op, een oneven aantal een fermion. De meeste hadronen bestaan geheel uit eerste-generatie (*up* en *down*) quarks. Slechts enkele komen in gewone materie voor: protonen, neutronen en pionen. Zwaardere deeltjes ontstaan weer alleen bij kernreacties of als zeer kort durende fluctuaties.

Samengestelde fermionen: baryonen

De subatomaire, samengestelde fermionen bestaan uit een oneven aantal (anti-)quarks – in de meeste gevallen drie. Deze zijn aan elkaar gebonden door de sterke kernkracht. We noemen deze deeltjes wel baryonen (Grieks voor *zwaar*). De twee eenvoudigste baryonen zijn stabiel. Dit zijn het proton (geheel stabiel) en het neutron (vervalt in ongebonden toestand na gemiddeld 886 seconde). De overige baryonen vervallen snel.

Van de talloze mogelijke combinaties zijn er ruim 120 experimenteel onderzocht. Het zijn onder andere aangeslagen toestanden van verbintenissen van drie eerste-generatie-quarks (bijvoorbeeld de verscheidene Delta-baryonen). Andere baryonen bevatten één of meer quarks van de tweede generatie.



Baryonen (per groep)

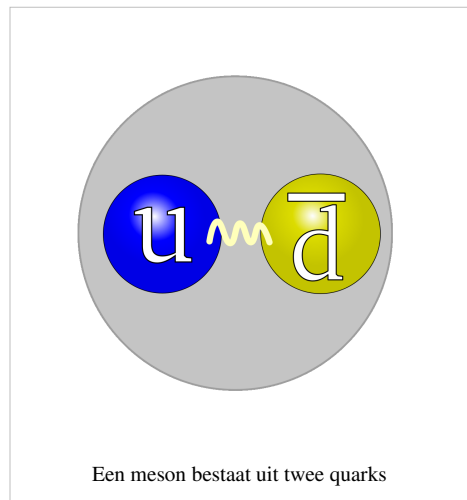
Deeltje	Symbol	Quark-opbouw	Spin J	Lading Q	Massa (MeV)	Vervaltijd (s)
proton	p	uud	$1/2$	+1	938,3	$> 6,6 \times 10^{36}$
neutron	n	udd	$1/2$	0	939,6	886
N-baryonen	N	uud of udd	$1/2 - 11/2$	0 of +1	1440 – 2600	
Delta-baryonen	Δ	$uuu/uud/udd/ddd$	$1/2 - 11/2$	+2/+1/0/-1	1232 – 2420	
Lambda-baryonen	Λ	uds	$1/2 - 9/2$	0	1116 – 2350	
Sigma-baryonen	Σ	$uus/uds/ds$	$1/2 - 7/2$	+1/0/-1	1189 – 2250	
Xi-baryonen	Ξ	uss of dss	$1/2 - 5/2$	0 of -1	1315 – 2030	
Omega-baryonen	Ω	sss	$3/2$	-1	1672 – 2250	

Waar geen vervaltijd vermeld staat, is deze zeer kort. Naast de hier genoemde groepen zijn nog andere baryonen onderzocht, zoals die met een c -quark of de 'exotische', waarin een anti-quark voorkomt (bijvoorbeeld het Θ^+ -deeltje, dat bestaat uit $uudd$ en anti- s).

Samengestelde bosonen: mesonen

De subatomaire, samengestelde bosonen bestaan uit twee quarks: een quark en een anti-quark. Die zijn aan elkaar gebonden door de sterke kernkracht. We noemen deze deeltjes mesonen (Grieks voor *midden*, dat wil zeggen midden tussen de lichte leptonen en de zware baryonen). Mesonen zijn instabiel en vervallen na korte tijd.

Van de talloze mogelijke combinaties zijn er ruim 135 experimenteel onderzocht. Het zijn onder andere aangeslagen toestanden van eerste-generatie quark/anti-quarkparen (bijvoorbeeld de drie rho-mesonen). Andere mesonen bevatten een of twee (anti-)quarks van de tweede generatie. Een anti-deeltje wordt aangeduid met een streepje, bijvoorbeeld \bar{u} . Gemengde toestanden (kwantummechanische superposities van verschillende toestanden) worden weergegeven als de som of het verschil van zuivere toestanden.



Mesonen (per groep)

Deeltje	Symbol	Quark-opbouw	Spin J	Lading Q	Massa (MeV)	Vervaltijd (s)
pion (positief)	π^+	$u\bar{d}$	0	+1	139,6	$2,603 \times 10^{-8}$
pion (negatief)	π^-	$\bar{u}d$	0	-1	139,6	$2,603 \times 10^{-8}$
pion (neutraal)	π^0	$u\bar{u} - d\bar{d} - s\bar{s}$	0	0	135,0	$8,4 \times 10^{-17}$
eta-meson	η	$(u\bar{u} + d\bar{d}) + s\bar{s}$	0	0	548	
rho-mesonen	ρ	$u\bar{d}/(u\bar{u} - d\bar{d})/\bar{u}d$	1	+1/0/-1	776	
omega-meson	ω	$(u\bar{u} + d\bar{d}) + s\bar{s}$	1	0	783	
Overige lichte mesonen		<i>zie π/η</i>	0/1/2/3/4	+1/0/-1	400 – 2340	
Kaonen (K-mesonen)	K	$u\bar{s}/d\bar{s}/\bar{d}s/\bar{u}s$	0/1/2/3/4	+1/0/-1	494 – 2045	
B-mesonen	B	$u\bar{b}/\bar{d}b/\bar{s}b/\bar{c}b$	0	+1/0	5279 – 6276	
D-mesonen	D	$c\bar{d}/c\bar{u}/\bar{c}u/\bar{c}d$	0/1/2	+1/0/-1	1865 – 2459	
D _s -mesonen	D_s	$c\bar{s}/\bar{c}s$	0/1/2	+1/0/-1	1968 – 2572	

Waar geen vervaltijd vermeld staat, is deze zeer kort. Naast de hier genoemde groepen zijn nog andere mesonen onderzocht, zoals die met een b -quark of met $c\bar{c}$.

Externe link

- Particle Data Group (recente gegevens van subatomaire deeltjes) ^[8]

Fysische deeltjes	
Atomair deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomair deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Tachyon

Een **tachyon** (uit het Grieks: *ταχύς* (*takhús*), 'snel') is een hypothetisch exotisch deeltje dat beweegt met een snelheid groter dan de lichtsnelheid. De eerste beschrijving van tachyonen wordt toegeschreven aan de Duitse natuurkundige Arnold Sommerfeld, maar het waren George Sudarshan^{[1][2]} en Gerald Feinberg^[3] (die de term bedacht) in de jaren '60 die een theoretisch model ontwikkelden voor hun onderzoek. Tachyonen worden in meerdere theorieën gebruikt, waaronder de snaartheorie. In termen van speciale relativiteit is een tachyon een deeltje dat zich op een ruimte-achtige (in plaats van een tijd-achtige) baan beweegt en een imaginaire eigentijd heeft.

New Age producten

Vanuit de New Age-wereld zijn vanuit pseudowetenschappelijk onderzoek^[4] of marketing een aantal producten^[5] en diensten^[6] ontwikkeld die claimen gebruik te maken van Tachyons.

Referenties

- [1] Bilaniuk en Sudarshan, Particles beyond the Light Barrier, *Physics Today*, (mei 1969)
- [2] Bilaniuk, Deshpande en Sudarshan, Meta Relativity, *American Journal of Physics*, pp. 718ff (1962)
- [3] Gerald Feinberg, Possibility of Faster-Than-Light Particles, *Physical Review*, vol. 159 (1967) 1089-1105
- [4] (<http://www.skepsis.nl/tachyonen.html>)
- [5] (<http://www.tachyon-wellness.be>)
- [6] (<http://www.afstandsinwijding.nl/a-9568147/healing-inwijdingen/tachyon-source-2010>)

Tau-antineutrino

Een **tau-antineutrino** of **tauon-antineutrino** (symbool $\bar{\nu}_\tau$) is het neutrino dat optreedt als de isospinpartner van het antitau-lepton.

Het tau-antineutrino is een ongeladen lepton. Het is dus een elementair deeltje of meer algemeen een subatomair deeltje. Het heeft spin 1/2 en is dus een fermion. Het tau-antineutrino is het antideeltje van het tau-neutrino. Het heeft net dezelfde eigenschappen als het tau-neutrino, maar dan gespiegeld. De twee zijn dus antimaterie en materie en annihileren elkaar dus als ze elkaar ontmoeten.

Het tau-antineutrino is een neef (3e generatie, laatst ontdekt, zwaarst) van het elektron-antineutrino (1e generatie) en het muon-antineutrino (2e generatie). Het is nog niet zeker, of het tau-antineutrino een massa bezit of niet, maar als het er één heeft, dan is die kleiner dan 18,2 MeV. Meer informatie is te vinden onder het standaardmodel van de deeltjesfysica.

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Tau-neutrino

Een **tau-neutrino** of **tauon-neutrino** (symbool ν_τ) is het neutrino dat optreedt als isospin partner van het tauon.

Het is een ongeladen lepton. Het behoort dus tot de elementaire deeltjes, of meer algemeen tot de subatomaire deeltjes.

Het tau-neutrino heeft een spin 1/2 en is dus een fermion.

Het is niet zeker of het tau-neutrino een massa bezit of niet, maar als het er één bezit, dan is ze kleiner dan 18 MeV.

Het tau-neutrino is een neef (3e generatie, laatst ontdekt) van het elektron-neutrino (1e generatie, eerst ontdekt) en het muon-neutrino (2e generatie).

Ontdekking

Het bestaan van het tau-neutrino was al eerder voorspeld, maar het werd pas in 2000 waargenomen door het DONUT-experiment op Fermilab in de Verenigde Staten.

Meer informatie is te vinden in het artikel over het standaardmodel van de deeltjesfysica.

Externe link

- Ontdekking van het tau-neutrino ^[1]

Fysische deeltjes
<p>Atomaire deeltjes: Molecuul · Atoom · Ion</p> <p>Subatomaire deeltjes: Nucleon · Atoomkern</p> <p>Bosonen: Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson</p> <p>Fermionen: Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon</p>

Referenties

- [1] <http://www.fnal.gov/pub/inquiring/physics/neutrino/discovery/index.html>

Top-quark

De **top-quark** is een van de zes quarks in het Standaard Model van de deeltjesfysica. De top-quark is een *up*-type quark en heeft een lading van $+2/3$ keer de elementaire lading. Hij vormt samen met de bottom-quark de derde generatie van quarks. De top-quark is net als alle andere quarks een fermion en heeft een spin van $1/2$. Het antideeltje van de top-quark is de antitop-quark, of ook wel top-antiquark.

De top-quark is bijzonder, omdat zijn massa vele malen groter is dan de andere vijf quarks. De top-quark heeft een massa van $172.9 \pm 1.5 \text{ GeV}/c^2$ ^[1] en is daarmee ongeveer 35 keer zo zwaar als de bottom-quark, de op een na zwaarste quark. De top-quark is ook ongeveer 170 keer zo zwaar als het proton. Het gevolg is dat de levensduur van een top-quark zeer kort is, 10^{-25} seconden^[1]. Hierdoor vervalt de top-quark voordat hij de mogelijkheid krijgt om hadronen of mesonen vormen, gebonden toestanden van meerdere quarks, zoals bij de andere vijf quarks het geval is. De top-quark komt niet in de natuur voor en kan alleen worden geproduceerd in deeltjesversnellers.

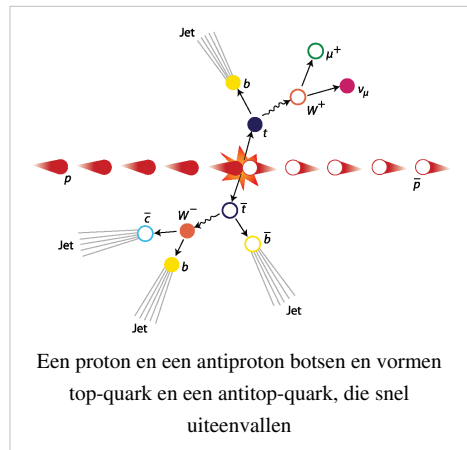
Het bestaan van de top-quark werd al voorspeld in 1973 door Makoto Kobayashi en Toshihide Maskawa om te verklaren dat er schending van de CP-symmetrie is in het verval van 'kaonen'^[2]. Uiteindelijk werd de top-quark in 1995 ontdekt met behulp van de CDF detector^[3] en vervolgens de D0 detector^[4] op Fermilab. Kobayashi en Maskawa ontvingen in 2008 de Nobelprijs voor de Natuurkunde voor de voorspelling van het bestaan van bottom- en top-quarks. De naam top-quark vindt zijn oorsprong in een artikel van Hariri^{[5][6]}.

Productie van top quarks

Top-quarks kunnen geproduceerd worden in paren, waarin een top-quark en een anti-top-quark worden gemaakt. Dit gebeurt door middel van de 'sterke wisselwerking', waarbij gluons en/of lichtere quarks met voldoende energie interactie aangaan om een top-quark paar te creëren. Een andere, mindere voorkomende mogelijkheid is om *losse* (anti-)top-quarks te maken, zonder in dezelfde botsing het antideeltje te maken. Deze laatste mogelijkheid wordt *single top production* genoemd en ontstaat door de zwakke wisselwerking. In 2006 leverde het D0-experiment het eerste experimenteel bewijs voor het bestaan ervan.

Verval van top quarks

Na de korte levensduur vervalt de top-quark in 99,9% van de gevallen naar een bottom-quark en een W-boson, via de zwakke wisselwerking^[1]. De overige 0,1% wordt gevormd door het verval naar een strange-quark of een down-quark, in combinatie met een W-boson.



Vectorboson


Een **vectorboson** is een boson met een spin gelijk aan een eenheid van \hbar (de constante van Planck gedeeld door 2π). In de elementaire deeltjesfysica zijn alle vectorbosonen die momenteel tot de fundamentele deeltjes worden gerekend ijkbosonen. Er zijn drie types vectorbosonen:

- Het foton als drager van de elektromagnetische kracht
- Het intermediair vectorboson als drager van de zwakke kernkracht
- Het gluon als drager van de sterke kernkracht

Drie verschillende vectorbosonen dragen de zwakke kernkracht: de twee W-bosonen W^\pm en het neutrale Z-boson. Er zijn acht verschillende gluonen.

Hoewel het foton en het gluon geen massa hebben, hebben de ijkbosonen van de zwakke kernkracht een massa vanwege het Higgs-mechanisme.

Het graviton, drager van de zwaartekracht, heeft spin 2 en is daarom strikt genomen geen vectorboson.

<p><i>Geplaast op:</i> 02-09-2008</p>	<p><i>Dit artikel is een beginnetje over natuurkunde. U wordt uitgenodigd op bewerken ^[1] te klikken om uw kennis aan dit artikel toe te voegen.</i></p>	
---	--	---

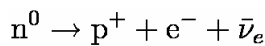
Referenties

[1] <http://en.wikipedia.org/wiki:Vectorboson>

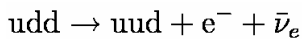
W-boson

Het **W-boson** is een elementair boson dat de zwakke kernkracht overbrengt (W is afkomstig van 'weak', oftewel 'zwak') en komt in twee varianten voor: positief geladen W^+ en negatief geladen W^- . Het werd ontdekt in 1983 in het CERN-lab. De natuurkundigen Simon van der Meer en Carlo Rubbia kregen onder andere voor hun bijdrage aan de ontdekking van het W-boson in 1984 de Nobelprijs voor de natuurkunde. De massa van het W-boson is $80,4 \text{ GeV}/c^2$.

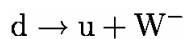
In praktijk gebeurt dit bijvoorbeeld als een neutron vervalt tot een proton.



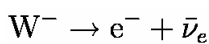
Een neutron bestaat uit 2 downquark en 1 up-quark. Het is afgeleid in udd. Verder bestaat een proton uit 1 downquark en 2 up-quark. Het is afgeleid in uud.



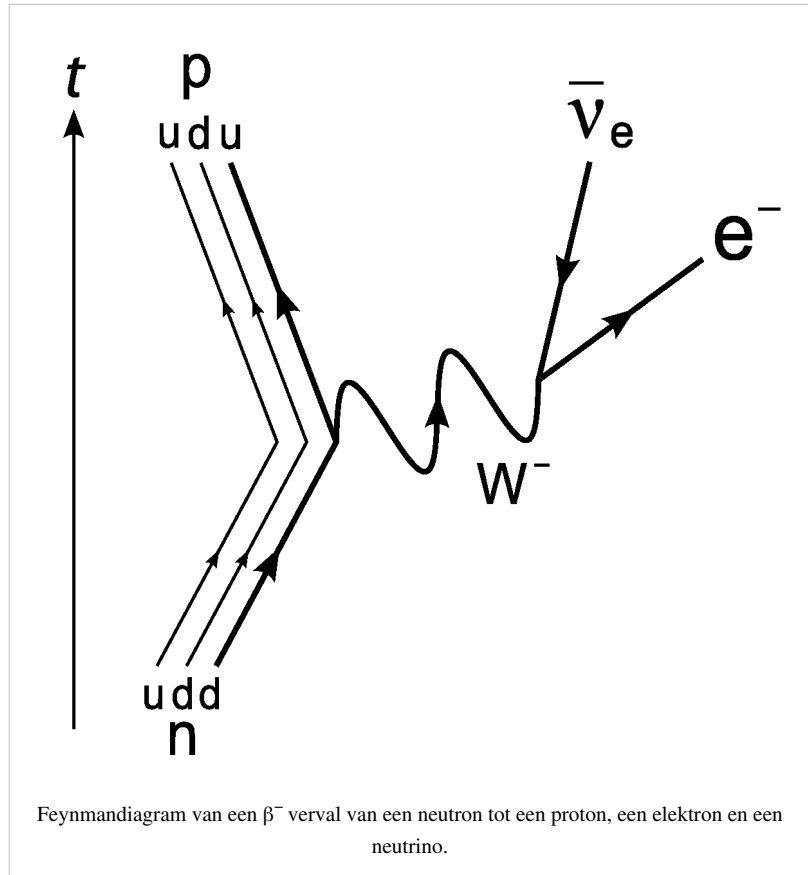
Zo ontstaat een W-boson als een downquark in een upquark verandert.



Het W-boson vervalt zelf tot een elektron en een elektron-antineutrino. Het ontstaat een Bèta-verval



Voor eigenschappen zie ook de lijst van elementaire bosonen.



Feynmandiagram van een β^- verval van een neutron tot een proton, een elektron en een neutrino.

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Z-boson

Het **Z-boson** is een boson dat de zwakke kernkracht overbrengt. Het elementair deeltje is elektrisch neutraal (notatie Z^0) en heeft een massa van 91 GeV. Het deeltje werd voorspeld in de jaren 60 in de theorie voor de elektrozwakke wisselwerking van Sheldon Glashow, Abdus Salam en Steven Weinberg, en werd voor het eerst waargenomen in 1983 in het CERN-lab. In 1984 kregen de natuurkundigen Simon van der Meer en Carlo Rubbia de nobelprijs voor de natuurkunde onder andere voor hun bijdrage aan de ontdekking van het Z-boson. Voor eigenschappen zie ook de lijst van elementaire bosonen.

Fysische deeltjes	
Atomaire deeltjes:	Molecuul · Atoom · Ion
Subatomaire deeltjes:	Nucleon · Atoomkern
Bosonen:	Foton · Gluon · W-boson · Z-boson · Higgsboson · Graviton · Pion · Meson
Fermionen:	Quark · Lepton · Neutrino · Elektron · Positron · Muon · Tau · Proton · Neutron · Baryon

Fundamentele natuurkracht

Elektromagnetisme

Elektromagnetisme



Elektriciteit · Magnetisme

Elektrostatica

Elektrische lading · Elektrisch veld
Elektrische potentiaal · Wet van
Coulomb
Elektrische flux · Wet van Gauss

Magnetostatica

Magnetisch veld · Elektrische
stroom
Wet van Ampère · Lorentzkracht
Magnetische flux · Dipoolmoment

Elektrodynamica

Inductie · Wetten van
Maxwell
Elektromagnetische golf
Wet van Faraday

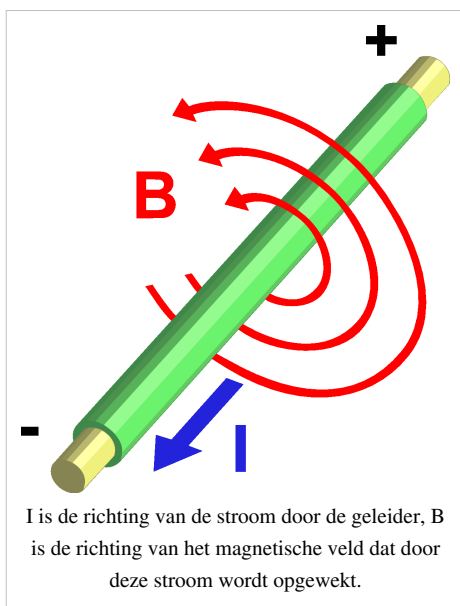
Elektriciteitsleer

Spanning · Stroom ·
Weerstand
Condensator · Spoel ·
Impedantie
Wet van Ohm

Wetenschappers

Ampère · Coulomb · Faraday ·
Gauss
Lorentz · Maxwell · Ohm · Tesla
Volta · Weber · Ørsted

Elektromagnetisme is de fysica van het elektromagnetische veld: een vectorveld dat heel de ruimte beslaat en bestaat uit twee componenten: het elektrische veld en het magnetische veld. De twee componenten bewegen zich te allen tijde loodrecht op elkaar door de ruimte met de lichtsnelheid. De term *elektrodynamica* wordt soms gebruikt om de combinatie van elektromagnetisme en mechanica aan te duiden.

Elektrische en magnetische velden

Een elektrisch veld wordt geproduceerd door elektrische ladingen en zorgt voor een elektrische kracht op andere ladingen. Een magnetisch veld wordt geproduceerd door de *beweging* van elektrische ladingen. In een magneet bijvoorbeeld wordt het veld veroorzaakt door de bewegingen van de elektronen in het materiaal. Ook rondom een kabel waardoor een stroom vloeit (afbeelding links) ontstaat een magneetveld, omdat de stroom een beweging van ladingen is.

De term **elektromagnetisme** geeft aan dat elektrische en magnetische verschijnselen verstrengeld zijn. Zo zal een veranderlijk magnetisch veld een elektrisch veld opwekken en omgekeerd. Dit heet elektromagnetische inductie en vormt de basis voor de werking van dynamo's, elektromotoren en transformatoren.

De elektromagnetische kracht

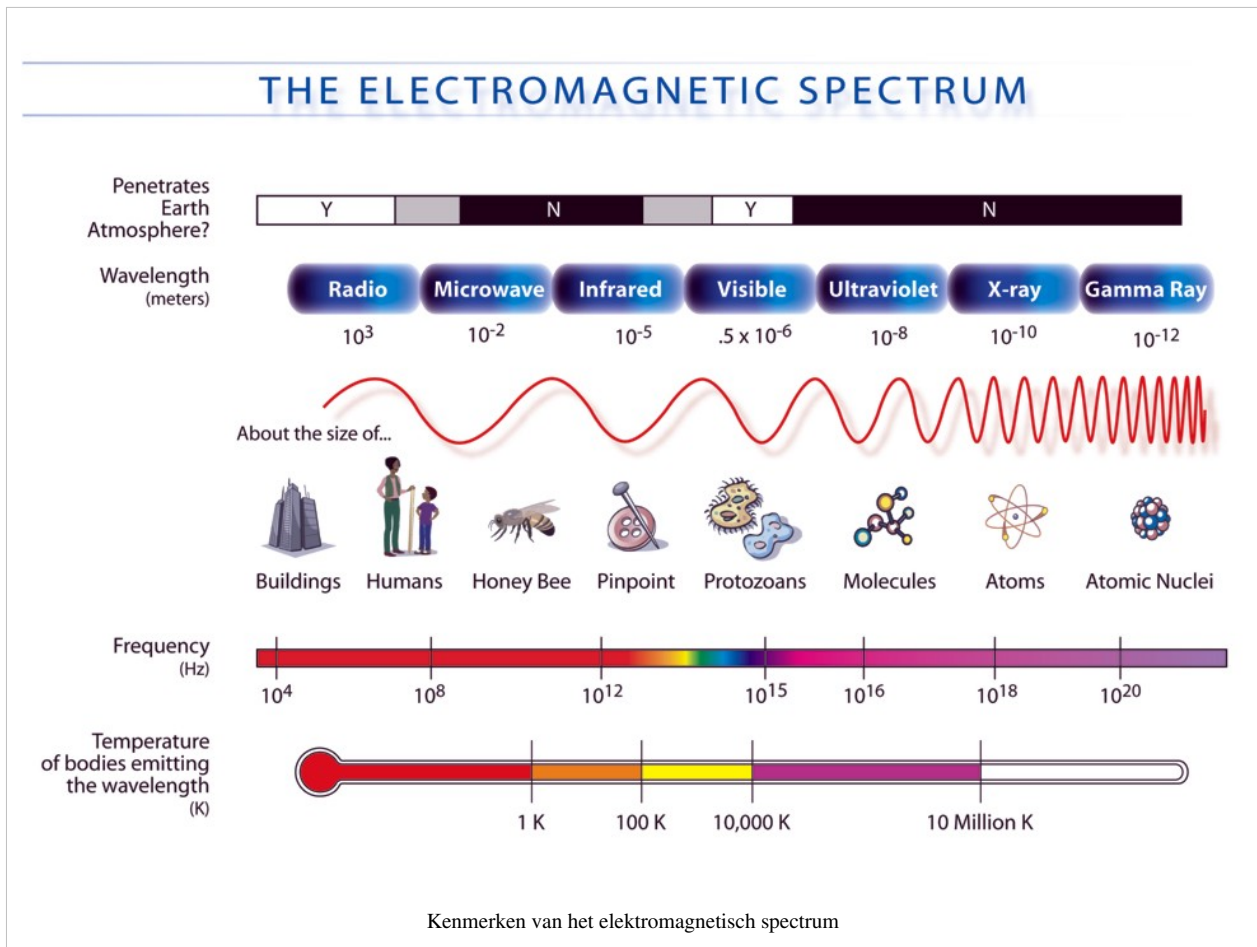
De kracht die elektrische geladen deeltjes voelen door elektromagnetische velden, heet de *elektromagnetische kracht*. Het is een van de vier fundamentele natuurkrachten, naast zwaartekracht, sterke kernkracht en zwakke kernkracht.

De elektromagnetische kracht speelt naast de zwaartekracht een zeer grote rol in het dagelijkse leven. Deze kracht ligt aan de basis van de chemische eigenschappen van materie. Zo wordt de wisselwerking tussen atomen en moleculen bepaald door de elektronen en zijn bijvoorbeeld vaste stoffen vast door de elektrische en magnetische afstoting van de elektronen van de atomen in de stof.

Elektromagnetische straling

Alle vormen van elektromagnetische straling vallen in het zogenaamde elektromagnetisch spectrum. De verschillende soorten elektromagnetische straling worden gekarakteriseerd door hun golflengte en frequentie. De verhouding tussen de golflengte en frequentie wordt bepaald door de voortplantingssnelheid (propagatiesnelheid) van elektromagnetische golven. Deze is gelijk aan de lichtsnelheid, die in de natuurkunde wordt aangeduid met de constante c . Licht kan worden gezien als zich voortbewegende verstoringen in het elektromagnetische veld (zie ook

elektromagnetische straling). Alles wat optica betreft is dus een elektromagnetisch verschijnsel, maar ook radiogolven, microgolven, röntgenstraling en gammastraling behoren tot het elektromagnetisch spectrum.



Elektromagnetische theorie

James Maxwell ontdekte dat licht een elektromagnetisch verschijnsel is en vatte alle voorgaande ontdekkingen op dit gebied, van onder meer Faraday, samen in één theorie, het *klassieke elektromagnetisme* die hij uitdrukte in de Maxwellvergelijkingen. Later voegde Hendrik Lorentz de lorentzkracht toe.

Een van de eigenaardigheden van het klassieke elektromagnetisme is dat het niet compatibel is met de klassieke mechanica. Volgens de Maxwellvergelijkingen is de lichtsnelheid in vacuüm een universele constante die enkel afhangt van de elektrische permittiviteit en de magnetische permeabiliteit van het vacuüm. Dit is in strijd met de relativiteitsbetrekkingen van Galilei, een van de hoekstenen van de klassieke mechanica. Hierin wordt een snelheid altijd uitgedrukt ten opzichte van de beweging van het assenstelsel van de waarnemer. Uiteindelijk ontwikkelde Albert Einstein de speciale relativiteitstheorie, waarmee deze paradox uit de wereld werd geholpen. Met de komst van de kwantummechanica werd het nodig een kwantumtheorie voor het elektromagnetisme op te stellen. Deze theorie werd uitgewerkt in de jaren 1940-50 en heet kwantumelektrodynamica (QED).

Eenheden

Elektromagnetische eenheden maken deel uit van een systeem van elektrische eenheden die primair gebaseerd zijn op de magnetische eigenschappen van elektrische stromen, waarvan de SI-basiseenheid de ampère is.

Elektromagnetische SI-eenheden				
Symbol	Naam van grootheid	Afgeleide eenheden	Eenheid	Basis eenheden
I	Elektrische stroom	ampère (SI-basiseenheid)	A	$A (= W/V = C/s)$
Q	Elektrische lading	coulomb	C	$A \cdot s$
$U, \Delta V, \Delta \varphi;$ E	Spanning, Potentiaalverschil; Elektromotorische kracht	volt	V	$J/C = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
$R; Z; X$	Elektrische weerstand, Resistantie; Impedantie; Reactantie	ohm	Ω	$V/A = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$
ρ	Soortelijke weerstand, Resistiviteit	ohm meter	$\Omega \cdot \text{m}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$
P	Elektrisch vermogen	watt	W	$V \cdot A = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
C	Elektrische capaciteit	farad	F	$C/V = \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{A}^2 \cdot \text{s}^4$
Φ_E	Elektrische flux	volt meter	$V \cdot \text{m}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
E	Elektrische veldsterkte	volt per meter	V/m	$N/C = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$
D	Elektrische verplaatsing	coulomb per vierkante meter	C/m^2	$A \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$
ϵ	Permittiviteit	farad per meter	F/m	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{A}^2 \cdot \text{s}^4$
χ_e	Elektrische susceptibiliteit	(dimensieloos)	-	-
$G; Y; B$	Elektrische geleidbaarheid, Conductantie; Admittantie; Susceptantie	siemens	S	$\Omega^{-1} = \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2$
κ, γ, σ	Soortelijke geleidbaarheid, Conductiviteit	siemens per meter	S/m	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2$
B	Magnetische inductie	tesla	T	$\text{Wb}/\text{m}^2 = \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1} = \text{N} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Φ	Magnetische flux	weber	Wb	$V \cdot s = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$
H	Magnetische veldsterkte	ampère per meter	A/m	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
L, M	Inductantie	henry	H	$\text{Wb}/A = V \cdot s/A = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
μ	Magnetische permeabiliteit	henry per meter	H/m	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
χ	Magnetische susceptibiliteit	(dimensieloos)	-	-

Sterke kernkracht

De **sterke (kern)kracht** of **sterke wisselwerking** is de sterkste van de vier fundamentele natuurkrachten uit de natuurkunde. De sterke kernkracht beïnvloedt op kleine schaal alleen quarks en antiquarks en is verantwoordelijk voor het samenbinden van quarks zodat deze hadronen kunnen vormen zoals protonen en neutronen. Op "grotere" schaal (ca. $10^{-15} m$) is zij ook de interactie die de nucleonen (protonen en neutronen), waaruit de atoomkern bestaat, bij elkaar houdt.

Residuële effecten (samengevat in de Yukawa-potentiaal) reiken tot buiten het hadron en binden de neutronen en protonen vervolgens tot de kern van het atoom. Zonder deze kracht zouden de positief geladen protonen elkaar afstoten en zou een atoomkern niet kunnen bestaan.

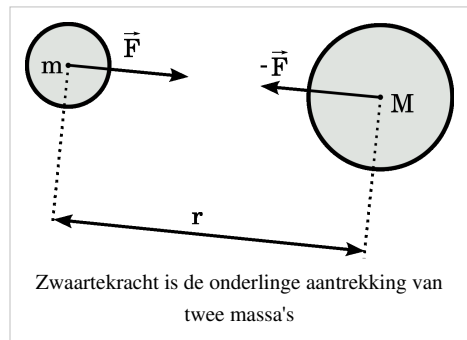
De sterke kernkracht ontstaat door het continu uitwisselen van krachtvoerende deeltjes tussen de quarks. Deze krachtdragende deeltjes heten gluonen (van het Engelse "glue" dat lijm betekent).

De sterke kernkracht wordt beschreven door de kwantumchromodynamica. De werking wordt ook wel omschreven met de term "kleurkracht". Daarbij gaat men ervan uit dat quarks drie kleuren kunnen hebben (rood, blauw, groen) en anti-quarks ook (anti-rood, anti-blauw, anti-groen). Een gluon transporteert kleurlading van de ene naar de andere.

Zwaartekracht

De **zwaartekracht** of **gravitatie** is een aantrekkende kracht die twee massa's op elkaar uitoefenen. De zwaartekracht is een van de vier natuurkrachten. Deze kracht is op het niveau van atomen zeer klein vergeleken met de andere krachten, maar is de meest alledaagse op macroscopische afstanden werkende kracht: een op elk voorwerp naar beneden (naar het middelpunt van de aarde) werkende kracht, evenredig met de massa van het voorwerp.^[1] De zwaartekracht is op astronomische afstanden in nog sterkere mate de overheersende kracht, bijvoorbeeld tussen de aarde en de maan, tussen de zon en alle planeten

en zelfs tussen sterrenstelsels, waardoor de uitdijing van het heelal tegengewerkt wordt. De zwaartekracht, die verantwoordelijk is voor het vallen van bijvoorbeeld een appel, zorgt er eveneens voor dat de maan of een satelliet in een baan om de aarde blijft, dat de aarde zelf in een baan om de zon blijft draaien, en dat de zon op zijn beurt samen met alle andere sterren van de Melkweg om een zeker middelpunt heen blijft draaien.



Formule

De gravitatiewet van Newton luidt

$$F = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

met

- F de zwaartekracht tussen twee voorwerpen (in newton)
- m_1 de massa van het eerste voorwerp (in kg)
- m_2 de massa van het tweede voorwerp (in kg)
- r de afstand tussen de zwaartepunten van die voorwerpen (in m)
- G de gravitatieconstante = $(6,67428 \pm 0,00067) \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$.

De aantrekkingskracht die de aarde uitoefent op een voorwerp dat zich op het aardoppervlak bevindt kan berekend worden door in deze vergelijking voor m_1 de massa van de aarde te gebruiken, en voor r de (gemiddelde) straal van

de aarde. In dat geval kan bovenstaande vergelijking vereenvoudigd worden tot:

$$F = g \cdot m_2$$

waarin

$$g = G \cdot \frac{m_{aarde}}{r_{aarde}^2} \approx 9.81 \text{ m/s}^2$$

De vergelijking wordt meestal geschreven als:

$$F = m \cdot g$$

waarin m de massa van het betreffende voorwerp is, en g de hierboven berekende valversnelling aan het aardoppervlak.

Zwaartekracht op aarde

De gravitatiewet van Newton geeft de aantrekkingskracht tussen twee puntmassa's, maar geldt ook voor homogene bolvormige lichamen. Bij de aarde moeten we ermee rekening houden dat deze van binnen niet homogeen is (de massa is niet overal gelijkmatig verspreid). Dat is één van de oorzaken dat de zwaartekracht op sommige plaatsen op het aardoppervlak groter kan zijn dan op andere, bijvoorbeeld door aanwezigheid van zwaardere steensoorten.

Daarnaast zorgt de rotatie van de aarde om haar as ervoor dat op voorwerpen op aarde naast de zwaartekracht ook een middelpuntvliedende kracht werkt, min of meer tegen de richting van de zwaartekracht in. Hoe verder van de aardas af, hoe groter deze middelpuntvliedende kracht. Op de evenaar is deze kracht het grootst, aan de polen is ze nul. De gemeten zwaartekracht is daarom op hogere breedtegraden groter dan op lagere.

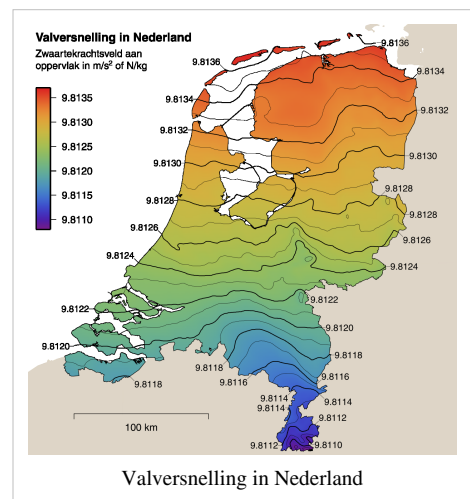
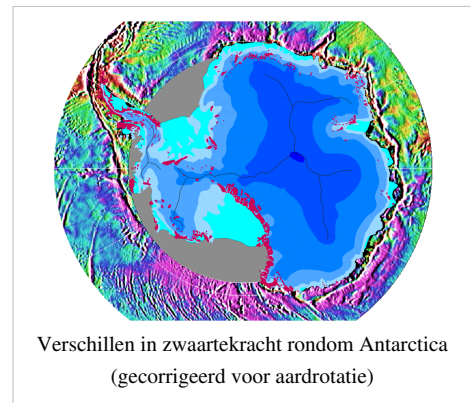
Ten derde is de vorm van de aarde niet zuiver rond maar - onder invloed van de rotatie - bij de polen heel licht afgeplat. De aarde heeft de vorm van een sferoïde. Dat betekent dat men zich op de polen ongeveer 21 km dichterbij het centrum van de aarde bevindt dan op de evenaar, wat de zwaartekracht op de polen iets groter maakt.

De zwaartekracht- of valversnelling op het aardoppervlak varieert door al deze oorzaken tussen ongeveer $9,789 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ en $9,832 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. In Nederland en België bedraagt die gemiddeld $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Dit wordt voor niet al te nauwkeurige toepassingen afgerond naar $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Geschiedenis van onderzoek naar de zwaartekracht

Oudheid

Uit de oudheid is niet veel bekend over onderzoek naar de zwaartekracht. De Griekse filosofen spraken er soms over; zo meende Aristoteles dat alles naar beneden valt omdat het midden van de aarde de "natuurlijke plaats" van de materie was in de zogenaamde ladder der natuur.



Vroegmoderne tijd

Tijdens de Wetenschappelijke Revolutie was Galileo Galilei de eerste die de zwaartekracht onderzocht door middel van waarnemingen aan banen van hemellichamen en valproeven op aarde.

Isaac Newton heeft de aard van de zwaartekracht in de kosmologie als eerste ingezien. Volgens eigen zeggen kwam hij op het idee toen hij een appel uit de boom zag vallen. Dat de appel op zijn hoofd viel, zoals soms wordt beweerd, is twijfelachtig.^[2] Het baanbrekende karakter van zijn theorie zat hem vooral in het toepassen van eenzelfde wet voor aardse situaties, bijvoorbeeld een appel die van een boom valt en hemellichamen. Newton verklaarde met zijn zwaartekrachtwet de banen van planeten, die Nicolaus Copernicus, Johannes Kepler en Tycho Brahe hadden beschreven maar niet hadden verklaard. In elk geval realiseerde hij zich dat de maan aantrekkingskracht van de aarde ondervindt, maar dat die in evenwicht wordt gehouden door middelpuntvliedende kracht van Christiaan Huygens.^[3] De getijdenbeweging kon hij verklaren uit de aantrekkingskracht van de maan.

Een ander voorbeeld van Newton is de kanonskogel. Een kanonskogel die met voldoende grote snelheid wordt weggeschoten, kan ook in een baan om de aarde gaan vliegen, of zelfs nooit meer terugkomen (zie ontsnappingsnelheid).

Relativiteitstheorie

In het begin van de twintigste eeuw is de theorie van de zwaartekracht drastisch bijgesteld door met name Albert Einstein. Zijn algemene relativiteitstheorie (1915) geeft een beschrijving van de tot dan toe onverklaarbare precessie in het baanvlak van de planeet Mercurius (zie Vulcanus) en voorspelt ook correct nieuwe verschijnselen die tot dan toe volstrekt ondenkbaar waren, zoals de toename van de massa van een deeltje als het de lichtsnelheid nadert, of de afbuiging van lichtstralen in een zwaartekrachtveld, wat tot uiting komt bij een zwaartekracht lens om een melkwegstelsel of een Einsteinring rondom een ster. Dit werd voor het eerst waargenomen aan een ster bij een zonsverduistering. Ook verklaart de theorie waarom massa twee aspecten heeft: *traagheid* (verzet tegen snelheidsverandering) en *gravitatie* (het veroorzaken van de zwaartekracht). Bovendien is het mogelijk er modellen mee op te stellen voor de evolutie van het heelal.

Aard van de zwaartekracht

Zoals in vorige sectie vermeld staat, zijn er sinds de nieuwe tijd twee zeer succesvolle gravitatie theorieën bekend. De oudste wet is de gravitatie wet van Newton. Deze is zeer precies, en in de meeste gevallen meer dan exact genoeg om het juiste resultaat te bekomen. De "opvolger" van deze wet, namelijk de algemene relativiteitstheorie van Einstein, is echter preciezer en vollediger. De theorie geeft in de meeste situaties aanleiding tot dezelfde uitkomst, en spreekt de wet van Newton dus niet helemaal tegen, maar geeft in bepaalde extreme gevallen een antwoord dat preciezer is dan de Newtoniaanse zwaartekracht. Het grote verschil tussen Einsteins theorie en Newtons theorie is:

- Newton: Zwaartekracht gaat *uit* van een massa en beïnvloedt van daaruit onmiddellijk alle andere massa in het heelal.
- Einstein: Zwaartekracht is een *vervorming* van het ruimte-tijd-continuüm, het 'weefsel' van de lege ruimte, veroorzaakt door de aanwezigheid van een massa. Een kunstmaan om de aarde bijvoorbeeld volgt de vervorming die de massa van de aarde in het omringende ruimte-tijdweefsel maakt en gaat langs het pad dat in die ruimte-tijd het kortst is. Dit zien we als de *baan* van deze satelliet.

Snelheid van het zwaartekrachtveld

Newton dacht dat de zwaartekracht direct, zonder vertraging van invloed is. Uit Einsteins algemene relativiteitstheorie volgt daarentegen dat zwaartekrachtvelden zich voortplanten met de lichtsnelheid.

Dat de theorie van Einstein overeenkomt met de werkelijkheid is al vaak gebleken, maar op 7 januari 2003 is de snelheid van het zwaartekrachtveld voor het eerst (indirect) gemeten door Ed Fomalont en Sergei Kopeikin^{[4][5]}. Met behulp van de bewegingen van de planeet Jupiter hebben zij deze metingen verricht. Op 8 september 2002 stond Jupiter namelijk vanaf de aarde gezien zeer dicht bij een quasar, die heldere radiogolven uitzendt. Fomalont en Kopeikin combineerden metingen van een aantal radiotelescopen verspreid over de aarde. Hiermee konden ze de schijnbare verplaatsing van de quasar als gevolg van het zwaartekrachtveld van Jupiter bepalen. Uit deze gegevens konden zij berekenen dat het zwaartekrachtveld 1.06 ± 0.21 keer zo snel beweegt als het licht; hieruit kan dus geen verschil tussen de twee snelheden worden gezien. De resultaten zijn controversieel; er zijn andere wetenschappers die zeggen dat de metingen niets met de snelheid van het zwaartekrachtveld te maken hebben.

Zwaartekrachtsgolven

► *Zie Zwaartekrachtsgolf voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

De algemene relativiteitstheorie voorspelt dat er ook zwaartekrachtsgolven bestaan. Deze kunnen bijvoorbeeld optreden bij een grote explosie in het heelal. Zwaartekrachtsgolven zijn naar verwachting transversaal, al voorspellen sommige theorieën daarnaast ook longitudinale golven. Indien zwaartekrachtsgolven kunnen optreden bij grote explosies in het heelal dan vertaalt zich dat in een tijdelijke ruimtevermeerdering, die waargenomen kan worden door tijdelijke grotere spectrale roodverschuivingen. Omgekeerd krijg je bij implosies ruimtevermindering, wat zich vertaalt in spectrale blauwverschuiving.

Aan de universiteit van Leiden wordt in het Kamerlingh Onnes Laboratorium gewerkt aan een uiterst gevoelige bolvormige antenne die zwaartekrachtsgolven kan waarnemen. De naam van het project is MiniGrail. Deze antenne is zo gevoelig, dat trillingen met een uitwijking van ongeveer 10^{-20} meter kunnen worden gedetecteerd.

Anti-zwaartekracht

Vóór Einstein meenden veel natuurkundigen dat er ook anti-zwaartekracht mogelijk was. Met Einsteins theorie verviel hiervoor de noodzaak, omdat er geen tegenhanger voorstelbaar is voor een 'anti' tijd-ruimtecontinuum vervorming. Maar bij recente metingen aan de kosmische achtergrondstraling is gebleken dat er misschien toch een soort uitdijende kracht in het universum werkzaam is, die de zwaartekracht tegenwerkt. Deze uitdijende kracht is door Einstein de kosmologische constante genoemd en zou veroorzaakt worden door donkere energie.

Problemen met de huidige theorieën van zwaartekracht^[6]

Ondanks het succes van Newtons zwaartekrachttheorie, die in bijna alle gevallen heel goed voldoet, bleken er aan het eind van de negentiende eeuw, toen meettechnieken steeds preciezer werden, toch verschijnselen te zijn die hiermee niet helemaal te verklaren zijn. Dat werd in het begin van de twintigste eeuw verholpen met Einsteins relativiteitstheorie die een aanscherping is van Newtons theorie. Maar ook met deze verder zeer succesvolle theorie blijken er verschijnselen te zijn die hiermee niet beschreven kunnen worden:

- De banen van de planeten dijen sneller uit dan te verklaren is met verlies van zonsmassa.
- De Pioneer-sondes die aan de grenzen van het zonnestelsel vliegen, vertragen sneller dan te verklaren is met de huidige theorie.
- De uitdijing van het heelal lijkt te versnellen, wat moeilijk te verklaren is als er niet een of andere mysterieuze anti-zwaartekracht werkzaam is.

Nieuwe verklaring

De Nederlandse natuurkundige Erik Verlinde kwam in 2009 en later met een afleiding van Newton's zwaartekrachtwet, uitgaande van het holografisch principe van Gerard 't Hooft^[7]^[8]. Al eerder hadden natuurkundigen als Richard Feynman een verband gelegd tussen zwaartekracht en thermodynamica. Verlinde stelt dat de kracht het gevolg is van het verschil in informatiedichtheid in de ruimte tussen twee elkaar aantrekkende massa's en de ruimte daarbuiten. In drie dimensies neemt deze dichtheid met het kwadraat van de afstand af. Volgens deze theorie is zwaartekracht geen fundamentele kracht, maar het gevolg van microscopische kwantummechanische effecten, die statistisch samen de zwaartekracht opleveren ("entropische zwaartekracht").

Externe link

- Minigrail, een zwaartekrachtdetector Universiteit Leiden ^[9]

Referenties

- [1] Andere op afstand werkende krachten die men in het dagelijks leven tegen komt zijn veel minder overheersend: die van magneetjes en statische elektriciteit. Door gasdruk werkende krachten kunnen *lijken* op afstand te werken doordat men de gasdeeltjes niet ziet.
- [2] White, Michael (1997). Isaac Newton: The Last Sorcerer. Fourth Estate Limited. ISBN 1-85702-416-8., p. 86
- [3] De grootte (straal) van de maanbaan en zijn omloopsnelheid waren bekend, evenals de zwaartekrachtsversnelling op het aardoppervlak (appel), zodat getoetst kon worden of de aardse zwaartekracht verantwoordelijk zou kunnen zijn voor de baan van de maan.
- [4] Forumdiscussie over het experiment van Kopeikin en Fomalont (engels) (<http://www.bautforum.com/archive/index.php/t-52397.html>)
- [5] Download link originele artikel (engels) (http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-ref_query?bibcode=2003Ap)
- [6] van de Engelse wikipedia over zwaartekracht
- [7] Preprint Xarchiv: On the Origin of Gravity and the Laws of Newton (<http://arxiv.org/abs/1001.0785>)
- [8] Volkskrant: Is Einstein een beetje achterhaald? (<http://www.volkskrant.nl/vk/nl/2672/Wetenschap-Gezondheid/article/detail/374333/2009/12/12/Is-Einstein-een-beetje-achterhaald.dhtml>)
- [9] <http://www.minigrail.nl>



Zie de categorie *[/wiki/Commons:Category:Gravitation?uselang=nl#mw-subcategories Gravitation]* van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.

Zwakke kernkracht

De **zwakke kernkracht** (ook **zwakke kracht** of **zwakke wisselwerking** genoemd) is een van de vier fundamentele natuurkrachten. In het standaardmodel van de deeltjesfysica wordt de zwakke kernkracht toegeschreven aan de uitwisseling van de zware W^- - en Z^0 -bosonen. Het bekendste effect van de zwakke kernkracht is bètaverval (de emissie van elektronen door neutronen of positronen door protonen, die zich in atoomkernen bevinden) en de daarmee geassocieerde radioactiviteit. Het woord *zwak* slaat hier op het feit dat de veldsterkte van de zwakke kernkracht ongeveer 10^{-11} van de sterkte van de elektromagnetische kracht en ongeveer 10^{-13} van de sterkte van de sterke kernkracht bedraagt.

De zwakke kernkracht wordt overgebracht door W^+ - en W^- -bosonen en Z^0 -bosonen en beïnvloedt

- neutrino's
- geladen leptonen
- quarks

De zwakke kernkracht stelt leptonen en quarks (en hun antimaterie-tegenhangers) in staat energie, massa en lading met elkaar uit te wisselen. Met een veldsterkte, die een factor 10^9 kleiner is dan de sterke kernkracht, blijft de invloed van de zwakke kernkracht beperkt tot in de atoomkern. Deze kleine actieradius wordt verklaard door de relatief grote massa/energie van de zwakke deeltjes (80 GeV). De zwakke wisselwerking schendt de CP-symmetrie.

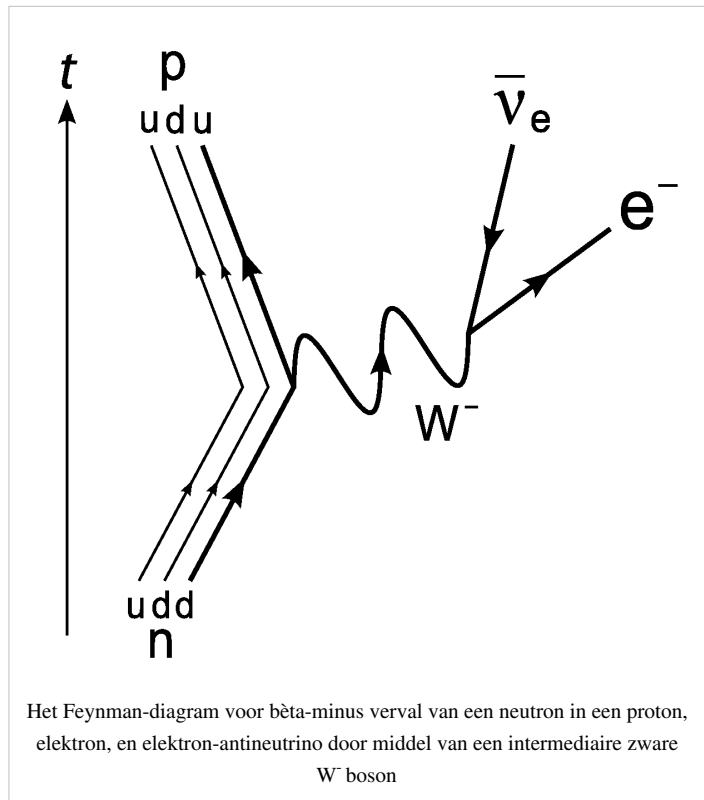
Eigenschappen

De zwakke kernkracht is van invloed op alle linkshandige leptonen en quarks. Het is de enige kracht die inwerkt op neutrino's (met uitzondering van gravitonen, die echter op laboratoriumschalen verwaarloosbaar is). De zwakke kernkracht is in een aantal aspecten uniek:

1. Het is de enige wisselwerking die in staat is van smaak te veranderen.
2. Het is de enige wisselwerking die de pariteitssymmetrie \mathbf{P} schendt (omdat het bijna uitsluitend inwerkt op linkshandige deeltjes). Het is ook de enige die de CP-symmetrie \mathbf{CP} schendt.
3. Hij wordt overgebracht door *massieve* ijkbosonen. Deze ongewone karakteristiek wordt in het Standaard Model verklaard door het higgsmechanisme.

Als gevolg van de grote massa van de overbrengerdeeltjes van de zwakke kernkracht (ongeveer 90 GeV), is hun gemiddelde levensverwachting ongeveer 33×10^{-25} seconden.

Aangezien de zwakke kernkracht zowel zeer zwak is als alleen op zeer korte afstand werkt, is het meest merkbare effect ervan toe te schrijven aan haar andere unieke eigenschap: verandering van smaak. Beschouw een neutron (quark met inhoud: udd , of een up-quark en twee down-quarks). Hoewel het neutron zwaarder is dan haar zusterneutron, het proton (quark inhoud uud), kan het niet vervallen in een proton, zonder de smaak van een van



haar down-quarks te veranderen. Noch de sterke kernkracht, noch het elektromagnetisme staan smaakveranderingen toe, dit kan dus alleen door **zwak verval**. In dit proces verandert in het neutron een down-quark in een up-quark door de uitstoot van een W^- -boson, die vervolgens opbreekt in een hoog-energetisch elektron en een elektron anti-neutrino. Aangezien hoogenergetische elektronen bètastraling zijn, noemt men dit proces bètaverval.

Als gevolg van de zwakte van de zwakke kernkracht, verloopt verval van zwakke deeltjes veel langzamer dan verval van sterke- of elektromagnetische deeltjes. Een elektromagnetisch vervallend neutraal pion heeft bijvoorbeeld een levensduur van ongeveer 10^{-16} seconden; een zwak vervallend geladen pion bestaat ongeveer 10^{-8} seconden, honderd miljoen keer langer. Een vrij neutron bestaat ongeveer 15 minuten en is daarmee het onstabiele subatomaire deeltje met de langste bekende gemiddelde levensverwachting.

Zwakke isospin is voor de zwakke kernkracht wat kleurlading voor de sterke kernkracht is, en wat massa is voor de zwaartekracht. Zwakke isospin is een kwantumgetal; deeltjes die niet betrokken zijn bij de zwakke kernkracht hebben een waarde van 0. Andere elementaire deeltjes hebben zwakke isospinwaarden van $-1/2$ of $+1/2$. Zoals in het geval met elektrische lading, zijn deze twee mogelijke waarden aan elkaar gelijk, behalve dat het teken verschilt. Zwakke isospin wordt geconserveerd: de som van de zwakke isospingetallen van de deeltjes die een reactie verlaten is altijd gelijk aan de som van de zwakke isospingetallen van de deeltjes die de reactie ingaan.

Wisselwerkingstypen

Er bestaan drie basistypen wisselwerkingen voor de zwakke kernkracht vertices ("up to" ladingconjugatie en kruisingssymmetrie). Twee van deze drie typen zijn respectievelijk de geladen bosonen en de intermediaire vectorbosonen, die "geladen stroom wisselwerkingen" worden genoemd. Het derde type wordt de "neutrale stroom wisselwerking" genoemd.

- Een geladen lepton (zoals een elektron of een muon) kan een W -boson uitzenden of absorberen en omzetten in een corresponderend neutrino.
- Een down-type quark (met lading $-1/3$) kan een W -boson uitzenden of absorberen en overgaan in een superpositie van up-type quarks. Omgekeerd kan een up-quark overgaan in een superpositie van down-type quarks. De exacte inhoud van deze superpositie wordt gegeven door de CKM-matrix.
- Een lepton of een quark kan een Z -boson uitzenden of absorberen.

Twee "geladen-stroom"-wisselwerkingen samen zijn verantwoordelijk voor het bètaverval. De neutrale stroming wisselwerking werd in 1974 voor het eerst waargenomen in neutrino-verstrooiing experimenten en in 1983 bevestigd in botsingsexperimenten.

Symmetrienschending

Men heeft lange tijd gedacht dat de natuurwetten onveranderd blijven onder spiegel reflectie, de omkering van alle ruimtelijke assen. Men verwachtte dat de resultaten van een experiment, dat met hulp van een spiegel werk bekeken, identiek zou zijn aan de resultaten van een spiegel-gereflecteerde kopie van de experimentele opstelling. Het was bekend dat deze zogenaamde wet van behoud van pariteit werd gerespecteerd door de klassieke zwaartekracht en het elektromagnetisme; men nam aan dat hier sprake was van een universele natuurwet. In het midden van de jaren 1950 gaven Chen Ning Yang en Tsung-Dao Lee echter in overweging dat de zwakke kernkracht deze "universele natuurwet" overtrad. Dit vermoeden werd in 1957 in Brookhaven experimenteel bevestigd bij bètaverval van kobalt-60 door de vrouwelijke Chinese natuurkundige Chien-Shiung Wu en haar medewerkers. Zij vonden dat de zwakke kernkracht in de praktijk maximaal schendt.^[1] Voor deze ontdekking van Wu kregen Yang en Lee in 1957 de Nobelprijs voor de Natuurkunde.

Hoewel de zwakke kernkracht op dat moment meestal werd beschreven met behulp van of de theorie van Fermi of een contact vier-fermionen interactie, vroeg de ontdekking van deze pariteitsschending en de renormalisatietheorie om een nieuwe aanpak. Robert Marshak en George Sudarshan in 1957 en iets later ook Richard Feynman en Murray Gell-Mann stelden een **V-A** (vector minus axiale vector of linkshandige) Lagrangiaan voor zwakke kernkrachten

voor. In deze theorie werkt de zwakke kernkracht alleen in op linkshandige deeltjes (en rechtshandige anti-deeltjes). Aangezien de spiegeling van een linkshandige deeltje rechtshandig is, verklaart dit de bovengenoemde maximale schending van pariteit.

Deze theorie stond echter nog toe dat de samengestelde symmetrie, **CP** behouden bleef: **CP** combineert pariteit **P** (verwisselen van links en rechts) met ladingconjugatie, **C** (verwisselen van deeltjes en anti-deeltjes). In 1964 werd de natuurkundige wereld echter opnieuw verrast, toen James Cronin en Val Fitch in kaon-verval met onomstotelijk bewijs kwamen dat ook de CP-symmetrie gebroken kon worden. Deze ontdekking leverden Cronin en Fitch in 1980 op hun beurt de Nobelprijs voor de Natuurkunde op. In tegenstelling tot de P-pariteitsschending, is deze CP-schending echter een zeer klein effect.

Elektrozwakke theorie

Het standaardmodel van de deeltjesfysica beschrijft de elektromagnetische kracht en de zwakke kernkracht als twee verschillende aspecten van een enkele elektrozwakke wisselwerking. Een theorie hiervoor werd rond 1968 ontwikkeld door Sheldon Glashow, Abdus Salam en Steven Weinberg (zie W-boson en Z-boson). Deze drie wetenschappers werden voor deze theorie in 1979 bekroond met de Nobelprijs voor de Natuurkunde.

Volgens de elektrozwakke theorie, kent het universum bij zeer hoge energieën vier massaloze ijkboson velden, die vergelijkbaar zijn met de fotonen en een complex scalair higgsveld doublet. De ijkbosonen worden geassocieerd met een $SU(2) \times U(1)$ ijk-symmetrie. Bij lage energieën verkrijgt een van de higgsvelden echter een vacuümverwachtingswaarde en wordt de ijk-symmetrie spontaan opgebroken in $U(1)$ -symmetrie van het elektromagnetisme. Deze symmetriebreking zou drie massaloze Goldstone-bosonen produceren, maar deze drie deeltjes raken door drie fotonachtige velden door middel van het higgsmechanisme met elkaar vervlochten, met als gevolg dat zij na de symmetriebreking over een massa beschikken. Deze drie velden worden de W^+ , W^- en Z-bosonen van de zwakke kernkracht genoemd, terwijl het vierde ijkveld, dat wel massaloos blijft, het vertrouwde foton uit het elektromagnetisme is.

Hoewel deze theorie een aantal voorspellingen heeft gedaan, waaronder een voorspelling voor de massa's van de Z-en W-bosonen, is het higgsboson zelf nog niet officieel ontdekt, hoewel op 4 juli 2012 werd bekendgemaakt dat een deeltje is ontdekt waarvan de massa overeenkomt met die van het higgsboson. Mogelijk gaat het hier om het bewuste deeltje. Het produceren van het higgsboson is een van de belangrijkste doelen van de in 2008/9 in gebruik genomen Large Hadron Collider in CERN.

Externe link

- [\(en\) Georgia State Univ. pagina over de vier fundamentele natuurkrachten.](#)^[2]

Bronnen, noten en/of referenties

Kwantumveldentheorie

Asymptotische vrijheid

Asymptotische vrijheid is de eigenschap van sommige ijktheorieën waarmee men kan aantonen dat de wisselwerking tussen de deeltjes, zoals quarks, willekeurig zwak wordt bij kleinere afstanden, oftewel afstanden die asymptotisch naar nul convergeren.

Het feit dat asymptotische vrijheid een eigenschap is van kwantumchromodynamica, is ontdekt door David Gross, Frank Wilczek en David Politzer. Het betekent dat quarks binnen nucleonen in feite als vrije, niet-wisselwerkende deeltjes bewegen. Hierdoor kunnen natuurkundigen de botsingsdoorsnede van verschillende gebeurtenissen in de deeltjesfysica betrouwbaar berekenen. Voor deze ontdekking ontvingen de drie onderzoekers in 2004 de Nobelprijs voor de Natuurkunde.

Casimireffect

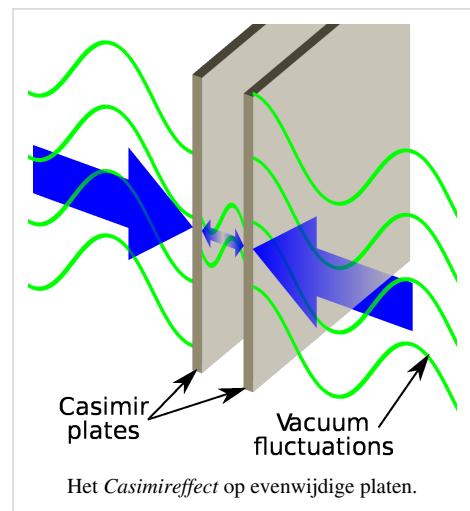
Het **Casimireffect** is het natuurkundige verschijnsel dat twee bij elkaar geplaatste metalen platen in een vacuüm door kwantumfluctuaties (zeer geringe) krachten ondervinden die ze naar elkaar toe drijven. Hendrik Casimir en Dirk Polder voorspelden dit verschijnsel in 1948.^[1] Andere namen voor dit verschijnsel zijn Casimir-Polder kracht en Casimir-kracht.

Verklaring

Omdat deze aantrekkende kracht sterk afneemt met de afstand (nl. met de vierde macht) is het effect alleen meetbaar bij uiterst kleine tussenafstanden. De kracht wordt veroorzaakt doordat alleen virtuele deeltjes met een bepaalde golflengte tussen de twee platen passen. Andere golflengtes worden uitgedempt. Hierdoor is het aantal deeltjes tussen de platen kleiner dan het aantal daarbuiten en worden de platen naar elkaar geduwd. Het effect kan ook gezien worden als een resonantie van de vacuümenergie tussen de platen. Op korte afstand is de Casimirkracht voor ongeladen platen de overheersende kracht.

Meting

Marcus Sparnaay van Philips in Eindhoven deed in 1958 een van de eerste metingen met een moeilijk experiment.^[2] De resultaten waren niet in strijd met de theorie maar kampten met grote meetfouten. Steve K. Lamoreaux van het Los Alamos National Laboratory en Umar Mohideen en Anushree Roy van de University of California at Riverside deden in 1997 een nauwkeuriger meting. Via een uiterst nauwkeurige torsieslinger slaagde Lamoreaux erin om in vacuüm de casimirkracht te meten tussen een verguld bolletje van 4 cm in diameter en een verguld kwartsplaatje.^[3] Mohideen en Roy toetsen het effect met experiment met een hefboompje van een atoomkrachtmicroscop met daarop een verguld bolletje van 200 μm .^[4] Daarmee werd dit kwantumeffect proefondervindelijk aangetoond binnen 15% van de voorspelde waarde van de kracht. In 2001 slaagde een onderzoeksgroep van de Universiteit van Padua



erin de Casimirkracht tussen parallelle platen te meten met behulp van microresonatoren.

Formule

Een uitdrukking voor deze Casimirkracht kan met heuristische argumenten (op een voorfactor na) gevonden worden. De kracht is evenredig met de oppervlakte A van de platen. Dat de platen van metaal moeten zijn om het effect waar te nemen duidt erop dat het om een elektromagnetisch verschijnsel gaat. De virtuele deeltjes zijn virtuele fotonen. Daarom komt de elektromagnetische constante bij uitstek, de lichtsnelheid c in de formule voor. Omdat het een kwantummechanisch effect is, is ook constante van Planck h nodig. Een eenhedenanalyse laat zien dat de kracht omgekeerd evenredig moet zijn met de vierde macht van de afstand a tussen de platen. Een formele afleiding geeft hetzelfde resultaat en tevens de voorfactor (die negatief is aangezien het een aantrekkende kracht betreft). De formule voor de kracht luidt

$$F = -\frac{\pi^2 \hbar c}{240 a^4} A$$

Toepassing en omkering

Professor Ulf Leonhardt en Dr Thomas Philbin van de St Andrews Universiteit in Schotland, hebben een manier gevonden om het verschijnsel om te keren, zodat het afstoot in plaats van aantrekt.^[5]

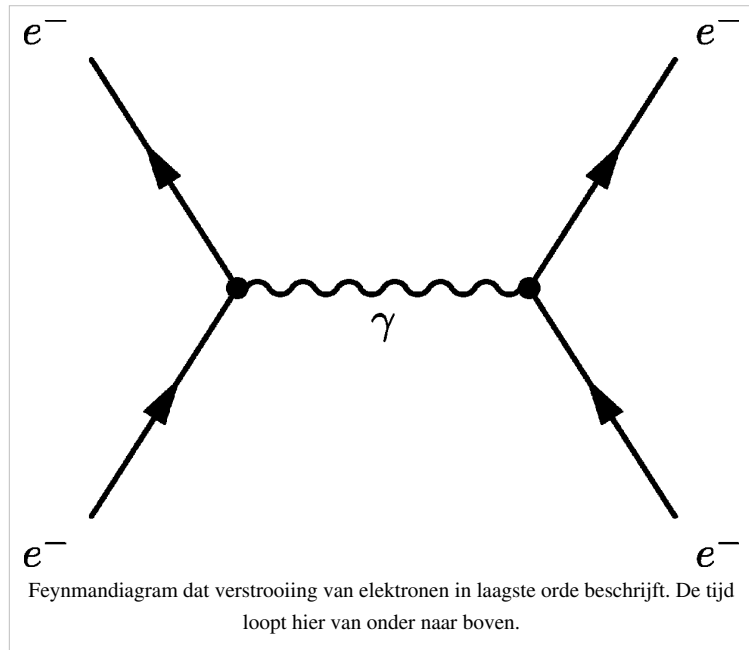
Verwijzing

- [1] H.B.G. Casimir and D. Polder (1948). *The Influence of Retardation on the London-van der Waals Forces*. *Physical Review* **74** (4): pp.360-372. DOI: 10.1103/PhysRev.73.360 (<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.73.360>).
 - [2] M.J. Sparnaay (1958). *Measurements of attractive forces between two flat plates*. *Physica* **24**: 751. DOI: 10.1016/S0031-8914(58)80090-7 ([http://dx.doi.org/10.1016/S0031-8914\(58\)80090-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0031-8914(58)80090-7)).
 - [3] S.K. Lamoreaux (1997). *Demonstration of the Casimir Force in the 0.6 to 6µm Range*. *Physical Review Letters* **78** (1): 5-8. DOI: 10.1103/PhysRevLett.78.5 (<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.5>).
 - [4] U. Mohideen and A. Roy (1998). *Precision Measurement of the Casimir Force from 0.1 to 0.9µm*. *Physical Review Letters* **81** (21): 4549–4552. DOI: 10.1103/PhysRevLett.81.4549 (<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.4549>).
 - [5] Daily Telegraph 8-8-2007
- From NIST: Measurements Recast Usual View of Elusive Force (http://www.nist.gov/public_affairs/newsfromnist_casimir-polder.htm)
 - H.B.G. Casimir, *Proc. Kon. Nederland. Akad. Wetensch.* **B51**, 793 (1948) (<http://www.historyofscience.nl/search/detail.cfm?pubid=2642&view=image&startrow=1>)
 - Casimir effect description (<http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Quantum/casimir.html>) van University of California, Riverside
 - A. Lambrecht, The Casimir effect: a force from nothing (<http://physicsweb.org/articles/world/15/9/6>), *Physics World*, September 2002.
 - G. Bressi, G. Carugno, R. Onofrio, G. Ruoso, " Measurement of the Casimir force between Parallel Metallic Surfaces (<http://link.aps.org/abstract/PRL/v88/e041804>)", *Phys. Rev. Lett.* **88** 041804 (2002)
 - M. Bordag, U. Mohideen, V.M. Mostepanenko, " New Developments in the Casimir Effect (<http://arxiv.org/abs/quant-ph/0106045>)", ArXiv quant-ph/0106045. (275 page review paper.)
 - O. Kenneth, I. Klich, A. Mann and M. Revzen, *Repulsive Casimir forces*, Department of Physics, Technion - Israel Institute of Technology, Haifa, February 2002
 - J. D. Barrow, " Much ado about nothing (<http://www.gresham.ac.uk/event.asp?PageId=4&EventId=258>)", (2005)
 - G. Lang, The Casimir Force (<http://www.casimir.rl.ac.uk/default.htm>) web site, 2002

- V.V. Nesterenko, G. Lambiase, G. Scarpetta, Calculation of the Casimir energy at zero and finite temperature: some recent results (<http://arxiv.org/abs/hep-th/0503100>), arXiv:hep-th/0503100 v2 13 May 2005
- Professor Ulf Leonhardt and Dr Thomas Philbin (<http://www.telegraph.co.uk/news/main.jhtml?xml=/news/2007/08/06/nlevitate106.xml>)

Feynmandiagram

Een **Feynmandiagram** is een methode om berekeningen in kwantumveldentheorie te doen, ontwikkeld door de Amerikaanse natuurkundige Richard Feynman. De lijnen stellen deeltjes voor die een zekere interactie met elkaar hebben. Wiskundige uitdrukkingen corresponderen met elke lijn en elk knooppunt. De waarschijnlijkheid dat bepaalde interacties plaatsvinden kunnen berekend worden door de bijbehorende diagrammen te tekenen, en deze te gebruiken om de juiste wiskundige expressie te vinden. Het zijn in principe boekhoudkundige gereedschappen met een eenvoudige visuele voorstelling van een botsing van deeltjes.



Zie de categorie [\[/wiki/Commons:Category:Feynman diagrams?uselang=nl#mw-subcategories Feynman diagrams\]](#) van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.

Globale symmetrie

Een **global symmetrie** is een symmetrie, die op alle beschouwde punten in de ruimtetijd van toepassing is. dit in tegenstelling tot een lokale symmetrie, die van punt tot punt varieert.

In de natuurkunde vereisen globale symmetrieën behoudswetten, maar geen krachten.

Nulpuntsenergie

De **nulpuntsenergie** van een kwantummechanisch systeem is de energie van zijn grondtoestand. Zij is het gevolg van het onzekerheidsprincipe van Heisenberg, dat voorschrijft dat de impuls en de positie van een deeltje niet tegelijkertijd precies bepaald kunnen worden. De nulpuntsenergie werd al eerder in 1913 voorgesteld door Albert Einstein en Otto Stern.

Kwantumfysische oscillator

Een kwantumfysische harmonische oscillator heeft het energiespectrum:

$$E_n = \hbar\omega\left(n + \frac{1}{2}\right),$$

waarin \hbar de constante van Dirac is en $\omega = 2\pi f$ de hoeksnelheid van de oscillator. Ook in de laagste energietoestand, de grondtoestand met $n = 0$ bestaat er daardoor een energie die ongelijk is aan nul:

$$E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega.$$

Absolute nulpunt

De nulpuntsenergie is daardoor ook de energie van een systeem bij het absolute nulpunt (0 K = -273,15 °C). Hoewel het duidelijk lijkt dat bij voortgaande afkoeling de bewegingen van de atomen 'bevrozen', blijft er toch nog een kwantumfysische restbeweging over: dit is de nulpuntsenergie. Deze nulpuntsenergie is niet direct thermisch te meten, omdat je alleen maar temperatuurverschillen kunt bepalen. Indirect kan de nulpuntsenergie echter aangetoond worden door het vergelijken van bepaalde kenmerken van isotopen. Het directe experimentele bewijs kon in 1928 geleverd worden door het bepalen van de temperatuurafhankelijkheid van de interferentie van röntgenstraling.

Vacuümenergie

In een speciaal geval van de kwantumveldentheorie heet de nulpuntsenergie vacuümenergie, omdat ze de energie van de lege ruimte beschrijft. Volgens de kwantummechanica bestaat er door de onzekerheidsrelatie van Heisenberg zelfs in het absolute vacuüm altijd een kans op het spontaan verschijnen van deeltjes-antideeltjes. Deze vernietigen elkaar dan weer (annihilatie), waarbij twee fotonen ontstaan. Door het aantonen van het Casimir-effect is het bestaan van deze deeltjes-antideeltjes/fotonen inmiddels bewezen.

Op kosmologische schaal is de vacuümenergie een belangrijke, vormende factor. Zij zou de inflatie van het jonge heelal veroorzaakt hebben (een exponentiële uitdijning gedurende een zeer korte tijd). De inflatietheorie loste zowel het horizonprobleem als het vlakheidsprobleem op. Recente waarnemingen aan een bepaalde soort supernova (type Ia die altijd dezelfde lichtkracht heeft) suggereren dat ons heelal niet statisch is en in de toekomst ook niet zal inkrimpen, maar juist steeds sneller zal uitdijen. Ook hier wordt als mogelijke oorzaak weer aan het "valse vacuüm" (ofwel de vacuümenergie) gedacht. Volgens sommige theoretici is de vacuümenergie hetzelfde als de 'donkere energie' die recentelijk gepostuleerd wordt om de versnelde uitdijning van het heelal te verklaren

Toepasbaarheid

Volgens theoretische berekeningen varieert de nulpuntsenergie tussen enkele mega-joules per m^3 tot de onvoorstelbare hoeveelheid van 10^{116} joule per m^3 . Hiermee zou de nulpuntsenergie van een kubieke centimeter vacuüm, genoeg zijn om de gehele Melkweg te laten verdampen. Volgens sommige onderzoekers is deze energie in theorie af te tappen, maar door de meerderheid van de natuurkundige gemeenschap wordt dit betwijfeld. Energie kan alleen toegepast worden als het van een hogere naar een lagere toestand stroomt. En - voor zover we nu weten - is nulpuntsenergie de laagste energietoestand die een systeem kan hebben.

Toch heeft de suggestie van het 'vrij kunnen maken' van energie uit een vacuüm de aandacht getrokken van amateuruitvinders en pseudowetenschappers. Veel plannen voor vrije-energiegeneratoren zijn reeds gepresenteerd. Ten gevolge van al deze aandacht en de intrigerende theoretische uitleg, is het concept van nulpuntsenergie een eigen leven gaan leiden in de populaire cultuur, waar het opduikt in sciencefictionverhalen, spelletjes en films.

Externe links

- Artikel over vacuümenergie van de vakgroep Theoretische Natuurkunde van de [[Universiteit van Amsterdam ^[1]]]

Referenties

- [1] http://www.science.uva.nl/research/itf/projecten/vacuuum_energie.pdf

Spinor

In de natuurkunde, de differentiaalmeetkunde en de groepentheorie, deelgebieden van de wiskunde, met name in de theorie van de orthogonale groepen (zoals de rotatiegroepen of de Lorentz-groepen, zijn **spinors** elementen van een complexe vectorruimte, die zijn ingevoerd om de notie van een ruimtelijke vector uit te breiden. Spinors zijn nodig omdat de volledige structuur van de groep van rotaties in een gegeven aantal dimensies een aantal extra dimensies vereist om de spinors te laten zien. Concreet zijn spinors meetkundige objecten die zijn opgebouwd uit een vectorruimte die is uitgerust met een kwadratische vorm, zoals een Euclidische- of Minkowski-ruimte, door middel van een algebraïsche procedure, via Clifford-algebra, of een kwantisatie procedure. Een gegeven kwadratische vorm kan verschillende soorten spinors ondersteunen.

Spinoren in het algemeen werden in 1913 ontdekt door de Franse wiskundige Élie Cartan.^[1] Vijftien jaar later werden spinoren in de kwantummechanica gebruikt om de eigenschappen van het intrinsieke impulsmoment van de elektron en andere fermionen te bestuderen. Heden ten dage genieten spinoren een breed scala van toepassingen van de natuurkunde. Klassiek worden spinoren in drie dimensies gebruikt om de spin van het niet-relativistische elektronen en andere spin- $\frac{1}{2}$ deeltjes te beschrijven. Via de Dirac-vergelijking zijn Dirac-spinoren vereist voor de wiskundige beschrijving van de kwantumtoestand van het relativistische elektron. In de kwantumveldentheorie beschrijven spinoren de toestand van relativistische veel-deeltjes systemen. In de wiskunde, in het bijzonder in de differentiaalmeetkunde en de globale analyse, hebben spinoren toepassingen gevonden in de algebraïsche en differentiaaltopologie, symplectische meetkunde, ijktheorie, complexe algebraïsche meetkunde, indextheorie en speciale holonomiegroepen.

De technische definities kunnen spinoren laten lijken als een vanuit de meetkunde opgelegde constructie, maar er zijn verschillende redenen, nu goed begrepen, waarom dit niet echt het geval is. Vanuit een algebraïsch oogpunt, zijn spinoren nodig, omdat zij weergaven zijn van infinitesimale orthogonale transformaties (de Lie-algebra), die startend vanuit de natuurlijke rotatie weergave niet kunnen worden geconstrueerd. Het bestaan van dergelijke "ontbrekende" weergaven is topologisch in natuur en weerspiegelt het feit dat rotatiegroepen in het algemeen niet enkelvoudig

samenhangend zijn.

Voetnoten

[1] Cartan, 1913.

Referenties

- (fr) Élie Cartan, Les groupes projectifs qui ne laissent invariante aucune multiplicité plane (http://archive.numdam.org/article/BSMF_1913__41__53_1.pdf) Bul. Soc. Math. France, vol 41, 1913, pag 53-96.

Spontane symmetriebreking

In de kwantumveldentheorie, een deelgebied van de theoretische natuurkunde, komt **spontane symmetriebreking** voor, wanneer een systeem dat symmetrisch is met betrekking tot een symmetriegroep in een vacuümtoestand komt die niet symmetrisch is. Als dat gebeurt, lijkt het systeem zich niet meer op een symmetrische wijze te gedragen. Het komt van nature in vele situaties voor.

De symmetriegroep kan discreet zijn, zoals in de ruimtgroepen van een kristal, of continu (bijvoorbeeld een Lie-groep), zoals de rotatiesymmetrie van de ruimte. Maar als het systeem slechts één ruimtelijke dimensie bevat, dan kunnen in een vacuümtoestand van de volledige kwantumtheorie alleen discrete symmetrieën worden gebroken, hoewel in een klassieke oplossing ook een continue symmetrie kan breken.

Een bekend voorbeeld van spontane symmetriebreking is een bal, die stabiel op de top van een heuvel ligt. Deze bal is in een volledig symmetrische toestand. Toch is de toestand instabiel: de geringste storende kracht zal de bal in een bepaalde richting van de heuvel doen rollen. Op dat punt is de symmetrie verbroken, omdat de richting, waarin de bal rolt, niet symmetrisch is en zich onderscheidt van alle andere richtingen.

Wiskundig voorbeeld: de Sombrero-potential

In het eenvoudigste voorbeeld wordt het spontaan gebroken veld beschreven door een scalaire veldentheorie. In de kwantumveldentheorie wordt de dynamica van systemen beschreven met Lagrangianen. Deze bevatten termen voor de kinetische energie en potentiële energie:

$$\mathcal{L} = \partial^\mu \phi \partial_\mu \phi - V(\phi).$$

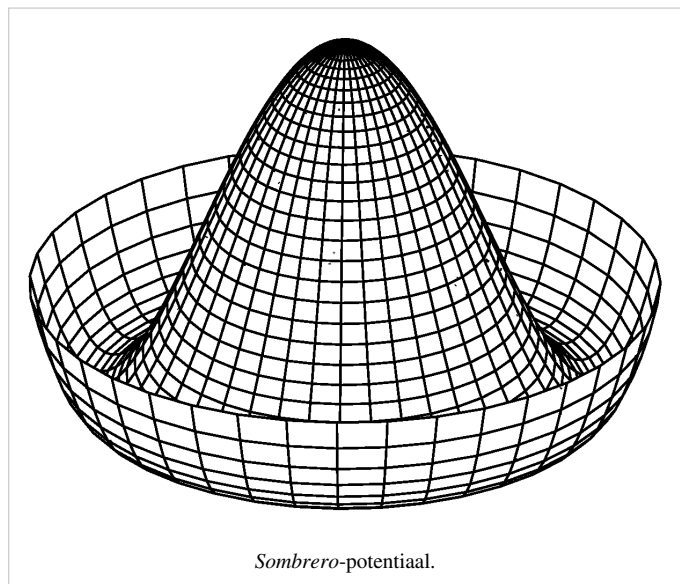
In de potentiaalterm ($V(\phi)$) treedt nu symmetriebreking op voor de volgende vorm van de potentiaal - zie plaatje rechts:

$$V(\phi) = -10|\phi|^2 + |\phi|^4$$

Deze potentiaal heeft vele mogelijke minima (vacuümtoestanden) gegeven door

$$\phi = \sqrt{5}e^{i\theta}$$

met θ een reëel getal tussen 0 en 2π . Het systeem heeft ook een instabiele vacuümtoestand die overeenkomt met $\phi = 0$. Deze toestand heeft een U(1)-symmetrie. Zodra het systeem echter voor een bepaalde stabiele vacuümtoestand "kiest" (overeenkomend met een keuze van θ) zal het lijken of deze symmetrie verloren is gegaan; ze is dan spontaan gebroken.



Higgsveld

➤ *Zie Higgsveld voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

In het standaardmodel van de deeltjesfysica wordt spontane symmetriebreking bereikt door gebruik te maken van het higgsboson. Het fenomeen is daar verantwoordelijk voor de massa van de W-en Z-bosonen. Een technische presentatie van dit mechanisme wordt in het artikel over de Yukawa-interactie gegeven. Daar wordt getoond hoe spontane symmetriebreking de massa van de fermionen kan verklaren.

Externe links

- (en) Spontane symmetriebreking ^[1]
- (en) Spontane symmetriebreking in ijktheorieën: een historisch overzicht ^[2]

Referenties

[1] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/forces/unify.html#c2>

[2] <http://lanl.arxiv.org/abs/hep-th/9802142>

Stelling van Noether

De **stelling van Noether** (vaak ook **theorem van Noether** genoemd) is een belangrijke uitkomst van de theoretische natuurkunde en de infinitesimaalrekening waarin wordt aangetoond dat een behoudswet afgeleid kan worden door differentiatie toe te passen op aanwezige symmetrie in natuurkundige systemen. De wet van behoud van energie blijkt bijvoorbeeld het gevolg te zijn van het feit dat alle natuurkundige wetten, inclusief de waarden van natuurkundige constanten, invariant zijn voor een translatie langs de tijd-as; ze veranderen niet in de tijd.

De stelling houdt dus in dat elke differentieerbare symmetrie van de actie van een natuurkundig systeem een corresponderende behoudswet heeft. Deze baanbrekende stelling werd in 1915 door de Duitse wiskundige Emmy Noether bewezen en in 1918 gepubliceerd.^[1] De actie van een natuurkundig systeem is de integraal over de tijd van een Lagrangiaanse-functie (die al of niet een integraal over de ruimte van een Lagrangiaanse dichtheidsfunctie is), met behulp waarvan het gedrag van het systeem kan worden bepaald door gebruik te maken van het principe van de kleinste werking.

De stelling van Noether is een fundamenteel instrument van de moderne theoretische natuurkunde en de variatierekening geworden. De stelling van Noether staat een verregaande veralgemening toe van eerder werk over bewegingsconstanten in de Lagrangiaanse- en de Hamiltoniaanse mechanica. De stelling van Noether is niet van toepassing op systemen, die niet met behulp van een Lagrangiaan kunnen worden gemodelleerd; dissipatieve systemen met continue symmetrieën hoeven bijvoorbeeld geen corresponderende behoudswet te hebben.

De stelling van Noether geldt voor alle natuurkundige wetten die zich met verandering bezighouden. De stelling speelt een belangrijke rol in de kwantummechanica bij het onzekerheidsprincipe van Heisenberg, bij het koppelen van (positie en impuls, tijd en energie, hoek en impulsmoment, etc).

Informele uitleg van de stelling

Alle verfijnde technische punten terzijde, kan de stelling van Noether als volgt informeel worden geponoerd

Als een systeem een continue symmetrie-eigenschap heeft, dan zijn er corresponderende grootheden waarvan de waarden in de tijd behouden blijven.^[2]

Een meer geavanceerde versie van de stelling luidt:

Met iedere differentieerbare symmetrie, die door lokale acties wordt gegenereerd, correspondeert een behouden lading.

Het woord "symmetrie" in de bovenstaande stelling verwijst meer bepaald naar de covariantie van de vorm, die een natuurkundige wet neemt met betrekking tot een eendimensionale Lie-groep van transformaties, die aan zekere technische criteria voldoen. De behoudswet van een natuurkundige grootheid wordt meestal uitgedrukt als een continuïteitsvergelijking.

Het formele bewijs van de stelling maakt alleen gebruik van de voorwaarde van invariantie om een uitdrukking af te leiden voor een stroom, die geassocieerd wordt met een behouden natuurkundige grootheid. De behouden grootheid wordt de *Noether-lading* genoemd en de stroom die deze 'lading' draagt noemt men de *Noether-stroom*. De Noether-lading is uniek gedefinieerd op een Divergentievrij vectorveld na.

Toepassing

Toepassing van de stelling van Noether stelt natuurkundigen in staat om in elke algemene theorie inzicht te krijgen welke vorm een wet moet hebben om invariant, constant te zijn. Bijvoorbeeld:

- de invariantie van natuurkundige wetten voor een translatie in de ruimte (de stelling dat natuurkundige wetten overal hetzelfde moeten zijn) levert een wet van behoud van impuls op.
- invariantie voor rotatie geeft de wet van behoud van impulsmoment.
- invariantie met betrekking tot de tijd geeft de bekende wet van behoud van energie

Historische context

► *Zie Bewegingsconstante en behoudswet voor de hoofd artikelen over dit onderwerp.*

Een behoudswet stelt dat een bepaalde kwantiteit X , die een natuurkundig systeem beschrijft, gedurende haar gehele beweging constant blijft; wiskundig uitgedrukt is de mate van verandering van X (de afgeleide met betrekking tot de tijd) gelijk aan nul:

$$\frac{dX}{dt} = 0.$$

Men zegt dat deze grootheden behouden blijven; zij worden vaak bewegingsconstanten genoemd, hoewel er niet *per se* beweging bij hoeft te zijn betrokken, maar evolutie in de tijd ook volstaat. Als de energie van een natuurkundig systeem bijvoorbeeld wordt behouden, blijft haar energie te allen tijde constant, wat een restrictie op de beweging van het systeem oplegt, wat weer kan helpen om het systeem op te lossen. Naast het inzicht dat deze bewegingsconstanten geven in de aard van een natuurkundig systeem, zijn zij een nuttig instrument voor hulp bij berekeningen; een benadering een oplossing kan bijvoorbeeld worden gecorrigeerd door de dichtstbijzijnde toestand te vinden, die voldoet aan de behoudswetten.

De eerste bewegingsconstanten die werden ontdekt zijn impuls en energie, die in de 17e eeuw door René Descartes en Gottfried Leibniz werden voorgesteld op basis van botsing experimenten, en werden door latere onderzoekers verfijnd. Isaac Newton was de eerste die de wet van behoud van impuls in zijn moderne vorm verkondigde, en toonde aan dat de wet van behoud van impuls een gevolg was van derde wet van Newton; interessant genoeg geldt de wet van behoud van impuls ook in situaties waar de derde wet van Newton niet opgaat. De moderne natuurkunde

heeft onthuld dat de behoudswetten van impuls en energie slechts bij benadering waar zijn, maar hun moderne verfijningen - het behoud van vier-impuls in de speciale relativiteitstheorie en de nul divergentie van de energie-momentum-tensor in de algemene relativiteitstheorie - zijn strikt genomen waar binnen de begrenzingen van die theorieën. Het behoud van impulsmoment, een veralgemening van roterende starre lichamen, is op soortgelijke manier waar binnen de moderne natuurkunde. Een ander belangrijke te behouden grootheid, die werd ontdekt in studie van de hemelmechanica van astronomische lichamen was de Laplace-Runge-Lenz-vector.

In de late 18e en vroege 19e eeuw, ontwikkelden natuurkundigen meer systematische methoden voor het ontdekken van behouden grootheden. Een grote stap kwam in 1788 met de ontwikkeling van de aan het principe van de kleinste werking gerelateerde Lagrangiaanse mechanica. In deze aanpak kan de toestand van het systeem worden beschreven door een soort van gegeneraliseerde coördinaten \mathbf{q} ; de bewegingswetten hoeven niet te worden uitgedrukt in een Cartesisch coördinatensysteem, zoals gebruikelijk was in de Newtoniaanse mechanica. De actie wordt gedefinieerd als de tijdsintegraal I van een functie die bekend staat als de Lagrangiaan L

$$I = \int L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) dt$$

waar de stip boven de \mathbf{q} de mate van verandering van de coördinaten \mathbf{q} betekent

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{d\mathbf{q}}{dt}.$$

Het principe van Hamilton stelt dat het natuurkundige pad $\mathbf{q}(t)$; het pad dat echt door het systeem wordt genomen - een pad is waarvoor infinitesimale variaties in dat pad geen verandering veroorzaken in I , ten minste "up to" de eerste orde. Dit principe resulteert in de Euler-Lagrange-vergelijkingen

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) = \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}}.$$

Dus als een van de coördinaten, zeg q_k , niet voorkomt in de Lagrangiaan, is de rechterkant van de vergelijking gelijk aan nul, en laat de linker kant zien dat

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) = \frac{dp_k}{dt} = 0$$

waar de behouden impuls p_k als de hoeveelheid aan de linkerkant tussen haakjes wordt gedefinieerd. De afwezigheid van de coördinaat q_k in de Lagrangiaan impliceert dat de Lagrangiaan niet wordt beïnvloed door veranderingen of transformaties van q_k ; de Lagrangiaan is invariant en men zegt dat de Lagrangiaan een soort van symmetrie vertoont. Dit is het basisidee van waaruit de stelling van Noether is voortgekomen.

Verschillende alternatieve methoden voor het vinden van behouden grootheden werden in de 19e eeuw ontwikkeld, vooral door William Rowan Hamilton. Zo ontwikkelde hij bijvoorbeeld een theorie van kanonieke transformaties, die onderzoekers toestond de coördinaten zo te veranderen, dat deze coördinaten uit de Lagrangiaan verdwenen, wat resulteert in behouden grootheden. Een andere aanpak en misschien wel de meest efficiënte manier voor het vinden van de behouden grootheden is de Hamilton-Jacobi-vergelijking.

Wiskundige uitdrukking

De essentie van de stelling van Noether is de volgende: Stel je voor dat de actie I , zoals hierboven gedefinieerd, invariant is onder kleine verstoringen (perturbaties) van de variabele tijd t en de gegeneraliseerde coördinaten \mathbf{q} ; wij schrijven (in een notatie die vaak gebruikt door natuurkundigen)

$$t \rightarrow t' = t + \delta t$$

$$\mathbf{q} \rightarrow \mathbf{q}' = \mathbf{q} + \delta \mathbf{q}$$

waar de verstoringen δt en $\delta \mathbf{q}$ zowel klein als variabel zijn. Veronderstel in zijn algemeenheid dat er misschien meerdere van dergelijke symmetrie transformaties van de actie zijn, zeg, N ; we kunnen een index gebruiken $r=1, 2, 3, \dots, N$ om de transformaties bij te houden. Dan kan een generieke verstoring worden geschreven als een lineaire som van de afzonderlijke types verstoringen

$$\delta t = \sum_r \epsilon_r T_r$$

$$\delta \mathbf{q} = \sum_r \epsilon_r \mathbf{Q}_r.$$

Door gebruik te maken van deze definities, toonde Emmy Noether aan dat de N grootheden

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \cdot \dot{\mathbf{q}} - L \right) T_r - \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \cdot \mathbf{Q}_r$$

behouden worden, dat wil zeggen, bewegingsconstanten zijn; dit is een eenvoudige versie van de stelling van Noether

Voorbeelden

Beschouw ter illustratie een Lagrangiaan, die niet afhangt van de tijd, dat wil zeggen dat deze invariant (symmetrisch) is onder veranderingen $t \rightarrow t + \delta t$, zonder enige verandering in de coördinaten \mathbf{q} . In dit geval, $N = 1$, $T = 1$ en $\mathbf{Q} = 0$; de overeenkomstige behouden grootheid is de totale energie H ^[3]

$$H = \frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \cdot \dot{\mathbf{q}} - L.$$

Voetnoten

[1] (de) Emmy Noether, 1918, Invariante Variationsprobleme, Nachr. D. König. Gesellsch. D. Wiss. Zu Göttingen, Math-Phys. Klasse, 1918, pag. 235-257 zie hier (<http://arxiv.org/abs/physics/0503066v1>)

[2] (en) Thompson, W.J., (1994) *Angular Momentum*. Wiley, pag.5.

[3] Lanczos, blz. 401-403.

Vertexoperatoralgebra

In de wiskunde is een **vertexoperatoralgebra (VOA)** een algebraïsche structuur, die een belangrijke rol speelt in de hoekgetrouwe veldentheorie en aanverwante gebieden van de theoretische natuurkunde. Vertexoperatoralgebra's zijn in zuivere wiskundige contexten, zoals de monsterlijke maneschijn en het meetkundige Langlands-programma nuttig gebleken.

Vertexoperatoralgebra's werden, gemotiveerd door vertexoperatoren, die voortkomen uit veldinserties in tweedimensionale hoekgetrouwe veldentheorie, in 1986 voor het eerst geïntroduceerd door Richard Borcherds. De axioma's van een vertexoperatoralgebra zijn een formele algebraïsche interpretatie van wat natuurkundigen een chirale algebra noemen. De definitie van een vertexoperatoralgebra is strikt wiskundig geformuleerd door Alexander Beilinson en Vladimir Drinfel'd.

Belangrijke voorbeelden van vertexoperatoralgebra's zijn rooster VOA's (die rooster hoekgetrouwe veldtheorieën modelleren), VOA's gegeven door weergaven van affiene Kac-Moody-algebra's (van het WZW-model), de Virasoro-VOA's (dat wil zeggen, VOA's die corresponderen met weergaven van de Virasoro-algebra) en de maneschijnmodule V^h , in 1988 geconstrueerd door Igor Frenkel, James Lepowsky en Arne Meurman in 1988.

Referenties

- (en) Richard Borcherds, "Vertex algebras, Kac-Moody algebras, and the Monster", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. **83** (1986) 3068-3071
- (en) Igor Frenkel, James Lepowsky, Arne Meurman, "Vertex operator algebras and the Monster". *Pure and Applied Mathematics*, 134. Academic Press, Inc., Boston, MA, 1988. liv+508 pag. ISBN 0-12-267065-5
- (en) Victor Kac, "Vertex algebras for beginners". *University Lecture Series*, 10. American Mathematical Society, 1998. viii+141 pag. ISBN 0-8218-0634-2

Virasoro-algebra

In de groepentheorie, een deelgebied van de wiskunde, is de **Virasoro-algebra** (vernoemd naar de natuurkundige Miguel Ángel Virasoro) een complexe Lie-algebra, gegeven als een centrale uitbreiding van de complexe polynomiale vectorvelden van de cirkel en wordt veel gebruikt in snaartheorie.

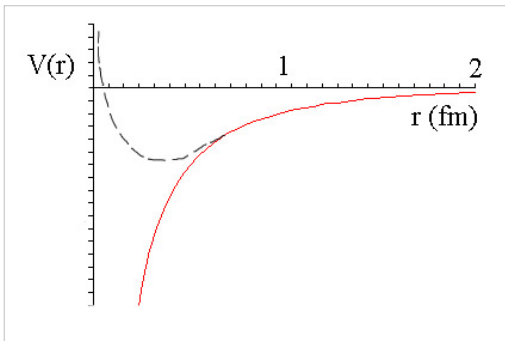
Yukawa-potentiaal

De Japanner Hideki Yukawa deed in de jaren 30 van de 20e eeuw theoretisch onderzoek aan de sterke kernkracht, de kracht die de deeltjes in een atoomkern bijeen houdt. In zijn model stelde hij dat een nucleon (kerndeeltje) continu deeltjes uitzendt. Wanneer deze deeltjes een ander nucleon bereiken zal de uitwisseling van impuls (de botsing) zorgen voor een kracht tussen de nucleonen. Deze kracht wordt beschreven door een potentiaal die nu de **Yukawa-potentiaal** wordt genoemd

$$V(r) = A \frac{e^{-\frac{mc}{\hbar} r}}{r}$$

Yukawa publiceerde dit resultaat in 1935 in een artikel "On the Interaction of Elementary Particles. I." (Proc. Phys.-Math. Soc. Japan, 17, p. 48). Op basis van bovenstaande uitdrukking kon hij de massa m schatten van het deeltje dat de sterke kernkracht veroorzaakt. In 1947 werd inderdaad dit deeltje gevonden en wel met precies de eigenschappen zoals voorspeld door Yukawa. De vondst van dit door hem voorspelde deeltje, dat nu pi-meson of pion wordt genoemd, leverde hem twee jaar later de Nobelprijs op.

Kernpotentiaal



In bijgaand figuur is met rood de Yukawa-potentiaal aangegeven. Wat opvalt is dat voor kleine afstanden de potentiaal onbegrensd afneemt. Dit betekent dat twee nucleonen elkaar met een steeds grotere kracht aan zullen trekken, wat in werkelijkheid niet het geval is. Daarom dient voor kleine afstanden een correctie ingevoerd te worden die met zwart is aangegeven. Deze extra afstotende kracht is het gevolg van onder andere het uitsluitingsprincipe van Pauli.

Virtuele deeltjes

Zoals gezegd was een van de aannames in Yukawa's model dat nucleonen continu pionen uitzenden. Voor het ontstaan van deeltjes is echter energie nodig, welke een nucleon zelf niet bezit. Gelukkig wil de natuur best een oogje dichtknijpen voor wat betreft het schenden van de wet van behoud van energie, echter wel voor heel even. En hoe meer energie er wordt 'geleend' hoe sneller het ook weer terug moet worden gebracht. Dit is een gevolg van de onzekerheidsrelatie van Heisenberg. Deeltjes die een korte levensduur hebben vanwege dit principe worden virtuele deeltjes genoemd.

Aantrekkende kracht

De kernkracht komt in het model van Hideki Yukawa door het uitwisselen van pionen tussen de nucleonen. Dit is vergelijkbaar met de situatie waarin twee personen een bal overgooien. Bij het weggooien ondervindt de werper een kracht naar achter en degene die de bal vangt wordt erdoor weggeduwd. Wanneer beide personen geen wrijvingskracht zouden ondervinden die hun op hun plek houdt, zouden ze langzaam uit elkaar bewegen. Dit gevolg van 'impulsuitwisseling' levert dus een afstotende kracht op.

In het geval van de kernkracht is echter sprake van een aantrekkende kracht, wat deze analogie opbreekt. Wederom komt de onzekerheidsrelatie van Heisenberg te hulp. Echter in dit geval is vrij lastig voor te stellen wat er gebeurt. Onder andere omdat de wereld van het kleine, zoals beschreven door de kwantummechanica, erg anders is dan we gewend zijn van het gedrag van macrosopische objecten. Bij deeltjes als pionen kun je niet spreken van een positie of een impuls zoals je dat voor een bal kunt. Er is een fundamentele onzekerheid in beide. Sterker nog, volgens de gangbare Kopenhaagse interpretatie heeft het pion, wanneer het niet in interactie is met een ander deeltje, helemaal geen precies gedefinieerde impuls of positie. Er is dus een kans dat wanneer een door een nucleon uitgezonden pion een ander nucleon treft, dit een impuls heeft dusdanig dat beide nucleonen naar elkaar toe bewegen.

Massa van het pion

Met behulp van de Yukawa-potentiaal

$$V(r) = C \frac{e^{-r/r'}}{r} \text{ met } r' = \frac{\hbar}{mc}$$

kon Yukawa een schatting maken van de massa m van het deeltje dat zorgde voor de kracht tussen nucleonen. Hij deed dit door aan te nemen dat de interactie afvalt over een afstand ter grootte van ongeveer de kern. Dit is aannemelijk aangezien de kernkracht zich vooral binnen de kern zal manifesteren. r' in bovenstaande uitdrukking is een goede maat voor de relatieve grootte van de interactie. Bij gelijkstellen aan 2×10^{-15} m, de grootte van een kleine atoomkern, volgt een massa van ongeveer 200 maal die van een elektron.

Ook op basis van het onzekerheidsprincipe kan een (grobe) schatting worden gemaakt van de pionmassa:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

In een tijd Δt kan het pion een maximale afstand $c\Delta t$ afleggen. De massa van dit pion kan geschat worden door ΔE door c^2 te delen

$$m \approx \frac{\Delta E}{c^2} \approx \frac{\hbar}{c^2 \Delta t} \approx \frac{\hbar}{cr'}$$

waarbij r' de afstand aangeeft waarover het pion zich ongeveer kan bewegen. Dit is dezelfde uitdrukking voor de pionmassa als die verkregen met de Yukawa-potentiaal en geeft dus dezelfde schatting.

Afleiding

Een formele afleiding van de Yukawa-potentiaal kan verkregen worden uit de Klein-Gordonvergelijking voor spinloze deeltjes als het pion. Hier zal de Yukawa-potentiaal opduiken als gevolg van enkele plausibiliteitsargumenten.

In het mechanisme voorgesteld door Yukawa zendt een nucleon continu deeltjes uit. De golf functie van zo'n deeltje kan op (relatief) grote afstand benaderd worden door een bolsymmetrische golf van de vorm

$$\psi(r) = A \frac{e^{ikr}}{r}$$

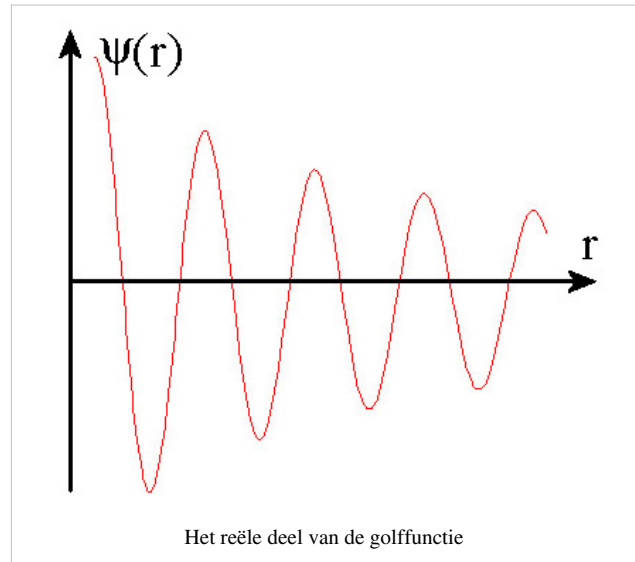
zoals in de figuur hiernaast weergegeven. Voor een uitgezonden pion is echter geen energie beschikbaar zodat via de relativistische relatie tussen energie en impuls $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$ de impuls imaginair is:

$$p^2c^2 + m^2c^4 = 0 \rightarrow p = imc$$

Het golfgetal k is aan de impuls gerelateerd via $p = \hbar k$, zodat de golf functie wordt

$$\psi(r) = A \frac{e^{-\frac{mc}{\hbar}r}}{r}$$

en dat is precies de Yukawa-potentiaal.



Kwantumchromodynamica

Hoewel het model van Yukawa aardig in staat bleek bepaalde resultaten te verklaren, faalt het voor kleine afstanden. Tegenwoordig beschouwen we het mechanisme van het uitwisselen van pionen slechts als residuaal effect van de werkelijke sterke kernkracht zoals beschreven door de kwantumchromodynamica. Dit is vergelijkbaar met de status van de Vanderwaalskracht.

Snaartheorie

Calabi-Yau-variëteit

De **Calabi-Yau-ruimten** zijn speciale complexe variëteiten van samengevouwen plooiën en rondingen. Deze wiskundige objecten zijn ontwikkeld door Eugenio Calabi en Shing-Tung Yau uit de vergelijkingen van de supersnaartheorie. Deze speciale klasse van variëteiten speelt een belangrijke rol zowel in de algebraïsche meetkunde als in de theoretische natuurkunde in de supersnaartheorie voor het compactificeren van de ruimte. De bekendste, eenvoudigste en best bestudeerde Calabi-Yau-variëteiten zijn de complex-3-dimensionale (reëel-6-dimensionale) Calabi-Yau-variëteiten.^[1]



Opgerolde dimensies

De Calabi-Yau-ruimte is een mogelijkheid om een aantal dimensies op te rollen tot ultra-kleine afmetingen. Het zijn eerder onzichtbare toevoegingen aan elk punt van de ons bekende drie dimensies. Ze zijn net zo onzichtbaar als de tijd, die als **tijddimensie** en in feite als vierde dimensie is toegevoegd.

Ruimtebepaling

Deze vorm geeft een extra ruimtebepaling, die loodrecht staat op élk punt van de waarneembare ruimtelijke dimensies. Die richting is bekend, zie dimensie. We zouden omringd zijn door deze uiterst minuscule golvende structuren. Elke beweging die we maken in welke richting dan ook, speelt zich af binnen de drie vertrouwde en tevens in meerdere ruimtelijke dimensies en wel in een bepaalde tijd.

Groot aantal golvende vormen

Er zijn inmiddels tienduizenden **Calabi-Yau-vormen**, maar de vraag is welke van deze ruimten verantwoordelijk is voor de extra dimensies van de ruimtestructuur. Dit is één van de belangrijkste vragen die de snaartheorie wil beantwoorden. De gedetailleerde eigenschappen van de trillingspatronen van snaren, worden alleen met een duidelijke keuze voor één van de Calabi-Yau-vormen bepaald. Het trillingspatroon van zo'n snaar bepaalt o.a. de massa en de (positieve of negatieve) lading van de elementaire deeltjes. De vergelijkingen van de snaartheorie bepalen niet direct de afmetingen van de extra dimensies, maar omdat deze "opgerolde" toevoegingen niet zichtbaar zijn, moeten ze wel uiterst kleine afmetingen hebben.

De supersnaartheorie vereist het bestaan van meerdere dimensies om elementaire- en krachtoverdragende deeltjes in onder te brengen. Het graviton, dit is het krachtdragende deeltje van de zwaartekracht is nog niet waargenomen, maar wordt vermoed gevonden te worden in een van deze ruimtelijke veelvouden. Het foton, dat elektromagnetisme overdraagt, het gluon, dat de sterke kernkracht draagt en de intermediaire vectorbosonen (W en Z deeltjes) die de zwakke kernkracht overdragen (zie elementair deeltje) bevinden zich in de ruimte die we kennen. Het elementaire deeltje dat nog niet is gevonden, het Higgs boson, dat verantwoordelijk is voor de massa van alle deeltjes, wordt mogelijk aangetoond tijdens de processen in de Large Hadron Collider.

Wikipedia-links

- <http://en.wikipedia.org/wiki/Calabi-yau>
- http://en.wikipedia.org/wiki/E._Calabi
- http://en.wikipedia.org/wiki/Shing-Tung_Yau
- http://en.wikipedia.org/wiki/Quintic_threefold

Bronnen, noten en/of referenties

- "De Ontrafeling van de kosmos" door Brian Greene.
- Artikelen uit Wikipedia over elementaire deeltjes.
- "Gevangen in een vliegend tapijt" door Robbert Dijkgraaf.

Voetnoten

D-braan

Een **D-braan** is een begrip uit de theoretische natuurkunde, meer bepaald snaartheorie. Het zijn ruimtelijk uitgestrekte objecten, met een welbepaald aantal ruimtelijke dimensies. Als het aantal dimensies p is, spreekt men ook wel van een D_p -braan. Zo is bijvoorbeeld een D_2 -braan een 2 dimensionaal object. Dat is dus een oppervlak, dat beweegt door de ruimte. Een belangrijke eigenschap van D-branen is het feit dat open snaren erop kunnen eindigen. D-branen werden bekend toen de theoretisch natuurkundige Joe Polchinski aantoonde dat deze objecten nauw verwant (eigenlijk identiek) zijn aan P-branen, objecten die al veel eerder bekend en bestudeerd waren.

Verdere informatie

Oorspronkelijk werd snaartheorie geformuleerd als een theorie van 1-dimensionale objecten: kleine trillende snaartjes. Deze snaartjes zouden zo klein zijn, dat ze voor waarnemers zoals ons gewoon op puntdeeltjes zouden lijken. Midden jaren '90 werd het duidelijk dat deze theorie uitgebreid kon -en eigenlijk ook moest- worden, door objecten toe te voegen met hogere dimensie: D-branen. Formeel zijn deze niet-perturbatieve toestanden van de theorie. Dat wil zeggen dat ze, ondanks het feit dat ze niet opduiken in de perturbatieve theorie, geïncorporeerd dienen te worden voor een consistent geheel.

D-branen maken snaartheorie niet alleen eleganter (aangezien het eigenlijk natuurlijk is om objecten van verschillende dimensies toe te laten, niet alleen 1-dimensionale snaren), maar ook rijker. Veel van de pogingen om snaartheorie te verzoenen met de werkelijkheid, en te verklaren hoe snaartheorie de achterliggende beschrijving is van de fysica die we zien, doen beroep op D-branen.

Deze zaken hebben ertoe aanleiding gegeven dat D-branen sinds hun ontdekking tot op heden een actief en vruchtbaar onderwerp van onderzoek zijn binnen de theoretische natuurkunde.

Literatuur

- Joseph Polchinski
 - String Theory Vol. I: An Introduction to the Bosonic String (1998). Cambridge University Press. ISBN 0-521-63303-6.
 - String Theory Vol. II: Superstring Theory and Beyond (1998). Cambridge University Press. ISBN 0-521-63304-4.

M-theorie

De **M-theorie** is een poging tot een overkoepelende beschrijving (Unificatie-theorie) van de verschillende bestaande snaartheorieën.

Verschillende snaartheoretici hadden al opgemerkt dat de vijf dan bekende tiendimensionale snaartheorieën sterke overeenkomsten vertoonden, en het was bekend dat er tussen verschillende van deze theorieën zogeheten dualiteiten bestonden, manieren om de ene theorie in de andere te transformeren.

Edward Witten poneerde in 1995 dat het mogelijk zou moeten zijn een theorie in elf dimensies te formuleren die een overkoepelende beschrijving (unificatie) geeft van die vijf typen snaartheorie, alsmede van een elfdimensionale vorm van superzwaartekracht (een type veldentheorie dat supersymmetrie en de algemene relativiteitstheorie verenigt).

Waar men tot dan toe dacht dat hooguit één van de vijf snaartheorieën de juiste zou kunnen zijn, leek het nu mogelijk deze te verenigen tot één overkoepelende theorie. De eendimensionale *snaren* in ieder van de vijf tiendimensionale snaartheorieën zijn in wezen doorsneden van tweedimensionale membranen in de elfdimensionale M-theorie. Hierin zou "M" voor "membraan" kunnen staan, hoewel Witten zelf hier uitermate vaag over is. Andere fysici - zoals Robbert Dijkgraaf - opperden dat de "M" wellicht: Mysterieus, Magisch, Matrix of Moeder zou kunnen betekenen. De hogerdimensionale objecten zijn dan de zogenaamde branen, die genoemde snaren en membranen als "doorsnede" bevatten, dus zelf weer allerlei materiedeeltjes in zich kunnen dragen, die evenwel dimensionaal zijn opgesloten.

Het is echter nog niet duidelijk hoe deze M-theorie er precies uit zou moeten zien, en een volledige niet-perturbatieve wiskundige formulering is nog niet voorhanden. Op grond van de bestaande formuleringen van de afzonderlijke snaartheorieën en de verbanden daartussen is het echter wel mogelijk bepaalde resultaten over deze theorie af te leiden en bepaalde eigenschappen ervan te bewijzen.

Membraan (M-theorie)

In theoretische natuurkunde en M-theorie in het bijzonder, slaat de term **membraan** op een ruimtelijk uitgestrekt object, of braan. In M-theorie, welke (samen met zijn 'broertjes', de snaartheorieën) een kandidaat is voor de Theorie van alles, zijn membranen de fundamentele bouwstenen van de deeltjes en krachten. Een macroscopische waarnemer zou een klein en opgerold membraan gewoon zien als een puntdeeltje. Zelfs als M-theorie juist is, zullen we wellicht nooit deze fundamentele membranen in het dagelijks leven zien, omdat deze in zekere zin te klein zijn om de microscopische details ervan te kunnen waarnemen.

Er zijn twee soorten membranen: M2-branen en M5-branen. Deze hebben respectievelijk twee en vijf ruimtelijke dimensies, en zijn magnetisch en elektrisch geladen onder de 4-vorm veldsterkte van M-theorie.

Supergravitatie

Supergravitatie is een veldentheorie, en valt onder het domein van theoretische fysica. Het is een uitbreiding van de relativiteitstheorie van de zwaartekracht, en wordt een mogelijke uitbreiding en vervollediging geacht van de fysica zoals we die nu kennen. De theorie is nog niet experimenteel bevestigd, en wordt dus bestudeerd als kandidaat-theorie. Los van de vraag of de theorie echt overeenkomt met onze werkelijkheid, wordt ze bestudeerd omwille van een aantal mooie en interessante eigenschappen.

Achtergrond

Supergravitatie is een vereniging van algemene relativiteitstheorie met supersymmetrie. Hoewel relativiteitstheorie een goed onderbouwde, en experimenteel bevestigde theorie is, is men van het bestaan van supersymmetrie nog niet zeker. Toch wordt supersymmetrie vaak beschouwd als een zeer levensvatbare theorie, omwille van zijn uniek en verenigend karakter. Deze zaken maken van supergravitatie een van de meest natuurlijke kandidaten voor uitbreiding van de zwaartekrachtstheorie zoals we die nu kennen.

Er bestaan verschillende versies van supergravitatie, met verschillende hoeveelheden supersymmetrie, in verschillende dimensies, en met verschillende aanwezige deeltjessoorten. Er zijn echter ook een groot aantal gemeenschappelijke kenmerken, dat is de reden dat men deze verschillende theorieën met de gemeenschappelijke noemer supergravitatietheorie aanspreekt.

Verder wordt supergravitatie ook aangeduid als de *lage energie limiet* van snaartheorie. Indien snaartheorie -zoals vele theoretische fysici denken en hopen- een verenigende theorie van alles is, en dus onze werkelijkheid op het meest fundamentele niveau beschrijft, dan zal de fysica die wij daarvan zien een supergravitatietheorie zijn. De uitleg hiervoor is dat alle experimenten die wij met onze hedendaagse technologie kunnen uitvoeren, allemaal in zekere zin op erg lage energieën gebeuren. (Meer precies, op energieniveaus ver onder de Planckschaal.) Als snaartheorie juist is, zullen we dus in de nabije toekomst onmogelijk de 'hele theorie' kunnen zien; hooguit de lage energie-fenomenen. Het zijn net die fenomenen die voor alle bekende snaartheorieën supergravitatietheorieën zijn.

Dat maakt van supergravitatie dus niet alleen de meest eenvoudige uitbreiding van het Standaardmodel van fysica, maar ook erg interessant vanuit het standpunt van de meest ambitieuze theorie die de theoretische fysica van vandaag kent (snaartheorie).

Supersymmetrie

In supergravitatie is supersymmetrie een lokale symmetrie. Dat is nodig om consistentie met de diffeomorfisme invariantie van algemene relativiteitstheorie te garanderen. Bovendien zijn er supersymmetrische partners van het graviton. Dat zijn dus spin-3/2 -velden, en noemt men de gravitini. Het aantal zulke gravitini komt overeen met het aantal supersymmetrieladingen, een grootte die genoteerd wordt met N . Het geval $N > 1$ noemt men ook wel uitgebreide supergravitatie.

p-branen

➤ *Zie p-braan voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Een centraal object dat bestudeerd wordt binnen de supergravitatie, zijn de zogeheten p-branen of p-braan oplossingen. Dit zijn massieve, geladen objecten, met een horizon (net als een zwart gat). Er bestaan verschillende types van p-branen, afhankelijk van de supergravitatie theorie onder beschouwing, afhankelijk van de massa en lading, en ook van de dimensie van het braan in kwestie; deze wordt weergegeven door p . Een 3-braan is dus bijvoorbeeld een object met (ruimtelijke) dimensie drie. Men heeft ontdekt dat de p-branen van supergravitatie nauw verwant zijn aan het begrip D-branen in snaartheorie. Veel kennis die we hebben over D-branen in snaartheorie komt eigenlijk door de studie van p-branen in supergravitatie, welke eerder en beter begrepen waren.

Geschiedenis

Supergravitatie, ook wel **SUGRA**, werd voor het eerst voorgesteld in 1976, door de fysici Daniel Z. Freedman, Peter van Nieuwenhuizen en Sergio Ferrara aan de Stony Brook-universiteit. De oorspronkelijke formulering behandelde $N=1$ supergravitatie in vier ruimtetijd-dimensies. Kort daarna werd de theorie veralgemeend naar hoger-dimensionale theorieën, met meer supersymmetrieladingen ($N > 1$). Vandaag kent men zelfs 11-dimensionale versies van supergravitatie, welke de lage energie-limiet van M-theorie beschrijft.

Bronnen

Historisch

- D.Z. Freedman, P. van Nieuwenhuizen and S. Ferrara, "Progress Toward A Theory Of Supergravity", *Physical Review* **D13** (1976) pp 3214–3218.
- E. Cremmer, B. Julia and J. Scherk, "Supergravity theory in eleven dimensions", *Physics Letters* **B76** (1978) pp 409–412.
- P. Freund and M. Rubin, "Dynamics of dimensional reduction", *Physics Letters* **B97** (1980) pp 233–235.
- Ali H. Chamseddine, R. Arnowitt, Pran Nath, "Locally Supersymmetric Grand Unification", " *Phys. Rev.Lett.*49:970,1982"

Pedagogisch

- Structure of supergravity theories "[1]" (2002) (*Een overzicht van supergravitatie theorieën, door de Belgische fysicus Antoine Van Proeyen*)
- A Supersymmetry primer "[2]" (1998) geupdated in (2006), (*Een inleiding tot supergravitatie.*)
- Adel Bilal, "Introduction to supersymmetry ^[3]" (2001) ArXiv hep-th/0101055. (*Een inleiding tot supersymmetrie.*)
- Friedemann Brandt, "Lectures on supergravity ^[4]" (2002) ArXiv hep-th/0204035. (*Een inleiding tot 4-dimensionale N=1 supergravitatie.*)

Referenties

[1] <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0301005>

[2] <http://arxiv.org/abs/hep-ph/9709356>

[3] <http://arxiv.org/abs/hep-th/0101055>

[4] <http://arxiv.org/abs/hep-th/0204035>

Relativiteit

Absolute ruimte

Absolute tijd en **absolute ruimte** zijn twee hypothetische concepten die met name een belangrijke rol spelen in de natuurkundige theorieën van Isaac Newton. Ze waren eigenlijk bedoeld als operationele definitie en stonden lange tijd centraal in de natuurkunde, totdat de speciale relativiteitstheorie van Albert Einstein haar intrede deed. Newton stelde dat de ruimte altijd hetzelfde bleef en nooit bewoog; "absolute beweging" was volgens hem niets anders dan het zich verplaatsen van de ene absolute plaats naar de andere. Volgens de Newtoniaanse definitie van "absolute tijd" verloopt tijd voor alle waarnemers in het heelal in hetzelfde tempo. Dit betekent dat ruimte en tijd niet afhankelijk zijn van concrete gebeurtenissen, maar hiervoor slechts het "decor" vormen, en dat een voorwerp alleen in staat van absolute rust of absolute beweging kan verkeren.

In Newtons eigen tijd werd er al bezwaar gemaakt tegen dit idee van absolute tijd en ruimte als twee volledig los van elkaar staande entiteiten. Zo was Leibniz bijvoorbeeld juist van mening dat de begrippen tijd en ruimte slechts dan betekenis hadden wanneer ze als relatief werden beschouwd.

Literatuur

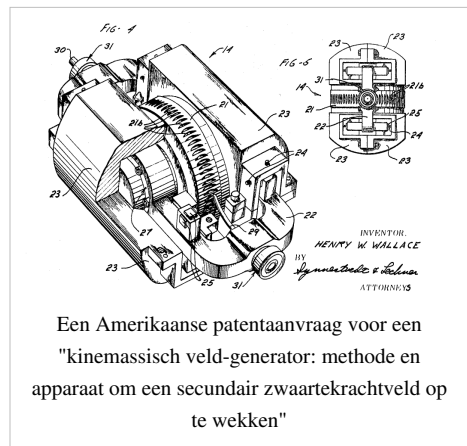
- Isaac Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*

Antizwaartekracht

Antizwaartekracht is een hypothetische kracht die de zwaartekracht opheft.

Newton beschouwde zwaartekracht als een natuurkundige kracht die instantaan (meteen) vanuit een massa werkt, maar hij maakte geen hypothese over het mechanisme (*Hypotheses non fingo*) in tegenstelling tot Descartes die zwaartekracht verklaarde met zijn vortextheorie.

Theoretisch zou een materiaal of een mechanisme denkbaar kunnen zijn dat de zwaartekracht tegenwerkt of afschermt. Volgens Einsteins algemene relativiteitstheorie is zwaartekracht een kromming van de structuur van de ruimte zelf als die reageert op de aanwezige massa. Hiermee zou het dan niet meer mogelijk zijn om de zwaartekracht af te scherpen of te beïnvloeden zonder enorme hoeveelheden energie nodig te hebben om de ruimtestructuur te vervormen. De meeste natuurkundigen houden antizwaartekracht dan ook voor onmogelijk.



Zwaartekrachtschild

Na een voorlopige publicatie in 1992 schreef de materiaalkundige Eugene Podkletnov in 1996 een stuk waarin hij beweerde een vermindering van de zwaartekracht gevonden te hebben als gevolg van een sneldraaiende supergeleidende schijf. Na een aantal afwijzingen zou het gepubliceerd worden in de *Journal of Physics-D*. Voor de officiële publicatie kreeg een journalist hier lucht van en blies de ontdekking in de *Sunday Telegraph* op tot "antizwaartekracht". Dat kostte Podkletnov zijn carrière, omdat dat begrip in de wetenschap tot onmogelijkheid is verklaard. De directeur van het wetenschappelijk instituut waar hij werkte, distantieerde zich van de publicatie en de co-auteur liet weten dat zijn naam zonder zijn medeweten was gebruikt. Uiteindelijk trok Podkletnov de publicatie in en werd hij ontslagen.

In 1990 had een Chinese onderzoeker Ning Li al voorspeld dat supergeleiders de zwaartekracht konden beïnvloeden. Samen met de Amerikaanse onderzoeker Douglas Torr wist hij de NASA te interesseren in hun ideeën. De NASA heeft de ideeën inmiddels getest en geen praktische toepassing kunnen vinden.

Donkere energie

Onlangs is bij nieuwe metingen van de expansie van het heelal gebleken dat er misschien toch een soort antizwaartekracht is die de expansie tegenwerkt. Wikipedia:Bronvermelding Deze kracht wordt toegeschreven aan donkere energie.

Sciencefiction

Het idee van *antizwaartekracht* spreekt schrijvers van sciencefictionverhalen zeer aan en daarin zijn dan ook vaak apparaten aan het werk die op een of andere manier gebruikmaken van antizwaartekracht. En hoewel verreweg de meeste natuurkundigen antizwaartekracht tegenwoordig als onmogelijk afwijzen zijn er toch talloze (hobby)uitvinders die werken aan vermeende antizwaartekrachtmachines.

Externe links

- wired.com ^[1] *Breaking the Law of Gravity*
- space.com ^[2] *NASA's Controversial Gravity Shield Experiment Fails to Produce*

Referenties

[1] <http://www.wired.com/wired/archive/6.03/antigravity.html>

[2] http://www.space.com/business/technology/technology/anti_grav_update_011010.html

Ce Tecpatl

Ce-Tecpatl, of **1-Steen**, is - behalve een datum verbonden met de krijgsgoden Huitzilopochtli en Mixcoatl-Camaxtli die ook Ce Tecpatl Mixcoatl heette - de kalendernaam van de Azteekse wijze (*tlamatini*) en profeet (*ah-bobat*) die als de grondlegger van de rekenkunde, kalender en astrologie gold. Volgens de overlevering kwam hij uit het mythologische oorsprongslaan aan gene zijde van de oceaan (Tamoanchan), uit het "land van de zwarte en de rode inkt" (Tlillan-Tlapallan). Voor de Azteken gold dit overzeese gebied niet alleen als de bakermat van wetenschap en kennis, maar ook als het stamland van de oorlog.

Sommigen identificeren 1-Steen met de bringer van alle esoterische kennis, Quetzalcoatl, die ook de god van de kooplieden was. Enkele afbeeldingen tonen hem echter niet met de baard van Quetzalcoatl, maar met een snor. Omdat dit in de Azteekse iconografie ongewoon is, maar vaker voorkomt in de kunst van de Maya's (zoals bij enkele edellieden uit Palenque en late vorsten van Seibal het geval is), veronderstelt men wel een oostelijke herkomst voor 1-Steen. 1-Steen zou ook de Lange telling hebben uitgevonden en, in samenhang daarmee, het wereldeinde in 2012 hebben voorspeld.

In één geval steekt de besnorde 1-Steen zijn tong uit, wat ook het meest opvallende kenmerk is van het centrale gezicht op de Azteekse Kalendersteen (zie Azteekse kalender). Zoals bekend is de Kalendersteen een cosmogram van tijd (*xiuhpohualli*) en beweging (*ollin*) waarin de cyclus van wereldondergangen vervat ligt. De uitgestoken tong laat bijgevolg zien dat 1-Steen de archetypische ingewijde is in de geheimen van ruimte en tijd. De tong bevat echter ook een onmiskenbaar element van spot, wat tot de overhaaste aanname heeft geleid, dat 1-Steen een band onderhoudt met de aartsbedrieger, de Azteekse god Tezcatlipoca.

Samenvattend kan gesteld worden dat de besnorde en spotlustige 1-Steen, afkomstig uit een overzees gebied van spreekwoordelijke geleerdheid en krijgskunde, en met een achtergrond in de sociale klasse der kooplieden, meer dan welke andere Mesoamerikaanse persoonlijkheid ook de geheimen van ruimte, tijd, en kosmische energie heeft weten te doorgronden.

Literatuur

- A. Caso, Los Calendarios Prehispánicos. UNAM, Mexico 1967.
- H. B. Nicholson, A Cholulteca Ceramic "Caricature" of a Totonac 'Prophet'. Notas Mesoamericanas no. 13 (1991-1992).

D'Alembertiaan

De **d'Alembertiaan** is een concept uit de relativiteitstheorie, dat het begrip van de Laplaciaan uit vectoranalyse veralgemeent naar ruimtes met een Minkowski-signatuur. Het begrip is genoemd naar de Franse natuurkundige d'Alembert. Het geeft aan in welke mate een functie of tensor varieert doorheen de ruimtetijd.

Definitie

Als we werken in Planck-eenheden, zodat de lichtsnelheid c de numerische waarde 1 heeft, is de viergradiënt gegeven door

$$\partial_\mu = (\partial_t, \nabla) = (\partial_t, \partial_x, \partial_y, \partial_z).$$

De contravariante viergradiënt bekomt men door contractie met de Minkowski-metrick:

$$\partial^\mu = \eta^{\mu\nu} \partial_\nu = (\partial_t, -\partial_x, -\partial_y, -\partial_z)$$

Met behulp van deze twee operatoren kan men dan de d'Alembertiaan definiëren, als volgt:

$$\square := \partial^\mu \partial_\mu = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta$$

Indien men werkt in SI-eenheden, komt er nog een factor c^2 voor in de noemer van de tijdsafgeleide, zodat:

$$\square := \frac{\partial^2}{c^2 \partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Interpretatie en gebruik

Uit de bovenstaande definitie is duidelijk dat voor een functie of tensor die niet afhangt van de tijd is de d'Alembertiaan gegeven door (minus) de Laplaciaan, en dus inderdaad een veralgemening is hiervan. Ook is de d'Alembertiaan een Lorentz-covariante uitdrukking is, en dus hangt deze niet af van het inertiaalstelsel van waaruit men de fysische situatie beschrijft. De algemeen-relativistische definitie bekomt men door de viergradiënt te vervangen door een covariante afgeleide:

$$\square = \nabla^\mu \nabla_\mu$$

Deze is op zijn beurt diffeomorfisme-invariant, en hangt dus niet af van het gebruikte coördinatensysteem. Dit maakt het een goed gedefinieerd object binnen algemene relativiteitstheorie.

De d'Alembertiaan komt frequent voor in o.a. veldentheorie, waar het optreedt als differentiaaloperator in de bewegingsvergelijking van de meest courante (kwantum)velden.

Externe links

- D'Alembertiaan op de wiskundige encyclopedie Wolfram ^[1]

Referenties

[1] <http://mathworld.wolfram.com/dAlembertian.html>

Arthur Eddington

Arthur Stanley Eddington (Kendal (Engeland), 28 december 1882 – Cambridge, 22 november 1944) was een Brits astronoom.

Wetenschappelijke biografie

Eddington studeerde aan het Owens College in Manchester en studeerde in 1902 af in de natuurkunde. Hij promoveerde in 1905 aan het Trinity College in Cambridge toen hij 22 was en werd benoemd tot hoofdassistent op het Royal Observatory in Greenwich. In 1913 werd hij benoemd tot hoogleraar astronomie in Cambridge.

Eddington was een van de eerste astronomen die de volle betekenis van de relativiteitstheorie van Albert Einstein besepte.

In 1919 organiseerde hij een expeditie naar het eiland Principe om op 29 mei een zonsverduistering te observeren. Tijdens deze zonsverduistering kon hij aantonen dat het licht van sterren, dat vlak langs de verduisterde zon trok, door de zwaartekracht van de zon werd afgebogen. Dit was het eerste experimentele bewijs van de relativiteitstheorie.

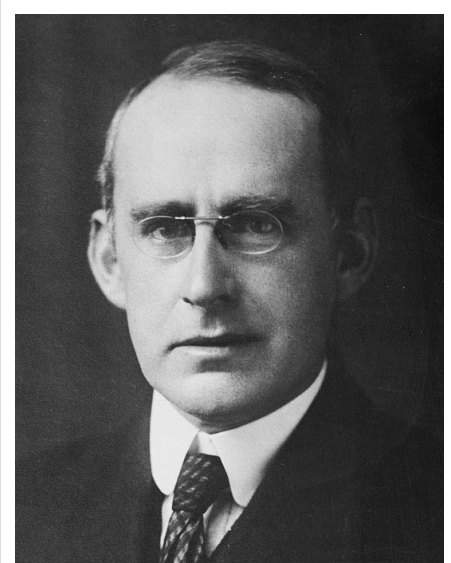
Verder ontwikkelde hij in 1926 als eerste een model van het inwendige van de zon. Zijn idee bestond eruit dat in de zon een evenwicht bestond tussen zwaartekracht, gasdruk en stralingsdruk. Eddington was de krachtigste pleitbezorger tegenover James Jeans van het door de Fransman Jean Baptiste Perrin gelanceerde idee dat sterren energie produceren door middel van kernfusie van waterstof, dat zodoende in helium wordt omgezet,

In 1938 toonde Hans Bethe aan dat de energie van de zon inderdaad door kernfusieprocessen van waterstof werd geleverd.

Jarenlang deed hij foutief de theorie van Subramanyan Chandrasekhar over zwarte gaten af als "stellar buffoonery."

Persoonlijke leven

Arthur Eddington werd in Kendal geboren als zoon van Arthur Henry Eddington (schoolhoofd) en Sarah Ann Shout. Hij was een Quaker, een gewetensbezwaarde in de Eerste Wereldoorlog, en bleef zijn leven lang vrijgezel en geheelonthouder



Arthur Eddington



Meer mediabestanden die bij dit onderwerp horen, zijn te vinden op de pagina *[/wiki/Commons:Arthur Stanley Eddington?uselang=nl Arthur Stanley Eddington]* op Wikimedia Commons.

Eenparig cirkelvormige beweging

De **eenparig cirkelvormige beweging** of **ECB** is een eenparige beweging en wordt, net als de eenparig rechtlijnige beweging, gekarakteriseerd door een constante snelheid. Er is echter ook een versnelling, die ervoor zorgt dat het voorwerp zijn cirkelvormige baan zal behouden. De bewegingszin van een ECB is altijd in tegenwijzerzin.

Bewegingsvergelijking

Beschouwen we nu een voorwerp dat met een constante hoeksnelheid ω beweegt rond het middelpunt van een cirkel. We kunnen de positie op elk tijdstip weergeven met de volgende bewegingsvergelijking:

$$\begin{cases} s_x(t) = R \cos(\omega t) \\ s_y(t) = R \sin(\omega t) \end{cases}$$

Kinematica van een ECB

Bij de eenparig cirkelvormige beweging is de snelheid de afgeleide is van de standwet, en de versnelling de afgeleide van de snelheid. Hieronder staan enkele kinematische gegevens omtrent de ECB.

Baansnelheid

De baansnelheid drukt de afgelegde weg uit in functie van de tijd en wordt gegeven door de uitdrukking (uitgedrukt in m/s):

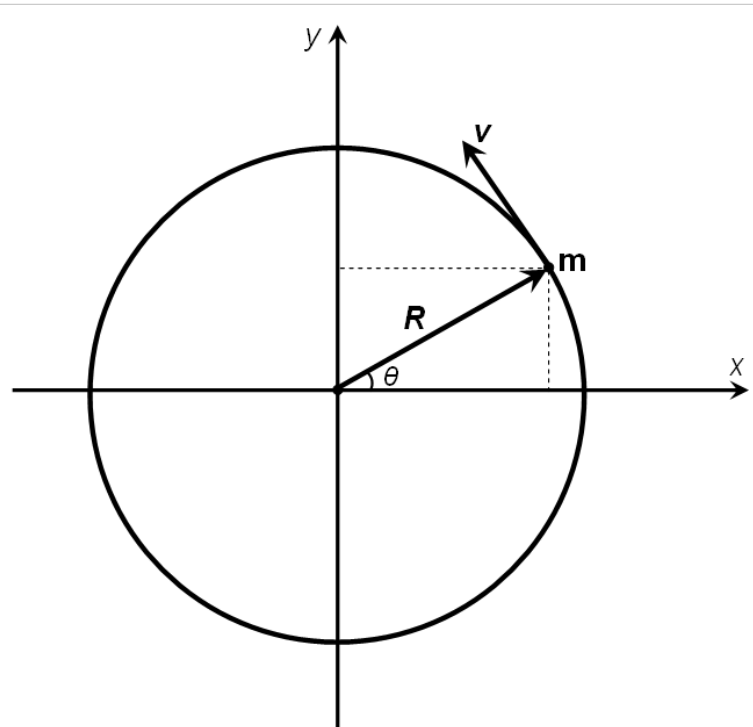
$$v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R \cdot f$$

waarbij:

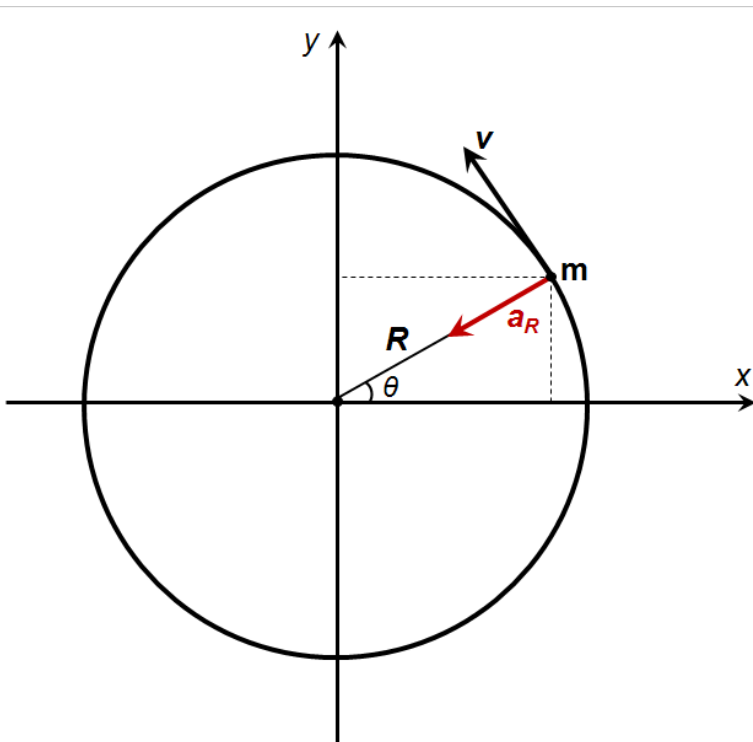
R de straal van de cirkel

T de periode van de beweging

f de frequentie van de beweging



Schema van een ECB door een massapunt m , met weergave van de standvector R en de snelheidsvector v .



Schema van een ECB door een massapunt m , met weergave van centripetale versnellingsvector a_R .

Hoeksnelheid

De hoeksnelheid geeft het verband weer tussen de afgelegde hoek en de tijd en wordt gegeven door de uitdrukking (in rad/s):

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f$$

Snelheid

Leiden we deze uitdrukking af naar de tijd, bekommen we de snelheid.

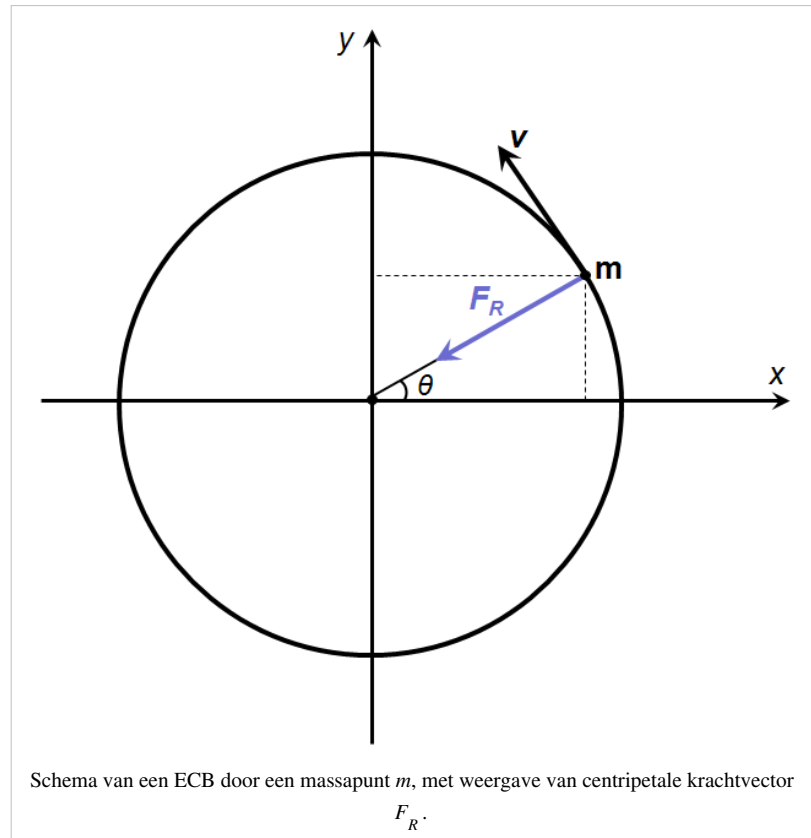
$$\begin{cases} \frac{d}{dt}s_x(t) = v_x(t) = -\omega R \sin(\omega t) \\ \frac{d}{dt}s_y(t) = v_y(t) = \omega R \cos(\omega t) \end{cases}$$

De snelheid kan ook als volgt uitgedrukt worden:

$$v = \omega r$$

of als

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$



Versnelling

Nogmaals afleiden levert de versnelling op:

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dt^2}s_x(t) = \frac{d}{dt}v_x(t) = a_x(t) = -\omega^2 R \cos(\omega t) \\ \frac{d^2}{dt^2}s_y(t) = \frac{d}{dt}v_y(t) = a_y(t) = -\omega^2 R \sin(\omega t) \end{cases}$$

De versnelling kan ook als volgt uitgedrukt worden:

$$a(n) = \omega^2 r = \omega v = \frac{v^2}{r}$$

We vinden hierbij terug dat de versnelling terug de standwet is, vermenigvuldigd met $-\omega^2$. Deze versnelling is dus constant en niet gelijk aan nul, staat loodrecht op de snelheid en is naar het middelpunt van de cirkel gericht. Deze versnelling wordt de centripetale of middelpuntzoekende versnelling genoemd en is nodig om het voorwerp op zijn baan te houden.

Dynamica van een ECB

Volgens de tweede wet van Newton ($F = m \cdot a$) moet op een voorwerp dat versnelt een nettokracht worden uitgeoefend. Op een voorwerp dat een cirkelvormige beweging uitvoert, zoals een bal aan een touw, moet dus een kracht worden uitgeoefend om dat voorwerp de ECB te blijven laten uitvoeren. Met andere woorden: er is een kracht noodzakelijk om het voorwerp een centripetale versnelling te geven. De grootte van die benodigde kracht kan berekend worden met de tweede wet van Newton voor de radiale component ($F_R = m \cdot a_R$). Hierbij staat a_R voor de radiale versnelling (d.i. de centripetale versnelling). De totale nettokracht wordt dus gegeven door de betrekking:

$$F_R = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

Bij een eenparig cirkelvormige beweging, waarbij de snelheid constant is, is de versnelling a_R op elk moment gericht naar het middelpunt van de cirkel. Dat geldt bijgevolg ook voor de centripetale kracht, die evenzo moet gericht zijn naar het middelpunt van de cirkel. Er is telkens een kracht nodig, want als deze er niet zou zijn, zou volgens de eerste wet van Newton (wet van de traagheid) het voorwerp geen cirkelvormige baan beschrijven, maar een rechte baan (ERB).

Eenparig rechtlijnige beweging

Een **eenparig rechtlijnige beweging** of **ERB** is een eenparige beweging waarbij de snelheid en bewegingsrichting over een tijdsinterval Δt constant blijven.

Een voorbeeld van een eenparig rechtlijnige beweging is de beweging die een opwindbaar speelgoedwagentje maakt.

Bewegingsvergelijking

Voor deze beweging geldt voor de snelheid v :

$$v = \text{constant}$$

en voor de afstand Δs :

$$\Delta s = s_e - s_0$$

waaruit volgt dat:

$$s_e = v_s(\Delta t) + s_0$$

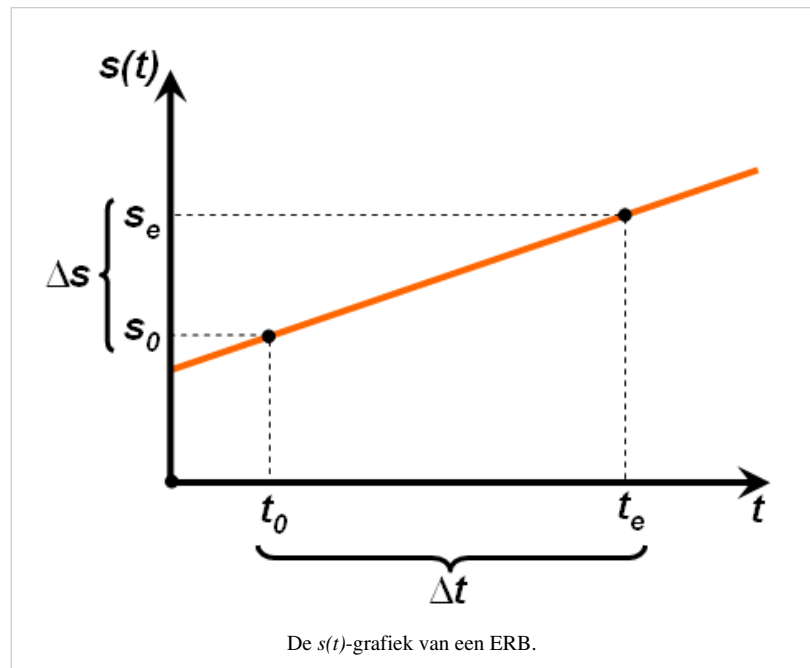
Waarbij

s_e de eindpositie is in m

s_0 de beginpositie is in m

v_s de snelheid is in m/s

Δt het tijdsinterval is waarover de beweging zich afspeelt (in seconden)



Visueel

Het $s(t)$ -diagram is een rechte, het $v(t)$ -diagram is een horizontale rechte (aangezien de snelheid constant is).

Eenparig versnelde beweging

Een **eenparig versnelde beweging** - ook wel **eenparig veranderlijke rechte lijnige beweging** of **EVRB** genoemd - is een beweging waarbij de snelheid in de tijd lineair toe- of afneemt, ofwel een gelijkmatige versnelling of vertraging van een beweging. De letter *V* in EVRB kan dus slaan op versnelde of vertraagde rechte lijnige beweging (of **variabele**).

Een eenparige versnelling kan worden berekend door de verandering in snelheid binnen een bepaald tijdsinterval te delen door de tijd (dv/dt). De uitkomst van deze berekening is de versnelling. Deze heeft binnen elk tijdsinterval waarin de beweging plaatsvindt dezelfde waarde.

Als de snelheid van een eenparig versnellend voorwerp dat op $t = 0$ s in rust verkeerde binnen 0,5 s eenparig is versneld naar 10 m/s, bedraagt de eenparige versnelling 20 m/s^2 . Het voorwerp heeft dan in het gegeven tijdsinterval een gemiddelde snelheid van 5 m/s, aan de hand waarvan de afgelegde afstand kan worden berekend. Dit kan overigens ook worden gedaan met de formule voor s onder Bewegingsvergelijking.

Een voorbeeld van een eenparig versnelde beweging is de beweging die een appel maakt als hij uit de boom valt. Een seconde nadat de appel van de boom losbreekt is zijn snelheid $9,81 \text{ m/s}$. Na twee seconden is zijn snelheid tweemaal de snelheid die hij na een seconde had ($19,6 \text{ m/s}$), na drie seconden driemaal ($29,4 \text{ m/s}$), enzovoort (hierbij is geen rekening gehouden met de luchtweerstand die de appel tijdens zijn val ondervindt).

In het algemeen treedt een eenparig versnelde beweging op als er op een voorwerp een constante kracht wordt uitgeoefend. In het geval van de vallende appel is deze kracht de zwaartekracht, die op het aardoppervlak nagenoeg constant is.

Bewegingsvergelijking

Voor deze beweging geldt voor de snelheid v

$$v = v_0 + at$$

en voor de afstand s

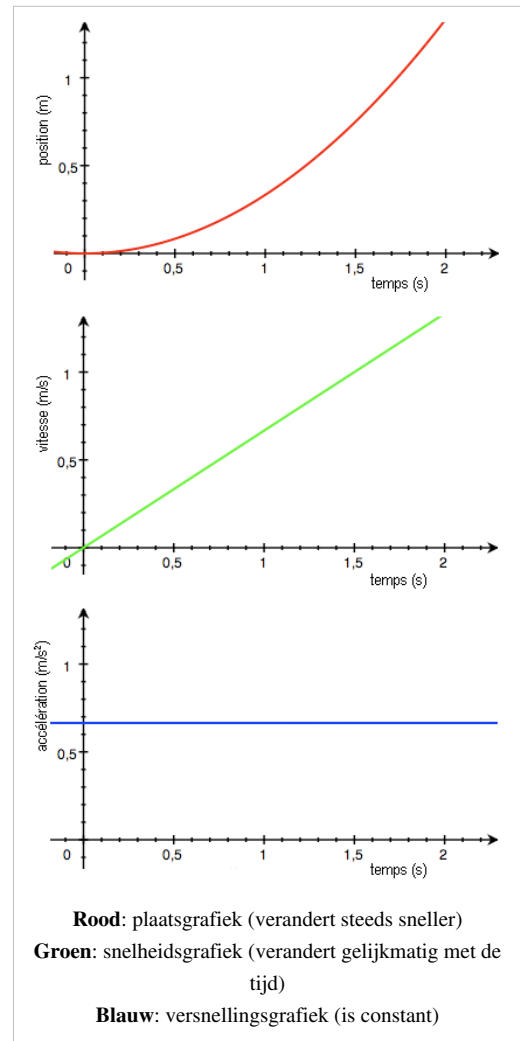
$$s = s_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

Waarbij

v_0 de beginsnelheid is in m/s ,

a de versnelling in m/s^2 en

t de tijd in seconden is.



Visueel

Als we een beweging in een (v,t)-diagram visualiseren, is de oppervlakte onder de snelheidsfunctie de afgelegde afstand. Dit is een driehoek bij een eenparig versnelde of vertraagde beweging. Als we de afgelegde weg visualiseren, zien we een halve parabool.

Ehrenfest-paradox

De **Ehrenfest-paradox** doet zich voor als men een ronddraaiende cirkel beschrijft met speciale relativiteit.

In zijn oorspronkelijke formulering, zoals door Paul Ehrenfest in 1909 in het *Physikalische Zeitschrift* voorgesteld, beschrijft hij een ideaal starre cilinder die om zijn symmetrie-as draait. De straal a staat altijd loodrecht op zijn bewegingsrichting en zou in het bewegende stelsel daarom gelijk moeten zijn aan zijn stilstaande waarde a_0 . Maar de omtrek die parallel aan de bewegingsrichting staat en in het mee bewegende stelsel $2\pi a$ is zou door de lengtecontractie een kleinere waarde moeten hebben in het stilstaande stelsel. Dit leidt tot de tegenspraak dat $a = a_0$ en $a < a_0$.

Later hebben vele andere natuurkundigen zich over dit probleem gebogen. Vele oplossingen zijn gevonden en worden vandaag de dag nog bediscussieerd.

Wiskundige beschrijving

Een cirkel met straal a draait met een hoeksnelheid ω .

Wiskundig gezien zou de omtrek dan gelijk zijn aan

$$O = 2\pi a.$$

Relativistisch gezien is de omtrek gelijk aan

$$O = \frac{2\pi a}{\gamma} \text{ waar } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\omega^2 a^2}{c^2}}}.$$

Hier is c de lichtsnelheid is, omdat de omtrek in de bewegingsrichting staat.

Merk op dat $\gamma > 1$ wanneer $\omega > 0$. Dit zou betekenen dat de (relativistische) verhouding tussen omtrek en diameter

$$\frac{2\pi a}{2\gamma a} = \frac{\pi}{\gamma} < \pi \text{ voor } \omega > 0 \text{ is.}$$

Normaliter (wiskundig) hebben alle cirkels de eigenschap dat de verhouding tussen omtrek en diameter

$$\frac{2\pi a}{2a} = \pi \text{ is.}$$

Dit is een paradox, een *starre* cirkel, die ronddraait voldoet niet meer aan de geometrie van de wiskundige cirkel.

Externe links

- The Rigid Rotating Disk in Relativity ^[1], by Michael Weiss (1995), from the *sci.physics FAQ*.
- The Resolution of the Ehrenfest Paradox ^[2], by Jaroslav Hynecsek, from the *General Science Journal*

Referenties

[1] http://www2.corepower.com:8080/~relfaq/rigid_disk.html

[2] <http://www.wbabin.net/physics/hynecek7.pdf>

Eigentijd

Eigentijd is een begrip uit de relativiteitstheorie. Het geeft de tijd, zoals gemeten door een (bewegende) waarnemer.

Achtergrond

Volgens de relativiteitstheorie zijn bepaalde grootheden niet eenduidig bepaald, maar hangen deze af van de waarnemer die ze meet. Eén van die grootheden is de tijd. Tijddilatatie is het verschijnsel dat voor een waarnemer die beweegt met een constante snelheid de tijd in een ten opzichte van hem bewegend ruimtevaartuig trager lijkt te verlopen, zelfs als hij rekening houdt met de tijd die signalen nodig hebben om de afstand te overbruggen. Als de ander ook beweegt met een constante snelheid is dit dus wederzijds. Dit is een zeer tegen-intuïtief fenomeen, maar is experimenteel getest in verschillende experimenten. Voor dagelijkse snelheden is dit effect zeer klein, en we merken er dan ook weinig van. In meer extreme omstandigheden (waarmee snelheden in de buurt van de lichtsnelheid gemoeid zijn) is het effect wel merkbaar.

Definitie

De eigentijd kan voor een aantal (lichtjes verschillende) situaties gedefinieerd worden. Hieronder de meest courante.

Constance snelheid

Als A en B elk een constante snelheid hebben en de snelheid van B ten opzichte van A bedraagt v , dan is de tussen twee gebeurtenissen in het ruimteschip van B verstreken eigentijd van B gegeven door

$$\Delta\tau = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

waarbij c de lichtsnelheid is, en Δt de tijd die volgens de klok van A verstreken is tussen de gebeurtenissen, waarbij het moment van een gebeurtenis in het ruimteschip van B bijvoorbeeld berekend wordt door het moment van ontvangen van een signaal te corrigeren voor de tijd dat het signaal nodig moet hebben gehad om de afstand te overbruggen. De bovenstaande uitdrukking zegt dus het volgende: als een bepaalde persoon beweegt met snelheid v , gedurende een tijd Δt (gemeten door stilstaande waarnemers), zal volgens hem deze reis slechts een tijd $\Delta\tau$ geduurd hebben. De duur van een reis gemeten in eigentijd is dus korter dan het tijdverloop volgens de ander.

Als de twee waarnemers eerst bij elkaar zijn, dan enige tijd zich van elkaar verwijderen als boven en dan naar elkaar terugkeren, waarbij A zijn snelheid handhaaft en B halverwege de reis zijn snelheid zodanig verandert dat de onderlinge snelheid even groot maar tegengesteld is, dan is de in totaal verstreken eigentijd van B kleiner dan die van A (tweelingparadox). Er is nu geen symmetrie meer: redeneren vanuit een stilstaande A kan wel, maar omdat B halverwege de reis is omgekeerd is er geen inertiaalstelsel waarin B de hele reis heeft stilgestaan.

Variabele snelheid

Het is duidelijk dat de bovenstaande uitdrukking ook veralgemeend kan worden naar waarnemers die met een variabele snelheid bewegen. In dat geval moet men het pad denkbeeldig opdelen in allemaal stukjes waarover de waarnemer beweegt met een constante snelheid, en dan de eigentijden van die stukjes bij elkaar optellen. Meer precies, men moet de eigentijd integreren over het pad. De totale verstreken tijd τ op het horloge van een waarnemer die zich beweegt met een variabele snelheid $v(t)$, zoals gemeten door een stilstaande waarnemer wiens tijd gegeven is door t , is:

$$\tau = \int d\tau = \int \sqrt{1 - \frac{v(t)^2}{c^2}} dt.$$

Voor een constante snelheid is de integraal triviaal, en herleidt de bovenstaande uitdrukking tot de uitdrukking die hoger staat.

Met behulp van de Minkowski-metrick

Men kan het bovenstaande ook in een nettere notatie gieten. Laten we eerst de verstreken eigentijd van een waarnemer een nieuwe naam geven: $d\tau$ in de plaats van t . Laten we ook de waarnemer zich in een drie-dimensionale ruimte verplaatsen: de verplaatsing is dus gegeven door een vector $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$. Als deze verplaatsing gebeurt binnen een tijd Δt_0 (gemeten door stilstaande waarnemers), is zijn snelheid

$$v = \frac{|\Delta \vec{x}|}{\Delta t} = \frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}}{\Delta t}$$

Op basis van de uitdrukking hoger, is het kwadraat van de verstreken eigentijd dan gegeven door

$$(\Delta \tau)^2 = (\Delta t)^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = (\Delta t)^2 - \frac{1}{c^2} \left((\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 \right)$$

of dus

$$\Delta \tau = \sqrt{(\Delta t)^2 - \frac{(\Delta x)^2}{c^2} - \frac{(\Delta y)^2}{c^2} - \frac{(\Delta z)^2}{c^2}}.$$

In de speciale relativiteitstheorie voegt men de verplaatsing in ruimte en in tijd samen tot één vector met vier componenten $(\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$, en noteert deze viervector met Δx^μ . De index μ kan dus vier waarden aannemen. Indien men ook nog de Minkowski-metrick $\eta_{\mu\nu}$ (zie lager voor conventies) en de sommatieconventie invoert, kan men de bovenstaande uitdrukking eenvoudigweg schrijven als

$$(\Delta \tau)^2 = \Delta x^\mu \Delta x^\nu \eta_{\mu\nu} = \Delta x^\mu \Delta x_\mu$$

Wederom kan men tijdsafhankelijke snelheden beschouwen. In dat geval deelt men het pad denkbeeldig op in infinitesimale verplaatsingen (dt, dx, dy, dz) in de ruimtetijd, elk met hun eigen constante snelheid, en elk met een infinitesimale eigentijd

$$d\tau = dx^\mu dx_\mu$$

De totale verstreken eigentijd is dan de som van alle infinitesimale stapjes in de eigentijd, wat aldus de volgende integraal oplevert: $\tau = \int d\tau = \int \sqrt{dx^\mu dx_\mu}$

In gekromde ruimte

In de algemene relativiteitstheorie beschrijft men ook de gravitatie. Concreet gebeurt dit door een metrick $g_{\mu\nu}$ in te voeren die (in tegenstelling tot de Minkowski-metrick $\eta_{\mu\nu}$) niet meer constant en vlak is. Concreet: $g_{\mu\nu}$ is een functie van de positie en tijd x^μ . De uitdrukking voor de eigentijd, verstreken op het horloge van een bewegende waarnemer, is wel nog erg analoog. Men dient in de bovenstaande uitdrukkingen de Minkowski-metrick te vervangen door zijn veralgemening: de (mogelijk gekromde) metrick $g_{\mu\nu}$. Men krijgt dus:

$$\tau = \int d\tau = \int \sqrt{dx^\mu dx^\nu g_{\mu\nu}} = \int \sqrt{dx^\mu dx_\mu}$$

In de laatste uitdrukking gebeurde de contractie nu dus met g , niet met η .

Notatie en conventies

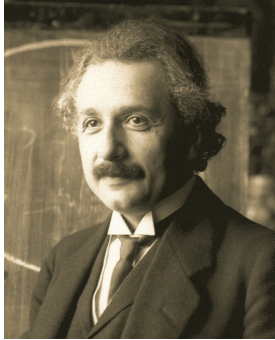
Zowel de Minkowski-metrik van de speciale relativiteitstheorie, als zijn algemeen relativistische veralgemening g zijn onderhevig aan een scala van verschillende definities en normeringen. Er is dus geen eenduidige definitie, en men dient wat voorzichtig te zijn als men met verschillende bronnen werkt. Soms absorbeert men een extra factor c^2 in de definitie van η of g , en soms een minteken. Men dient dus wat op te letten voor zulke tekenconventies. Op sommige plaatsen leest men dus bijvoorbeeld:

$$\tau = \int \sqrt{\frac{-1}{c^2} dx^\mu dx_\mu}$$


of nog andere varianten. (Geen minteken, wel $1/c^2$, of net andersom.) Verschillende leerboeken gebruiken dus vaak verschillende notaties. Voor de conventies die in dit artikel werden gebruikt, heeft de Minkowski-metrik de volgende componenten:

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{c^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{c^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{c^2} \end{pmatrix}$$

Albert Einstein

 Albert Einstein 14 maart 1879 - 18 april 1955	
	
Albert Einstein voor het bord tijdens een voordracht te Wenen in 1921.	
Geboorteland	 Duitsland
Geboorteplaats	Ulm
Plaats van overlijden	Princeton (New Jersey)
Nobelprijs voor de	Natuurkunde
In	1921
Reden	"Voor zijn verdiensten voor de theoretische natuurkunde, en met name voor zijn ontdekking van de wet van het foto-elektrisch effect"
Voorganger(s)	Charles-Édouard Guillaume
Opvolger(s)	Niels Bohr

Albert Einstein (Ulm, 14 maart 1879 - Princeton (New Jersey), 18 april 1955) was een Duits-Zwitsers-Amerikaanse theoretisch natuurkundige en uitvinder. Hij wordt algemeen gezien als een van de belangrijkste natuurkundigen uit de geschiedenis, naast Isaac Newton en James Clerk Maxwell. Zelf noemde hij altijd Newton als een veel belangrijker natuurkundige dan hijzelf, omdat Newton anders dan Einstein behalve theoretische ook grote experimentele ontdekkingen deed. In het dagelijks leven is de naam Einstein synoniem geworden met grote intelligentie.^[1]



Handtekening

Einstein werd vooral bekend vanwege de twee relativiteitstheorieën: de speciale relativiteitstheorie van 1905 en de algemene relativiteitstheorie van 1915 en volgende jaren, die de speciale relativiteitstheorie uitbreidt door ook plaats in te ruimen voor de zwaartekracht. Hij publiceerde meer dan 300 wetenschappelijke en meer dan 150 niet-wetenschappelijke werken.^[2] In zijn latere jaren schreef Einstein uitvoerig over filosofische en politieke onderwerpen.^[3] Hij wordt vaak samen met Max Planck beschouwd als de vader van de moderne natuurkunde.

Hij droeg aanzienlijk bij aan andere deelgebieden van de natuurkunde: voor zijn verklaring van het foto-elektrisch effect ontving hij in 1921 de Nobelprijs voor de Natuurkunde en ook zijn beschrijving van de Brownse beweging en de eerste fluctuatie-dissipatiestelling was een belangrijke doorbraak. Deze twee verklaringen en de speciale relativiteitstheorie publiceerde hij bovendien allemaal in zijn wonderjaar 1905. Verder werk omvat onder meer onderwerpen in de kwantummechanica, de theorie van de vaste stof, de nulpuntsenergie, de statistische mechanica,

de kosmologie, de theorie van straling (fotonen, dualiteit van golven en deeltjes, kritische opalescentie en gestimuleerde emissie, de theorie achter de laser) en de veldentheorie. Een eenheid in de fotochemie draagt zijn naam, de einstein. Het chemisch element einsteinium is ook naar hem vernoemd, net als de Einsteinring in de astronomie en de Einsteincoëfficiënten in de optica.

Albert Einstein werd in een liberaal-Joodse familie in het Duitse Keizerrijk geboren, woonde later in Italië, Zwitserland en het toenmalige Oostenrijk-Hongarije voor hij terugkeerde naar Duitsland. Toen Adolf Hitler in 1933 in Duitsland aan de macht kwam, besloot Einstein zich in de VS te vestigen.^[4] In 1940 nam hij de Amerikaanse nationaliteit aan en deed afstand van zijn Duitse (hij behield wel de Zwitserse). Hij overleed op 18 april 1955 in Princeton aan een aneurysma.

Leven



Einstein als kind, jaren '80 van de 19e eeuw

Jeugd

Albert Einstein werd op 14 maart 1879 geboren te Ulm, destijds binnen het Duitse Keizerrijk gelegen in het Koninkrijk Württemberg. Hij was de zoon van Hermann (Buchau, 1847- Milaan, 1902) en Pauline Einstein (meisjesnaam Koch, Cannstatt, 1858 - Berlijn, 1920). Hermann Einstein was onder meer beddenverkoper en later met zijn jongere broer Jakob (1850-1912) fabrikant van elektrotechnische apparatuur voor elektriciteitscentrales en straatverlichting (*Elektrotechnische Fabrik J. Einstein & Cie.*) te München. Hermann en Pauline Einstein-Koch kregen nog een kind, Alberts jongere zus Maja Einstein (München, 1881 - Princeton, 1951).

Einsteins ouders waren liberale joden en daarmee religieus tolerant. Einstein kreeg elementair onderwijs in de joodse godsdienst en leerde viool spelen. In zijn latere leven speelde hij vaak viool ter ontspanning, terwijl hij tegelijkertijd wetenschappelijke problemen overdacht.^[5] Rond 1884 kreeg Einstein zijn eerste kompas en was verbijsterd door het wonder van de onzichtbare magnetische kracht.^[6] Hij was de beste van zijn klas op de lagere school en zeer geïnteresseerd in exacte wetenschap. Als hobby bouwde hij modellen en mechanische apparaten. Vanaf 1891 leerde hij ook wiskunde.

In 1895 verhuisde het gezin van München naar Pavia in Italië, maar Einstein bleef aanvankelijk in München achter om zijn middelbare school af te maken. Na één trimester hield hij de eenzaamheid en de strenge school niet meer uit, waarop hij zich bij zijn familie in Pavia voegde. In 1895 deed Einstein, hoewel hij er eigenlijk twee jaar te jong voor was, met speciale toestemming toelatingsexamen voor de ETH, de Eidgenössische Technische Hochschule (de technische universiteit van Zürich). Hij presteerde goed in de bètavakken, maar zakte op Frans en Geschiedenis.^[7] Om de middelbare school af te ronden stuurden zijn ouders hem naar Aarau in Zwitserland. Daar kwam hij op het volgende gedachte-experiment, dat vooruitliep op zijn speciale relativiteitstheorie: een waarnemer die met de lichtsnelheid met een lichtgolf meerent, ziet een staande golf.^{[8][9]} In 1896 ontving Einstein zijn middelbareschooldiploma, waarna hij alsnog naar de Eidgenössische Technische Hochschule in Zürich ging. In hetzelfde jaar gaf Einstein zijn Duitse staatsburgerschap op, waardoor hij staatloos werd.

Aan de ETH trok Einstein op met zijn medestudenten Marcel Grossmann, Mileva Marić en Michele Besso. Hij mocht in het laboratorium zijn voorstel voor een proef over de beweging van de aarde in de ether niet uitvoeren maar kreeg een waarschuwing dat hij te weinig experimenteerde. Hij vond de colleges van professor Heinrich Weber ouderwets, omdat de Maxwelltheorie niet werden behandeld. Door zelfstudie maakte hij kennis met de werken van Kirchhoff, Hertz, Helmholtz, Lorentz en Boltzmann. Maxwelltheorie leerde hij kennen door een boek van August Föppl. Hij las ook over andere wetenschappen zoals biologie (Darwin) en filosofie. Hij waardeerde de wiskundecolleges van Hermann Minkowski maar was vaak afwezig.^{[10][11]}

In 1900 behaalde Einstein aan de Eidgenössische Technische Hochschule zijn lesbevoegdheid als *Fachlehrer* natuurkunde. Zijn cijfers waren een 5 voor theoretische- en experimentele natuurkunde en voor astronomie, 5,5 voor functietheorie en 4,5 voor een opstel over warmtegeleiding (op een schaal van maximaal 6). Hij verkreeg het Zwitsers staatsburgerschap in februari 1901.

Der Erziehungsrat
des
Kantons Aargau
urkundet hienit:

Herr Albert Einstein von Ulm,
geboren den 14. März 1879,
besuchte die aargauische Kantonschule A. von der III. S. IV. Klasse
der Gewerbeschule
Nach abgelegter schriftlicher Maturitätsprüfung am 18. & 21.
September sowie am 20. September 1896 erhielt derselbe folgende Noten:

1. Deutsche Sprache und Literatur	5
2. Französisch	5
3. Englisch	5
4. Lateinisch	5
5. Geschichte	6
6. Geographie	4
7. Algebra	6
8. Geometrie	6
9. Mathematische Geometrie	6
10. Physik	6
11. Chemie	5
12. Naturgeschichte	5
13. Lateinische Schriften	4
14. Lateinische Rechnen	4

Gestattet hienauf wird denselben das Zeugnis des Reife nicht.
Aarau den 3^{ten} Oktober 1896.

Der Präsident des Erziehungsrates
Der Schulleiter

Cijferlijst van Einsteins eindexamen middelbare school, 1896. De cijfers werden gegeven op een schaal van 1 tot 6, waarbij 6 het hoogste cijfer, en 4 een voldoende is. Einstein had vijf maal een "6" (=10): voor geschiedenis, natuurkunde en drie wiskundevakken.

Gezin en vroege loopbaan

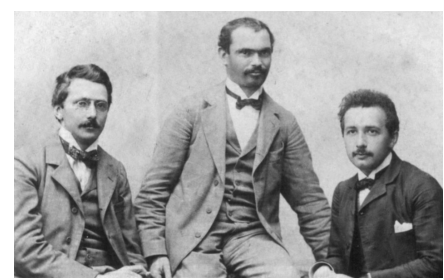
Aan de ETH in Zwitserland ontmoette Einstein Mileva Marić, een Servische jaargenote (die ook bevriend was met Nikola Tesla), en werd verliefd op haar. Einstein en Marić kregen in januari 1902 een dochter, Lieserl, die waarschijnlijk ter adoptie werd afgestaan. Einstein trouwde met Mileva Marić op 6 januari 1903. Het huwelijk was zowel een persoonlijke als een intellectuele samenwerking: bij haar vond Einstein een klankbord voor zijn nieuwe ideeën.

Toen hij afstudeerde kon Einstein geen werk in de wetenschap vinden. De ETH bood hem geen assistentschap aan en Einstein solliciteerde tevergeefs bij onder andere Heike Kamerlingh Onnes in Leiden en Wilhelm Ostwald in Leipzig. Vanaf mei 1901 werkte hij twee maanden als invalleraar natuurkunde aan een middelbare school in Winterthur en daarna kreeg hij een jaarcontract als leraar natuurkunde aan een particuliere school in Schaffhausen, waar hij veel tijd overhield voor onderzoek. In december 1901 solliciteerde hij bij het Zwitserse Patentbureau te Bern en werd aanbevolen door de vader van zijn studievriend Marcel Grossmann. Voor de nieuwe baan afkwam nam Einstein al ontslag als leraar en vestigde zich in februari 1902 in Bern. Daar vormde hij met zijn vrienden Maurice Solovine, die hij bijles gaf, en Konrad Habicht de zogenaamde *Akademia Olympia* om samen boeken te bespreken, te eten en plezier te maken.^[12] Per 16 juni 1902 werd hij technisch expert derde klas bij het patentbureau. Daar beoordeelde hij ingediende patentaanvragen.

Op 14 mei 1904 werd zijn eerste zoon Hans Albert Einstein geboren. In datzelfde jaar werd Einsteins aanstelling bij het patentbureau vast. Hij verrichtte in deze periode veel onderzoek, dat er uiteindelijk toe leidde dat 1905 zijn wonderjaar werd. In 1906 werd Einstein bevorderd tot technisch expert tweede klasse. Einsteins tweede zoon, Eduard Einstein, werd geboren op 28 juli 1910.

Het gezin Einstein verhuisde in 1914 naar Berlijn, maar Mileva kon er niet wennen. Hun relatie verslechterde en Mileva verhuisde met de kinderen terug naar Zwitserland. Einstein scheidde van Mileva op 14 februari 1919, en huwde een half jaar later zijn nicht Elsa Löwenthal (geboren Einstein: Löwenthal was de achternaam van haar eerste man Max) op 2 juni 1919. Einstein, die de Nobelprijs voor de Natuurkunde van 1921 ontving, gaf het aan de prijs verbonden geldbedrag aan Mileva, zoals bij hun scheiding was afgesproken.^[13] Later vond Mileva dat Einstein onvoldoende bijdroeg aan de kosten van de behandeling van hun zoon Eduard. Ze gaf privé piano- en wiskundeles om bij te verdienen.

Het lot van het eerste kind van Albert en Mileva, Lieserl, is onbekend: sommigen denken dat zij jong gestorven is, anderen geloven dat ze voor adoptie werd afgestaan. Eduard Einstein (koosnaam *Tete*) groeide voorspoedig op en bleek zeer intelligent. Hij toonde interesse in psychologie en ging na zijn middelbare school studeren in die richting. Tijdens de studie ontwikkelde Eduard schizofrenie en was al snel tot niets meer in staat. Albert Einstein had weinig contact met hem en zijn moeder Mileva zorgde voor Eduard tot haar eigen overlijden op 4 augustus 1948.^[14] Hij stierf in 1965 in de psychiatrische inrichting Burghölzli in Zürich. Hans Albert werd hoogleraar hydraulische werktuigbouwkunde aan de Universiteit van Californië - Berkeley, en had aanvankelijk eveneens weinig contact met zijn vader. Na de oorlog verbeterde dit. Hans-Albert zat aan het sterfbed van Albert Einstein.

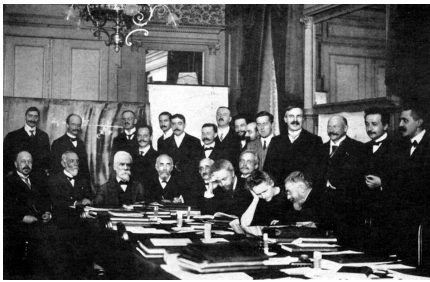


Einstein met zijn vrienden Habicht (links) en Solovine (midden), 1903



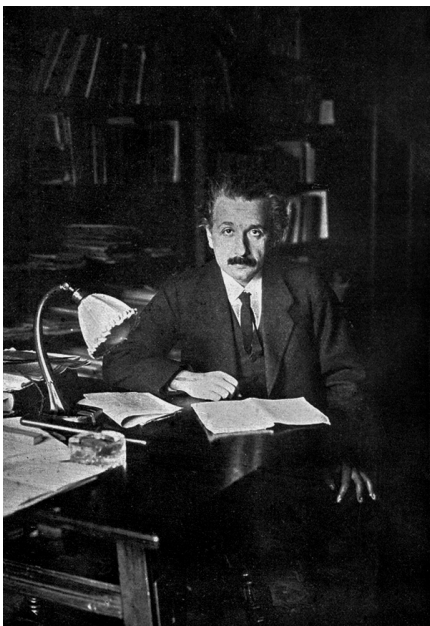
Einstein op het Patentbureau in Bern, 1905

Hoogleraar



Einstein (tweede van rechts) op de Solvay-conferentie van 1911 in Brussel, onder voorzitterschap van Hendrik Lorentz

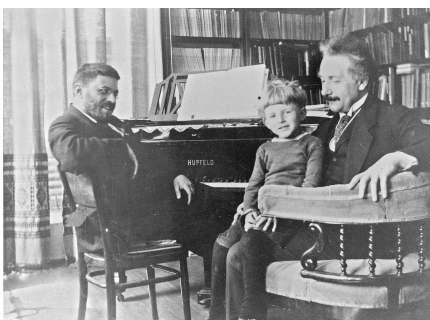
In 1908 werd Einstein in Bern (Zwitserland) benoemd tot privaattoecent (onbezoldigd docent aan een universiteit). Drie jaar later werd Einstein eerst assistent-hoogleraar aan de Universiteit van Zürich, en kort daarna volledig hoogleraar aan de (Duitse) Universiteit van Praag. In 1912 keerde hij terug naar Zürich om daar volledig hoogleraar aan de ETH te worden. Op dat moment werkte hij nauw samen met de wiskundige Marcel Grossmann. In 1912 begon Einstein "tijd" als de vierde dimensie aan te duiden, zoals zijn vroegere hoogleraar Hermann Minkowski al eerder deed.



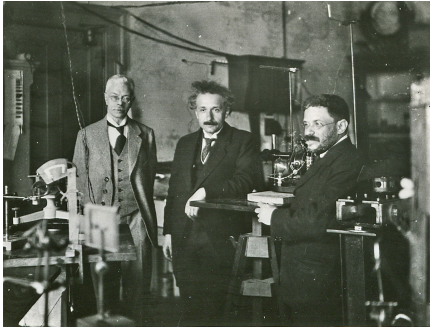
Einstein als professor aan de universiteit van Berlijn (1920)

In 1914 werd Einstein lid van de Pruisische Academie van Wetenschappen in Berlijn. Het jaar daarop kreeg hij zijn Duitse nationaliteit terug, en was tot 1933, toen hij Duitsland verliet wegens de machtsovername door de nazi's, directeur van het Keizer Wilhelm-Instituut voor Natuurkunde in Berlijn. In deze periode kreeg hij ook de Nobelprijs voor zijn verklaring van het foto-elektrisch effect. Pogingen van onder meer Hendrik Lorentz - die bij Einstein in hoog aanzien stond - om hem als gewoon hoogleraar aan een Nederlandse universiteit te verbinden, mislukten. Ten slotte werd hij wel bijzonder hoogleraar vanwege het Leids Universiteits Fonds aan de Rijksuniversiteit Leiden van 1920 tot officieel 1946: hij gaf enkele malen per jaar een gastcollege in Leiden. In 1921 ontving hij de Matteucci Medal, in 1925 de Copley Medal.

In 1922 maakte Einstein zijn eerste wereldreis. Met zijn tweede vrouw Elsa ging hij per schip naar Japan en deed ook Singapore, Hongkong en Sjanghai aan.



Einstein in 1920 op bezoek in Leiden bij zijn vriend en collega Paul Ehrenfest, op Einsteins schoot zit de zoon van Ehrenfest: Paul Ehrenfest jr.



Einstein bezoekt in de jaren 20 met Paul Ehrenfest (rechts) het laboratorium van Pieter Zeeman (links) aan de Universiteit van Amsterdam

Vertrek naar de VS

Einsteins pacifisme en joodse afkomst waren een doorn in het oog van Duitse nationalist en antisemieten. Nadat hij wereldberoemd was geworden groeide deze antisemitische haat tegen hem, en er ontstond zelfs een georganiseerde campagne onder Duitse natuurkundigen om zijn theorieën in diskrediet te brengen. Toen Adolf Hitler op 30 januari 1933 in Duitsland aan de macht kwam bereikte de haatcampagne tegen Einstein nieuwe hoogten. Einstein werd door het nazi-regime beschuldigd een "joodse natuurkunde" (in de zin van theoretische natuurkunde) voor te staan in tegenstelling tot de "Duitse" of "Arische natuurkunde" (*Deutsche of Arische Physik*, waaronder experimentele natuurkunde verstaan werd). Het regime werd daarbij ondersteund door nazi-gezinde natuurkundigen, waaronder zelfs Nobelprijswinnaars zoals Johannes Stark en Philipp Lenard, die probeerden Einsteins theorieën in diskrediet te brengen. Daartoe werd ook een zwarte lijst aangelegd van Duitse natuurkundigen die Einsteins theorieën bleven onderwijzen zoals Werner Heisenberg.

Einstein was toen in de Verenigde Staten, waar hij een lezingencyclus aan Caltech verzorgde. Hij besloot niet meer terug te keren naar zijn geboorteland, maar bracht nog wel een bezoek aan België en Engeland voordat hij zich voorgoed in de VS vestigde. Hij gaf zijn Duitse staatsburgerschap op, kreeg een permanente verblijfsvergunning voor de VS en aanvaardde een betrekking aan het pas opgerichte Institute for Advanced Study in Princeton, New Jersey.^[4] Hij werd Amerikaans staatsburger in 1940, hoewel hij steeds het Zwitserse staatsburgerschap behield.



Einstein vertrekt in december 1930 met zijn gezin van het station in Antwerpen op weg naar de VS waar hij een lezingencyclus gaat geven.

Op 2 augustus 1939 schreef Einstein een brief aan de Amerikaanse president Roosevelt, waarin hij waarschuwde dat Duitsland bezig was een atombom te ontwikkelen. Hiermee liep hij vooruit op de latere beslissing van Roosevelt van oktober 1941 om de atombom eerder te maken dan de Duitsers, het Manhattanproject, waaraan Einstein overigens zelf niet meewerkte. Over deze brief bestaan verschillende lezingen. Er is wel verondersteld dat niet Einstein maar Szilárd deze brief had geschreven. Szilárd zou vanwege het effect op de president Einstein om ondertekening gevraagd hebben. Maar volgens biograaf Bram Pais had Einstein de brief wel zelf opgesteld, na een bezoek van Szilárd en Wigner. Op aandringen van Szilárd stuurde Einstein op 7 maart 1940 een tweede brief van dezelfde strekking aan Roosevelt.^[15]



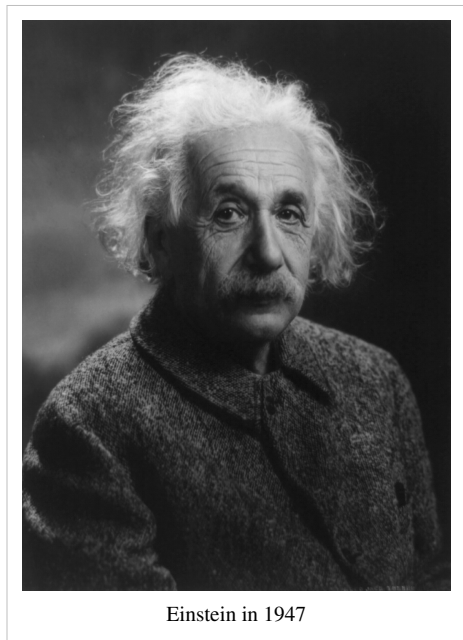
Einsteins huis in Princeton (New Jersey)

Laatste jaren

Einstein steunde het idee een Joodse universiteit te stichten in het toenmalige Britse mandaatgebied Palestina. Hij was actief betrokken bij oprichting van de Hebreeuwse Universiteit van Jeruzalem. Hij zamelde onder andere geld in voor de universiteit met Chaim Weizmann, biochemicus, zionistisch leider en eerste president van Israël. Uiteindelijk liet hij zijn persoonlijke eigendommen, inclusief zijn geschriften, na aan de Hebreeuwse Universiteit van Jeruzalem. Hij was eveneens betrokken bij de oprichting van de Technion-universiteit in Haifa.

Na de Tweede Wereldoorlog waarschuwde Einstein publiekelijk voor de mogelijk catastrofale gevolgen van een kernwapenwedloop. In zijn latere jaren was hij socialistisch gezind. Hierover schreef hij in de eerste editie van *Monthly Review* in mei 1949 een weinig bekend geworden essay met de titel *Why Socialism?*

In 1952 bood de Israëlische regering Einstein het presidentschap aan na het overlijden van Weizmann. Einstein zei "vereerd te zijn door het aanbod maar ongeschikt voor de positie" en sloeg het af. Daarmee werd hij de enige burger van de Verenigde Staten die ooit de positie van buitenlands staatshoofd werd aangeboden.



Einstein in 1947

Overlijden

Einstein stierf in zijn slaap in een ziekenhuis in Princeton op 18 april 1955. Hij was opgenomen vanwege een gebarsten aneurysma (verwijding) van de aorta. Zijn artsen wilden hem opereren maar Einstein weigerde dit, omdat hij zijn leven niet onnodig wilde rekken maar waardig wilde sterven. Naar eigen wens werd zijn lichaam dezelfde dag in Trenton gecremeerd. De as werd op een geheime plaats uitgestrooid. Einstein moest namelijk niets hebben van de verering van het grote publiek en wilde hiermee een 'bedevaartsoord' voorkomen. Zijn familie had van tevoren wel toestemming gegeven voor een autopsie en Einsteins hersenen werden onderzocht door Dr. Thomas Stoltz Harvey, de patholoog die de autopsie uitvoerde. Harvey ontdekte niets bijzonders aan deze hersenen en bewaarde ze vervolgens in een bokaal gevuld met formaldehyde in zijn laboratorium. In 1999 vond een team aan de McMaster-Universiteit dat het deel van de hersenen dat gebruikt wordt voor wiskundig denken, ruimtelijke herkenning en bewegingsinzicht 15% breder was dan normaal.

Werk

1905: Einsteins wonderjaar

➤ *Zie Einsteins wonderjaar voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

In 1905 promoveerde Einstein op het proefschrift *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*.^[16] Ook schreef hij in dat jaar vier artikelen die de basis van de moderne natuurkunde zouden vormen, zonder veel wetenschappelijke literatuur te raadplegen of zijn theorieën te bespreken met veel wetenschappelijke collega's. Einstein discussieerde over zijn wetenschappelijke resultaten hoofdzakelijk met zijn vrouw Mileva Marić die eveneens natuurkundige was, en met studievrienden als Michele Besso. Zijn artikelen stuurde hij sinds 1901 naar het tijdschrift *Annalen der Physik*, waar hij ook boekrecensies voor schreef. Zijn eerste artikel over het gedrag van vloeistoffen in rietjes (capillairen)^[17] verscheen in hetzelfde nummer als de kwantumtheorie over de zwarte straler van Max Planck.^[18] Tussen 1902 en 1904 publiceerde Einstein een reeks artikelen over de statistische mechanica, maar in 1910 schreef hij dat als hij het werk van Josiah Willard Gibbs destijds had gekend, hij het bij enkele opmerkingen gelaten zou hebben.^[19]

In het algemeen wordt 1905 als het vruchtbaarste jaar in Einsteins wetenschappelijke leven beschouwd. De meeste natuurkundigen zijn het erover eens dat drie van deze artikelen (over de Brownse beweging, het foto-elektrisch effect en de speciale relativiteitstheorie) elk een Nobelprijs waard zouden zijn. Voor het foto-elektrisch effect won hij in 1921 de prijs. Ironisch, omdat Einstein uiteindelijk veel bekender is geworden door zijn relativiteitstheorie en omdat het foto-elektrisch effect gebaseerd is op kwantummechanische principes.^{[20][21]} Einstein bleef altijd een onbevredigd gevoel houden over de statistische interpretatie van de latere kwantumtheorie, die volgens hem het deterministische wereldbeeld ondermijnde.^[22]

Foto-elektrisch effect

➤ *Zie Foto-elektrisch effect voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Zijn eerste artikel in 1905, getiteld *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt (De productie en omzetting van licht vanuit heuristisch gezichtspunt)*, voerde het begrip *energiekwantum* in (tegenwoordig foton genoemd). Einstein toonde aan hoe dit begrip gebruikt kon worden om verschijnselen als het foto-elektrisch effect te verklaren. Het idee van energiekwanta kwam voort uit de stralingswet voor een zwart lichaam van Max Planck. Einstein veronderstelde dat lichtenergie alleen geabsorbeerd of uitgezonden kan worden in discrete (afgepaste) hoeveelheden. Hij toonde aan dat het mysterieuze foto-elektrische effect verklaard kan worden door aan te nemen dat licht werkelijk bestaat uit discrete pakketjes en beschreven kan worden met de formule $hf = \Phi + E_k$.

Het idee van lichtkwanta was in tegenspraak met de golftheorie van het licht, die volgt uit de vergelijkingen van Maxwell voor elektromagnetisch gedrag, en meer algemeen met de veronderstelling dat energie in fysische systemen oneindig deelbaar is. Hoewel experimenten aangetoond hadden dat de vergelijkingen van Einstein voor het foto-elektrisch effect correct waren, werd zijn uitleg niet algemeen aanvaard. In 1922 kreeg hij de Nobelprijs van het jaar 1921 voor zijn werk aan het foto-elektrisch effect.

De theorie van lichtkwanta vormde een sterke aanwijzing voor de dualiteit van golven en deeltjes. Dit begrip, dat door de grondleggers van de kwantummechanica gebruikt wordt als een fundamenteel principe, betekent dat fysische systemen eigenschappen van zowel golven als deeltjes kunnen vertonen. Een volledig beeld van het foto-elektrisch effect werd pas later verkregen na verdere ontwikkeling van de kwantummechanica.

Brownse beweging

➤ *Zie Brownse beweging voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Het tweede artikel in 1905 was getiteld *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen* (*Over de beweging van deeltjes in suspensie in vloeistoffen in rust, zoals de moleculair-kinetische theorie der warmte vereist*), en ging over zijn onderzoek naar de Brownse beweging. Door gebruik te maken van de toen nog controversiële kinetische gastheorie van vloeistoffen stelde hij dat het verschijnsel (dat tientallen jaren na de eerste waarneming nog niet verklaard was) een empirisch bewijs vormde voor het bestaan van atomen. Het artikel maakte ook de nauw samenhangende Statistische thermodynamica geloofwaardig, die toen ook nog controversieel was.

Vóór het verschijnen van dit artikel was wel het molecuul al erkend als een nuttig concept, maar natuur- en scheikundigen waren het er niet over eens of moleculen en atomen ook echt bestonden. Dankzij Einsteins statistische beschrijving van het gedrag van moleculen was er nu een manier om met een gewone microscoop moleculen te tellen. Wilhelm Ostwald, een vooraanstaand tegenstander van atomen, vertelde Arnold Sommerfeld later dat hij uiteindelijk toch het bestaan van atomen experimenteel bewezen achtte door Einsteins volledige verklaring van de Brownse beweging.^[23]

Speciale relativiteitstheorie

➤ *Zie Speciale relativiteitstheorie voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Einsteins derde artikel van 1905 was getiteld *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (*Over de elektrodynamica van lichamen in beweging*), en werd gepubliceerd op 30 juni 1905. Terwijl hij dit artikel uitwerkte schreef Albert Einstein aan zijn eerste vrouw Mileva Marić over "ons werk over relatieve beweging" en dit leidde tot de vraag naar de rol van Mileva. Het artikel introduceerde de speciale relativiteitstheorie, een theorie over tijd, afstand, massa en energie die consistent was met het elektromagnetisme, maar die de zwaartekracht buiten beschouwing liet.

Speciale relativiteit bood een oplossing voor het probleem dat in 1886 gerezen was ten gevolge van het Michelson-Morley-experiment, waarmee aangetoond werd dat lichtgolven zich niet door een medium, in dit geval de *ether*, bewegen zoals andere golfverschijnselen in bijvoorbeeld water of lucht. De snelheid van het licht bleek constant en niet relatief ten opzichte van de beweging van de waarnemer. Dit is volgens de Newtonse klassieke mechanica niet mogelijk, waarin bijvoorbeeld snelheden wel optellen.

George FitzGerald had in 1894 verondersteld dat het resultaat van Michelson en Morley verklaard kon worden als bewegende lichamen samengedrukt werden in de richting van hun beweging. Enkele belangrijke vergelijkingen in Einsteins artikel, de Lorentztransformaties voor de vervorming van ruimte en tijd, waren al in 1903 ingevoerd door de Nederlandse natuurkundige Hendrik Lorentz, onafhankelijk van FitzGerald. Einstein verklaarde echter de onderliggende oorzaken van deze geometrische eigenaardigheid. Henri Poincaré had al eerder de lichtsnelheid als de maximale snelheid aangemerkt.

Einsteins uitleg volgde uit de aanname van twee axioma's:

- Galilei's oude idee dat de natuurwetten dezelfde zouden moeten zijn voor alle waarnemers die met een constante snelheid ten opzichte van elkaar bewegen,
- de regel dat de lichtsnelheid dezelfde is voor iedere waarnemer.

De speciale relativiteit heeft diverse verrassende gevolgen, omdat de absolute tijd en plaats (dus ook afstand) niet meer geldt. De theorie wordt de "speciale relativiteitstheorie" genoemd om haar te onderscheiden van de latere "algemene relativiteitstheorie", waarin ook versnelde waarnemers onderling gelijkwaardig zijn.

De theorie lijkt aanvankelijk in strijd met het gezonde verstand en zit vol paradoxen, maar Einstein slaagde erin deze allemaal op te lossen en de theorie is sindsdien door vele experimenten bevestigd.

Equivalentie van massa en energie

➤ *Zie Massa-energie relatie voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Het vierde artikel uit 1905 gaat over het verband tussen de traagheid van een voorwerp en zijn energieinhoud en is een gevolg van de speciale relativiteitstheorie. Massa en energie blijken in elkaar uit te drukken volgens de bekende formule $E = mc^2$.^{[24][25]} Kleine beetjes massa (m) kunnen worden omgezet in enorme hoeveelheden energie (E) dankzij de vermenigvuldiging in de formule met het kwadraat van de lichtsnelheid c. Deze massa-energie-equivalentie werd later de verklaring voor energieopwekking bij kernsplijting en kernfusie, waarbij enige massa verloren gaat maar veel energie vrijkomt.

Algemene relativiteitstheorie

➤ *Zie Algemene relativiteitstheorie voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

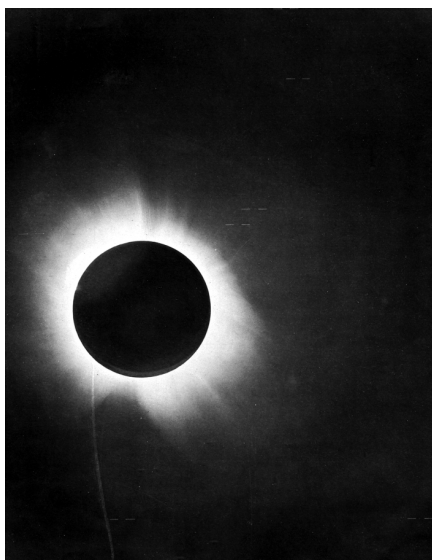


Foto van de totale zonsverduistering van 29 mei 1919 uit het rapport van de Britse sterrenkundige Eddington, die Einsteins theorie bevestigde dat de zon licht afbuigt. (De gebruikte sterren staan tussen streepjes.) Op 7 november 1919 drukte de Britse krant *The Times* de kop af: "Revolution in Science – New Theory of the Universe – Newtonian Ideas Overthrown." (Revolutie in de wetenschap - nieuwe theorie van het heelal - Ideeën van Newton verworpen).^[26]

In november 1915 gaf Einstein een reeks lezingen voor de Pruisische Academie van Wetenschappen, waarin hij zijn algemene relativiteitstheorie beschreef, een uitbreiding van zijn speciale relativiteitstheorie. De laatste lezing had als hoogtepunt de introductie van een vergelijking die de wet van de zwaartekracht van Newton verving. Hierin wordt gesteld dat alle waarnemers gelijkwaardig zijn, niet alleen waarnemers met een eenparige maar ook met een versnelde beweging. In de algemene relativiteitstheorie is de zwaartekracht niet langer een kracht (zoals in de wet van Newton) maar een gevolg van de kromming van ruimte-tijd.

Deze theorie vormde de grondslag voor kwantitatief onderzoek in de kosmologie. Nu kon er gerekend worden aan vele eigenschappen van het heelal, ook een aantal dat pas na Einsteins dood ontdekt werd.

De algemene relativiteitstheorie was revolutionair en heeft tot nu toe elke experimentele toets doorstaan. Maar oorspronkelijk waren veel onderzoekers sceptisch omdat de theorie uit een wiskundige redenering en een rationele analyse ontstond en niet uit waarneming en experimenten. De theorie berustte op niet-euclidische meetkunde en differentiaalmeetkunde van Bernhard Riemann waarbij Einsteins vriend de wiskundige Marcel Grossmann hem geholpen had. In 1919 konden voorspellingen die met behulp van de theorie gedaan waren bevestigd worden door metingen onder leiding van Arthur Stanley Eddington tijdens een zonsverduistering. Hierbij werd de afbuiging van

licht van een ster door de zwaartekracht van de zon gemeten. Op 7 november bracht *de Times* deze bevestiging van Einsteins theorie op de voorpagina, waarmee Einstein op slag beroemd werd.

Vele onderzoekers waren om allerlei redenen nog niet overtuigd: sommigen aanvaardden Eddingtons interpretatie van de experimenten niet, anderen wilden vasthouden aan een absoluut referentiekader. Ook werd bezwaar gemaakt tegen de media-aandacht die Einstein ongewild ten deel viel na Eddingtons rapport.^[27] in 1919 en dit duurde nog tot in de jaren 30.

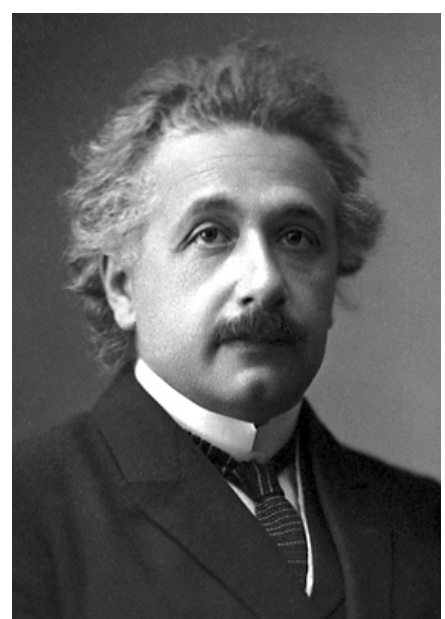
Met Arthur Eddington verwierp Einstein ten onrechte het idee van onder meer Robert Oppenheimer en Subramanyan Chandrasekhar dat een hemellichaam ineens kon storten tot een zwart gat.

Gestimuleerde emissie en kosmologische constante

In 1917 publiceerde Einstein "Over de kwantummechanica van straling" ("Zur Quantenmechanik der Strahlung", *Physikalische Zeitschrift* 18, 121-128). Hij voerde het begrip "gestimuleerde emissie" in, dat ten grondslag ligt aan de lichtversterking in de laser. In hetzelfde jaar publiceerde hij ook een artikel waarin hij de kosmologische constante invoerde, zodat hij de algemene relativiteitstheorie kon gebruiken om het heelal als een statisch geheel te modelleren. Dit noemde hij later zijn "ergste misser", omdat zijn theorie zonder deze constante al de uitzetting van het heelal voorspelde die Georges Lemaître en Edwin Hubble later aantoonde.

Nobelprijs

In de vroege jaren 20 was Einstein de leidende figuur op de beroemde wekelijkse natuurkundecolloquia aan de Universiteit van Berlijn. Op 30 maart 1921 bezocht Einstein New York om een lezing over zijn nieuwe theorie te geven. In dat jaar kreeg hij ook de Nobelprijs. Hoewel hij het bekendst is geworden door zijn werk aan de relativiteitstheorie, kreeg hij de Nobelprijs voor zijn eerdere werk aan het foto-elektrisch effect. Zijn relativiteitstheorie was op dat moment nog niet algemeen geaccepteerd.



Officieel portret bij de uitreiking van de Nobelprijs in 1921

Kopenhaagse interpretatie

➤ *Zie Kopenhaagse interpretatie voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Einsteins verhouding tot de kwantumfysica was ambivalent. Zijn eigen idee over lichtkwanta, die we nu fotonen noemen, was een mijlpaal in de overgang van de klassieke naar de moderne natuurkunde. In 1909 presenteerde Einstein zijn eerste artikel op een natuurkundige bijeenkomst, waarin golven en deeltjes expliciet als equivalent werden gezien.

Midden jaren 20, toen de originele kwantumtheorie vervangen werd door de nieuwe kwantummechanica, verzette Einstein zich tegen de Kopenhaagse interpretatie van de nieuwe vergelijkingen. Deze interpretatie gaat uit van waarschijnlijkheidsrekening, waarbij het mechanisme niet verklaard wordt. Einstein ging er mee akkoord dat deze theorie de best beschikbare was, maar hij zocht toch naar een fundamentele deterministische verklaring. Dit streven had eerder geleid tot zijn geslaagde verklaring van het gedrag van atomen, fotonen en zwaartekracht.

In een brief aan Max Born uit 1926 maakte Einstein een opmerking die nu beroemd is:



Niels Bohr (rechts) en Einstein in discussie op straat tijdens de Solvayconferentie van 1930.

Foto door Paul Ehrenfest.

"Kwantummechanica is zeker indrukwekkend. Maar iets in mij zegt me dat het nog niet het ware is. De theorie zegt heel veel, maar ze brengt ons niet echt dicht bij het geheim van De Oude. Ik ben ervan overtuigd dat Hij niet met dobbelstenen werpt."

Hierop reageerde Niels Bohr, die met Einstein stevig in discussie was over de kwantumtheorie, met de eveneens beroemde opmerking:

"Hou op God te zeggen wat Hij moet doen!"

Het was geen verwerping van de toepassing van waarschijnlijkheidsrekening in de kwantummechanica. Einstein gebruikte zelf statistische analyse in zijn werk over de Brownse beweging en het foto-elektrisch effect. Hij had voor 1905 de statistische theorie van J.W. Gibbs herontdekt waarmee hij voordien onbekend was. Einstein was er alleen van overtuigd dat de fysische realiteit zich in de kern deterministisch gedraagt.

Experimenteel bewijs tegen deze overtuiging werd slechts veel later gevonden met de ontdekking van de stelling van Bell en de ongelijkheid van Bell. De discussie gaat echter nu nog door: ook heden zijn er gerenommeerde natuurkundigen die een in de kern deterministisch heelal postuleren zoals de Nederlandse nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft.

Bose-Einsteinstatistiek

➤ *Zie Bose-Einsteinstatistiek voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

In 1924 ontving Einstein een kort artikel van de jonge Indiase natuurkundige Satyendra Nath Bose, waarin deze licht als een gas van fotonen beschreef, en Einstein om hulp bij de publicatie vroeg. Einstein realiseerde zich dat dezelfde statistiek op atomen kon worden toegepast, en publiceerde een artikel dat Boses model en de consequenties ervan beschreef. Bose-Einsteinstatistiek beschrijft elk stelsel van deze niet-onderscheidbare deeltjes, nu bekend als bosonen. Het verschijnsel van het Bose-Einsteincondensaat werd in de jaren 20 door Bose en Einstein voorspeld, gebaseerd op Boses werk aan de statistische mechanica van fotonen, geformaliseerd en gegeneraliseerd door Einstein. In 1995 werd voor het eerst zo'n condensaat gemaakt. Einsteins originele aantekeningen van deze theorie werden in 2005 in de Universiteitsbibliotheek te Leiden ontdekt in de nalatenschap van Ehrenfest.

Einstein–Podolsky–Rosen-paradox

➤ *Zie EPR-paradox voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

In 1935 bekeek Einstein met Boris Podolski en Nathan Rosen hoe volgens de kwantummechanica de meting zou uitvallen aan een deeltje dat eigenschappen heeft die gekoppeld (*entangled*, verstrengeld) zijn aan die van een ander deeltje dat ver weg kan zijn. Ze leidden af dat de meting van plaats of impulsmoment van het ene deeltje het andere deeltje niet zouden moeten beïnvloeden. Dit resultaat is in strijd met de Kopenhaagse interpretatie van de kwantummechanica en heet de EPR-paradox. Deze hypothese was experimenteel te toetsen en werd weerlegd door proeven van de Franse natuurkundige Alain Aspect. De meting aan het ene deeltje bleek het andere deeltje wel degelijk te beïnvloeden.

Op zoek naar een unificatietheorie

➤ *Zie Theorie van alles voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Einstein bracht de laatste 14 jaren van zijn leven door met het zoeken naar een unificatietheorie, ook wel genoemd de *Algemene Veldtheorie*, die zwaartekracht en elektromagnetisme moest verenigen. Daarbij bleef hij zich verzetten tegen de Kopenhaagse interpretatie van de kwantummechanica met als belangrijke vertegenwoordiger Niels Bohr. Aangezien de kwantummechanica steeds de experimentele toetsing glansrijk doorstond onderschreven tenslotte de meeste natuurkundigen deze theorie. Einstein kwam hierdoor steeds meer alleen te staan in zijn speurtocht en vele 'jongeren' onder de fysici beschouwden hem als een relik uit het verleden die de aansluiting met de 'moderne' natuurkunde was misgelopen ook al was hij een van de grondleggers.

Einstein publiceerde verscheidene keren een unificatietheorie, maar telkens bleek, na narekenen door collega-natuurkundigen, dat deze toch niet alle krachten onder één noemer kon brengen. Achteraf gezien is dit niet verwonderlijk, omdat in zijn tijd hiervoor nog niet voldoende inzicht in de sterke kernkracht en zwakke kernkracht aanwezig was. Dit werd pas in 1970 bereikt, waarna het elektromagnetisme en de kernkrachten geünificeerd konden worden. Voor de zwaartekracht is dit nog steeds niet gelukt. Veelbelovend schijnt de M-theorie (een afgeleide van de snaartheorieën) te zijn, maar deze is hiervoor nog niet voldoende uitgewerkt.

Op 30 maart 1953 publiceerde Einstein voor de laatste keer officieel een herziene unificatietheorie die overigens weer niet alle natuurkrachten bleek te unificeren. Na zijn overlijden bleken uit zijn nagelaten laatste aantekeningen dat hij nog steeds hieraan werkte.

Einstein de uitvinder

Minder bekend is dat Einstein ook een paar patenten op zijn naam heeft voor uitvindingen. Hij had deze interesse in mechanische en elektrische apparaten meegekregen van zijn vader Hermann en zijn oom, de ingenieur Jakob Einstein en hield zich soms bezig met 'knutselen' zoals hij het noemde. Einstein en voormalig student Leó Szilárd vonden samen een nieuw type stille koelkast voor huishoudelijk gebruik uit in 1926. Ze gebruikten een koelprocedé bij constante druk, met alleen toevoer van warmte, zonder bewegende delen. De koelcyclus gebruikt ammoniak, butaan en water. Einstein werkte verder mee aan onderzoek naar een spanningsversterker met de gebroeders Habicht, een gehoorapparaat voor een Nederlandse firma met Rudolf Goldschmidt, een foto-electrische sensor voor fotografie met Gustav Bucky, een gyrokompass en de permeabiliteit van membranen met Hans Mühsam.^[28]

Samenwerking

Einstein schreef zijn hoofdwerken alleen, afgezien van het artikel uit 1913 met Marcel Grossmann over de algemene relativiteitstheorie. Maar verder heeft hij samengewerkt met tientallen meest natuurkundigen, soms langdurig (bijvoorbeeld met Leopold Infeld, Nathan Rosen, Peter Bergmann) en soms eenmalig, zoals met Satyendra Nath Bose, Leó Szilárd en Boris Podolsky die hierboven al vermeld zijn en met bijvoorbeeld Otto Stern, Adriaan Fokker, Wander de Haas, Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli, Willem de Sitter, Richard Chase Tolman, Banesh Hoffmann, Cornelius Lanczos, Walther Mayer, Valentin Bargmann, Rudolf Goldschmidt en Walter Ritz soms voor een paar artikelen achter elkaar (Jakob Johann Laub, de wiskundige Ludwig Hopf).

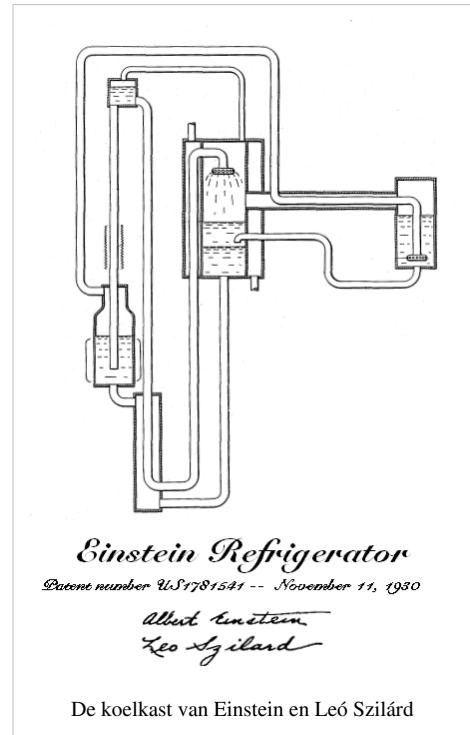
Einstein-de Haas-experiment

Einstein en Wander de Haas toonden in 1915 aan dat magnetisatie komt door de beweging van elektronen: dit heet tegenwoordig hun spin. Ze keerden de magnetisatie van een ijzeren staaf om die aan een torsieslinger hing en vonden dat de staaf hierdoor ging draaien, omdat het draaimoment van de elektronen met de magnetisatie verandert.

Gasmodel van Schrödinger

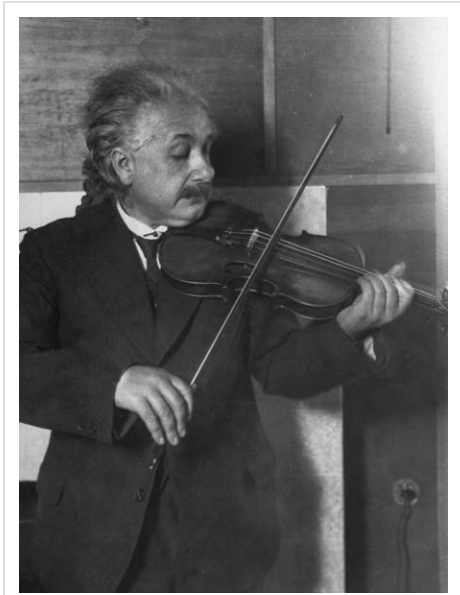
Einstein suggereerde aan Erwin Schrödinger dat hij de statistiek van een Bose–Einstein-gas zou kunnen reproduceren met een gesloten vat. Met elke mogelijke beweging van een deeltje in het vat kan een onafhankelijke harmonische oscillator worden verbonden. Door deze oscillatoren te kwantiseren, krijgt ieder energieniveau een eigen bezettingsgetal, gelijk aan het aantal deeltjes dat dat energieniveau heeft.

Deze formulering is een vorm van tweede kwantisatie, lang voor het begin van de moderne kwantummechanica. Erwin Schrödinger paste deze suggestie toe in zijn afleiding van de thermodynamische eigenschappen van een semiklassiek ideaal gas. Schrödinger drong er bij Einstein op aan om co-auteur te worden, maar deze weigerde.^[29]



Icoon en legende

In *Pais: Einstein lived here* wordt een verklaring geboden voor de populaire icoon die de media van Einstein maakten. Voor Einstein werden in de wetenschap alleen Wilhelm Röntgen, ontdekker van de röntgenstraling en Madame Curie, die radium vond door de media alom vereerd. De wereldwijde hype rond Einstein begon met het bericht in *The New York Times* van 10 november 1919 dat de zon het licht van een ster bleek af te buigen, zoals de algemene relativiteitstheorie van Einstein voorspelde. De expeditie van Arthur Eddington naar de zonseclips van 29 mei 1919 had dit waargenomen. De NYT kopte op de voorpagina



Einstein speelt viool, 1921

"Lights all askew in the heavens. Men of science more or less agog over results of eclips observations. Einsteins theory triumphs. Stars not where they seem [...]" (vertaling: Alle hemellichten staan scheef. Onderzoekers min of meer in de war over de uitkomsten van de eclipswaarnemingen. Einsteins theorie wint. Sterren niet waar ze lijken te staan [...])"

Pais noemt enkele verklaringen voor de hype:

1. Na de Eerste Wereldoorlog bleef de wereld in verwarring achter. Einstein bracht nieuwe orde in het heelal. Charles Poor, hoogleraar in hemelmechanica aan de Columbia University van New York kwam al op 16 november 1919 met deze verklaring.
2. Het taalgebruik ("gekromde ruimte", "sterren zijn niet waar ze lijken te zijn", "gewicht van licht") was raadselachtig. In de media werd er steeds de nadruk opgelegd, dat de lezer niet moest proberen de relativiteitstheorie te begrijpen.

Einstein verklaarde in een interview (*Nieuwe Rotterdamsche Courant*, 4 juli 1921.^{[30][31]}):

"Of ik het gek vind, die algemene opwinding over mijn theorieën, waar niemand een woord van begrijpt? Ik vind het grappig en interessant om te zien. Ik weet zeker dat het het mysterie van het onbegrijpelijke is, dat mensen aantrekt. Het maakt een diepe indruk op ze [...] en men wordt enthousiast en raakt opgewonden."

Terwijl het belang van Einsteins natuurkundige bijdragen afnam vanaf eind jaren dertig van de vorige eeuw, nam de belangstelling van de media voor hem juist toe. Reclames maken nog steeds gebruik van zijn naam en gezicht.

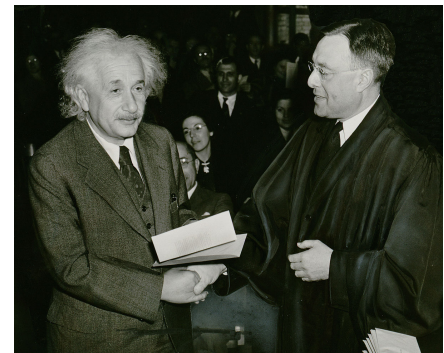
Einstein herkende zich niet in het beeld dat de media van hem schiepen. Hij antwoordde na een heildronk op de wereldberoemde professor Einstein door Bernard Shaw tijdens een diner:

"Ik dank u...voor de onvergetelijke woorden aan het adres van mijn mythologische naamgenoot die mij het leven zo moeilijk maakt."^[32]

Politieke opvattingen

Pacifisme en supranationalisme

Tot in de jaren dertig van de 20e eeuw riep Einstein op tot dienstweigering om oorlogen onmogelijk te maken. Tijdens de Eerste Wereldoorlog distantieerde hij zich van het pamflet van de Duitse geleerden (*Aufruf an die Kulturwelt* van 11 oktober 1914, beter bekend als *Es ist nicht wahr*) waarin ten onrechte beweerd werd dat Duitse militairen geen excessen gepleegd zouden hebben in België. Uit verzet tegen dit pamflet schreef hij mee aan en ondertekende hij de oproep tot verzoening, getiteld *Manifest aan de Europeanen*. In november 1914 was hij een van de oprichters van de Bund Neues Vaterland, die streefde naar onmiddellijke vrede zonder annexaties en de stichting van een supranationale organisatie om oorlogen te voorkomen. Einstein kwam dan ook op een lijst te staan van pacifisten die door de Berlijnse politie in de gaten werden gehouden.^[33]

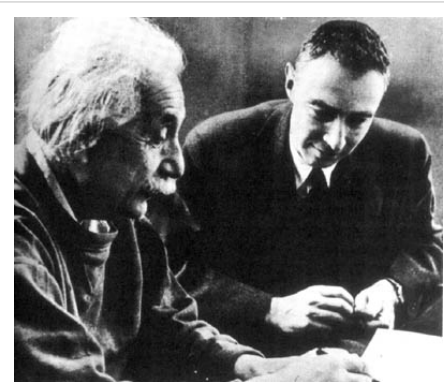


Einstein werd staatsburger van de Verenigde Staten in 1940

Einstein was in zijn hart pacifist maar beseftte ook dat agressieve regimes zich daardoor niet laten intomen en dat soms militair verzet nodig is. Na de opkomst van de nazi's in de jaren dertig beval hij dan ook militaire voorbereiding van beschaafde landen aan, om aan de steeds duidelijker wordende expansionistische dreiging van Hitler en zijn regime het hoofd te kunnen bieden. Daarom schreef hij op 2 augustus 1939 de bekende brief aan president Roosevelt over het gevaar van een Duitse kernbom. Overigens werd het Manhattan Project pas in oktober 1941 begonnen, zodat Einsteins brief niet als de impuls voor de Amerikaanse kernbom kan worden beschouwd. Einstein had zelf geen directe bemoeienis met het Manhattan Project en de kernbommen op Hiroshima en Nagasaki kwamen ook voor hem als een verrassing.

Einstein was voorstander van een wereldorganisatie om met een eigen leger oorlogen te voorkomen. Hij was voor de Tweede Wereldoorlog lid van een wetenschappelijke commissie (Commission internationale de coopération intellectuelle, CICI) van de Volkenbond, die hij vanwege haar machteloosheid afkeurde.

Ook na de Tweede Wereldoorlog bleef Einstein tegenstander van de wapenwedloop en voorstander van een wereldregering met zeggenschap over alle kernwapens. Toen de verhouding tussen de eerdere bondgenoten de VS en de USSR verkilde, schreef Einstein "Ik weet niet hoe de Derde Wereldoorlog zal worden uitgevochten, maar ik weet nu al wat voor wapens ze in de Vierde zullen gebruiken: stenen!".^[34] In het artikel "Why Socialism?" (Waarom Socialisme?) uit 1949 in de *Monthly Review*.^[35] schreef Einstein dat de chaotische



Einstein in Princeton met Robert Oppenheimer (rechts), wetenschappelijk directeur van het Manhattanproject.

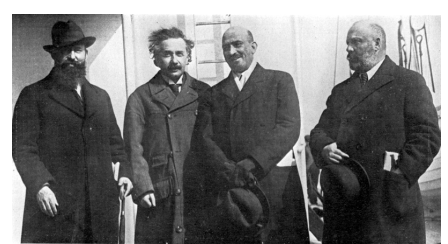
kapitalistische samenleving een bron van kwaad was die overwonnen moest worden: *een roofzuchtige fase in de ontwikkeling van de mens*. Met Albert Schweitzer en Bertrand Russell riep Einstein op kernproeven te staken en af te zien van kernwapens. Vlak voor zijn dood ondertekende hij nog het Russell–Einstein Manifest, dat leidde tot de Pugwash Conferences on Science and World Affairs over ontwapening en vreedzame internationale conflictoplossing.^[36]

Burgerrechten

Tijdens de heksenjacht op communisten in de VS (1950-1955) riep Einstein op tot matiging en verzet tegen deze hetze tegen vooral linkse intellectuelen. Einstein was lid van verscheidene organisaties voor burgerrechten, onder meer de afdeling Princeton van de NAACP. Toen de bejaarde W. E. B. Du Bois beschuldigd werd van spionage voor de Russen, stond Einstein voor hem in zodat men de aantijging liet vallen. Einstein was twintig jaar lang bevriend met de activist Paul Robeson, onder wie hij als vicevoorzitter van de *American Crusade Against Lynching* optrad.^[37]

Israël

Einstein steunde het idee van een joods tehuis in Palestina, maar vond een joodse staat aanvankelijk niet nodig. Hij benadrukte de noodzaak van samenwerking met de Arabieren van Palestina en zag het zionisme als een humanistisch ideaal. Einstein werd nooit lid van een zionistische organisatie. Wel was hij lid van de raad van bestuur van de Hebreeuwse Universiteit van Jeruzalem, tot hij aftrad uit protest tegen het beleid. Na de dood van de eerste president van Israël Chaim Weizmann werd Einstein gevraagd hem op te volgen, waar hij voor bedankte.



Einstein met leiders van de World Zionist Organization, New York, 1921

Godsdienstige opvattingen

De kwestie van determinisme in de wetenschap leidde tot vragen over Einsteins opvatting over theologisch determinisme en of hij geloofde in (een) God. In 1929 zei Einstein tegen Rabbi Herbert S. Goldstein: "Ik geloof in Spinoza's God, die zich openbaart in de harmonieuze ordening van de wereld, niet in een God die zich bezighoudt met het lot en de activiteiten van de mensen."^[38] In een brief uit 1954 schreef hij "Ik geloof niet in een persoonlijke God. Dat heb ik nooit ontkend maar altijd duidelijk aangegeven."^[39] In een brief aan de filosoof Erik Gutkind merkte Einstein op: "Het woord God is voor mij een uiting en voortvloeisel van menselijke zwakheid. De Bijbel is een verzameling van eerbiedwaardige maar toch primitieve legenden die nogal kinderachtig zijn."^[40]

Einstein noemde zich een agnost.^{[41][42]} In een interview met *Time Magazine* legde hij uit dat de mens het wezen van God niet kan kennen:

Ik ben geen atheïst en ik kan me, geloof ik, geen pantheïst noemen. We zijn als een klein kind dat een enorme bibliotheek binnenstapt met boeken in vele verschillende talen. Het kind beseft dat iemand die boeken moet hebben geschreven, maar weet niet hoe. Het vermoedt vagelijk een geheimzinnige orde in de rangschikking van de boeken maar weet niet welke. Dit lijkt me de houding van zelfs de intelligentste mens ten opzichte van God.

Publicaties

De onderstaande onvolledige lijst bevat verwijzingen naar vooral PDF-bestanden. Deze zijn, tenzij anders vermeld, gesteld in het Duits.

Verzameld werk

- *The Collected Papers of Albert Einstein*. Ed. by John J. Stachel, Martin J. Klein, Robert Schulmann, Ann M. Hentschel. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1987–.. (chronologische uitgave, waarvan tot dusver negen delen zijn verschenen)

1895

- (en) *The Investigation of the State of Aether in Magnetic Fields* ^[43], 1895, Engelse vertaling van jeugdwerk, destijds ongepubliceerd.

1901-1904

- *Folgerungen aus den Capillaritätserscheinungen* ^[44], *Annalen der Physik*, 1901, 4, 513-523.
- *Über die thermodynamische Theorie der Potentialdifferenz zwischen Metallen und vollständig dissociierten Lösungen ihrer Salze und über eine elektrische Methode zur Erforschung der Molecularkräfte* ^[45], *Annalen der Physik*, 1902, 8, 798-814.
- *Kinetische Theorie des Wärmegleichgewichtes und des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik* ^[46], *Annalen der Physik* 1902, 417-433.
- *Eine Theorie der Grundlagen der Thermodynamik* ^[47], *Annalen der Physik*, 1903, 11, 170-87.
- *Zur allgemeinen molekularen Theorie der Wärme* ^[48], *Annalen der Physik*, 1904, 14, 354-362.

Wonderjaar 1905

- *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* ^[49] *Annalen der Physik*, 1905, 17, 132-148.
- *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen* ^[50] *Annalen der Physik*, 1905, 17, 549-560.
- *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* ^[51], *Annalen der Physik*, 30 juni 1905, 17, 891-921 (en) *On the Electrodynamics of Moving Bodies* ^[52], Engelse vertaling.
- *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* ^[53], *Annalen der Physik*, 27 september 1905, 18, 639-641. (en) *Does the Inertia of a Body Depend Upon Its Energy Content?* ^[54], Engelse vertaling.

1906-1910

- "Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen" ^[55], *Annalen der Physik*, 1906, 19, 289-306.
- "Zur Theorie der Brownschen Bewegung" ^[56], *Annalen der Physik*, 1906, 19, 371-381.
- "Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption" ^[57], *Annalen der Physik*, 1906, 20, 199-206.
- "Das Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und die Trägheit der Energie" ^[58], *Annalen der Physik*, 1906, 20, 627-633.
- "Über eine Methode zur Bestimmung des Verhältnisses der transversalen und longitudinalen Masse des Elektrons" ^[59], *Annalen der Physik*, 1906, 21, 583-586.
- "Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme" ^[60], *Annalen der Physik*, 1907, 22, 180-190.
- "Über die Gültigkeitsgrenze des Satzes vom thermodynamischen Gleichgewicht und über die Möglichkeit einer neuen Bestimmung der Elementarquanta" ^[61], *Annalen der Physik*, 1907, 22, 569-572.
- "Berichtigung zu meiner Arbeit: Die Plancksche Theorie der Strahlung etc." ^[62], *Annalen der Physik*, 1907, 22, 800.
- "Über die Möglichkeit einer neuen Prüfung des Relativitätsprinzips" ^[63], *Annalen der Physik*, 1907, 23, 197-198.
- "Bemerkungen zu der Notiz von Hrn. Paul Ehrenfest: Die Translation deformierbarer Elektronen und der Flächensatz" ^[64], *Annalen der Physik*, 1907, 23, 206-208.
- "Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie" ^[65], *Annalen der Physik* 1907, 23, 371-384.
- "Über die elektromagnetischen Grundgleichungen für bewegte Körper" ^[66], *Annalen der Physik* 1908, 26, 532-540 samen met J. Laub.
- "Über die im elektromagnetischen Felde auf ruhende Körper ausgeübten ponderomotorischen Kräfte" ^[67] *Annalen der Physik*, 1908, 26, 541-550 samen met J. Laub.

- "Berichtigung zur Abhandlung: Über die elektromagnetischen Grundgleichungen für bewegte Körper ^[68]", *Annalen der Physik*, 1908, 27, 232 samen met J. Laub.
- "Bemerkungen zu unserer Arbeit: Über die elektromagnetischen Grundgleichungen für bewegte Körper ^[69]", *Annalen der Physik*, 1909, 28, 445-447 samen met J. Laub.
- "Bemerkung zu der Arbeit von D. Mirimanoff: 'Über die Grundgleichungen ...' ^[70]", *Annalen der Physik*, 1909, 28, 885-888.
- "Über einen Satz der Wahrscheinlichkeitsrechnung und seine Anwendung in der Strahlungstheorie ^[71]" *Annalen der Physik* 1910, 33, 1096-1104 samen met L. Hopf.
- "Statistische Untersuchung der Bewegung eines Resonators in einem Strahlungsfeld ^[72]" *Annalen der Physik*, 1910, 33, 1105-1115 samen met L. Hopf.
- "Theorie der Opaleszenz von homogenen Flüssigkeiten und Flüssigkeitsgemischen in der Nähe des kritischen Zustandes ^[73]" *Annalen der Physik*, 1910, 33, 1275-1298.

1911-1915

- "Bemerkungen zu dem Gesetz von Eötvös ^[74]", *Annalen der Physik*, 1911, 34, 165-169.
- "Eine Beziehung zwischen dem elastischen Verhalten und der spezifischen Wärme bei festen Körpern mit einatomigem Molekül ^[75]", *Annalen der Physik*, 1911, 34, 170-174.
- "Bemerkungen zu den P. Hertzschen Arbeiten: 'Über die mechanischen Grundlagen der Thermodynamik' ^[76]", *Annalen der Physik*, 1911, 34, 175-176.
- "Bemerkung zu meiner Arbeit: 'Eine Beziehung zwischen dem elastischen Verhalten ...' ^[77]", *Annalen der Physik*, 1911, 34, 590.
- "Berichtigung zu meiner Arbeit: 'Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen' ^[78]", *Annalen der Physik*, 1911, 34, 591-592.
- "Elementare Betrachtungen über die thermische Molekularbewegung in festen Körpern ^[79]", *Annalen der Physik*, 1911, 35, 679-694.
- "Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes ^[80]", *Annalen der Physik*, 1911, 35, 898-906.
- "Thermodynamische Begründung des photochemischen Äquivalentgesetzes ^[81]", *Annalen der Physik*, 1912, 37, 832-838.
- "Lichtgeschwindigkeit und Statik des Gravitationsfeldes ^[82]", *Annalen der Physik*, 1912, 38, 355-369.
- "Zur Theorie des statischen Gravitationsfeldes ^[83]", *Annalen der Physik* 1912, 38, 443-458
- "Nachtrag zu meiner Arbeit: 'Thermodynamische Begründung des photochemischen Äquivalentgesetzes' ^[84]", *Annalen der Physik*, 1912, 38, 881-884.
- "Antwort auf eine Bemerkung von J. Stark: 'Über eine Anwendung des Planckschen Elementargesetzes ...' ^[85]", *Annalen der Physik*, 1912, 38, 888.
- "Relativität und Gravitation. Erwiderung auf eine Bemerkung von M. Abraham ^[86]", *Annalen der Physik*, 1912, 38, 1059-1064.
- "Bemerkung zu Abrahams vorangehender Auseinandersetzung 'Nochmals Relativität und Gravitation' ^[87]", *Annalen der Physik*, 1912, 39, 704.
- "Einige Argumente für die Annahme einer molekularen Agitation beim absoluten Nullpunkt ^[88]", *Annalen der Physik*, 1913, 40, 551-560 met Otto Stern.
- "Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation", *Zeitschrift fuer Mathematik und Physik* 62, 1913, 225-261, met Marcel Grossmann. Ook als boek verschenen bij uitgeverij Teubner, 1913.
- "Die Nordströmsche Gravitationstheorie vom Standpunkt des absoluten Differentialkalküls ^[89]", *Annalen der Physik*, 1914, 44, 321-328 met Adriaan Fokker.
- (en) "Inaugural Lecture to the Prussian Academy of Sciences ^[90]", 1914, Engelse vertaling.

- "Antwort auf eine Abhandlung M. v. Laues 'Ein Satz der Wahrscheinlichkeitsrechnung und seine Anwendung auf die Strahlungstheorie'^[91]", *Annalen der Physik*, 1915, 47, 879-885.
- "Zur allgemeinen Relativitätstheorie", Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte (1915), 778-786.
- "Zur allgemeinen Relativitätstheorie (Nachtrag)", Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte (1915), 799-801.
- "Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie", Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte (1915), 831-839.
- "Die Feldgleichung der Gravitation", Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte (1915), 844-847.

1916-1920

- *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*^[92], *Annalen der Physik*, vierte Folge Band 49, p. 769-822, 1916. Idem met Engelse vertaling en foto manuscript.^[93]
- *Über Friedrich Kottlers Abhandlung 'Über Einsteins Äquivalenzhypothese und die Gravitation'*^[94], *Annalen der Physik* 1916, 51, 639-642.
- *Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie*^[95], *Annalen der Physik*, 1918, 55, 241-244.
- *Bemerkung zu der Franz Seletyschen Arbeit 'Beiträge zum kosmologischen System'*^[96], *Annalen der Physik*, 1922, 69, 436-438.
- (en) *The Foundation of the General Theory of Relativity*^[97], *Annalen der Physik*, 1916, Engelse vertaling.
- (en) *Aether and the theory of relativity*^[98], 1920; vertaald in *Sidelights on relativity*, Dover, NY, 1983, pp. 1–24; ed. "May 5th, 1920", intreerede aan de Rijksuniversiteit Leiden uitgesproken op 27 oktober 1920. Algemene relativiteitstheorie wordt gezien als een ethertheorie zonder deeltjes.

1920-1954

- (en) *Relativity: The Special and General Theory*, 1920, herziene editie, ISBN 0-517-88441-0.
 - Project Gutenberg E-text^[99]
 - Einstein Reference Archive^[100]
- (en) *Fundamental ideas and problems of the theory of relativity*^[101], *Lecture Nordic Assembly of Naturalists at Gotenburg*, 11 juli 1923.
- (en) *The Principle of Relativity.*, New York: Dover Publications, 1923, door Albert Einstein, Hendrik Lorentz, Hermann Weyl en H. Minkowski.
- (en) *Mein Weltbild*, Amsterdam: Querido-Verlag, 1934, ISBN 0-8065-0711-X.
- (en) *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, *Physical Review (ser. 2)*, **47**, 777–780, link^[102]. Met B. Podolsky en N. Rosen.
- (en) *The Evolution of Physics*, 1938, door Albert Einstein en Leopold Infeld, ISBN 0-671-20156-5.
- (en) *Why Socialism?*^[103], *Monthly Review*, mei 1949.
 - Origineel manuscript^[104]
- (en) *On the Generalized Theory of Gravitation*^[105], april 1950.
- (en) *The Meaning of Relativity*, Princeton Univ. Press, 1956.
- (en) *Ideas & Opinions*, samenvattingen van publicaties tussen 1919 en 1954 (waaronder materiaal uit *The World As I See It* (1934), *Out of My Later Years* (1950) en *Mein Weltbild* (Zürich, 1953), ISBN 0-517-00393-7.

Referenties

- [1] Een intelligent of slim persoon wordt wel eens betiteld als 'een Einstein'
- [2] Paul Arthur Schilpp, *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Volume II, Harper and Brothers Publishers (Harper Torchbook edition), New York, 1951, p 730–746. .
- [3] Een greep uit zijn niet-wetenschappelijke werken: *About Zionism: Speeches and Lectures by Professor Albert Einstein* (1930), "Why War?" (1933, met Sigmund Freud), *The World As I See It* (1934), *Out of My Later Years* (1950), en een populariserend boek over wetenschap *The Evolution of Physics* (1938, met Leopold Infeld).
- [4] Pais, *Einstein lived here* p 187-188, 191-198
- [5] Hoffmann en Dukas: *Albert Einstein*, p. 30
- [6] Pais: *Subtle is the Lord*, p. 37 citeert A. Einstein: *Autobiographisches* in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist* (P. Schilpp, ed.) Tudor, New York, 1949.
- [7] Pais: *Subtle is the Lord*, p. 40
- [8] Pais: *Subtle is the Lord*, p. 131
- [9] Hoffmann en Dukas: *Albert Einstein*, p. 39
- [10] Pais: *Subtle is the Lord*, p. 44-45
- [11] Hoffmann en Dukas: *Albert Einstein*, p. 41
- [12] Pais, *Subtle is the Lord*, p45-47
- [13] Pais: *Einstein lived here*, p. 19
- [14] Pais: *Einstein lived here*, p. 21
- [15] Pais, *Subtle is the Lord*, p. 490. Pais, *Einstein lived here*, p. 218
- [16] A. Einstein, *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*, *Annalen der Physik*, 1906, 19, 289-306. Zie link over publicaties
- [17] A. Einstein, *Folgerungen aus den Capillaritätserscheinungen*, *Annalen der Physik*, 1901, 4, 513-523. Zie link bij publicaties.
- [18] Max Planck, *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum*, *Annalen der Physik* 4 [309], 553-563 (1901)
- [19] A. Pais, *Subtle is the Lord*, p 55. verwijst naar A. Einstein, *Bemerkungen zu den P. Hertzschen Arbeiten: 'Über die mechanischen Grundlagen der Thermodynamik'*, *Annalen der Physik*, 1911, 34, 175-176. Op pagina 176 staat de opmerking. Zie link bij publicaties.
- [20] Pais: *Subtle is the Lord*, p. 502-511
- [21] Pais: *Einstein lived here*, p. 63-77
- [22] Pais: *Subtle is the Lord*, onder meer p. 440-459 voor een inhoudelijke bespreking. Pais merkt terecht op: *Geen enkele biografie van hem [Einstein] laat zijn opmerking, dat God niet dobbelt weg.*
- [23] Pais: *Subtle is the Lord*, p. 103
- [24] Hawking, S. W.: *The Universe in a Nutshell*, Bantam Books, 2001, isbn 0-55-380202-X
- [25] Schwartz, J. en McGuinness, M., *Einstein for Beginners*, Pantheon Books, 1979, isbn 0-39-450588-3
- [26] Andrzej, Stasiak (2003). *Myths in science* (<http://www.nature.com/embor/journal/v4/n3/full/embor779.html>). *EMBO reports* 4 (3). DOI: 10.1038/sj.embor.embor779 (<http://dx.doi.org/10.1038/sj.embor.embor779>). Geraadpleegd op 31 March 2007.
- [27] F. W. Dyson, A. S. Eddington, and C. Davidson, "A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919" *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* (1920): 291-333. Foto eclips op bladzijde 332
- [28] Pais, *Subtle is the Lord*, p. 483.
- [29] Moore, Walter. *Schrödinger: Life and Thought*, Cambridge University Press, Cambridge, 1989 ISBN 0-521-43767-9.
- [30] Rob van den Berg, NRC 2005 (<http://www.nrcboeken.nl/recensie/de-heer-schatert-het-uit>)
- [31] Pais, A.: *Einstein lived here*, p. 149 en Citaat uit NRC 4 juli 1921 (<http://www.nrcboeken.nl/recensie/albert-einstein-%E4%ber-die-spezielle-und-die-allgemeine-relativit%C3%a4stheorie-gemeinverst%C3%a4ndlic>)
- [32] Redevoering in het Savoy Hotel te Londen, najaar 1930. *Jüdische Gemeinschaft in Albert Einstein: Mein Weltbild*, ed. Carl Seelig, Ullstein Materialien, Frankfurt/M, 1980, p. 93
- [33] Pais, *Einstein was here*, p 168
- [34] Calaprice, Alice (2005). The new quotable Einstein (<http://press.princeton.edu/titles/7921.html>). Princeton University Press. Van dit citaat bestaan verschillende versies.
- [35] Why Socialism? (http://findarticles.com/p/articles/mi_m1132/is_n8_v40/ai_6944290). Geraadpleegd op 30 June 2007.
- [36] Butcher, Sandra Ionno (May 2005). The Origins of the Russell–Einstein Manifesto (<http://www.pugwash.org/publication/phs/history9.pdf>) (PDF). Council of the Pugwash Conferences on Science and World Affairs. Geraadpleegd op 2 May 2007.
- [37] Ken Gewertz (12 April 2007). Albert Einstein, Civil Rights activist (<http://www.news.harvard.edu/gazette/2007/04.12/01-einstein.html>). Harvard University Gazette. Geraadpleegd op 11 June 2007.
- [38] Brian, Dennis. *Einstein: A Life*, New York: John Wiley & Sons, 1996, p. 127 ISBN 0471114596.
- [39] "Geloof in God komt voort uit menselijke zwakheid of human weaknesses': Einstein letter" (<http://www.cbc.ca/world/story/2008/05/13/einstein-religion.html>), CBC News. Retrieved December 16, 2009.
- [40] "Letters of Note: The word God is a product of human weakness" (<http://www.lettersofnote.com/2009/10/word-god-is-product-of-human-weakness.html>), Letters of Note. Retrieved December 16, 2009.

- [41] Some of Einstein's Writings on Science and Religion (<http://einsteinandreligion.com/>) Website van prof. A.V. Lesikar met deels vertaalde fragmenten uit Einsteins werk. St. Cloud State University, St. Cloud, Minnesota, V.S.
- [42] *Einstein and Religion: Physics and Theology*, Max Jammer, Princeton University Press, 1999, ISBN 0-691-10297-X
- [43] http://www.worldscibooks.com/phy_etextbook/4454/4454_chap1.pdf
- [44] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1901_4_513-523.pdf
- [45] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1902_8_798-814.pdf
- [46] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1902_9_417-433.pdf
- [47] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1903_11_170-187.pdf
- [48] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1904_14_354-362.pdf
- [49] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1905_17_132-148.pdf
- [50] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1905_17_549-560.pdf
- [51] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1905_17_891-921.pdf
- [52] <http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/specrel/www/>
- [53] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1905_18_639-641.pdf
- [54] http://www.fourmilab.ch/etexts/einstein/E_mc2/www/
- [55] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1906_19_289-306.pdf
- [56] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1906_19_371-381.pdf
- [57] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1906_20_199-206.pdf
- [58] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1906_20_627-633.pdf
- [59] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1906_21_583-586.pdf
- [60] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1907_22_180-190.pdf
- [61] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1907_22_569-572.pdf
- [62] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1907_22_800.pdf
- [63] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1907_23_197-198.pdf
- [64] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1907_23_206-208.pdf
- [65] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1907_23_371-384.pdf
- [66] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1908_26_532-540.pdf
- [67] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1908_26_541-550.pdf
- [68] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1908_27_232.pdf
- [69] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1909_28_445-447.pdf
- [70] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1909_28_885-888.pdf
- [71] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1910_33_1096-1104.pdf
- [72] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1910_33_1105-1115.pdf
- [73] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1910_33_1275-1298.pdf
- [74] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1911_34_165-169.pdf
- [75] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1911_34_170-174.pdf
- [76] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1911_34_175-176.pdf
- [77] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1911_34_590.pdf
- [78] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1911_34_591-592.pdf
- [79] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1911_35_679-694.pdf
- [80] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1911_35_898-908.pdf
- [81] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1912_37_832-838.pdf
- [82] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1912_38_355-369.pdf
- [83] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1912_38_443-458.pdf
- [84] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1912_38_881-884.pdf
- [85] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1912_38_888.pdf
- [86] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1912_38_1059-1064.pdf
- [87] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1912_39_704.pdf
- [88] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1913_40_551-560.pdf
- [89] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1914_44_321-328.pdf
- [90] http://alberteinstein.info/gallery/pdf/CP6Doc3_English_pp16-18.pdf
- [91] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1915_47_879-885.pdf
- [92] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1916_49_769-822.pdf
- [93] <http://www.alberteinstein.info/gallery/gtext3.html>
- [94] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1916_51_639-642.pdf
- [95] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1918_55_241-244.pdf
- [96] http://www.physik.uni-augsburg.de/annalen/history/einstein-papers/1922_69_436-438.pdf
- [97] <http://hem.bredband.net/b153434/Works/Einstein.htm>
- [98] http://www.mountainman.com.au/aether_0.html

- [99] <http://www.gutenberg.net/browse/BIBREC/BR5001.HTM>
- [100] <http://www.marxists.org/reference/archive/einstein/works/1910s/relative/index.htm>
- [101] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1921/einstein-lecture.pdf
- [102] http://physics.princeton.edu/~mcdonald/examples/QM/einstein_pr_47_777_35.pdf
- [103] <http://www.monthlyreview.org/598einst.htm>
- [104] <http://www.amnh.org/exhibitions/einstein/global/popups/socialism.php>
- [105] <http://www.alberteinstein.info/db/ViewImage.do?DocumentID=34170&Page=1>

Einstein-De Sittermodel

Het **Einstein-De Sittermodel** is een theoretisch model voor het beschrijven van de uitdijing van het heelal, zoals beschreven door de Friedmann-vergelijkingen. Het maakt gebruik van de veronderstelling dat het heelal een vlakke geometrie heeft en alleen materie bevat. Het is een veelgebruikt voorbeeld van een oplossing voor de Friedmann-vergelijking, omdat het eenvoudig is uit te rekenen.

Oorsprong

Het model werd in 1932 door Albert Einstein en Willem de Sitter gezamenlijk in een artikel in *Proceedings of the National Academy of Sciences* voorgesteld als model voor het heelal. Hierin werd aangenomen dat het heelal isotroop en homogeen is. Dit wordt ook wel het kosmologisch principe genoemd, en werd in 1922 al door Alexander Friedmann gebruikt voor het afleiden van de Friedmann-vergelijkingen. De andere veronderstelling die de afleiding van het model mogelijk maakt is dat het heelal slechts materie bevat. Andere (meer recente) modellen van het universum bevatten ook andere componenten als straling en donkere energie.

Eigenschappen

Het model voorspelt een oneindig groot heelal dat beschreven kan worden met een Euclidische geometrie. Met een Hubble parameter H_0 van

$$H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

(waarbij Mpc is Megaparsec) geeft het een leeftijd van het heelal van 10,2 miljard jaar. Dit is minder oud dan sommige sterren die we kunnen zien.

Einsteinring

Een **Einsteinring**, ook wel **Chwolsonring**, is een ring van licht die aan de hemel te zien is met een goede telescoop, zoals de Hubble Ruimtetelescoop. De ring wordt veroorzaakt door een zwaartekracht lens. Het licht van een zeer verre bron buigt door de zwaartekracht om een sterrenstelsel (de gele objecten in de afbeelding hieronder) heen. Als de verre lichtbron, het sterrenstelsel en de waarnemer bij de aarde op één lijn staan is in sommige gevallen een ring waarneembaar, in plaats van een puntvormig object dat in de afwezigheid van de lens zichtbaar zou zijn.

Naamgeving

Einsteinringen zijn genoemd naar de bedenker ervan, Albert Einstein, in 1936. Het bestaan volgt uit de Algemene relativiteitstheorie, die stelt dat niet alleen materie, maar ook licht (fotonen) worden beïnvloed door zwaartekracht. Einstein achtte de aantoonbaarheid van de ringen zeer onwaarschijnlijk. Toch zijn er tot 2005 elf Einsteinringen ontdekt.

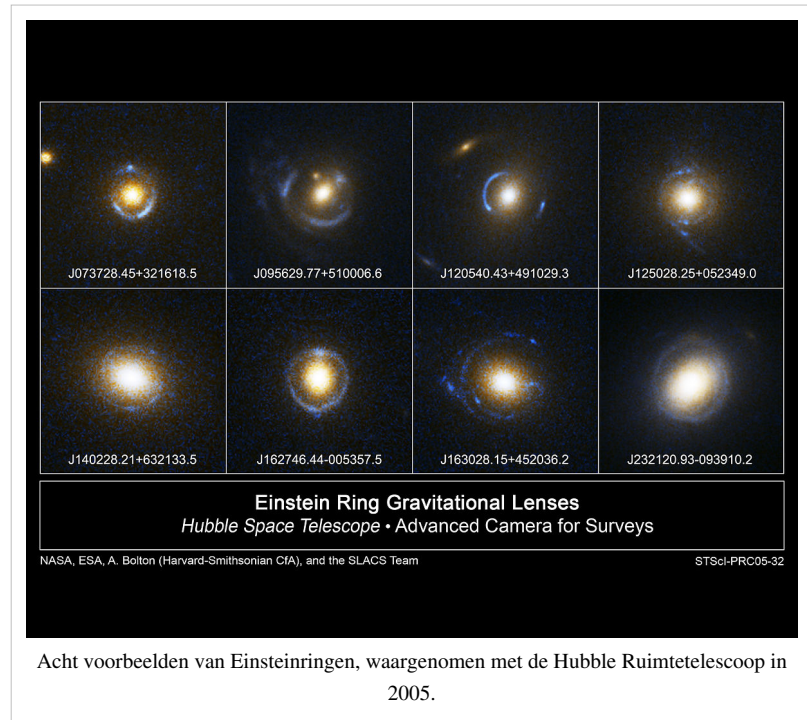
Niet altijd ringvormig

In totaal zijn honderden melkwegstelsels — of clusters van melkwegstels — gevonden die werken als zwaartekracht lens. Het precieze effect van de lens op het licht dat eromheen buigt hangt af van de massaverdeling in het (cluster van) melkwegstelsels zelf. Een zwaartekracht lens heeft lang niet altijd een perfecte ring tot gevolg; vaak wordt alleen een aantal verstoorde kopieën van de achterliggende bron waargenomen, soms in de vorm van bogen.

Afstanden

De afstanden waar men aan moet denken bij de Einsteinring zijn enorm. Eén bepaalde Einsteinring staat op acht miljard lichtjaar afstand (D_L in de figuur hierboven) van de aarde, waarbij het licht afkomstig is van een sterrenstelsel op twaalf miljard lichtjaar afstand (D_S).

Zie ook: Zwaartekracht lens



Einsteins wonderjaar

Einsteins wonderjaar of zijn **annus mirabilis** duidt op het jaar 1905, waarin Albert Einstein vier artikelen publiceerde die de natuurkunde voorgoed zouden veranderen. In de artikelen behandelde hij verschillende grote (toen onbegrepen) problemen van de natuurkunde, en loste deze op met elegante en baanbrekende verklaringen. Deze inzichten zouden meteen de weg openen naar een reeks nieuwe natuurkundige theorieën, die deel uitmaken van wat men met moderne natuurkunde aanduidt.

Achtergrond

Aan de valavond van de 19de eeuw heerste in de natuurkundige gemeenschap de mening dat alle waarneembare fenomenen konden verklaard worden met de wetten van Newton en van Maxwell. Deze opvatting kwam echter in het gedrang toen men beseftte dat deze theorieën *geen* verklaring konden geven voor een aantal waargenomen specifieke fenomenen. De relevantie van deze problemen werd pas duidelijk toen Einstein in 1905 vier artikelen publiceerde. Deze behandelden verschillende van die problemen, en maakten duidelijk dat de werkelijkheid op een radicaal andere manier bekeken dient te worden indien men een bevredigende verklaring wilt geven. Hij legde zo belangrijke grondslagen voor de relativiteitstheorie en kwantummechanica, die daaropvolgend de moderne natuurkunde zouden inleiden.



Einstein op het octrooibureau in Bern, waar hij in 1905 werkzaam was.

De publicaties

De vier publicaties die Einstein in één klap beroemd zouden maken, gingen over de volgende onderwerpen.

Het foto-elektrisch effect

Men had experimenteel vastgesteld dat licht elektronen kan vrijmaken uit metalen. Klassiek is het niet makkelijk om dit foto-elektrisch effect te begrijpen waarom dit effect optreedt. Het werd nog veel moeilijker toen bleek dat dit effect voor een bepaald metaal alleen optreedt bij voldoende grote frequenties (kleur in de richting van blauw), ongeacht de intensiteit van het licht. Einstein slaagde er in dit fenomeen te verklaren door aan te nemen dat licht bestaat uit kleine pakketjes. Deze *lichtkwanta* hadden zekere gelijkenissen met de kwanta die Max Planck vijf jaar eerder had voorgesteld om het spectrum van een zwarte straler te kunnen verklaren. Op die manier werd een tweede belangrijke empirische verklaring gegeven met een nieuw soort fysica, die uiteindelijk zou uitgroeien tot de kwantummechanica.

De Brownse beweging

Rond 1900 heerste er geen consensus over het al dan niet correct zijn van de atoomtheorie. Hoewel de theorie in wezen tot één van de oudste natuurkundige theorieën gerekend kan worden (met antiek-Griekse oorsprong), bleven veel natuurkundigen sceptisch over het al dan niet reëel zijn van deze ondeelbare, kleinste bouwstenen van de materie. Einstein slaagde er echter in een goede kwantitatieve verklaring te geven voor de (tot dan niet begrepen) Brownse beweging, steunend op de atoomtheorie. Daarmee leverde hij overtuigend bewijs voor het *echt zijn* van atomen.

De speciale relativiteitstheorie

De wetten van Maxwell, die enkele decennia voor Einstein alle fenomenen van het elektromagnetisme op een unificerende manier verklaarden, leken te suggereren dat licht eigenlijk een elektromagnetische golf is. Maxwell kon inderdaad ook de snelheid van deze golven afleiden, die inderdaad goed met de lichtsnelheid overeenkwam. Er heerste echter lange tijd de vraag: 'in welke stof beweegt licht'? Veel fysici waren van mening dat er een soort achtergrond (ether) moest zijn ten opzichte waarvan licht beweegt. Een waarnemer die in beweging zou zijn ten opzichte van de ether, zou dan een hogere of lagere lichtsnelheid meten, afhankelijk van zijn bewegingsrichting ten opzichte van het licht. Het Michelson-Morley-experiment toonde echter aan dat dit niét zo was: de lichtsnelheid bleef (ongeacht de snelheid van de meter) altijd gelijk.

Dit was erg moeilijk te begrijpen met de klassieke natuurkunde. Einsteins oplossing voor dit probleem betekende een nieuwe kijk op ruimte en tijd, die voortbouwde op werk van Hendrik Lorentz en Henri Poincaré. De speciale relativiteitstheorie was geboren, en maakt voorgoed komaf met de notie van een absolute tijd. Einsteins professor Hermann Minkowski breidde Einsteins theorie uit en beschreef ruimte en tijd als één geheel, de ruimtetijd met tijd als een vierde dimensie. Later zou Einstein deze theorie verder uitbreiden tot de algemene relativiteitstheorie, die (buiten het incorporeren van de speciale relativiteitstheorie in een meer algemeen kader) op een natuurlijke manier de zwaartekracht beschrijft.

De relatie tussen massa en energie

Uit de speciale relativiteitstheorie, oorspronkelijk bedoeld om het probleem van de lichtsnelheid te verklaren, kon Einstein echter nog een andere conclusie trekken. Voor wiskundige consistentie blijkt het nodig dat de massa van een voorwerp direct gerelateerd is aan zijn rustenergie. Einstein maakte dit concreet met zijn Massa-energie relatie, $E = mc^2$.

Vervolg

Snel na deze baanbrekende publicaties werd Einstein bekend. Hij ontving vele jaren later in 1921 de Nobelprijs "voor zijn verdiensten voor de theoretische natuurkunde, en met name voor zijn ontdekking van de wet van het foto-elektrisch effect". (De speciale relativiteitstheorie was toen nog omstreden.) Deze beperkte toelichting (die slechts één van zijn wapenfeiten vermeldt) is toe te schrijven aan het feit dat veel van zijn andere voorspellingen pas later direct getest zouden kunnen worden. De door hem uitgevonden laser (in 1917) werd bijvoorbeeld pas in 1960 voor het eerst succesvol gemaakt (de maser echter al eerder) en het Bose-Einstein-condensaat (voorspeld in 1924) werd pas in 1995 waargenomen.

"Einsteinjaar" 2005

Het jaar 2005 werd internationaal uitgeroepen tot het wereldjaar van de natuurkunde, ter viering van de honderdste verjaardag van Einsteins wonderjaar.

Referenties

De originele publicaties (met vrij vertaalde titels):

- "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt ^[49]" (*Een heuristische kijk op de opwekking en omzetting van licht*), *Annalen der Physik*, **17**:132-148 (1905)
- "Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen ^[50]" ("Over de beweging van deeltjes in een vloeistof, volgend uit de moleculaire warmtetheorie), *Annalen der Physik*, **17**:549-560. (1905)
- "Zur Elektrodynamik bewegter Körper ^[51]" (*De elektrodynamica van bewegende lichamen*), *Annalen der Physik*. **17**:891-921. (30 juni 1905) (Engelse vertaling ^[52])

- "Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?"^[53]" (*Hangt de massa van een lichaam af van zijn energie-inhoud?*), *Annalen der Physik*, **18**:639-641. (27 september 1905) (Engelse vertaling^[54])

Nederlandse vertalingen:

- Nederlandse vertaling van 'Zur Elektrodynamik bewegter Körper'^[1]
- Nederlandse vertaling artikelen wonderjaar^[2]

Externe links

- (en) *Einsteins Wonderjaar 1905*^[3]

Referenties

[1] <http://www.einsteingenootschap.nl/inhoudvertaling.htm>

[2] http://wet.kuleuven.be/wetenschapinbreedbeeld/lesmateriaal_fysica/einstein.pdf

[3] <http://lorentz.phl.jhu.edu/AnnusMirabilis/>

Equivalentieprincipe

Algemene relativiteitstheorie
$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$
(de Einstein-vergelijking)
Achtergrond
Speciale relativiteit Equivalentieprincipe · Wereldlijn Coördinaat-onafhankelijkheid Wiskundige achtergrond: tensoren
Vergelijkingen
Einstein-vergelijking Friedmann-vergelijking ADM-formalisme
Oplossingen
Schwarzschildmetriek Reissner-Nordströmmetriek Kerrmetriek
Experimentele verificatie
Gravitationeel lenseffect Zwarte gaten Perihelium-precessie
Gevorderde onderwerpen
Kaluza-Klein-theorie Kwantumgravitatie
Wetenschappers
Einstein · Minkowski · Eddington Lemaître · Schwarzschild Friedmann · Chandrasekhar Hawking

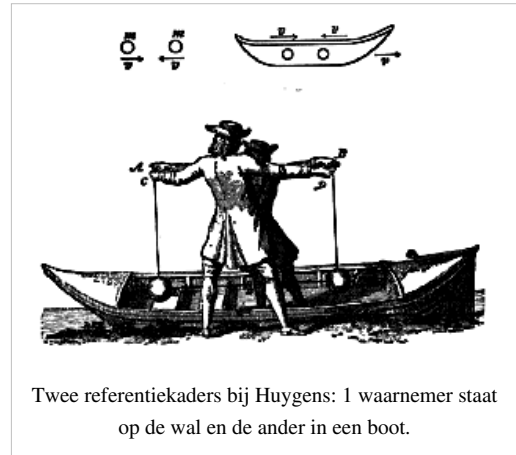
In de natuurkunde wordt met het **equivalentieprincipe** bedoeld het idee van Albert Einstein dat trage massa uit de eerste wet van Newton equivalent (gelijk) is aan de zware massa uit de gravitatiewet van Newton. Hij stelde dat voor een waarnemer er geen manier bestaat om een verschil te meten tussen een gravitatiekracht in een stilstaand stelsel of een inertiaalkracht in een versnellend stelsel en dat dat onderscheid dus niet terecht is. Het meer algemene principe dat natuurwetten voor verschillende waarnemers in verschillende stelsels identiek moeten zijn wordt meestal het

relativiteitsprincipe genoemd.

Geschiedenis

De oorsprong van het relativiteitsprincipe is Galileo Galilei, die in het begin van de 16de eeuw aantoonde dat alle voorwerpen naar het centrum van de Aarde vallen met dezelfde versnelling. Christiaan Huygens gebruikte ook een dergelijk principe bij het ontwikkelen van zijn botsingswetten: het eenvoudige geval van een botsing tussen twee kogels met gelijke snelheid werd veralgemeend voor botsing aan boord van een varende trekschuit.

In de zwaartekrachttheorie van Isaac Newton is een lastig punt dat **trage massa** (de tegenwerking van een voorwerp tegen elke versnelling) en de **zware massa** (de eigenschap om door andere zware voorwerpen aangetrokken te worden) – twee toch wezenlijk verschillende eigenschappen - zonder uitleg aan elkaar gelijk gesteld worden. Het eigenlijke equivalentieprincipe werd geïntroduceerd door Albert Einstein in 1907. Hij merkte toen op dat de waarneming dat voorwerpen naar het centrum van de Aarde vallen met een versnelling van $1g$ ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$ in Nederland) gelijkwaardig is aan de waarneming van iemand die zich in een raket bevindt – ver van de aarde en andere zware hemellichamen – die versnelt met $1g$. Einstein legde dit zo uit:



“Op grond van onze huidige ervaringen hebben we geen reden om te veronderstellen dat de natuurkundige wetten in stelsel Σ_1 op enigerlei wijze anders zouden zijn van die in stelsel Σ_2 , en dus moeten we aannemen dat een gravitatieveld fysisch volledig gelijkwaardig is met een referentiestelsel dat versneld beweegt.”

(Einstein, 1907)

Uit dit principe leidde Einstein af dat de **vrije val eigenlijk een gevolg is van traagheid**. Dit is in strijd met de mechanica van Newton, waarin gravitatie een kracht, een oorzaak is. Deze kracht trekt voorwerpen naar het centrum van een zwaar lichaam. Op het aardoppervlak wordt de kracht van de gravitatie tegengewerkt door de mechanische weerstand, de normaalkracht, van dat aardoppervlak. Dus in de Newtoniaanse fysica bevindt een persoon die stil staat op de oppervlakte van een (niet-roterend) zwaar voorwerp zich in in een inertiaalstelsel. Terwijl dit model heel goed werkt voor de meeste berekeningen, was het altijd een raadsel waarom de trage massa in de tweede wet van Newton, de m in $F = m \cdot a$ (simpele vorm voor constante massa), precies gelijk was aan de zware massa in de gravitatiewet van Newton. Met het equivalentieprincipe, wordt deze geheimzinnigheid opgelost door te stellen dat die “zwaarheid” een gevolg is van een niet aflatende versnelling en dus “gewone traagheid” is.



Gewichtloosheid aan boord van de Vomit Comet van NASA laat zien dat je (het effect van) gravitatiekracht kunt opheffen door een versnelling te ondergaan.

Een gevolg van het equivalentieprincipe is dat als een waarnemer ontdekt dat alle voorwerpen in zijn omgeving een (geheimzinnige) kracht ondervinden - evenredig met de trage massa van die voorwerpen – de conclusie moet zijn dat die waarnemer zich in een versneld referentiekader bevindt. Het equivalentieprincipe werd precies geformuleerd door Einstein in 1911, verwijzend naar twee referentiekaders K en K' . Het kader K bevindt zich in een homogeen gravitatieveld, terwijl er in K' geen gravitatie is, maar dát kader versnelt zodanig dat de voorwerpen in de twee kaders identieke krachten ondervinden:

“Deze veronderstelling van exacte fysieke gelijkwaardigheid maakt het voor ons onmogelijk om van een absolute versnelling van het referentiesysteem te spreken, net zoals het traditionele relativiteitsprincipe het onmogelijk maakt om van een absolute snelheid van een systeem te spreken. Het maakt het gelijk vallen van voorwerpen in een zwaartekrachtsveld nogal evident.” (Einstein, 1911)

Einstein maakte dit principe tot een algemeen beginsel bij het construeren van zijn relativiteitstheorie:

Zolang wij ons beperken tot zuiver mechanische processen in het rijk waar de wetten van Newton gelden, zijn wij zeker van de gelijkwaardigheid van de systemen K en K'. Maar deze mening zal geen diepere betekenis hebben tenzij de systemen K en K' gelijkwaardig zijn met betrekking tot alle natuurkundige processen, dat wil zeggen dat de wetten die gelden in K in volledige overeenkomst zijn met die welke gelden in K'. Als we veronderstellen dat dit werkelijk zo is, komen wij bij een principe uit dat, als het werkelijk waar is, groot heuristisch belang heeft. Door processen te bestuderen die plaatsvinden in een eenparige versnelling verkrijgen we informatie over processen die plaatsvinden in een homogeen zwaartekrachtsveld. (Einstein, 1911)

Hij gebruikte dit principe, samen met speciale relativiteit, om te voorspellen dat klokken sneller en langzamer lopen bij verschillende gravitatiekrachten en dat lichtstralen afbuigen onder invloed van gravitatie, zelfs nog voordat hij het concept van de gekromde plaats-tijd ruimte ontwikkelde.

Dus ging het originele equivalentieprincipe van Einstein over de natuurkundige gelijkheid van vrije val en beweging onder invloed van traagheid.

Hoewel het equivalentieprincipe hielp om de ontwikkeling van algemene relativiteit te sturen is het geen fundamenteel principe maar eerder het simpele gevolg van de geometrische aard van de theorie. In de algemene relativiteitstheorie volgen voorwerpen in vrije val geodesie-lijnen van plaats en tijd, en wat wij waarnemen als zwaartekracht is het gevolg van de mechanische weerstand van het onderliggende vlak dat voorkomt dat wij vrij vallen.

De interesse in het equivalentieprincipe kwam in 1937 in een stroomvernelling toen Paul Dirac zijn *hypothese van de grote getallen* formuleerde: dimensieloze getallen zouden in de natuurkunde niet als fundamentele constanten moeten voorkomen: er zou slechts één fundamentele energieschaal in fysica moeten zijn. Hij ondersteunde dit idee door op een toeval te wijzen: de verhouding (dimensieloos) tussen de elektrische en de gravitatiekrachten in een waterstofatoom is ongeveer even groot als de leeftijd van het heelal, vergeleken met de tijd die het licht erover doet om het waterstofatoom te doorkruisen. Beide verhoudingen zijn ongeveer 10^{40} . Om dit verrassende toeval te verklaren, postuleerde Dirac dat de gravitatieconstante zou variëren omgekeerd evenredig met de leeftijd van het heelal, en dat dus de relatieve zwakte van de gravitatie toe te schrijven was aan de leeftijd van het heelal.

Hoewel dit fout bleek te zijn bracht hij mensen op het idee dat de natuurwetten op verschillende punten in ruimte en tijd verschillend kunnen zijn, en dat de waarden van natuurconstanten dus ook dynamisch gedacht kunnen worden. Deze ideeën, samen met het principe van Mach - grofweg het idee dat de traagheid van een massa wordt veroorzaakt door de andere massa's in het heelal - brachten fysici ertoe om scalar-tensortheorieën te ontwikkelen, met name de Brans-Dicke theorie, waarin de gravitatieconstante geen constante is.

Het moderne gebruik

Een aantal verschillende vormen van het equivalentieprincipe wordt tegenwoordig onderscheiden.

Het zwakke equivalentieprincipe

Het zwakke equivalentieprincipe staat ook bekend als “de universaliteit van de vrije val” :

De baan van een vallend lichaam hangt slechts af van zijn aanvankelijke positie en snelheid en is onafhankelijk van zijn samenstelling.

of

Alle voorwerpen op een zelfde plaats-tijdpunt zullen in een bepaald gravitatieveld dezelfde versnelling ondergaan.

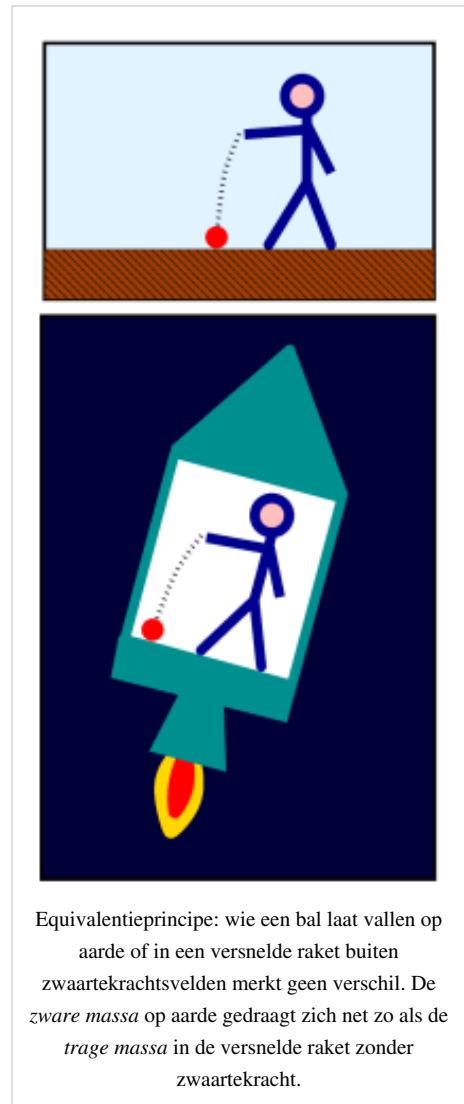
Het principe is niet van toepassing op grote voorwerpen, die getijdekrachten zouden kunnen ervaren, of zware voorwerpen, die door hun aanwezigheid het omringende gravitatieveld wezenlijk veranderen. Deze vorm van het equivalentieprincipe ligt het dichtst bij de oorspronkelijke verklaring van Einstein.

Er was een behoefte om de algemene relativiteitstheorie van Einstein te vergelijken met andere mogelijke zwaartekrachttheorieën die in overeenstemming bleven met de speciale relativiteit. De Amerikaan Robert Dicke wilde zo de algemene relativiteitstheorie toetsen. Twee nieuwe principes werden voorgesteld, het zogenaamde “Einstein-equivalentieprincipe” en het “sterke equivalentieprincipe”, die beide het “zwakke equivalentieprincipe” als uitgangspunt nemen. Zij verschillen slechts in de mate waarin zij op bepaalde gravitatieexperimenten van toepassing zijn. Het Einstein-equivalentieprincipe zegt dat het resultaat van een lokaal niet

gravitatie-experiment in een inertiaalstelsel niet afhankelijk is van de snelheid of de plaats in het heelal van het experiment. Dit is een soort copernicaanse uitbreiding van de originele formulering van Einstein, die vereist dat de referentiekaders waar dan ook in het heelal zich identiek gedragen. Het is een uitbreiding van de postulaten van speciale relativiteit in zoverre dat het vereist dat de fysieke waarden zonder dimensie zoals de fijnstructuurconstante en de elektron/proton massaverhouding constant zijn. Vele fysici denken dat om het even welke Lorentz-invariante theorie die voldoet aan het “zwakke equivalentieprincipe” ook voldoet aan het Einstein-equivalentieprincipe.

Het sterke equivalentieprincipe

Het “sterke equivalentieprincipe” stelt dat de resultaten van welk lokaal experiment dan ook, gravitatie of niet, in een inertiaalstelsel wanneer en waar ook in het heelal dezelfde uitkomst moet hebben. Dit is de enige vorm van het equivalentieprincipe dat op zelf-graviterende voorwerpen van toepassing is (zoals sterren), die een interne gravitatieinteractie hebben. Het vereist dat de gravitatieconstante overal in het heelal hetzelfde is en dat de zwaartekracht onverenigbaar is met een vijfde kracht. Het is veel beperkender dan het Einstein-equivalentieprincipe. De algemene relativiteitstheorie is de enige zwaartekrachtstheorie die compatibel is met deze vorm van het equivalentieprincipe.



Equivalentieprincipe: wie een bal laat vallen op aarde of in een versnelde raket buiten zwaartekrachtsvelden merkt geen verschil. De *zware massa* op aarde gedraagt zich net zo als de *trage massa* in de versnelde raket zonder zwaartekracht.

Bronnen

- Albert Einstein, "Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogene Folgerungen," *Jahrbuch der Radioaktivitaet und Elektronik* **4** (1907);
- Albert Einstein, "Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes," *Annalen der Physik* **35** (1911);
- The Genesis of General Relativity ^[1].

Referenties

[1] <http://www1.kcn.ne.jp/~h-uchii/gen.GR.html>

Friedmann-vergelijking

Algemene relativiteitstheorie
$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$
(de Einstein-vergelijking)
Achtergrond
Speciale relativiteit Equivalentieprincipe · Wereldlijn Coördinaat-onafhankelijkheid Wiskundige achtergrond: tensoren
Vergelijkingen
Einstein-vergelijking Friedmann-vergelijking ADM-formalisme
Oplossingen
Schwarzschildmetriek Reissner-Nordströmmetriek Kerrmetriek
Experimentele verificatie
Gravitationeel lenseffect Zwarte gaten Perihelium-precessie
Gevorderde onderwerpen
Kaluza-Klein-theorie Kwantumgravitatie
Wetenschappers
Einstein · Minkowski · Eddington Lemaître · Schwarzschild Friedmann · Chandrasekhar Hawking

De **Friedmann-vergelijkingen** zijn een stel vergelijkingen uit de kosmologie die de dynamica van ruimte-tijd beschrijven in een homogeen en isotroop heelal. Ze vormen een toepassing van de Einstein-vergelijkingen uit de algemene relativiteitstheorie voor een heelal dat aan die condities voldoet. Friedmann heeft zijn afleiding gepubliceerd in 1922^[1]

De vergelijkingen luiden:

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho + \Lambda}{3} - K\frac{c^2}{a^2}$$

$$3\frac{\ddot{a}}{a} = \Lambda - 4\pi G\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right)$$

hier is Λ de kosmologische constante, G is de gravitatieconstante, c is lichtsnelheid, a is de schaalfactor en K is de Gaussiaanse kromming. Als K positief is, dan is het heelal hypersferisch. Is K gelijk aan nul, dan is het heelal vlak. Is K negatief, dan is het heelal hyperbolisch. De Hubbleconstante, H , is de expansiesnelheid van het heelal.

Bronnen

[1] Friedmann, A: Über die Krümmung des Raumes, Z. Phys. 10 (1922), 377-386.

Gebeurtenis (relativiteit)

In fysica, meer bepaald relativiteitstheorie, is een **gebeurtenis** een fysische situatie of voorval op een welbepaalde ruimtetijdpositie (punt in ruimte en tijd, viervector, punt in de Minkowski-ruimte). Een glas dat stukvalt is bijvoorbeeld een gebeurtenis.

De ruimtetijdpositie van een gebeurtenis is een welgedefinieerde entiteit, ook al hangen de ruimtecoördinaten en de tijd af van het inertiaalstelsel.^[1] Deze wordt voorgesteld door een punt in een Minkowski-diagram. Voor een gegeven inertiaalstelsel zijn er ruimteassen en een tijdas, op basis waarvan met de ruimtetijdpositie ruimtecoördinaten en een tijd corresponderen.

Strikt genomen, is de notie van een gebeurtenis een idealisering: aangezien het een specifieke tijd en plaats opgeeft, terwijl een echte gebeurtenis altijd een uitgestrektheid groter dan nul heeft, zowel in tijd als in ruimte.^[2] Eén van de doelstellingen van algemene relativiteit, is te bepalen of twee gebeurtenissen elkaar kunnen beïnvloeden. Met behulp van de Minkowski-metrick, kan men bepalen of twee gebeurtenissen gescheiden zijn door een tijds-, ruimte-, of lichtachtig interval. Alleen in het geval van een licht- of tijdachtige scheiding kunnen twee gebeurtenissen elkaar beïnvloeden.

Bronnen

[1] A.P. French (1968), Special Relativity, MIT Introductory Physics Series, CRC Press, ISBN 0748764224, p 86

[2] Leo Sartori (1996), Understanding relativity: a simplified approach to Einstein's theories, University of California Press, ISBN 0520200292, p 9

Gesloten tijdachtige kromme

Een **gesloten tijdachtige kromme** (*closed timelike curve* of CTC in het Engels) is een begrip uit de algemene relativiteitstheorie. Het is de naam voor een kromme in een ruimtetijd die tijdachtig is (en dus gevolgd kan worden door een massief deeltje), maar toch gesloten is. Dat wil zeggen dat een deeltje dat langs deze wereldlijn beweegt, na een bepaalde eigentijd *terug* op hetzelfde punt in de ruimtetijd staat. (In het bijzonder, terug op het tijdstip waarop het deeltje vertrok.) Dit is uiteraard vanuit fysisch perspectief een zeer vreemde eigenschap, en zou bijvoorbeeld aanleiding geven tot de grootvaderparadox. Het bestaan van zulke krommes in een bepaalde ruimtetijd wordt daarom gezien als een fysisch ontoelaatbare eigenschap. Een voorbeeld van een ruimte die gesloten tijdachtige krommes heeft, is de Anti-de Sitter-metrik. Indien men overgaat naar de universele bedekking van deze ruimte (welke meestal met dezelfde naam aangeduid wordt), verdwijnen de gesloten tijdachtige krommen, en is de ruimte weer 'gezond'.

Gravity Probe B

Gravity Probe B is een zwaartekrachtmeter, waarmee zeer nauwkeurig het zwaartekrachtsveld van de aarde gemeten kan worden om de relativiteitstheorie, door Einstein gepostuleerd in 1916, aan de werkelijkheid te toetsen. De letter B in de naam betekent dat het de tweede sonde is waarmee dergelijke metingen gedaan zijn (zie Gravity Probe A ^[1]). Hiertoe worden vier cryogene gyroscopen gebruikt in een satelliet die op 642 km hoogte een polaire baan beschrijft rondom de aarde. Deze gyroscopen meten twee afwijkingen:

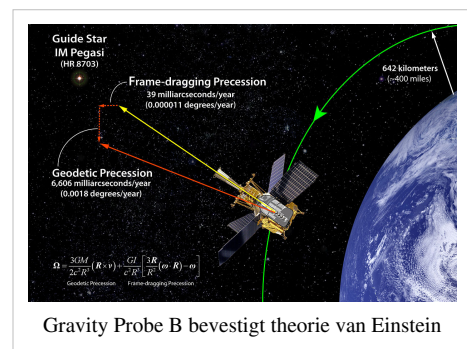
1. Het geodetisch effect (noord - zuid afwijking): de mate waarin de aarde de ruimtetijd vervormt.
2. De vervorming van de ruimtecoördinaten (eng.: *frame-dragging*) ten gevolge van de draaiing van de aarde (de aarde sleept de ruimte mee in haar draaiing).

Dit wordt gedaan door de precessiebeweging (hoekvariatie) van de assen van de gyroscopen te meten over een periode van één jaar en die hoeken te vergelijken met de theorie van Einstein.

Het experiment

Het experiment gebruikt 's werelds meest nauwkeurige gyroscopen. Inderdaad, Einstein voorspelde dat het geodetisch effect 6,6 boogseconden (0,0018 graden) per jaar zou bedragen en de frame-dragging 0,041 boogseconden (0,000011 graden) in het vlak van de draaiing van de aarde. Deze effecten zijn nooit rechtstreeks gemeten.

De missie staat onder leiding van NASA's Marshall Space Flight Center in Huntsville, Alabama. Het idee komt van de Stanford-universiteit in Californië die dan ook de ontwikkeling van het eigenlijke meetinstrument op zich neemt. De universiteit zal ook de missie leiden en achteraf de gegevens analyseren. Lockheed Martin in Palo Alto, Californië bouwt de satelliet.



De telescoop

De opzet is vrij eenvoudig. De gyroscopen zijn vast verbonden met de telescoop. Tijdens de missie zal de telescoop altijd op dezelfde ster -IM Pegasi- gericht blijven. Bij de start van de missie zullen de vier gyroscopassen uitgelijnd worden op deze ster. Door middel van een supergeleidend uitleessysteem SQUID (*Superconducting QUantum Interference Device*) zullen zeer kleine afwijkingen in de oriëntatie van de assen gemeten kunnen worden. Wijzigingen in de richting van de assen zijn een direct gevolg van het geodetisch en/of frame-dragging effect van de algemene relativiteit.

De gyroscopen

Elk van de vier gyroscopen moet nu zowat één miljard omwentelingen hebben gemaakt sinds de lancering in 2004. Zij zijn perfect bolvormig zodat zij elke mechanische of elektrische invloed elimineren. Zij kunnen hoeken detecteren kleiner dan 0,5 milliboogseconde ($1,4 \times 10^{-7}$ graden). Deze hoek komt overeen met de dikte van een mensenhaar gezien op een afstand van 32 km.

Volgens de wetten van de Newtoniaanse fysica zal de as van een perfecte sfeer, onveranderlijk zijn. Dit houdt in dat de gyroscopen, eens opgelijnd met de geleidester, voor altijd naar die ster gericht zullen blijven. Reeds in 1960 voorspelde Dr. Leonard Schiff, hoofd van het departement fysica van de Stanford-universiteit, dat een perfecte gyroscoop het geodetisch en frame-dragging effect zou kunnen meten.

Initialisatie van de gyroscopen

De gyroscopen worden één per één opgestart tot 4200 omw/min. Zij draaien twee aan twee in tegenovergestelde richtingen. Het opstarten gebeurt door ultra zuiver heliumgas tegen geluidssnelheid over de rotor te blazen gedurende verschillende uren. Daarna wordt de helium verwijderd zodat er hooguit nog enkele heliumatomen aanwezig zijn. Dit om de vertraging van de rotatiesnelheid tot een minimum te beperken. De periode waarop de snelheid tot 37% van de initiële snelheid gedaald is bedraagt meer dan 10.000 jaar. Het verwijderen gebeurt door middel van een collector die de heliumatomen als een dunne film op zijn oppervlak vasthoudt. Dit werkt zolang de temperatuur beneden de 5 graden Kelvin blijft. Dit is nog een reden waarom er met cryogene temperaturen wordt gewerkt. De collector bestaat uit gesinterd titanium. Hierdoor kan men een vacuüm creëren dat honderd maal beter is dan het vacuüm op de hoogte van de satelliet.

Technologie

Alle hoofdcomponenten (de vier gyroscopen, de telescoop en het blok waarop alles is gemonteerd) zijn gemaakt uit kwarts. Kwarts is zeer stabiel over een groot temperatuurbereik. Uitzetting en krimpings zijn zeer gering en gelijkmatig. Het bedrijf Speedring Inc. in Cullman, Alabama, heeft deze onderdelen en de behuizing voor de gyroscopen geleverd.

Cryogene sonde

De telescoop heeft een diafragma van 14 cm en zal gedurende het hele experiment op het centrum van IM Pegasi (HR 8703) gericht blijven. Zo heeft men een vast referentiestelsel voor dit relativistisch experiment. De sterren op enkele honderden lichtjaren worden immers als vast beschouwd of men kent er alvast nauwkeurig de eigenbeweging van.

De technici van het Marshall center ontwierpen een technisch zeer hoog staande uitrusting om de rotoren van de gyroscopen te polieren. De ingenieurs van Stanford ontwikkelden de dunne-filmtechnologie om de rotoren van een supergeleidende laag niobium te voorzien. De rotors zijn waarschijnlijk de meest ronde voorwerpen die ooit gemaakt zijn. Als men een rotor zou vergroten tot de omvang van de aarde, zou de hoogste berg of de diepste ravijn slechts 2,4 meter bedragen.

De meetinstrumenten zijn ondergebracht in een 2,7 meter lange cryogene sonde. De sonde zelf is nog eens verpakt in een supergeleidende loodfolie. Deze folie schermt de instrumenten af van het magnetisch veld van de aarde. Op hun beurt zijn de sonde en de loodfolie ondergebracht in een dewarvat dat 2.440 liter supervloeibaar helium bevat. De cryogene temperatuur van 1,8 graden Kelvin is nodig om het niobium van de rotoren supergeleidend te maken. De richting van de rotaties wordt bepaald door het magnetisch moment dat gegenereerd wordt door een draaiende supergeleider.^[2]

De supervloeibare helium in het dewarvat dient zowel voor de koeling van de cryogene omgeving als voor de positionering en rotatie van de satelliet. Door ingenieuze kleppen wordt een zeer kleine hoeveelheid helium in de ruimte geblazen via acht paren microstraalmotortjes om zo nauwkeurig de positie te regelen. Dit wordt gedaan door de helium 'af te koken'. De 400 draden en buizen die de sonde verbinden en het licht dat in de telescoop valt genereren enige warmte. Deze warmte is voldoende om de helium te koken (kookpunt: 4,2 Kelvin) en zo de warmte af te voeren. Eén van de vier gyroscopen vormt het zwaartepunt van de satelliet. De oriëntatie van de satelliet gebeurt rond deze gyroscoop zodat zij in vrije val verkeert.

Lancering

Gravity Probe B werd gelanceerd van op de luchtmachtbasis Vandenberg Air Force Base in Californië door een Boeing Delta II raket op 20 april 2004 om 9:57:24 lokale tijd.

Resultaten

Na 31 jaar onderzoek en ontwikkeling, 10 jaar voorbereiding van de missie, de 1,5 jaar durende missie zelf en vijf jaar analyseren van de gegevens is het GP-B team tot de definitieve resultaten gekomen voor de test van de Algemene Relativiteitstheorie van Einstein gepostuleerd in 1916. De metingen begonnen op 28 augustus 2004 en werden beëindigd op 14 augustus 2005. Het gewogen gemiddelde voor de vier gyroscopen geeft voor de geodetische afwijking $-6601,8 \pm 18,3$ mbs/jr (milliboogseconden per jaar) en voor de frame dragging $-37,2 \pm 7,2$ mbs/jr. De voorspelde waarden door de AR zijn respectievelijk $-6606,1$ mbs/jr en $-39,2$ mbs/jr. Eén milliboogseconde is $4,848 \times 10^{-9}$ radialen of $2,778 \times 10^{-7}$ graden.

Bronnen, noten en/of referenties

Externe links

- Gravity Probe B (http://www.nasa.gov/pdf/162789main_gpb_fs.pdf)
- cryopump (http://einstein.stanford.edu/content/tech_stories/ts_01-cryopump.html)
- GP-B video (http://einstein.stanford.edu/Media/gpb_video_file1.html)

Invariantie

Invariantie is een begrip uit de wiskunde en de theoretische natuurkunde.

Invariantie houdt in dat de natuurwetten niet afhankelijk mogen zijn van de coördinaten waarin deze geformuleerd worden, en vooral niet van verandering in het referentiestelsel.

Het begrip is voor het eerst geformuleerd door Galileo Galilei. Deze verdedigde de theorie van Copernicus, volgens welke de Aarde niet stil stond maar met grote snelheid om de zon heen draaide. Hij kreeg als tegenwerping dat we dan zouden moeten merken dat we met een dergelijk grote snelheid voortbewogen. Dus, zo beweerde hij, waren de natuurwetten onafhankelijk van de snelheid waarmee een systeem zich voortbewoog, mits deze snelheid eenparig was, met andere woorden, niet versneld werd.

De wetten van de Klassieke mechanica gelden in ieder inertiaalstelsel, dat wil zeggen in alle stelsels die ten opzichte van elkaar eenparig bewegen (dat wil zeggen: met constante snelheid), of stilstaan. Dit kan gedemonstreerd worden door een trein of vliegtuig. Als de ramen gesloten zijn kunnen we de 'absolute' snelheid ervan niet opmerken, noch meten. We noemen de overgang van een coördinatenstelsel op een ander dat ten opzichte van het eerste eenparig beweegt een Galileitransformatie, en de klassieke natuurwetten Galilei-invariant.

Dit alles veranderde nadat James Clerk Maxwell de Maxwellvergelijkingen formuleerde, die de wetten van elektriciteit en magnetisme in een enkel stelsel bijeenbracht. Uit deze vergelijkingen volgde de lichtsnelheid in vacuüm, en deze bleek niet invariant te zijn voor een Galileitransformatie. Het beroemde Michelson-Morley-experiment leerde echter dat de lichtsnelheid in alle richtingen dezelfde was, ongeacht de richting ten opzichte van de beweging van de Aarde.

In een inspanning om dit te verklaren kwam Hendrik Lorentz met een nieuwe transformatie, die sindsdien de Lorentztransformatie genoemd werd. Voor niet te hoge snelheden kwam deze overeen met de Galileitransformatie maar, indien de snelheden in de grootte-orde van de lichtsnelheid kwamen, week de Lorentztransformatie hier aanzienlijk van af. Een van de effecten was dan dat de lengte van een linaal door een evenwijdig met dit linaal bewegende waarnemer als een kortere lengte wordt gemeten. Dit staat bekend als de Lorentzcontractie. Een ander effect was de tijddilatatie, waarbij een waarnemer ook constateert dat de tijd op een ten opzichte van deze waarnemer bewegend voorwerp trager verloopt.

Dit alles inspireerde Albert Einstein tot de formulering van de speciale relativiteitstheorie. Hierbij kregen de begrippen uit de klassieke natuurkunde, zoals afstand, tijd, kracht en massa, geherformuleerd en werd ook de verwantschap tussen deze grootheden duidelijk.

De speciale relativiteitstheorie was echter niet van toepassing op systemen die ten opzichte van elkaar een versnelling ondervonden. Daarom werd deze uitgebreid tot de algemene relativiteitstheorie. Daarbij speelt de fundamentele gelijkwaardigheid van versnellingskrachten ("traagheid") en gravitatiekrachten ("zwaartekracht") een belangrijke rol. Wie in een lift op een weegschaal staat die meer dan zijn bekende gewicht aanwijst kan (langs natuurkundige weg) principieel niet vaststellen of de lift optrekt (versnelt), of dat hij zich op een andere planeet bevindt met een hogere aantrekkingskracht.

Roy Kerr

Roy Patrick Kerr (16 mei 1934) is een Nieuw-Zeelandse wiskundige die vooral bekend staat om zijn ontdekking van de Kerr-metrik, een exacte oplossing voor de Einstein-veldvergelijkingen in de algemene relativiteitstheorie. Deze oplossing beschrijft het zwaartekrachtsveld om een elektrisch ongeladen zwaar hemellichaam, in het bijzonder een draaiend zwart gat.

Wetenschappelijke loopbaan

Kerr's wiskundetalent bleek al op de middelbare school (*high school*) van St Andrew's College te Christchurch (Nieuw-Zeeland). Hij mocht in 1951 twee jaar overslaan tijdens zijn wiskundestudie aan Canterbury University College, de voorloper van de University of Canterbury. Hij promoveerde daar (*Ph.D.*) in 1959 op een proefschrift over de bewegingsvergelijkingen in de algemene relativiteitstheorie.

Na een korte postdoc op de Syracuse University in de staat New York, waar Einsteins medewerker Peter Bergmann [1] [2] professor was, werkte hij voor de United States Air Force op de Wright-Patterson Air Force Base. Kerr dacht dat "voornaamste reden dat de Amerikaanse luchtmacht een afdeling voor Algemene Relativiteit heeft waarschijnlijk is om de Marine te laten zien dat ook zij zuiver onderzoek konden doen".^[3]

In 1962 ging Kerr naar de University of Texas at Austin, waar hij in 1963 de naar hem genoemde exacte vacuüm-oplossing vond. In 1965 voerde hij met Alfred Schild het begrip Kerr-Schild ruimtetijd in. In Texas begeleidde Kerr vier promovendi.

In 1971 keerde Kerr terug naar de University of Canterbury in Nieuw-Zeeland, waar hij bleef tot zijn pensioen in 1993. Hij was tien jaar hoofd van de faculteit Wiskunde.

In 2008 werd Kerr benoemd tot hoogleraar op de Yevgeny Lifshitz ICRAnet Chair in Pescara, Italië.

Onderscheidingen

- Hughes Medal (1984)
- Marcel Grossmann Award (2006)

Verwijzingen

[1] <http://www.aps.org/programs/honors/prizes/prizerecipient.cfm?name=Peter%20G.%20Bergmann&year=2003>

[2] http://www34.homepage.villanova.edu/robert.jantzen/princeton_math/pmcxberg.htm

[3] Discovering the Kerr and Kerr-Schild metrics (<http://www.arxiv.org/abs/0706.1109>). In *"The Kerr Spacetime"*, Eds D.L. Wiltshire, M. Visser and S.M. Scott, Cambridge Univ. Press. Roy P. Kerr.



Roy Kerr

Noten

- Roy Kerr (<http://www.genealogy.ams.org/html/id.phtml?id=45397>). *Mathematics Genealogy Project*. University of North Dakota. Geraadpleegd op August 7 2005.
- Kerr, R. P. (1963). *Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics*. *Phys. Rev. Lett.* **11**: 237. DOI: 10.1103/PhysRevLett.11.237 (<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.11.237>).
- Kerr, R. P.; & Schild, A. (1965). *Some algebraically degenerate solutions of Einstein's gravitational field equations*. *Proc. Symp. Appl. Math.* **17**: 119.

Externe links

- (en) Professor Roy Kerr (<http://ifs.massey.ac.nz/mathnews/centrefolds/58/Aug1993.shtml>)
- (en) University of Canterbury: Roy Kerr (<http://www.phys.canterbury.ac.nz/people/kerr.shtml>)
- (en) Man of Mystery (<http://www.listener.co.nz/default,2629.sm>)
- (en) Roy Kerr (<http://scienceworld.wolfram.com/biography/KerrRoy.html>)
- (en) Marcel Grossmann meetings (<http://www.icra.it/MG/>)

Kinetische energie

Kinetische energie of **bewegingsenergie** is een vorm van energie die een lichaam heeft doordat het beweegt. De hoeveelheid hangt samen met de massa en de snelheid. De SI eenheid voor kinetische energie is de joule.

Klassiek

In de klassieke mechanica:

- bij een translatie wordt de kinetische energie gegeven door;

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

met E_k de kinetische energie, m de massa en v de snelheid.

- bij een rotatie wordt de kinetische energie gegeven door:

$$E_k = \frac{1}{2}I\omega^2$$

waarin I het traagheidsmoment van het roterende object is, en ω de hoeksnelheid.

- bij een algemene beweging is de stelling van König toepasbaar. (Som van de kinetische energie van twee bewegingen, bij een vlakke beweging namelijk een translatie en een rotatie).

De totale kinetische energie van een systeem kan bijvoorbeeld veranderen door omzetting van of naar potentiële energie, door omzetting van chemische energie in een verbrandingsmotor, waaronder ook een raketmotor, en bij het afschieten van een projectiel), en door omzetting naar warmte bij wrijving of een botsing.

De snelheid, en dus ook de kinetische energie bij een translatie, hangt af van het gekozen inertiaalstelsel. De totale kinetische energie van een systeem is het kleinst als het massamiddelpunt van dat systeem in rust is. In andere gevallen komt er de kinetische energie bij die overeenkomt met het bewegen van de totale massa met de snelheid van het massamiddelpunt. De snelheid van het massamiddelpunt van een gesloten systeem blijft constant wegens de wet



Een zware truck met hoge snelheid vertegenwoordigt veel kinetische energie

van behoud van impuls. Veranderingen in de totale kinetische energie van een systeem zoals in de voorbeelden hierboven hangen dus *niet* af van het inertiaalstelsel, maar veranderingen in onderdelen van het systeem *wel*.

Als bijvoorbeeld twee lichamen elkaar aantrekken en hun onderlinge afstand kleiner wordt dan wordt potentiële energie omgezet in kinetische energie, maar het hangt van het inertiaalstelsel af in hoeverre deze toename van de totale kinetische energie ten goede komt aan het ene lichaam en in hoeverre aan het andere, en de kinetische energie van het ene lichaam kan zelfs afnemen, waarbij die van het andere extra toeneemt. Evenzo, als een raket chemische energie omzet in kinetische energie, dan hangt het van de snelheid van de raket (en dus van het inertiaalstelsel) af in hoeverre deze toename van de totale kinetische energie ten goede komt aan de raket en in hoeverre aan de reactiemassa, en de kinetische energie van de raket kan zelfs afnemen, waarbij die van de reactiemassa extra toeneemt, of omgekeerd. Bij een volkomen elastische centrale botsing is de overgedragen kinetische energie evenredig met de snelheid van het massamiddelpunt van de botsende objecten.

De totale kinetische translatie-energie van twee lichamen t.o.v. het massamiddelpunt kan worden berekend op basis van de *gereduceerde massa* en de onderlinge snelheid, zie tweelichamenprobleem. De verdeling van deze energie over de beide lichamen is omgekeerd evenredig met de massa. Bij bijvoorbeeld het systeem van een rijdende auto en de rest van de Aarde verandert de kinetische energie van de rest van de Aarde nauwelijks bij snelheidsveranderingen van de auto, hoewel de impuls wel steeds meeverandert in dezelfde mate als die van de auto verandert.

Bij een drielichamenprobleem met de Zon, de Aarde en een ruimtecapsule is evenzo de kinetische energie van de Zon t.o.v. het massamiddelpunt van het geheel van de drie lichamen verwaarloosbaar. De veranderingen van de kinetische energie van de Aarde door de interactie met de capsule zijn nu niet verwaarloosbaar in verhouding tot de kinetische energie van de capsule, zie ook ontsnappingsnelheid.

Moleculen

De totale kinetische translatie-energie van plaatselijke moleculen is de som van enerzijds de kinetische energie die overeenkomt met het bewegen van de totale massa van deze moleculen met de snelheid van hun massamiddelpunt (dus de macroscopische beweging), en anderzijds de kinetische translatie-energie t.o.v. het massamiddelpunt. Deze laatste is gerelateerd aan de temperatuur op de betreffende plaats.

Bij een ideaal gas is de kinetische translatie-energie t.o.v. het massamiddelpunt in totaal $3/2$ maal de druk maal het volume, en evenredig aan de temperatuur, nl. 12,47 J per mol per Kelvin. Dit laatste is $3/2$ maal de gasconstante, en is bij een-atomige moleculen gelijk aan de soortelijke warmte bij constant volume. Bij andere moleculen is er nog andere energie die toeneemt met de temperatuur, nl. die van de rotatie en trilling van de moleculen, waardoor de soortelijke warmte hoger is.

Bij dezelfde temperatuur (en in het bijzonder dus ook in een gasmengsel) hebben zware moleculen gemiddeld dezelfde kinetische translatie-energie als lichte (equipartitietheorema); ze hebben dus een kleinere snelheid.

Relativistisch

Uit de speciale relativiteitstheorie van Einstein blijkt dat de klassieke theorie niet exact klopt. De relativistische energie van een puntmassa met (rust)massa m en snelheid v is:

$$E_{\text{totaal}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

met c de lichtsnelheid in vacuüm, $2,99792458 \cdot 10^8$ meter per seconde. Deze uitdrukking is afgeleid uit denkbeeldige botsingsproeven in combinatie met een Lorentz-transformatie. De energie kan worden onderverdeeld in de rustenergie (de energie die het voorwerp al heeft wanneer het stilstaat)

$$E_{\text{rust}} = mc^2$$

en de kinetische energie (de extra energie door het bewegen)

$$E_k = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

Uit deze formule blijkt, dat de kinetische energie naar oneindig gaat als de snelheid v de lichtsnelheid nadert. Het is dus niet mogelijk een massa te versnellen tot (meer dan) de lichtsnelheid.

We kunnen de relativistische formule voor de totale energie omrekenen in een oneindige reeks. We zien dan dat de klassieke formule voor de kinetische energie een term uit die reeks is. Deze reeks ziet er als volgt uit:

$$E_{\text{totaal}} = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 + \frac{3}{8}\frac{m}{c^2}v^4 + \frac{5}{16}\frac{m}{c^4}v^6 + \dots$$

De eerste term is de rustenergie; dit is de uitdrukking waarmee Einstein bij het grote publiek bekend is geworden. De tweede term is die van de klassieke kinematica. De overige (hogere-orde) termen zijn meestal verwaarloosbaar klein; ze krijgen pas betekenis bij zeer hoge snelheden. Ter indicatie: voor een lichaam dat beweegt met 34.500 km/s (11,5% van de lichtsnelheid) is de afwijking van de klassieke kinetische energie nog maar 1%.

Alternatieve formulering met variabele massa

De bovenstaande formules gaan uit van een constante massa, zoals dat in de relativistische natuurkunde aan de universiteiten en in wetenschappelijke tijdschriften sinds ca. twintig jaar gebruikelijk is. In schoolboeken en in populariserende boeken gaat men echter nog vaak uit van een verschil tussen de rustmassa en de massa van hetzelfde voorwerp als het beweegt. Dat leidt tot een iets andere formulering van de speciale relativiteitstheorie, wat overigens geen gevolgen heeft voor de fysische voorspellingen van de theorie. In deze versie hangt de massa af van de snelheid:

$$m(v) = \frac{m_{\text{rust}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

en voor de totale energie geldt dan

$$E_{\text{totaal}} = mc^2$$

(let op het verschil met de andere formulering). De kinetische energie is

$$E_k = (m - m_{\text{rust}}) c^2$$

De reeksontwikkeling is hetzelfde als boven, met dien verstande dat daarin voor m de rustmassa m_{rust} gelezen moet worden.

Kosmologische constante

De **kosmologische constante** wordt binnen de kwantummechanica gezien als de energie-inhoud van het vacuüm. Oorspronkelijk was het een correctiefactor, die aanvankelijk door Albert Einstein aan de algemene relativiteitstheorie werd toegevoegd, maar later verworpen. Tegenwoordig echter is de kosmologische constante in diverse heelalmodellen weer zeer actueel wegens de versnelde uitdijning van het heelal. Het symbool dat hiervoor in formules doorgaans wordt gebruikt is de Griekse letter lambda: Λ

De kosmologische constante in de relativiteitstheorie

Toen Einstein de algemene relativiteitstheorie opstelde, stelde hij vast dat het resulterende systeem geen statische oplossing had. Zet een aantal massa's bij elkaar, en ze zullen onherroepelijk elkaar aantrekken. Omdat men toen geloofde dat het heelal wel statisch was, voegde hij een extra kosmologische constante toe, die de ruimte uit zichzelf de mogelijkheid gaf uit te wijden of in te krimpen. Als deze constante de juiste waarde had, kon hij precies de ineenstorting van het heelal tegengaan.

Het duurde slechts een paar jaar voor de kosmologische constante op de schroothoop werd gegooid. De wet van Hubble werd ontdekt, en daarmee de uitdijning van het heelal. Het heelal was dus niet statisch, en de aantrekking van de zwaartekracht zorgde simpelweg voor een vertraging van deze uitdijning. Bovendien bleek uit diepere berekeningen dat de kosmologische constante ook niet werkte om het heelal statisch te houden — het heelal zou alleen statisch zijn en blijven als het volmaakt uniform was. Elke afwijking daarvan zorgt voor hetzij uitdijning hetzij inkrimping. Einstein zou dit later de grootste blunder uit zijn carrière noemen.

De kosmologische constante in de kwantumtheorie

In de moderne kwantummechanica steekt de kosmologische constante echter weer de kop op. Hij heeft namelijk een heel eenvoudige natuurkundige betekenis: het is de energie-inhoud van het vacuüm. Hoewel het in Einsteins tijd aannemelijk was dat deze energie-inhoud nul was, is dat tegenwoordig niet het geval; de aanwezigheid van virtuele deeltjes zorgt ervoor dat ook in het vacuüm nog steeds energie aanwezig is.

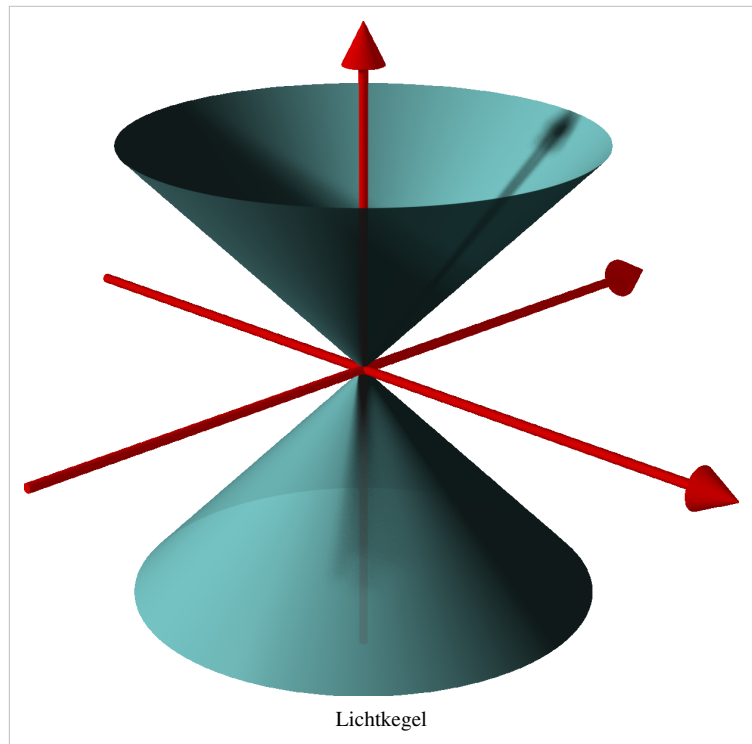
Vanuit de kwantumfysica zijn pogingen ondernomen om de waarde van deze kosmologische constante te berekenen. De gevonden waarden zijn echter veel groter dan uit kosmologische overwegingen mogelijk wordt gehouden - tot 10^{150} keer zo groot. Juist door dit grote verschil werd in de jaren 80 en 90 aangenomen dat de kosmologische constante toch nul zou zijn - het leek veel waarschijnlijker dat een of ander nog onbekend symmetrie-argument zorgde dat de diverse factoren elkaar precies ophieven dan dat de som van een aantal getallen van dergelijke grootte-orde wel bijna, maar niet precies nul zou zijn. Dit veranderde echter toen men in 1998 ontdekte dat de uitdijning van het heelal niet vertraagde maar versnelde. Een dergelijk gedrag kan eigenlijk alleen door een kosmologische constante verklaard worden.

Lichtkegel

Een **lichtkegel** is het oppervlak van waar het licht zich verspreidt. Als we een lichtbron nemen, waarvan de omvang en de positie onafhankelijk zijn van de snelheid van de bron, dan zou na één seconde het licht zich hebben uitgebreid tot een bol van zo'n 200 meter, na twee seconden naar een bol van zo'n 400 meter, enzovoorts. Dit gebeurt net als bij de rimpels van een vijver waar een steen in wordt gegooid. De rimpels worden groter naarmate de tijd verstrijkt. Als we snel achter elkaar foto's zouden maken en die houden we boven elkaar, vormt er zich een kegel met de punt op de plek waar de steen het water raakte.

De ruimtetijdposities van een lichtpuls vormen een driedimensionale kegel in de vierdimensionale ruimte-tijd. Deze kegel wordt de toekomstige lichtkegel genoemd.

Op deze manier kunnen we nog een kegel tekenen, de verleden lichtkegel. Die kegel is de verzameling van alle ruimtetijdposities van waaruit een lichtbron onze gegeven ruimtetijdpositie kan bereiken. Natuurkundigen kunnen zichzelf de structuren van zwarte gaten voorstellen door op de juiste manier lichtkegels in de ruimte-tijd-diagrammen (zie Minkowski-diagram) te tekenen.



Indeling ruimtetijdposities

Bij een ruimtetijdpositie E hoort een lichtkegel van ruimtetijdposities die alle ruimtetijdposities in 6 categorieën verdeelt:

- E zelf
- Ruimtetijdposities die lichtachtig gescheiden zijn van E
 - Ruimtetijdposities op de toekomstige lichtkegel van E (met de lichtsnelheid te bereiken vanuit E)
 - Ruimtetijdposities op de verleden lichtkegel van E (van waaruit met de lichtsnelheid E te bereiken is)
- Ruimtetijdposities die tijdachtig gescheiden zijn van E
 - Ruimtetijdposities binnen de toekomstige lichtkegel van E (met een lagere snelheid dan de lichtsnelheid te bereiken vanuit E)
 - Ruimtetijdposities binnen de verleden lichtkegel van E (van waaruit met een lagere snelheid dan de lichtsnelheid E te bereiken is)
- Ruimtetijdposities die ruimteachtig gescheiden zijn van E : er is te weinig tijdverschil om de ruimtelijke afstand met de lichtsnelheid te overbruggen; er is geen causaal verband mogelijk tussen een gebeurtenis hier en in E . Het is zelfs afhankelijk van het inertiaalstelsel of ze in tijd voor of na E zijn.

Zie ook ruimte-, licht- en tijdachtige intervallen.

Voorbeeld

Licht legt de afstand van de aarde tot de zon af in 8 minuten. Een gegeven ruimtetijdpositie P op de zon is lichtachtig gescheiden van twee ruimtetijdposities op aarde met een tussentijd van 16 minuten. Daartussen zijn de ruimtetijdposities ruimteachtig gescheiden van P. Ervoor en erna zijn ze tijdachig gescheiden van P. Aangezien de onderlinge snelheid tussen de aarde en de zon veel kleiner is dan de lichtsnelheid ligt het overigens voor de hand om een inertiaalstelsel te kiezen waarin de snelheden van beide klein zijn. Als we ons beperken tot zulke inertiaalstelsels kan men toch bijvoorbeeld spreken over een ruimtetijdpositie op aarde die in tijd 5 minuten na een ruimtetijdpositie op de zon is. Alleen in een inertiaalstelsel waarin zon en aarde beide een zeer grote bijna gelijke snelheid hebben zijn deze ruimtetijdposities gelijktijdig of in omgekeerde tijdvolgorde.

Speciale relativiteitstheorie

Als we de invloed van de zwaartekracht buiten beschouwing laten, zoals Albert Einstein en Henri Poincaré dat in 1905 deden, dan spreken we van de zogenaamde speciale relativiteitstheorie. We kunnen voor elke gebeurtenis in de ruimte-tijd een lichtkegel ontwerpen, en omdat de lichtsnelheid bij iedere gebeurtenis en in iedere richting gelijk is, zullen alle lichtkegels identiek zijn en dezelfde kant op wijzen. De theorie schrijft ook voor (uit deze theorie blijkt ook) dat niets sneller dan het licht kan gaan. Dat betekent dat de baan van ieder object door ruimte en tijd moet worden weergegeven door een lijn die binnen de lichtkegel ligt.

Lorentzklok

Een **Lorentzklok** is een hypothetische klok die de tijddilatatie aantoont. De klok is genoemd naar de Nederlandse natuurkundige Hendrik Lorentz.

Een Lorentzklok bestaat uit twee evenwijdige spiegels waartussen een foton heen en weer kaatst. Is de afstand tussen de spiegels 150.000 km, dan kaatst het foton in een seconde heen en weer.

Als men de klok evenwijdig aan de spiegels beweegt, moet het foton een langere weg afleggen. Aangezien de lichtsnelheid constant is, tikt de klok nu langzamer. De factor waarmee de klok langzamer loopt, heet de Lorentzfactor, voorgesteld door de letter gamma. Deze kan worden bepaald met de stelling van Pythagoras en is:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Volgens het relativiteitsbeginsel moet elke andere klok die met dezelfde snelheid beweegt, eveneens langzamer tikken.

Lorenz-ijk

De **Lorenz-ijk** (of **Lorenz-ijking**) definieert een relatie tussen de elektromagnetische potentialen die invariant is onder Lorentztransformaties. De magnetische potentiaal of vectorpotentiaal \mathbf{A} , een vector, en de elektrische potentiaal φ , een scalair, beide functies op de ruimte-tijd, waaruit de elektromagnetische velden door differentiatie verkregen kunnen worden, worden in deze Lorenz-ijk aan de volgende beperking onderworpen:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \varphi + \nabla \cdot \mathbf{A} = 0$$

Deze relatie heeft dezelfde vorm in coördinatensystemen die via een Lorentztransformatie met elkaar in verband staan. Hierbij wordt $(\varphi / c, \mathbf{A})$ als een zgn. vier-vector beschouwd, hetgeen overeenstemt met de eigenschappen van het elektromagnetische veld in de speciale relativiteitstheorie. Deze ijking heet daarom Lorentz-invariant; potentialen die in één coördinatenstelsel aan de Lorenz-ijk voldoen, voldoen in ieder in de speciale relativiteitstheorie toegelaten coördinatenstelsel aan die ijking.

Deze relatie, die in 1867 werd voorgesteld door de Deense natuurkundige Ludvig Lorenz, wordt vaak Lorentz-ijk genoemd. Ongeacht de motivatie voor deze naam lijkt het rechtvaardiger ten minste ook de naam van Ludvig Lorenz met deze relatie te verbinden. Men ziet deze relatie in de literatuur dan ook wel aangeduid als *Lorenz-Lorentz-ijk* of *Lorenz-ijk* (naast het veelvuldige, maar niet geheel terechte, *Lorentz-ijk*).

Massa-energie relatie

De **massa-energie relatie** is een verband tussen de natuurkundige grootheden massa en energie, dat in 1905 op theoretische gronden is afgeleid door Albert Einstein uit zijn speciale relativiteitstheorie. De formule van de relatie, $E = mc^2$, is de bekendste formule uit de relativiteitstheorie.

$$E = mc^2$$

Geschiedenis

Op 26 september 1905 publiceerde Einstein zijn speciale relativiteitstheorie in het Duitse tijdschrift *Annalen der Physik*. Op 21 november plaatste het tijdschrift nog een artikel van zijn hand, waarin hij een gevolg van zijn nieuwe theorie verder onderzocht. Het artikel heette *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* (Is de traagheid van een lichaam afhankelijk van zijn energie-inhoud?) en het antwoord dat Einstein gaf was *ja*. Een lichaam (voorwerp) dat energie opneemt, bijvoorbeeld door licht te absorberen, krijgt een grotere traagheid (massa): het wordt minder gemakkelijk te versnellen. De toename van de massa Δm hangt samen met de opgenomen energie ΔE volgens de relatie $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$. Hierin is c de lichtsnelheid (299 792 458 m/s).

Deze relatie had betrekking op een *toename* van energie en massa. Pas later ging Einstein verder en postuleerde hij dat de *hele* massa van een lichaam een uiting is van inwendige energie. De totale energie-inhoud van een lichaam staat dus in een direct verband met de totale massa. In het *Jahrbuch der Radioaktivität* presenteerde hij in 1907 de formule die dit idee samenvat: $E = mc^2$. De massa-energie relatie kwam dus voort uit de relativiteitstheorie plus een voor de hand liggende, maar gewaagde aanname.

De Franse wis- en natuurkundige Henri Poincaré had de massa-energie relatie eerder gevonden, zonder het bredere verband dat Einstein aanbracht.

Later ontdekte men allerlei fysische verschijnselen waarbij de totale massa niet gelijk bleef. Deze bevestigden het verband tussen toenames van massa en energie, $\Delta E = \Delta mc^2$. Pas toen men rond 1930 antideeltjes had ontdekt, kon ook de absolute relatie $E = mc^2$ bevestigd worden. Wanneer een deeltje en zijn antideeltje elkaar annihileren, verdwijnen ze geheel. Er komt energie vrij, en inderdaad bleek die hoeveelheid energie precies overeen te komen met de gecombineerde massa van het deeltje en het antideeltje.

Een ander bekend verschijnsel waar deze formule zich manifesteert is kernenergie. Het afval bij kernsplijting weegt iets minder dan de grondstof. Omdat c^2 - het kwadraat van de lichtsnelheid - een enorm getal is, representeert het geringe massaverlies een aanzienlijke hoeveelheid energie. Ook als lichte elementen fuseren neemt de massa af, en komt er (dus) energie vrij. Daarop is de waterstofbom gebaseerd.

In de loop van de twintigste eeuw is de formule $E = mc^2$ bij een groot publiek synoniem geworden met het werk van Einstein, met de moderne natuurkunde, en met ingewikkelde wetenschap in het algemeen. Hij is bijna even bekend als de stelling van Pythagoras. In veel populaire boeken over relativiteit is dit de enige formule. Dat komt vermoedelijk door de interessante betekenis van de formule, door de charismatische persoonlijkheid van Einstein of door de toepasbaarheid op de atoombom, maar ook door de eenvoud die de formule in feite heeft: het is een gewone evenredigheid, bijna de simpelste vorm die een natuurwet kan hebben.

Afleiding

Voor de afleiding van de equivalentie van massa en energie maakt men gebruik van de relativistische impuls. Deze wordt afgeleid door een gedachtenexperiment waarbij twee bollen volkomen elastisch botsen. Voor en na die botsing moet, rekening houdend met de Lorentztransformatie voor snelheden, behoud van impuls gelden. Daaruit volgt dat men de impuls moet definiëren als:

$$p(v) = m(v)v = \frac{m_{rust}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}v$$

Met de snelheid neemt niet alleen de impuls toe maar ook de relativistische massa $m(v)$. Dit lijkt samen te hangen met de toename van de energie. Net als in de klassieke mechanica definieert toename van de energie als de arbeid, dat wil zeggen het product van kracht en afgelegde weg, en kracht als de verandering van de impuls per seconde. Wanneer in korte tijd de snelheid, impuls en energie veranderen door een kracht vindt men:

$$\frac{dE}{dt} = F \frac{dx}{dt} = \frac{dp}{dt}v = \frac{dm(v)v}{dt}v = \frac{m_{rust}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}^3} \frac{dv}{dt}v = \frac{dm(v)}{dt}c^2$$

Daaruit volgt dan dat verandering van energie inderdaad gelijk is aan de verandering van massa vermenigvuldigd met het kwadraat van de lichtsnelheid.



Opschrift op Taipei 101

Hoge en lage snelheden

De wortel in de noemer van de snelheidsafhankelijke massa kan ontwikkeld worden in een Taylorreeks:

$$m(v) = m_{\text{rust}} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \dots \right)$$

Vermenigvuldiging met het kwadraat van de lichtsnelheid c^2 leidt dan tot

$$m(v)c^2 = m_{\text{rust}}c^2 + \frac{1}{2}m_{\text{rust}}v^2 + \frac{3}{8}m_{\text{rust}}\frac{v^4}{c^2} + \dots$$

De eerste term $m_{\text{rust}}c^2$ is groot, maar blijft in het dagelijkse leven onveranderd, zodat we er weinig van merken behalve in het geval van bijvoorbeeld kernenergie. In de tweede term $\frac{1}{2}m_{\text{rust}}v^2$ herkennen we de klassieke kinetische energie volgens de mechanica van Newton. De derde en volgende termen zijn voor de lage snelheden uit de dagelijkse praktijk nagenoeg onmerkbaar, waardoor ze in vroegere tijden nooit herkend zijn. Alle termen hebben de dimensie van energie. Daarmee ontstaat de interpretatie dat $m(v)c^2$ de totale energie $E(v)$ van een deeltje

$$E(v) = m(v)c^2$$

de rustenergie E_{rust} van een deeltje is. En daarmee is de relatie vastgelegd

of kortweg

$$E = mc^2$$

Interpretatie

De betekenis van de massa-energiere relatie is: *massa is equivalent met energie*. Met andere woorden, massa en energie zijn twee zijden van dezelfde medaille; of: de massa van een lichaam is een uiting van de energie van dat lichaam. Aan de massa kan de energie afgelezen worden; een precieze meting van de massa geeft weer hoeveel energie er in totaal in zit. Als een lichaam massa m heeft, heeft het in totaal een energie mc^2 ; dit is voor een deel inwendige bewegingsenergie, voor een deel inwendige potentiële energie, voor een deel inwendige kernenergie enzovoort.



Er bestaat bij veel mensen op twee punten verwarring over de interpretatie van de formule $E = mc^2$:

1. Betekent E alleen de inwendige energie (de energie in rust) of ook de kinetische energie (de extra energie die een lichaam heeft doordat het beweegt)? Met andere woorden, neemt de massa toe met de snelheid?
2. Zit de energie E in het lichaam *als energie* (dus moet E meegeteld worden als men de totale energie van een systeem berekent), of duidt E alleen op energie die pas *ontstaat* wanneer de massa afneemt?

Het antwoord op de eerste vraag is: dat is een kwestie van conventie. De relativiteitstheorie kan geformuleerd worden met massa's die gelijk blijven wanneer een lichaam in beweging komt, of met massa's die groter zijn bij beweging. Een niet-bewegingsafhankelijke massa is de laatste decennia gebruikelijk in de natuurkunde op de universiteiten en in wetenschappelijke artikelen. In boeken voor het grote publiek en op scholen gebruikt men echter nog vaak de formulering met een massa die afhankelijk is van de snelheid. Fysische voorspellingen ("wat gebeurt er als...") zijn dezelfde in beide formuleringen.

De tweede vraag heeft wel een eenduidig antwoord: E duidt op energie die in het lichaam *aanwezig is*. Bij een kernreactie neemt de massa af en er komt energie vrij (in de vorm van straling en warmte), maar die energie *zat al* in de kern. Het was bijvoorbeeld interne bewegingsenergie (kerndeeltjes die met grote snelheid om elkaar heen bewegen, de beweging van de quarks), potentiële energie (positief geladen protonen die vlak bij elkaar zitten), en meer abstracte vormen die men 'veldenergie' zou kunnen noemen. Het is dus niet correct te zeggen dat bij die

kernreactie "massa is omgezet in energie". De energie was al aanwezig. Wel is er inwendige energie, meetbaar als massa, omgezet in uitwendige energie (straling en warmte), die zich niet manifesteert als massa. Met andere woorden, de Wet van behoud van energie is gewoon geldig; alleen de Wet van behoud van massa wordt door de massa-energiere relatie ongeldig.

Voor de duidelijkheid zou men de formule kunnen schrijven als:

$$E_{\text{totaal}} = E_{\text{uitwendig}} + E_{\text{inwendig}}$$

$$E_{\text{inwendig}} = m_{\text{rust}}c^2$$

waaraan de wetenschappelijk gangbare formulering nog toevoegt: $m = m_{\text{rust}}$, ongeacht de snelheid van het lichaam.

Voorbeelden

Ter verduidelijking volgen enkele voorbeelden van situaties en processen, beschouwd vanuit het perspectief van de massa-energiere relatie. In alle gevallen is de hoeveelheid massa klein en de energie groot: door de enorme factor c^2 in de formule komt 1 gram massa overeen met $8,988 \times 10^{13}$ joule. Dat is de verbrandingswarmte van 15 000 vaten ruwe olie, ofwel de energie van een bom van 21,4 kiloton TNT: dezelfde orde van grootte als de atoombom Little Boy die in 1945 Hiroshima verwoestte.

Verandering van inwendige energie

Onder inwendige energie verstaan we iedere vorm van energie die in een systeem (een lichaam of deeltje) zit; deze energie bepaalt volgens $E=mc^2$ de traagheid voor het versnellen van dat systeem.

- Hebben we een doos waarin een veer vastgemaakt zit, dan is de traagheid van die doos groter wanneer de veer uitgerekt is dan wanneer hij ontspannen is. Het verschil in potentiële energie, in dit geval veerenergie, is merkbaar als een verschil in massa. In de praktijk is het verschil onmeetbaar klein.
- Een doos met daarin een vliegwiel heeft een grotere massa wanneer het vliegwiel ronddraait dan wanneer het stilstaat. Het verschil in inwendige bewegingsenergie, hier draaiingsenergie, uit zich in een verschil in massa. Het is onmeetbaar klein.
- Een afgesloten thermoskan met 1 liter water heeft een hogere massa wanneer het water 80 °C is dan wanneer het 20 °C is. Het verschil in inwendige energie (bewegings- en potentiële energie van de watermoleculen) is $2,5 \times 10^5$ J, dus het verschil in massa is $2,8 \times 10^{-12}$ kg. Dit is moeilijk of niet meetbaar. Als de thermoskan de warmte laat weglekken, verliest hij dus wat inwendige energie én een beetje massa (ook hier zegt men uiteraard niet dat "massa in energie wordt omgezet").
- Een geïsoleerd vat met daarin een blok hout en een paar liter zuurstofgas, waarin het hout wordt aangestoken, verandert niet van massa. De chemische energie van tevoren was even groot, en gaf evenveel traagheid, als de warmte die na afloop van de verbranding in het vat zit. De totale inwendige energie is niet veranderd, dus de massa ook niet. Als de inhoud van het vat echter afkoelt, dus warmte afgeeft aan de omgeving buiten het vat, gaat de massa alsnog omlaag. Dit is weer onmeetbaar weinig.

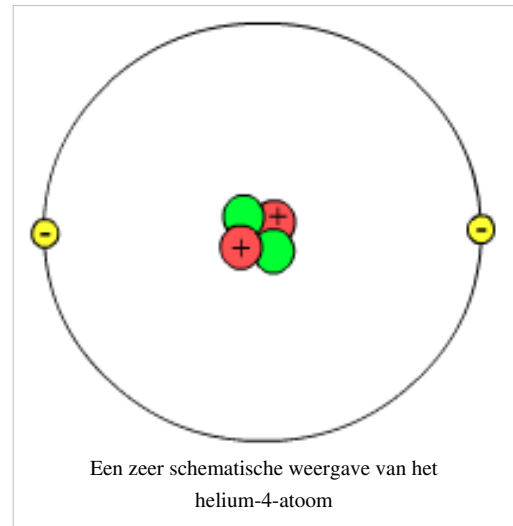
De massaveranderingen zijn in deze gevallen zeer klein. Daardoor was men vóór 1905 niet op de massa-energiere relatie gekomen: alle metingen wezen erop dat de massa behouden was. Voor meetbare verschillen in massa zijn we afhankelijk van een kracht die relatief zeer grote energiever schillen veroorzaakt: de sterke kernkracht. We hebben het dan over situaties met de atoomkern.

Het massadefect van de atoomkern

Een heliumatoom (de isotoop helium-4) bestaat uit een kern van twee neutronen en twee protonen, waar twee elektronen in een baan omheen gaan. Uitgedrukt in de atomaire massa-eenheid u is de massa van een proton $1,007\,276\,u$, van een neutron $1,008\,665\,u$ en van een elektron $5,4858 \times 10^{-4}\,u$. In totaal zou het atoom dus $4,033\,u$ moeten zijn – maar uit metingen blijkt dat het maar $4,003\,u$ is. Er ontbreekt $0,030\,u$ ($0,75\%$ van de massa). Dit is het **massadefect** of de bindingsenergie van helium-4.

Het massadefect wordt veroorzaakt door de sterke aantrekking die er op korte afstand tussen de nucleonen (kerneleukjes) is. Vanuit de situatie met vier vrije, ongebonden nucleonen en ongebonden elektronen (totale massa: $4,033\,u$) naar de situatie waarin de nucleonen dichtbij elkaar zitten, is er dus potentiële energie verloren gegaan. Deze is bij het ontstaan van de atoomkern ontsnapt, bijvoorbeeld in de vorm van straling. De totale (inwendige) energie van het atoom is dus kleiner dan die van de deeltjes toen ze nog ongebonden waren. Het is in de verte vergelijkbaar met de veer van hierboven: de losse deeltjes kan men zien als de uiteinden van een uitgetrokken veer.

In het geval van helium-4 moet er bij de vorming $0,030\,u \times 931,49 = 27,9447\,MeV$ energie zijn vrijgekomen. Men gebruikt het getal $931,49$ omdat in $E=mc^2$ is m in kilogram en niet in u . Één u is het gewicht van $1/12$ deel van een koolstof-12-atoom. $1\,u$ is $1,660\,54 \cdot 10^{-27}$ kilogram. Het massadefect per nucleon is $7,1\,MeV$. Voor iedere atoomkern is dit weer anders. Gaan we van helium naar zwaardere atomen, dan zien we het massadefect per nucleon toenemen tot $8,8\,MeV$ voor het isotoop ijzer-56 ($0,94\%$ van de massa). Dat betekent dat er bij de vorming van ijzer-56 relatief veel energie vrijkomt, dus dat het veel energie zou kosten die atoomkern op te breken – dit is dus een zeer stabiel isotoop. Nog zwaardere atoomkernen hebben weer minder bindingsenergie per nucleon en zijn dus weer minder stabiel.



Kernfusie en kernsplitsing

Een kernreactie die het massadefect per nucleon laat toenemen, dus de totale massa laat afnemen, leidt tot een lagere totale inwendige energie en – volgens de Wet van behoud van energie – het ontsnappen van energie. Deze reacties kunnen dus als energiebron gebruikt worden. Dit geldt dus voor kernreacties waarvan het resultaat dichterbij ijzer-56 zit:

- Kernfusie van lichtere atoomkernen. Men doet vooral onderzoek naar fusie tussen zware waterstofkernen (deuterium en tritium), maar sterren ontleen hun energie ook aan andere fusiereacties. De waterstofbom werkt ook met kernfusie.
- Kernsplitsing van zwaardere atomen. In kerncentrales gebruikt men uranium-235, dat ook zorgt voor de hitte in het binnenste van de aarde. Sommige kernbommen maken gebruik van plutonium.

Beide soorten reactie geven reactieproducten met een groter totaal massadefect; dat betekent dat er energie (warmte en straling) vrijkomt. Bij de eerste atoombom is er bijvoorbeeld ongeveer 0,7 gram massa verdwenen. De zon wordt per seconde vier miljard kilogram lichter. Gelukkig is dit een relatief klein deel van het totale gewicht van de zon: slechts $2,0 \times 10^{-19} \%$.

Annihilatie

Wanneer een subatomair deeltje en zijn antideeltje bij elkaar komen, verdwijnen ze allebei en gaat de massa verloren. Deze massa vertegenwoordigde echter een hoeveelheid energie, die niet verloren gaat maar in een flits ontsnapt. Soms gaat het om fotonen, bijvoorbeeld bij elektron-positronannihilatie. In andere gevallen komen andere deeltjes tevoorschijn.

De totale bewegingsenergie van de ontsnappende deeltjes is te berekenen. Als bijvoorbeeld een proton met een antiproton annihileert, moet $2 \times 938 = 1876$ MeV aan energie vrijkomen volgens de massa-energiere relatie. In het geval dat de reactieproducten vijf pionen zijn (in 20% van de annihilaties), die ieder 135 à 140 MeV aan massa hebben, is er nog 1183 MeV energie over. Dat betekent dat de pionen wegvliegen met in totaal 1183 MeV bewegingsenergie.

Bij de annihilatie van een elektron met een positron moeten de twee fotonen die ontstaan samen 2×511 keV energie hebben, omdat dat de massa was die verdwenen is (de inwendige energie die in licht wordt omgezet).

Zoals gebruikelijk worden hier massa's uitgedrukt in de energie-eenheid elektronvolt. Dit kan uiteraard vanwege de massa-energiere relatie.



Kernsplitsing: kernproef in 1951

Kinetische energie

Het is mogelijk de equivalentie van massa en energie uit te breiden tot kinetische energie (bewegingsenergie). Dan wordt de kinetische energie meegeteld en heeft een bewegend lichaam meer massa. Zoals hierboven besproken is dat in de natuurkunde niet meer gebruikelijk. Er zijn dus twee beelden van de relatie tussen beweging en massa: een waarbij de massa constant blijft en een waarbij ze toeneemt met de snelheid.

Daarnaast is er het onderscheid tussen *inwendige* en *lineaire* bewegingsenergie: wanneer de kinetische energie besloten is in een zeker volume van ruimte, zoals bij een vliegwiel, dan draagt die kinetische energie altijd bij aan de totale massa. In het geval van beweging in rechte lijn (die in principe oneindig ver kan doorgaan) kan er geen volume van ruimte aangewezen worden waar die beweging in besloten is, en is het een kwestie van conventie om die energie wel of niet mee te tellen. Voor die twee mogelijke conventies (lineaire beweging wel of niet meetellen in de massa) zijn de volgende formules opgesteld.

Constante massa

De gebruikelijke beschrijving in de fysica zegt dat de massa niet toeneemt bij beweging. De bewegingsenergie wordt dus niet opgenomen in de massa-energiere relatie maar staat daar los van. Inwendige bewegingsenergie (zoals warmte) telt uiteraard wél mee. Er geldt $m = m_{\text{rust}}$ en

$$E_{\text{inwendig}} = mc^2.$$

De kinetische energie bij snelheid v is (volgens de speciale relativiteitstheorie):

$$E_k = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

en daarmee is de totale energie:

$$E_{\text{totaal}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Nu is een bewegend voorwerp wel degelijk trager (moeilijker te versnellen) dan een stilstaand voorwerp, maar om dit weer te geven vervangt men de klassieke impuls $p = m \cdot v$ eenvoudig door

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

De kracht nodig voor een versnelling a is niet $F = m \cdot a$, zoals in de klassieke mechanica, maar in het algemeen meer. Bovendien hangt de kracht af van de richting: een versnelling in de bewegingsrichting kost meer kracht dan een versnelling loodrecht op de bewegingsrichting. Er gelden dus allerlei relativistische formules in plaats van de klassieke.

Variabele massa

De beschrijving die bekender is, telt de bewegingsenergie mee in de massa. Er geldt dus:

$$E_{\text{totaal}} = E_{\text{inwendig}} + E_k = mc^2$$

in afwijking van de formulering met de constante massa. De massa hangt nu van de snelheid af volgens

$$m(v) = \frac{m_{\text{rust}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

De totale energie is natuurlijk wel gelijk aan die in de andere formulering, maar de totale massa is groter. Voor de impuls geldt nu weer gewoon $p = m \cdot v$. De wet $F = m \cdot a$ geldt nu wel voor versnellingen loodrecht op de bewegingsrichting, maar niet voor andere gevallen.

Meerdimensionaal

Meerdimensionaal of **multidimensionaal** is alles wat meer dan één dimensie heeft. In de alledaagse ruimte hebben objecten drie dimensies: lengte, breedte en hoogte (of diepte). Deze zijn, behalve in naam, volkomen gelijkwaardig. Een wiskundig punt heeft geen afmetingen en dus nul dimensies, een rechte lijn is ééndimensionaal (of: enkeldimensionaal), een plat vlak heeft twee dimensies, en andere voorwerpen drie.

De tijd wordt wel eens de vierde dimensie genoemd. Volgens Einstein is de ruimte slechts te begrijpen als een onderdeel van de vierdimensionale tijdruimte, en sommige wetenschappers zijn van mening dat er wel elf of twaalf dimensies moeten zijn om de werkelijkheid te verklaren. De voor ons onwaarneembare dimensies zouden daarin zijn opgerold tot een punt.

Relativiteit

De relativiteitstheorie stelt dat verschillende waarnemers verschillende afmetingen waarnemen als zij met verschillende snelheden of in verschillende richtingen in een inertiaalstelsel voortbewegen. Een lijnstuk in zo 'n stelsel is voor de een langer dan voor de ander.

Voorstelling

Het is niet altijd nodig om de dimensies te kunnen voorstellen als hoogte-breedte-diepte. Een meervoudige dimensie is strikt wiskundig een plaats binnen een set verzamelingen. Een voorbeeld zou kunnen zijn: de eigenschappen van een voorwerp, zijnde: gewicht, oppervlak, kleur en aantal gaten. Dit voorbeeld heeft dan vier dimensies. Door het meten van deze vier dimensies, en te vergelijken met referentie-artikelen, zou kunnen worden bepaald wat voor artikel men bedoelt.

Michelson-Morley-experiment

Speciale relativiteitstheorie
$E = m c^2$
(de massa-energie relatie)
Achtergrond
Lichtsnelheid · Lorentz invariantie Inertiaalstelsel Wetten van Maxwell
Fundamentele begrippen
Lorentztransformatie · Ruimtetijd Viervector · Minkowski-ruimte Lengtecontractie · Tijddilatatie Gelijktijdigheid
Gevorderde onderwerpen
Massa-energie relatie Tweelingparadox EPR-paradox
Experimenten
Michelson-Morley-experiment Fizeau-experiment energieproductie bij kernreacties
Wetenschappers
Einstein · Maxwell · Minkowski Lorentz · Poincaré

Het **Michelson-Morley-experiment** is een experiment waarin de snelheid van het licht evenwijdig aan de baan van de Aarde wordt vergeleken met de snelheid van het licht loodrecht op diezelfde baan, in een poging om de beweging van de Aarde en de Zon aan te tonen. Dit werd uitgevoerd in 1887 door Albert Michelson en Edward Morley en wordt beschouwd als het eerste sterke bewijs tegen het bestaan van de ether, het medium ten opzichte waarvan het licht zich zou verplaatsen.

Reden van het experiment

Volgens veel klassieke wereldbeelden stond de aarde stil in het centrum van het heelal. In de 19e eeuw was men er reeds lang van overtuigd dat dit niet juist was: de Aarde was in beweging in een baan om de Zon (snelheid 30 km/s). Bovendien was de Zon in beweging rondom de Melkweg met een snelheid van 220 km/s en ze sleurde daarbij de aarde mee. De Melkweg was waarschijnlijk ook in beweging, maar niemand wist hoe. Het was niet eenvoudig de beweging van de Zon te constateren, men kon alleen vaststellen dat de Zon in beweging was ten opzichte van andere

sterren. Aangezien alle sterren gelijkwaardig zijn, was het ongerijmd te veronderstellen dat de Zon stilstond, maar daaruit bleek niet welke ster stilstond en welke in beweging was.

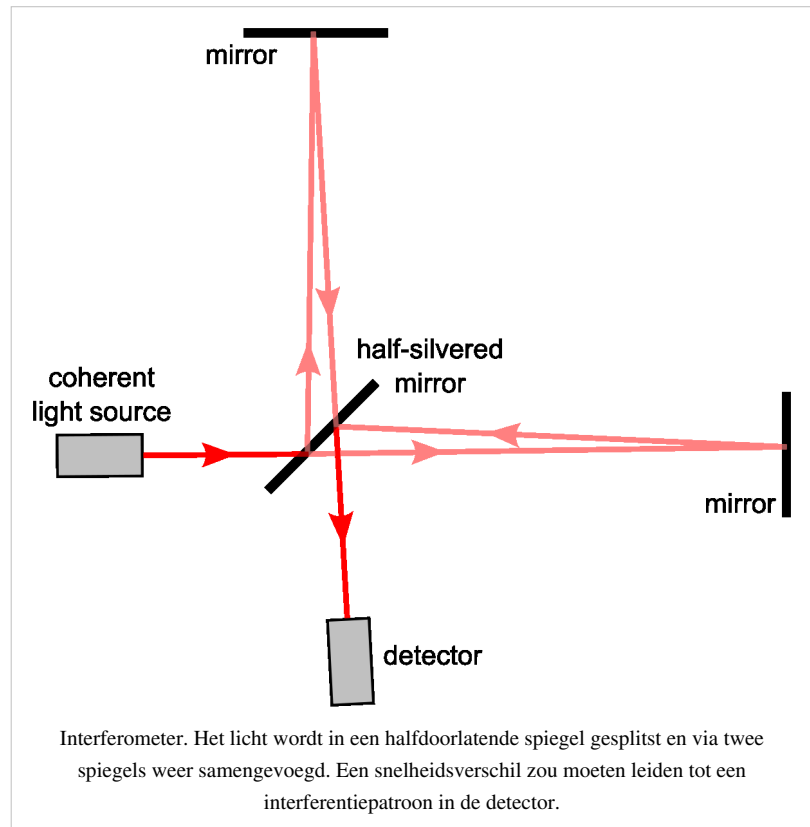
Michelson en Morley meenden de oplossing te kunnen vinden in de ether, het veronderstelde medium waardoor licht zich verplaatste. Als de ether een absoluut stilstaand medium was, kon men de beweging van de Aarde aantonen door de lichtsnelheid in verschillende richtingen te vergelijken.

Het experiment

Voor dit experiment ontwikkelde Michelson de (optische) interferometer. Een straal coherent, monochromatisch licht werd via een halfdoorlatende spiegel gesplitst in twee stralen die een rechte hoek met elkaar maakten. Als de stralen weer bij elkaar kwamen, ontstond er een interferentiepatroon. Als de Zon stilstond ten opzichte van de ether, zou de beweging van de Aarde zichtbaar zijn door een afwijkend interferentiepatroon als de positie van het apparaat werd veranderd.

Er werd inderdaad een verschil gezien, maar dat was minder dan verwacht en viel binnen de onnauwkeurigheid van het apparaat. Samen met Morley werd een nauwkeuriger interferometer gebouwd. Het resultaat bleef negatief.

De merkwaardige conclusie van het experiment was dat de lichtsnelheid in alle richtingen gelijk was. Dat kon betekenen dat de Aarde toch stilstond, maar die conclusie werd direct als ongerijmd verworpen. Het experiment leek mislukt te zijn, maar leverde in werkelijkheid een verrassend resultaat op: de conclusie was dat de ether niet bestond en dat de lichtsnelheid werkelijk onafhankelijk is van de beweging van de waarnemer.



Gevolgen

Het is één van de belangrijkste en beroemdste experimenten in de geschiedenis van de natuurkunde. Velen denken dat dit experiment mede aanleiding gaf tot de speciale relativiteitstheorie, maar in werkelijkheid was Albert Einstein zich niet bewust van dit experiment. Hij ontwierp de speciale relativiteit door gedachte-experimenten. Het experiment van Michelson-Morley bewees daarna dat Einstein gelijk had.

Het beroemdste mislukte experiment

De ironie wil dat het experiment, ondanks alle voorbereiding, resulteerde in een mislukking, tot heden het beroemdste mislukte experiment. In plaats van dat men inzicht kreeg in de eigenschappen van de ether, bleek uit niets dat de beweging van de Aarde een "etherwind" opleverde. Er werd wel een klein snelheidsverschil gemeten, maar dat was veel te klein om als bewijs van de ether te kunnen dienen. Bovendien was het verschil altijd even groot, onafhankelijk van het tijdstip van de dag of het jaargetijde, en bovendien was het verschil zo klein dat het binnen de

onnauwkeurigheden van de meetapparatuur viel, waaruit geconcludeerd werd dat het snelheidsverschil nul was. De apparatuur gedroeg zich alsof er helemaal geen etherwind was, alsof de Aarde stilstond.

Hoewel Michelson en Morley na hun eerste publicatie in 1887 zich gingen wijden aan andere experimenten, bleven ze ook op dit terrein actief. Er werden andere versies van het experiment uitgevoerd, met steeds hogere nauwkeurigheid. Kennedy en Illingsworth vervingen de spiegels door platen met een vertraging van een halve golflengte. Illingsworth vond geen veranderingen binnen $1/3000$ e van de golflengte en Kennedy niet binnen $1/15000$ e. Miller bouwde later een niet-magnetisch apparaat om magnetostrictie te vermijden, terwijl Michelson gebruik maakte van invar om thermische invloeden te vermijden. Anderen voerden experimenten uit met een hogere nauwkeurigheid, waarbij diverse neveneffecten werden vermeden. Het resultaat was steeds negatief.

Minkowski-diagram

Een **ruimtetijd**diagram illustreert de eigenschappen van ruimte en tijd uit de speciale relativiteitstheorie van Einstein. Een ruimtetijd diagram wordt ook wel een **Minkowski**diagram genoemd naar de bedenker Hermann Minkowski. Dit diagram stelt ons in staat bizarre effecten zoals tijddilatatie en lengtecontractie op een kwalitatieve manier te begrijpen, zonder formules.

Wij leven in ruimte en tijd: wij bevinden ons elk moment (tijd) op een bepaalde plaats (ruimte). In de speciale relativiteitstheorie worden ruimte en tijd niet meer los van elkaar gezien. De drie ruimtecoördinaten (lengte, breedte en hoogte) en de tijd (een coördinaat) vormen tezamen de vierdimensionale ruimtetijd. Een ruimtetijd diagram is een soort kaart waarop je kunt aflezen wat er gebeurt in onze wereld: de ruimtetijd.

De basis

Een punt in het ruimtetijd diagram geeft een gebeurtenis weer. Voor de eenvoud beperken we ons tot één ruimtedimensie. Voorwerpen bewegen hierbij dus alleen vooruit en achteruit. Het diagram is dan tweedimensionaal.

We beginnen met een horizontale ruimte-as en een verticale tijdas. De onderlinge schaal van de assen is op een specifieke manier gekozen. Relativistische effecten beginnen pas een rol van betekenis te spelen bij snelheden in de orde van de lichtsnelheid. Daarom vermenigvuldigen we alle tijdcoördinaten met de lichtsnelheid c . Waarbij geldt $c = 299.792.458$ m/s. Op de verticale as, zetten we dus niet de tijd t uit, maar de grootte ct . Als we de seconde als eenheid van tijd nemen, zetten we de afstand die het licht in één seconde aflegt ($299.792.458$ m) uit als eenheid langs de horizontale ruimte-as.

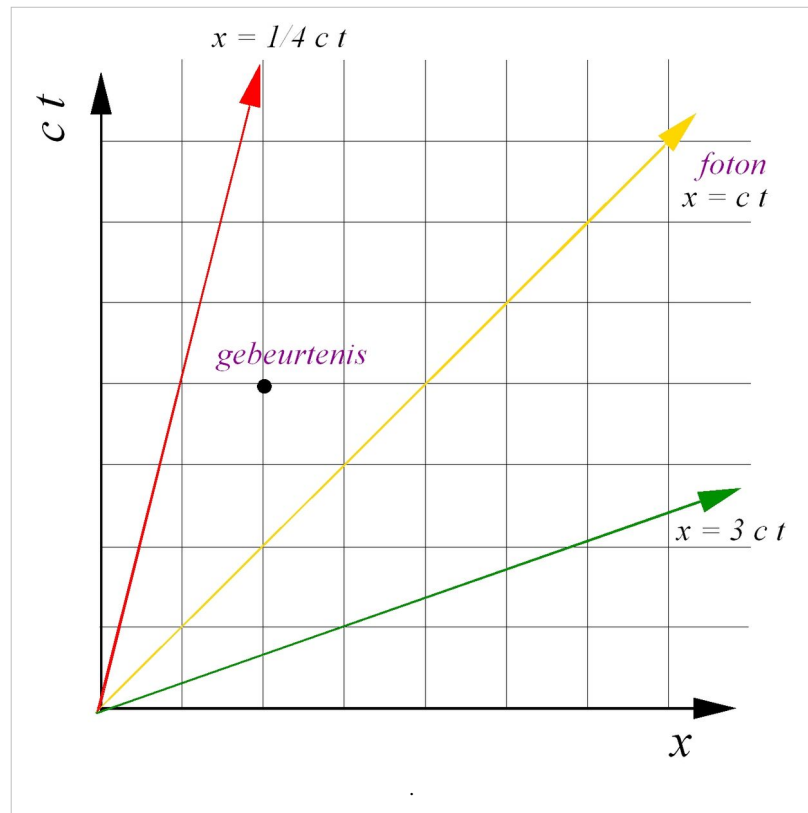
Door de eenheden zo te kiezen, hebben we zowel langs de verticale als de horizontale as een lengte-eenheid. Eén vierkant hokje heeft nu een zijde waarvan de lengte overeenkomt met de afstand die het licht in één seconde aflegt. Die afstand noemen we ook wel een lichtseconde (ls).

De wereldlijn van een foton/lichtflits, zoals de gele lijn in de figuur hiernaast, heeft dan een helling van 45° .

De rode lijn is bijvoorbeeld een ruimteschip dat beweegt met een kwart van de lichtsnelheid.

Verandering van inertiaalstelsel

Terwijl gebeurtenissen nog steeds door dezelfde punten worden aangegeven en de wereldlijnen dus ook niet veranderen (en die van fotonen dus nog steeds een helling hebben van 45°) kan men overgaan op een ander inertiaalstelsel door de tijdas met de klok mee te draaien en de ruimteas evenveel tegen de klok in of omgekeerd, over een hoek van minder dan 45 graden.^[1] De rode lijn is dan de tijdas in het inertiaalstelsel waarin het ruimteschip stilstaat. De groene lijn is een voorbeeld van een andere ruimteas.



Een lijn evenwijdig aan een tijdas verbindt gebeurtenissen op dezelfde ruimtelijke positie in het betreffende inertiaalstelsel. Een lijn evenwijdig aan een ruimteas verbindt gebeurtenissen die onderling in het betreffende inertiaalstelsel gelijktijdig zijn.

Stel dat A en B een constante snelheid hebben en elkaar ontmoeten in de oorsprong (ze verwijderen zich dus na de ontmoeting steeds verder van elkaar). Er is dan een symmetrische situatie. Als de beide wereldlijnen (de tijdassen van de beide stelsels) symmetrisch t.o.v. de verticale as getekend worden is er meetkundig ook symmetrie in het diagram.

Bij technisch correct werkende klokken geeft de klok van A de tijd in het inertiaalstelsel waarin A stilstaat aan, en de klok van B de tijd in het inertiaalstelsel waarin B stilstaat. Bij een signaal van A naar B met direct een signaal terug van B naar A, is op grond van symmetrie de tijd bij B op het moment dat het signaal daar aankomt en het antwoord verstuurd wordt het meetkundig gemiddelde van de tijd bij A op het moment dat het signaal uit A verstuurd wordt en de tijd bij A dat het antwoord aankomt.

Voorbeeld: B t.o.v. A een snelheid van 0,8 maal de lichtsnelheid en A verstuurt om 1 uur een signaal en na aankomst bij B wordt direct een antwoord verstuurd. Geredeneerd vanuit een stilstaande A is het signaal 4 uur onderweg (de afstand is 0,8 lichtuur, de relatieve snelheid waarmee het signaal B inhaalt is 0,2 maal de lichtsnelheid) en het antwoord ook 4 uur. Het antwoord komt dus om 9 uur aan. Op grond van de genoemde symmetrie moet de lokale tijd bij B bij aankomst van het signaal 3 uur zijn in plaats van 5 uur. Zo bekeken lijkt de klok bij B langzamer te lopen, maar alles geldt ook omgekeerd: geredeneerd vanuit een stilstaande B moet A het signaal om 1.40 uur verzonden hebben (toen hij op een afstand van $4/3$ lichtuur was) en komt het antwoord aan om 15 uur.

Een signaal dat volgens de lokale tijd bij de een 3 uur vóór de ontmoeting wordt verstuurd arriveert bij de ander volgens de lokale tijd 1 uur voor de ontmoeting. Hier geldt dus een factor $1/3$ i.p.v. 3.

Dienovereenkomstig toont een videobeeld (live, afgezien van de tijd dat het signaal onderweg is) van de een op het scherm van de ander de beelden eerst een factor 3 versneld en na passeren een factor 3 vertraagd.

Merk op dat bij constante snelheden de tijddilatatie dus niet zo ver gaat dat een signaal volgens de beide lokale tijden eerder aankomt dan het is verzonden. Dit is anders bij het verschijnsel van de tweelingparadox (geverifieerd in

diverse uitvoeringen van het Hafele–Keating experiment) waarbij waarnemers herenigen (en dus minstens één van beide geen constante snelheid heeft gehad) nadat de ene een grotere snelheid heeft gehad dan de andere, en de betreffende klokken dan een verschillende tijd aangeven. Bij een variërende snelheid is de lokale tijd niet zo gemakkelijk uit een diagram af te lezen.

Als voorbeeld nemen we weer aan dat B t.o.v. A een snelheid van 0,8 maal de lichtsnelheid heeft, en wel gedurende 5 jaar (in het inertiaalstelsel van A) nadat A en B ontmoetten, de afstand wordt dus 4 lichtjaar. Neem nu aan dat B vervolgens met dezelfde snelheid weer teruggaat. Voor B duurt de reis 6 jaar: 3 jaar heen en 3 jaar terug. B ziet dan 3 jaar lang een factor 3 vertraagde beelden van A (die dus 1 jaar A-tijd omvatten) en 3 jaar lang een factor 3 versnelde beelden van A (die dus 9 jaar A-tijd omvatten). Bij terugkomst is bij A 10 jaar verstreken en bij B 6 jaar.

Literatuur

- Bais, Sander. *De sublieme eenvoud van de relativiteit*, Amsterdam University Press. ISBN 9789053569924, 2007

Referenties

- [1] De schaal van deze schuine assen is groter dan van de horizontale en verticale as, dus 1 seconde op de tijdas en 1 lichtseconde op de ruimteas hebben een grotere lengte dan de zijde van een hokje.

Minkowski-ruimte

Speciale relativiteitstheorie
$E = m c^2$
(de massa-energie relatie)
Achtergrond
Lichtsnelheid · Lorentzinvariantie Inertiaalstelsel Wetten van Maxwell
Fundamentele begrippen
Lorentztransformatie · Ruimtetijd Viervector · Minkowski-ruimte Lengtecontractie · Tijddilatatie Gelijktijdigheid
Gevorderde onderwerpen
Massa-energie relatie Tweelingparadox EPR-paradox
Experimenten
Michelson-Morley-experiment Fizeau-experiment energieproductie bij kernreacties
Wetenschappers
Einstein · Maxwell · Minkowski Lorentz · Poincaré

In de natuurkunde en de wiskunde is de **Minkowski-ruimte** (of **Minkowski-ruimtetijd**) de ruimtetijd waarin Einsteins speciale relativiteitstheorie is geformuleerd. In deze context worden de drie gewone ruimte-dimensies gecombineerd met één enkele tijd-dimensie tot een vierdimensionale variëteit die de gehele ruimtetijd voorstelt. De Minkowski-ruimte is genoemd naar de Duitse wiskundige Hermann Minkowski.

Theoretische achtergrond

In de theoretische natuurkunde wordt de Minkowski-ruimte vaak vergeleken met de euclidische ruimte. Terwijl een euclidische ruimte alleen ruimtelijke dimensies kent, heeft een Minkowski-ruimte echter ook de tijd als een extra dimensie. Wat beide ruimtes met elkaar gemeenschappelijk hebben, is het feit dat beide *vlak* zijn. Meer expliciet:

- Binnen de grote familie van (mogelijk gekromde) oppervlakken, neemt de euclidische ruimte een bijzondere positie in omdat deze ruimte *vlak* is.
- Ook een ruimtetijd (= oppervlak + één tijddimensie) kan gekromd zijn. De Minkowski-ruimte is speciaal in de zin dat deze ruimte *vlak* is. Het is dus de meest eenvoudige ruimtetijd, en daarom het natuurlijke domein van de speciale relativiteitstheorie. De meer volledige beschrijving van de ruimtetijd waarin we leven, welke ook het effect van kromming beschrijft en dus een uitbreiding is van de speciale relativiteitstheorie, wordt beschreven in de algemene relativiteitstheorie.

Zoals bovenstaande uitleg duidelijk maakt, is een belangrijke eigenschap van een ruimte de vraag of deze al dan niet vlak is. Dit is nauw verbonden met de notie van *afstanden*,

Afstand in de Minkowski-ruimte

Om afstanden te beschrijven, merken we eerst op dat elke positie in een Minkowski-ruimte gegeven is door een positie-viervector (t_1, x_1, x_2, x_3) , welke zowel het tijdstip als een positie specificiert. (Men spreekt ook wel van een gebeurtenis, om het onderscheid met de gewoonlijke notie van positie te benadrukken.)

De afstand tussen twee gebeurtenissen in een Minkowski-ruimtetijd met positievectoren (t_1, x_1, x_2, x_3) en (t'_1, x'_1, x'_2, x'_3) is gegeven door

$$L^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2$$

waarbij $(\Delta t, \Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3) = (t_1 - t'_1, x_1 - x'_1, x_2 - x'_2, x_3 - x'_3)$, en c is de lichtsnelheid. Indien de posities (t_1, x_1, x_2, x_3) en (t'_1, x'_1, x'_2, x'_3) op hetzelfde tijdstip van de ruimtetijd vallen, is $t_1 = t'_1$, en reduceert L in bovenstaande uitdrukking tot de gewone euclidische afstand. Echter, als er ook een tijdsverschil is tussen de punten, is er ook een bijdrage van de eerste term in bovenstaande vergelijking. L^2 kan dan nul worden, of zelfs negatief.

Meer technisch, kan men de afstand tussen punten coderen in de metriek, gedefinieerd als de 4×4 -matrix

$$\eta = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Als we bovenstaande verschilvector kort noteren als (ct_1, x_1, x_2, x_3) kan bovenstaande afstand geschreven worden als

$$L^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 x^\mu x^\nu \eta_{\mu\nu} = x^\mu x^\nu \eta_{\mu\nu}.$$

De componenten van de metriek werden gelabeld met een rij-index μ en een kolom-index ν , en in de laatste stap werd overgegegaan naar de Einstein-sommatieconventie (sommatie over herhaalde indices wordt daarin verzwegen).

Opmerking: soms wordt de bovenstaande metriek met tegengestelde tekens gedefinieerd (of met extra factoren). Men dient bij het gebruiken van verschillende bronnen na te gaan welke tekenconventies daar gebruikt worden.

Ruimte-, licht- en tijdachtige intervallen

Stel nu dat een lichtpuls in de x_1 -richting beweegt, en dat deze vertrekt vanop de positie $(0, 0, 0, 0)$. Op een later tijdstip t is de positie van de lichtpuls dan $x = ct$ (herinner dat c de lichtsnelheid is). Op dat tweede moment is de ruimtetijdpositie dus gegeven door $(t, ct, 0, 0)$. De afstand tussen de eerste en tweede positie is dan

$$L^2 = -c^2 \Delta t^2 + \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 = -c^2 t^2 + (ct)^2 = 0$$

De Minkowski-afstand tussen twee punten op het pad van een lichtpuls is dus altijd nul. Vandaar dat men het volgende onderscheid maakt:

- Als de afstand tussen twee ruimtetijdposities positief is, zegt men dat deze ruimteachtig gescheiden zijn. Er kan geen causaal verband zijn tussen gebeurtenissen op beide ruimtetijdposities; het tijdsverschil is afhankelijk van het inertiaalstelsel positief, nul of negatief. De ruimtelijke afstand is het kleinst in het inertiaalstelsel waarin de ruimtetijdposities gelijktijdig zijn.
- Als de afstand tussen twee verschillende ruimtetijdposities nul is, zegt men dat deze lichtachtig gescheiden zijn. De ene ruimtetijdpositie is ondubbelzinnig na de andere, maar voor twee gegeven ruimtetijdposities kan door de keuze van het inertiaalstelsel het tijdsverschil (en dienovereenkomstig de ruimtelijke afstand) willekeurig klein gekozen worden.
- Als de afstand tussen twee ruimtetijdposities negatief is, zegt men dat deze tijdachtig gescheiden zijn. De ene ruimtetijdpositie is ondubbelzinnig na de andere. Het tijdsverschil is het kleinst in het inertiaalstelsel waarin de ruimteposities gelijk zijn (zie ook hieronder).

Zie ook de indeling plaatstijdposities t.o.v. de lichtkegel.

Relatie met eigentijd

De afstand die hierboven werd gedefinieerd is nauw gerelateerd aan de eigentijd van een waarnemer die zich met een constante snelheid tussen de posities (t_1, x_1, x_2, x_3) en (t'_1, x'_1, x'_2, x'_3) verplaatst: de klok van zo'n waarnemer gaat een tijd $\Delta\tau$ vooruit, waarbij

$$\Delta\tau = \sqrt{\frac{-L^2}{c^2}}$$

Aangezien een waarnemer altijd trager beweegt dan de lichtsnelheid, kan deze zich alleen over een tijdachtig interval verplaatsen. Voor zo'n interval is de Minkowski-afstand L^2 negatief, en is dus de bovenstaande uitdrukking voor de verstreken eigentijd een reëel getal. Het tijdsverschil tussen de twee ruimtetijdposities is het kleinst in het inertiaalstelsel van de genoemde waarnemer, het is dan de verstreken eigentijd van deze waarnemer.

Symmetrieën

De symmetriegroep van een euclidische ruimte is de euclidische groep. De symmetriegroep van de Minkowski-ruimte is de Poincaré-groep. Deze bestaat uit translatie en Lorentztransformaties, welke op hun beurt bestaan uit rotaties en zogeheten boosts.

Geschiedenis

De Minkowski-ruimte is genoemd naar de Duitse wiskundige Hermann Minkowski, die zich rond 1907 realiseerde dat de speciale relativiteitstheorie, die in 1905 was opgesteld door Albert Einstein, op elegante wijze kon worden beschreven door gebruik te maken van een vierdimensionale ruimtetijd, waar de ene dimensie van tijd gecombineerd wordt met de drie ruimtedimensies.

“De visie op ruimte en tijd die ik aan U wil voorleggen vindt zijn oorsprong in de experimentele natuurkunde en daarin schuilt ook zijn kracht. Het is een radicale visie. Van nu af aan zijn ruimte en tijd op zichzelf gedoemd om langzamerhand in de schaduwen te verdwijnen en zal slechts een soort

vereniging van de twee als een onafhankelijke realiteit voortleven. "-Hermann Minkowski, 1908

De weg voor de Minkowski-ruimte was eigenlijk reeds in de jaren negentig van de 19e eeuw gebaad door de ontwikkeling van de hyperbolische quaternionen. De Minkowski-ruimte kan als een wiskundige structuur worden gezien die bestaat uit de hyperbolische quaternionen minus het vermenigvuldigingsproduct, waardoor alleen een bilineaire vorm

$$\eta(p, q) = -\frac{pq^* + (pq^*)^*}{2}$$

overblijft, die door het hyperbolische quaternionenproduct pq^* wordt gegenereerd.

Externe link

- Animatievideo van de Minkowski-ruimte ^[1]

Referenties

[1] <http://www.youtube.com/watch?v=C2VMO7pcWhg>

Ontaarde materie

Gedegeneerde of ontaarde materie is materie die zodanig door de zwaartekracht wordt samengeperst dat de tegendruk van de materiedeeltjes, die wordt veroorzaakt door het uitsluitingsprincipe van Pauli, dominant wordt in de totale druk. Dit principe houdt in dat geen twee fermionen van hetzelfde type (twee elektronen, twee protonen, twee neutronen) dezelfde kwantumtoestand mogen bezetten. Gedegeneerde materie treffen we aan in metallisch waterstof, witte dwergen, de kern van reuzensterren (bijvoorbeeld de voorstadia van supernova's), neutronensterren en mogelijk ook in quarksterren.

Bij een witte dwerg wordt de tegendruk veroorzaakt door de elektronen (ook de atoomkernen kunnen ontaard raken, maar dat gebeurt pas bij veel hogere dichtheid). De dichtheid van elektron-gedegeneerde materie in witte dwergen kan oplopen tot meer dan een miljoen kg per kubieke centimeter.

Als de druk door de zwaartekracht hoger is dan de Chandrasekhar-limiet van 1,4 maal de massa van de zon worden de elektronen in de kern gedrukt, waarbij de elektronen samen met de protonen, neutronen vormen. Deze neutronen leveren door het uitsluitingsprincipe van Pauli wederom een tegendruk tegen de zwaartekracht. Deze vorm van gedegeneerde neutron-materie vinden we in neutronensterren. De massa bedraagt om en nabij een miljard ton per kubieke centimeter.

Indien de massa van een neutronenster de Oppenheimer-Volkoff limiet van ongeveer 3-5 zonnemassa's overschrijdt, is de tegendruk van de neutronen door het uitsluitingsprincipe van Pauli onvoldoende en wordt, afhankelijk van de massa, een quarkster of een zwart gat gevormd.

Relativistisch elektromagnetisme

Relativistisch elektromagnetisme is een moderne didactische benadering voor het ontwikkelen van elektromagnetische veldtheorie met behulp van elektrische velden en lorentztransformaties. Men gebruikt de wet van Coulomb, die uitgaat van actie op afstand maar eenvoudig te begrijpen is, en bestudeert deze in verschillende inertiaalstelsels. Hoewel dit veel kennis van de speciale relativiteitstheorie vergt (zelfs met een klassieke aanpak^[1]), is het soms mogelijk magnetische effecten te verklaren als gevolg van eenvoudige lorentzcontractie van ladingsdichtheid. Centraal staat dan de lorentzcontractiefactor: $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$. Deze benadering om elektromagnetisme te onderwijzen is onder andere beschreven in de Encyclopædia Britannica (1956) en de Feynman Lectures on Physics (1964) en biedt een voorbereiding voor elektromagnetische wetten zoals de wet van Biot-Savart, de wet van Ampère en de Maxwell-vergelijkingen.

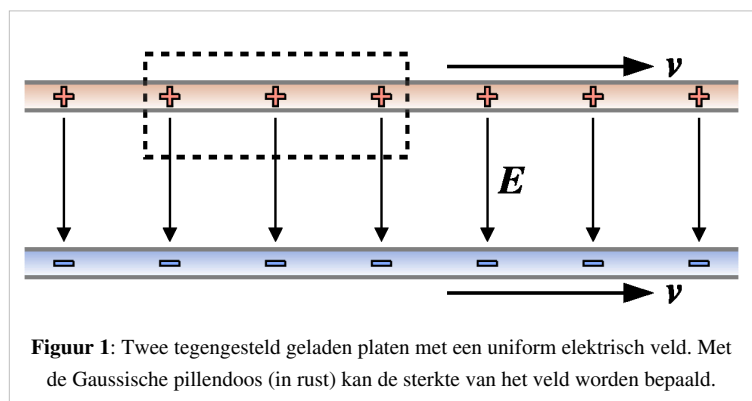
Achtergrond en uitgangspunten

De speciale relativiteitstheorie gaat over het formuleren van natuurwetten in verschillende inertiaalstelsels. Consequente toepassing van het relativiteitsprincipe leidt tot de lorentztransformatie. In eerste instantie beschrijft de hoe plaats en tijd moeten worden omgerekend tussen verschillende stelsels. Door beweging van deeltjes te beschrijven vindt men vervolgens de transformatie van onder andere massa, moment, energie en kracht. Ook bij elektrische en magnetische velden kan men zich afvragen hoe die worden geformuleerd in verschillende inertiaalstelsels. In een bepaald stelsel kan alleen sprake zijn van elektrische kracht (als de ladingen in rust zijn). In een ander stelsel (dat beweegt ten opzichte van het eerste) zullen ook magnetische krachten een rol spelen. Het moet daarom mogelijk zijn om uit te gaan van elektrische kracht en het bestaan van magnetische kracht aan te tonen of zelfs te beschrijven. Dit is het doel van **relativistisch elektromagnetisme**.

Uitgangspunt voor de relativistische beschrijving van elektromagnetisme is dat wanneer de lading die het veld veroorzaakt in rust is, er alleen sprake is van een elektrisch veld zoals beschreven door de wet van Coulomb. Ook het feit dat deze uitgaat van actie op afstand vormt dan geen bezwaar. Door vanuit het oorspronkelijke stelsel te transformeren naar een stelsel waarin dit het geval is, kan de elektrische kracht berekend worden. Die transformeert men vervolgens terug naar het oorspronkelijke stelsel. Doet men dit met een testlading die in rust is in het oorspronkelijke stelsel, dan vindt men het elektrisch veld. Effecten die ontstaan wanneer de testlading beweegt duiden op het bestaan van een magnetisch veld. Wanneer de lading die het veld veroorzaakt, bestaat uit verschillende delen die onderling bewegen, onderzoekt men eerst elk deel apart en combineert het resultaat.

Transformatie van elektrische velden: vereenvoudigde analyse

Laten wij eerste eens kijken naar het elektrisch veld van een bewegende ladingsverdeling. Zo'n veld kan worden gevormd tussen de geladen parallelle platen van een plaatcondensator. Het veld is dan uniform (met verwaarlozing van randeffecten) tussen de platen en nul daarbuiten. Veronderstel nu dat het geheel beweegt in een richting evenwijdig aan de platen. We gaan nu niet naar het stelsel waarin de lading in rust is, maar constateren



direct dat de platen korter worden met de bovengenoemde lorentzcontractiefactor ten opzichte van hun ruststelsel. De afstand tussen de platen zal niet veranderen. Aangezien de totale lading op iedere plaat onafhankelijk is van het

stelsel waarin het wordt gemeten, neemt de ladingsdichtheid op de bewegende platen toe en dus ook het veld:

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Wanneer de veroorzakende lading beweegt in een richting loodrecht op de platen, zal de afmeting van de platen niet veranderen, maar de afstand tussen de platen wel. Dit laatste heeft echter geen effect op de grootte van het elektrisch veld. De bovengenoemde analyse is zeer eenvoudig, maar de resultaten blijken algemeen geldig: een elektrisch veld neemt toe met de contractiefactor wanneer de veroorzakende ladingsverdeling beweegt in een richting loodrecht op het veld en verandert niet wanneer de beweging evenwijdig is aan het veld.

Oorsprong van magnetische kracht en magnetische velden

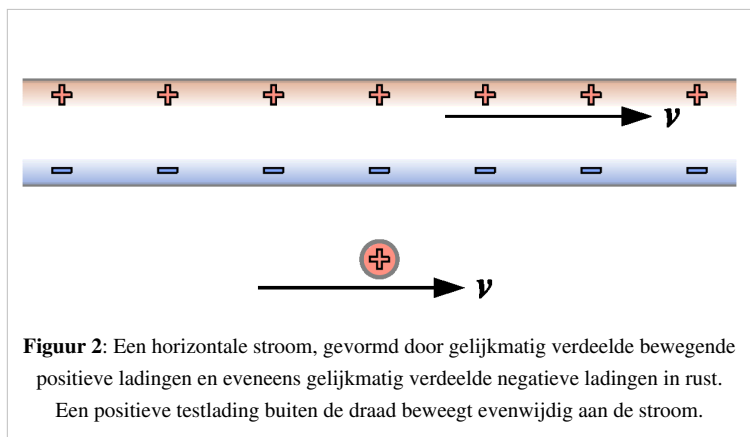
Laten we nu kijken naar een eenvoudig model voor elektrische stroom door een draad. Die wordt gevormd door gelijkmatig verdeelde positieve ladingen die naar rechts bewegen met evenveel negatieve ladingen in rust. Een positieve testlading, buiten de draad, beweegt evenwijdig aan de draad. Als verdere vereenvoudiging is de snelheid van de testlading (v) gelijk gesteld aan die van de bewegende ladingen in de draad.

In het laboratoriumstelsel beweegt zowel de testlading als de lading in de draad. Daardoor is de kracht op de testlading niet zomaar te bepalen. Omdat de ladingsdichtheid van positieve en negatieve ladingen gelijk is, is er geen netto elektrostatiche kracht. Maar, uit de praktijk weten we dat de testlading wel een magnetische kracht zal voelen. Laten wij nu zien of we dit kunnen aantonen met de juiste transformatie.

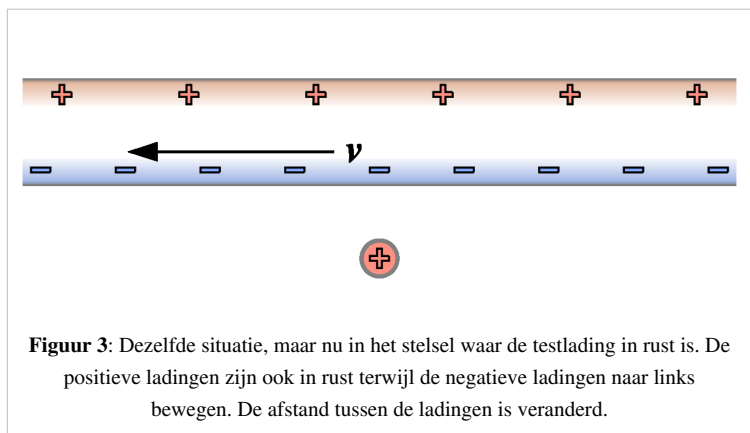
Beschouwen we daarom een ander stelsel waarin de positieve lading in rust is. Omdat

ook de testlading in rust is, is er alleen sprake van elektrostatiche krachten. In dit stelsel bewegen de negatieve ladingen naar links. Net als in het voorgaande voorbeeld is de afstand tussen deze ladingen kleiner dan in het laboratoriumstelsel. Voor de positieve ladingen geldt het omgekeerde. Die zijn na de transformatie in rust terwijl de afstand groter is dan in het laboratoriumstelsel. Het netto effect is dat de draad een negatieve lading draagt. Daardoor kunnen we constateren dat de testlading een kracht ondervindt in de richting van de draad.

In het bewegende stelsel zal de testlading in de richting van de draad bewegen. In het laboratoriumstelsel zal dit ook gebeuren. Dit is precies wat men ook door het magnetisch veld zou verwachten (twee evenwijdige stromen trekken elkaar aan). Het is bijzonder dat dit effect, dat met behulp van de relativiteitstheorie bereikt is, ook echt waargenomen wordt. De snelheid is namelijk vele malen lager dan de lichtsnelheid: in typische gevallen is de gemiddelde snelheid van de elektronen van de orde van 1 mm/s of nog lager! Dat de magnetische kracht toch kan worden waargenomen komt doordat er een geleider zeer veel positieve en negatieve lading bevat. Zelfs een kleine verandering van de ladingsdichtheid heeft daardoor al een meetbaar effect.



Figuur 2: Een horizontale stroom, gevormd door gelijkmatig verdeelde bewegende positieve ladingen en eveneens gelijkmatig verdeelde negatieve ladingen in rust. Een positieve testlading buiten de draad beweegt evenwijdig aan de stroom.



Figuur 3: Dezelfde situatie, maar nu in het stelsel waar de testlading in rust is. De positieve ladingen zijn ook in rust terwijl de negatieve ladingen naar links bewegen. De afstand tussen de ladingen is veranderd.

Grootte van de magnetische kracht

Nu we hebben aangetoond dat Lorentzcontractie van de ladingsdichtheid een kracht geeft in de zelfde richting als wordt verwacht voor de magnetische kracht, laten we dan ook eens kijken naar de grootte van die kracht. Stel om te beginnen de ladingsdichtheid van zowel de positieve als de negatieve ladingen in het laboratoriumstelsel gelijk aan σ . In het bewegende stelsel is de dichtheid van de negatieve ladingen is dan gelijk aan:

$$\sigma_+ = \sigma \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \approx \sigma \left(1 + \frac{1}{2}v^2/c^2\right)$$

En de dichtheid van de positieve ladingen:

$$\sigma_- = \sigma \sqrt{1 - v^2/c^2} \approx \sigma \left(1 - \frac{1}{2}v^2/c^2\right)$$

De netto ladingsdichtheid is:

$$\sigma_{netto} = \sigma_+ - \sigma_- \approx -\sigma v^2/c^2$$

Met behulp van de wet van Coulomb en integratie over een oneindig lange draad met deze ladingsdichtheid vinden we ten slotte de grootte van de kracht op de testlading (q):

$$F = Eq = \frac{\sigma_{netto}}{2\pi\epsilon_0 r} q = \frac{\sigma q v^2}{2\pi\epsilon_0 r c^2}$$

Daarin is E het elektrisch veld, r de afstand van de testlading tot de draad en ϵ_0 de elektrische veldconstante.

Laten we dan nu eens kijken hoe groot de kracht is die we verwachten van het magnetisch veld. Met de wet van Biot-Savart vinden we het magnetisch veld (B) van een oneindig lange stroomdraad. Stellen we de stroomsterkte (I) gelijk aan $I = \sigma v$, dan kunnen we magnetische Lorentzkracht op de testlading berekenen:

$$F = Bqv = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} qv = \frac{\mu_0 \sigma v}{2\pi r} qv = \frac{\mu_0 \sigma q v^2}{2\pi r}$$

Daarin is μ_0 de magnetische veldconstante. Aangezien tenslotte uit de wetten van Maxwell volgt dat $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ kunnen we constateren dat de twee uitdrukkingen voor de kracht gelijk zijn. De kracht waarvan we het bestaan in het vorige onderdeel hebben aangetoond is dus inderdaad de magnetische kracht die we al kennen uit de praktijk. We zien dan ook dat het niet per se nodig is rekening te houden met een magnetisch veld. Wanneer alleen de wet van Coulomb gebruikt wordt en verder correct gebruikgemaakt wordt van de Lorentztransformaties komen we ook tot een juiste beschrijving van de kracht. Maar, beschrijving met behulp van een magnetisch veld is wel handig zodat we niet steeds deze zeer ingewikkelde transformaties hoeven uit te voeren.

[1] <http://www.cse.secs.oakland.edu/haskell/SpecialRelativity.htm>

Relativiteitsprincipe

In de natuurkunde wordt met het **relativiteitsprincipe** bedoeld dat de vergelijkingen die de natuurkundige *wetten* weergeven gelijk moeten zijn in elk gelijkwaardig referentiestelsel.

Bijvoorbeeld de wetten van de mechanica zijn hetzelfde voor waarnemers in twee stelsels die eenparig (een beweging die geen versnelling of vertraging kent) ten opzichte van elkaar bewegen. Zulke stelsels noemt men inertiaalstelsels. Anders gezegd: het is voor diezelfde twee waarnemers onmogelijk om aan de hand van de natuurwetten te bepalen wie van beiden een absolute beweging uitvoert of mogelijk stilstaat. Dit heeft als direct gevolg dat er alleen relatieve en geen absolute snelheden bestaan - vandaar de naam *relativiteitsprincipe*.

Galilei

Dit idee werd het eerst verwoord door Galileo Galilei. Volgens hem zijn coördinatenstelsels die eenparig ten opzichte van elkaar bewegen, als volgt gerelateerd. Stel dat ten opzichte van het stelsel S de snelheid van een ander stelsel S' gelijk is aan \mathbf{v} , en dat de nulpunten van een lengtemaat in beide stelsels op tijdstip $t = 0$ samenvallen. Als we posities in S met \mathbf{r} aanduiden en in S' met \mathbf{r}' , geldt na verloop van een tijd t :

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} - \mathbf{v}t$$

De klassieke mechanica volgens de wetten van Newton nam dit relativiteitsprincipe over. Het was de grondslag voor de relativiteitstheorie.

Gelijkwaardigheid

Het idee van *gelijkwaardigheid* van waarnemingen op verschillende plaatsen en - wellicht - door verschillende waarnemers is belangrijk in de wetenschap. Een natuurwet wordt geacht te gelden in elke tijd en op elke plaats. Wetenschappelijk onderzoek moet hetzelfde resultaat te zien geven, ongeacht wie het onderzoek uitvoert. Het is de zoektocht naar onafhankelijkheid van gezichtspunt en reproduceerbaarheid die aan de basis ligt van alle wetenschappelijk onderzoek.

Stelling van Noether

Elk relativiteitsprincipe schrijft een symmetrie voor in natuurwetten: elke wet moet hetzelfde zijn voor ongeacht welke waarnemer. Volgens een diepliggend theoretisch resultaat met de naam stelling van Noether leidt elke symmetrie in de natuurwetten tot een behoudswet. Als twee waarnemers bijvoorbeeld hetzelfde proces bestuderen op verschillende momenten in de tijd dan leidt dit tot een behoudswet van energie. Zo bezien zijn relativiteitsprincipes niet slechts uitspraken over hoe wetenschappers hun wetten moeten formuleren, maar ze geven aantoonbare voorspellingen over hoe de natuur zich gedraagt.

Relativiteitstheorie

Beluister

Met **relativiteitstheorie** worden in de natuurkunde twee theorieën van Albert Einstein aangeduid, namelijk:

1. de speciale relativiteitstheorie,
2. de algemene relativiteitstheorie.

Het centrale idee van relativiteitstheorie is dat de wetten van de mechanica, of de natuurkunde in het algemeen, niet afhankelijk mogen zijn van de snelheid die een waarnemer heeft ten opzichte van andere waarnemers. Galileo Galilei had rond 1600 al een visie op dit principe. Eeuwen later werden de speciale en de algemene relativiteitstheorie ontwikkeld.



Relativiteitstheorie van Galilei

De relativiteitstheorie van Galilei gaat uit van het volgende principe: De wetten van de mechanica zijn dezelfde voor waarnemers in twee stelsels die eenparig (een beweging die geen versnelling of vertraging kent) ten opzichte van elkaar bewegen. Zulke stelsels noemt men inertiaalstelsels. Anders gezegd: het is voor diezelfde twee waarnemers onmogelijk om aan de hand van de wetten van de mechanica te bepalen wie van beiden een absolute beweging uitvoert of mogelijk stilstaat. Dit heeft als direct gevolg dat er alleen relatieve en geen absolute snelheden bestaan – vandaar de naam *relativiteitsprincipe*.

In de relativiteitstheorie van Galilei zijn coördinatenstelsels die eenparig ten opzichte van elkaar bewegen, als volgt gerelateerd. Stel dat ten opzichte van het stelsel S de snelheid van een ander stelsel S' gelijk is aan \mathbf{v} , en dat de nulpunten van beide stelsels op tijdstip $t = 0$ samenvallen. Als we posities in S met \mathbf{r} aanduiden en in S' met \mathbf{r}' , geldt na verloop van een tijd t :

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} - \mathbf{v}t$$

De klassieke mechanica volgens de wetten van Newton nam dit relativiteitsprincipe over van Galileo Galilei.

Speciale relativiteitstheorie

► *Zie speciale relativiteitstheorie voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

De speciale relativiteitstheorie werd ontwikkeld in 1905 door Albert Einstein. Deze theorie gaat uit van de volgende twee postulaten:

- De wetten van de natuurkunde (inclusief die van de elektrodynamica) zijn dezelfde voor waarnemers in inertiaalstelsels die eenparig ten opzichte van elkaar bewegen.
- De lichtsnelheid in vacuüm is een universele constante, oftewel: waarnemers in inertiaalstelsels meten voor de lichtsnelheid in vacuüm altijd 299.792.458 m/s, onafhankelijk van hun onderlinge (relatieve) beweging.

Het eerste postulaat leunt in feite dicht aan bij het basisidee van relativiteitstheorie van Galilei. Het tweede postulaat was (ten tijde van Einstein) een geheel nieuw principe, met (ondanks zijn formele eenvoud) bijzonder verreikende gevolgen. Om deze twee basisideeën met elkaar te verzoenen, zijn er speciale transformaties, de zgn. Lorentztransformaties, nodig om plaats en tijd van de ene waarnemer om te rekenen in plaats en tijd van de andere.

Hieruit volgt dat plaats en tijd met elkaar verbonden zijn. Evenzo zijn elektrische en magnetische velden (**E** en **B**) voor verschillende waarnemers in elkaar om te rekenen met Lorentztransformaties.

Het artikel van Einstein verscheen in 1905 onder de titel *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (over de elektrodynamica van bewegende lichamen). De theorie heeft als postulaat dat de lichtsnelheid in vacuüm hetzelfde is voor alle waarnemers. Dit was in overeenstemming met de resultaten van het experiment van Michelson en Morley, waar de wetenschap tot op dat moment niet goed raad mee wist. In deze experimenten was aangetoond dat er geen absoluut stilstaand medium, de ether, bestaat, dat als drager van lichtgolven zou fungeren.

De speciale relativiteitstheorie is ook volledig in overeenstemming met de Wetten van Maxwell voor het elektromagnetisme. Magnetisme is het relativistisch effect van elektriciteit. Stel dat een waarnemer een stilstaande elektrische lading ziet en dus een elektrisch veld. Een andere waarnemer in eenparige beweging ten opzichte van de eerste ziet dan een bewegende lading, dus een elektrische stroom, dus een magnetisch veld.

Uit de speciale relativiteit volgt ook Einsteins beroemde formule $E = mc^2$, die de gelijkwaardigheid van massa en energie uitdrukt. De theorie drukt ook uit dat ruimte en tijd verschijningen van dezelfde ruimte-tijd met vier dimensies zijn: de tijd speelt de rol van de vierde dimensie. Gelijktijdigheid is relatief: twee verschijnselen die zich voor een waarnemer gelijktijdig voordoen, kunnen zich voor een andere waarnemer op verschillende tijden voordoen. De theorie voorspelt dat de lengte verkort, de zogenaamde lengtecontractie of Lorentzcontractie, en de tijd trager loopt, de zogenaamde tijddilatatie, volgens de Lorentzfactor, naarmate de snelheid de lichtsnelheid nadert. Dit is onder meer in synchrotrons aangetoond en ook met muonen uit kosmische straling. Dit opent de principiële mogelijkheid tot tijdreizen, meer bepaald naar de toekomst. Zie hiervoor de tweelingparadox. De lichtsnelheid is de hoogst mogelijke snelheid: deeltjes die sneller dan licht zouden bewegen, tachyonen, zouden allerlei paradoxen veroorzaken.

Algemene relativiteitstheorie

➤ *Zie algemene relativiteitstheorie voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

De algemene relativiteitstheorie werd voorgesteld door Albert Einstein in een serie lezingen voor de Pruisische Academie van Wetenschappen in 1915.

Deze theorie vertrekt van het postulaat, dat waarnemers die zich in rust in een gelijkmatig zwaartekrachtsveld bevinden gelijkwaardig zijn met andere waarnemers die een constante (uniforme) versnelling ondervinden.

Deze veralgemening van het relativiteitsprincipe gaat samen met een nieuwe theorie van de zwaartekracht. In deze theorie wordt zwaartekracht niet langer als een kracht gezien zoals dat bij de Wetten van Newton het geval was, maar als een meetkundige eigenschap van de ruimte zelf. Een massa trekt de ruimte rondom zich krom, waardoor het lijkt alsof de massa andere massa's aantrekt. Volgens Newton is de zwaartekracht sneller dan het licht. Als bijvoorbeeld de maan opeens zou verdwijnen, zou je eerst zien dat de getijden zich terugtrokken en dan pas dat de maanschijf van de hemel verdween.

Einstein voorspelde zo de afbuiging van licht van een ster door de zon. Arthur Eddington nam dit waar bij de zonsverduistering op het eiland Principe op 29 mei 1919. Hoewel fotonen geen rustmassa bezitten, zijn zij volgens de relatie $E = hv$ van Max Planck een vorm van energie. Wegens $E = mc^2$ zijn energie en massa equivalent en trekt het zwaartekrachtsveld van de zon licht aan. Hij verklaarde zo ook de baan van de planeet Mercurius, die geen ellips beschrijft zoals de Wetten van Kepler aangeven, maar een rozet. Hij voorspelde ook dat hoger staande klokken sneller lopen, wat met atoomklokken inderdaad is aangetoond.

Ruimtetijd

Ruimtetijd of **tijdruimte** is een begrip uit de theoretische natuurkunde dat de vier dimensies van ons universum geïntegreerd in één model beschrijft:

- 3 dimensies in ruimte (lengte, breedte, hoogte)
- 1 dimensie in tijd (duur)

Deze verenigde visie vloeit voort uit de relativiteitstheorie, die stelt dat ruimte en tijd niet los van elkaar staan, maar met elkaar verweven zijn.

Ruimtetijd en de speciale relativiteitstheorie

Albert Einstein stelde in zijn speciale relativiteitstheorie dat het niet mogelijk is over ruimte en tijd als twee afzonderlijke entiteiten te spreken, maar dat er slechts één entiteit bestaat namelijk de ruimtetijd, die in feite alle gebeurtenissen in het verleden, heden en toekomst in ons heelal bevat. De tijd is daarbij een dimensie net als de andere, die echter op menselijke schaal anders wordt ervaren. De vier dimensies worden ook in dezelfde eenheid gemeten: door de vaststaande lichtsnelheid komt 299 792 458 meter overeen met 1 seconde.

Deze visie wijkt af van die van Newton, waarin ruimte en tijd elk als absoluut werden gezien. Er is nog wel iets van in terug te vinden uit de theorieën van Leibniz en Ernst Mach, volgens welke ruimte niet absoluut is en (al dan niet versnelde) bewegingen relatief zijn.

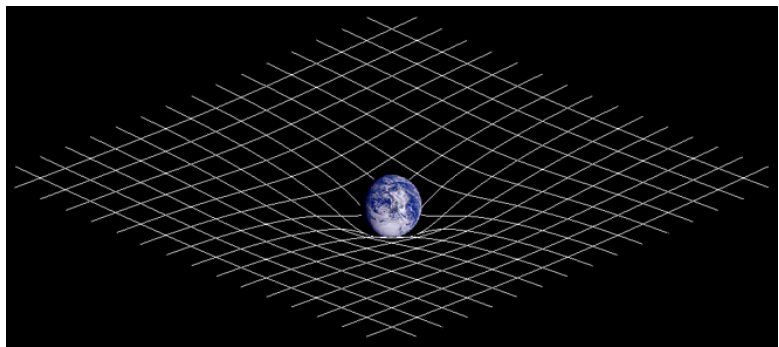
Krommingen in de ruimtetijd

Volgens de veldvergelijkingen van Einstein beschrijft een voorwerp dat met constante snelheid door de ruimtetijd beweegt een rechte lijn, maar wanneer het versnelt legt het een kromme baan af door de ruimtetijd. De ruimtetijd wordt ook gekromd door de in het heelal aanwezige materie en energie, hoofdzakelijk in de vorm van sterren en planeten. Hieruit volgt dat

1. snelheid in feite altijd relatief is.
2. zwaartekracht en versnelling op hetzelfde neerkomen, namelijk op krommingen in de ruimtetijd, het zogeheten equivalentieprincipe.

Een voorwerp dat versnelt levert altijd iets van zijn massa en zijn beweging door de tijd in, zodat de som van deze waarden ofwel zijn plaats in de ruimtetijd onder alle omstandigheden gelijk blijft.

Doordat licht, dat vermoedelijk geen enkele massa bezit, met de grootst mogelijke snelheid door de ruimtetijd beweegt, is het onmogelijk om sneller dan het licht te reizen. (Om soortgelijke redenen is ook de doorsnede van het volledige heelal vermoedelijk veel groter dan 13,7 miljard lichtjaar, een waarde die alleen is gebaseerd op de afstand tot de verst waarneembare sterrenstelsels en de geschatte leeftijd van het heelal).



Een tweedimensionale analogie van de ruimtetijd-distortie. Materie verandert de meetkunde van de ruimtetijd, waarbij de (gekromde) meetkunde wordt geïnterpreteerd als zwaartekracht. De witte lijnen geven niet de kromming van de ruimte weer, maar laten in plaats daarvan het coördinatensysteem zien dat opgelegd wordt aan de gekromde ruimtetijd. In een vlakke ruimtetijd zou dit coördinatensysteem uit een regelmatig, rechtlijnig rooster bestaan.

Ruimtetijd in de snaartheorie

De snaartheorie is een nieuw en speculatief geheel van wiskundig-mathematisch-fysische theorieën dat een mogelijke richting aangeeft voor een unificatie van de bestaande kwantumveldentheorieën en algemene relativiteitstheorie, maar alleen wiskundig consistent is voor specifieke aantallen ruimte-tijddimensies: 10, 11 of 26. Deze andere dimensies zijn dan niet waar te nemen doordat ze 'opgerold' zouden zitten in de kleinste deeltjes materie.

Historische oorsprong

Niet-wiskundige noties van een geünificeerde ruimtetijd

Philo merkte op dat tijd een resultaat is van de ruimte (heelal/wereld) en dat God de ruimte schiep, wat erin resulteerde dat gelijktijdig of onmiddellijk daarna de tijd ook ontstond.^[1]

De Inca's beschouwden ruimte en tijd als een enkel concept dat zij *pacha* noemden.^{[2][3][4]} De volkeren van de Andes hebben dit begrip tot nu in ere gehouden; het woord *pacha* komt nog steeds in de talen, Quecha en Aymara voor.^[5]

Het idee van een verenigde ruimtetijd vindt men bij Edgar Allan Poe in zijn essay over de kosmologie met de titel *Eureka* (1848). Poe schreef dat "Ruimte en duur één zijn." In 1895 schreef H.G. Wells in zijn roman, *The Time Machine*, "Er is geen verschil tussen de tijd en een van de drie dimensies van de ruimte, behalve dat ons bewustzijn zich langs de tijd beweegt."

Wiskundige concepten

De eerste verwijzing naar ruimtetijd als een wiskundig concept kwam in 1754 van Jean le Rond d'Alembert in zijn artikel *Dimension* in de Encyclopedie. Een andere vroege onderneming was die van Joseph-Louis Lagrange in zijn *Theorie van de analytische functies* (1797, 1813). Hij zei: "Men kan de mechanica zien als een meetkunde van vier dimensies en de mechanische analyse als een uitbreiding van de meetkundige analyse".^[6]

Na de ontdekking van quaternionen^[7] was William Rowan Hamiltons commentaar: "Van de tijd zegt men dat deze slechts één dimensie heeft, en dat de ruimte drie dimensies heeft. ... De wiskundige quaternion neemt deel in beide elementen; in technische taal kan worden gezegd dat de quaternion 'tijd plus ruimte' of 'ruimte plus tijd' is: en in deze zin heeft het, of impliceert het op zijn minst een verwijzing naar vier dimensies. En hoe "the One of Time, of Space the Three, Might in de Chain of Symbols girdled be." Meer dan een halve eeuw vóór de formele relativiteitstheorie speelden Hamiltons biquaternionen, die voldoende algebraïsche eigenschappen hebben om de ruimtetijd en haar symmetrie te modelleren, al een rol. William Kingdon Clifford merkte bijvoorbeeld de relevantie ervan op.

Een andere belangrijke aanloop naar de ruimtetijd was het werk van James Clerk Maxwell, die partiële differentiaalvergelijkingen gebruikte om de elektrodynamica met vier parameters te ontwikkelen. Lorentz ontdekte in de late 19 eeuw enige invarianties in de wetten van Maxwell. Deze invarianties lagen aan de basis van Einsteins speciale relativiteitstheorie. Fictie-auteurs speelden, zoals hierboven reeds vermeld, ook een rol. De tijd en de ruimte zijn altijd gemeten met behulp van reële getallen, en de suggestie dat de dimensies van ruimte en tijd vergelijkbaar zijn, zou opgeworpen kunnen zijn door de eerste mensen die de natuurkunde geformaliseerd hebben. Uiteindelijk zouden de tegenstellingen tussen de wetten van Maxwell en de Galileaanse relativiteit tot uiting komen met de realisatie van het belang van de eindigheid van de lichtsnelheid.

Hoewel ruimtetijd kan worden gezien als een gevolg van Albert Einsteins theorie van de speciale relativiteitstheorie uit 1905 werd de ruimtetijd voor het eerst expliciet wiskundig voorgesteld door een van zijn leraren, de wiskundige Hermann Minkowski, die in een essay uit 1908^[8] voortbouwde op en het werk van Einstein uitbreidde. Zijn concept van de Minkowski-ruimte is de eerste behandeling van ruimte en tijd als twee aspecten van een geünificeerd geheel, de essentie van de speciale relativiteitstheorie. Het idee van de Minkowski-ruimte heeft er ook toe geleid dat de speciale relativiteitstheorie op een meer meetkundige manier werd bekeken, dit meetkundig gezichtspunt van de

ruimtetijd was ook belangrijk in de algemene relativiteitstheorie. (Voor een Engelse vertaling van Minkowski's artikel, zie Lorentz et al. 1952) De dertiende editie (1926) van de Encyclopædia Britannica bevatte een artikel van Einstein met de titel "Space-Time".^[9]

Basisbegrippen

Ruimtetijden zijn de arena's, waarin alle natuurkundige gebeurtenissen plaatsvinden - een gebeurtenis is een punt in de ruimtetijd, dat wordt gespecificeerd door tijd en plaats. De beweging van planeten rondom de zon kan bijvoorbeeld worden beschreven in een bepaald type ruimtetijd, net zoals de beweging van het licht rondom een roterende ster in een ander type van de ruimtetijd kan worden beschreven. De basiselementen van de ruimtetijd zijn gebeurtenissen. In elke gegeven ruimtetijd is een gebeurtenis een unieke positie op een uniek tijdstip. Omdat gebeurtenissen ruimtetijdpunten zijn, is (x, y, z, t) , de locatie van een elementair (puntvormig) deeltje op een bepaald tijdstip, in de klassieke relativistische natuurkunde een voorbeeld van een gebeurtenis. Een ruimtetijd kan op dezelfde manier, zoals een lijn de vereniging van al haar punten is, als de vereniging van alle gebeurtenissen worden gezien, formeel georganiseerd in een variëteit, een ruimte die op kleine schalen kan worden beschreven door gebruik te maken van coördinatensystemen.

Een ruimtetijd is onafhankelijk van enige waarnemer.^[10] In het beschrijven van natuurkundige fenomenen (die zich op bepaalde momenten van de tijd in een bepaalde gebied van de ruimte voordoen) kiest iedere waarnemer een hem goed uitkomend metrisch assenstelsel. Gebeurtenissen worden gespecificeerd door vier reële getallen in enig coördinatenstelsel. De trajecten van de elementaire (puntgelijke) deeltjes door ruimte en tijd zijn dus een continuüm van gebeurtenissen, die de wereldlijn van het deeltje worden genoemd. Uitgebreide of samengestelde objecten (die uit vele elementaire deeltjes bestaat) zijn dus een vereniging van vele, op grond van hun interacties in de ruimtetijd in elkaar vervlochten wereldlijnen tot een "wereldvlechtwerk" (wat een fascinerend verband met de mythe van de Schikgodinnen toelaat).

In de natuurkunde is het echter gebruikelijk om een uitgebreid object als een "deeltje" of "veld" te behandelen met op elk gegeven moment zijn eigen unieke (bijv. puntmassa) positie, zodat de wereldlijn van een deeltje of lichtstraal het pad is, dat dit deeltje of lichtstraal in de ruimtetijd volgt en dit pad vertegenwoordigt de geschiedenis van het deeltje of de lichtstraal. De wereldlijn van de baan van de aarde wordt in een dergelijke beschrijving afgebeeld in twee ruimtelijke dimensies x en y (het vlak van de baan van aarde) en één tijdsdimensie orthogonaal op x en y . Op zich wordt de baan van de Aarde door een ellips in de ruimte beschreven, haar wereldlijn is echter een helix in de ruimtetijd.

De unificatie van ruimte en tijd wordt geïllustreerd door de gangbare praktijk van de selectie van een metriek (de maat die het interval tussen twee gebeurtenissen in de ruimtetijd specificeert), zodanig dat alle vier dimensies in termen van eenheden van afstand worden gemeten: een gebeurtenis weergevend als $(x_0, x_1, x_2, x_3) = (ct, x, y, z)$ (in de Lorentz-metriek) of $(x_1, x_2, x_3, x_4) = (x, y, z, ict)$ (in de originele Minkowski-metriek), waar c de lichtsnelheid is. De metrische beschrijvingen van de Minkowski-ruimte en ruimteachtige, lichtachtige en tijdachtige intervallen hieronder volgen deze conventie, net zoals de conventionele formuleringen van de Lorentz-transformatie.

Voetnoten

- [1] (en) The Works of Philo (De werken van Philo), door C.D. Yonge in het Engels vertaald, Hendrickson Publishers, 1993, ISBN 0-943575-93-1, Over de creatie (26-30), Over de onveranderlijkheid van God (jodendom) (23-32)
- [2] (es) Atuq Eusebio Manga Qespi, Instituto de Lingüística y Cultura Amerindia de la Universidad de Valencia. *Pacha: un concepto andino de espacio y tiempo* (<http://revistas.ucm.es/ghi/05566533/articulos/REAA9494110155A.PDF>). Revista española de Antropología Americana, 24, blz. 155-189. Edit. Complutense, Madrid. 1994
- [3] (en) Stephen Hart, Peruvian Cultural Studies: Work in Progress (http://www.ucl.ac.uk/spanish-latinamerican/Resources/Peru_cult)
- [4] (en) Paul Richard Steele, Catherine J. Allen, *Handbook of Inca mythology* (Handboek van de Inca-mythologie), blz. 86, (ISBN 1-57607-354-8)
- [5] (en) Shirley Ardener, University of Oxford, *Women and space: ground rules and social maps* (Vrouwen en ruimte: spelregels en sociale afbeeldingen, blz. 36 (ISBN 0-85496-728-1)
- [6] R.C. Archibald (1914) *Tijd als een vierde dimensie* (<http://projecteuclid.org/DPubS?verb=Display&version=1.0&service=UI&handle=euclid.bams/1183422749&page=record>) *Bulletin van de American Mathematical Society* 20:409
- [7] . *Geometric methods and applications: for computer science and engineering* (<http://books.google.com/books?id=B4Jtb1R1IkMC>), Springer, 2001, p. 249 ISBN 0-387-95044-3., Chapter 8, page 249 (<http://books.google.com/books?id=B4Jtb1R1IkMC&pg=PA249>)
- [8] (de) Hermann Minkowski, (Minkowski) "Raum und Zeit" (http://de.wikisource.org/wiki/Raum_und_Zeit_), 80. Versammlung Deutscher Naturforscher (Köln, 1908). Gepubliceerd in *Physikalische Zeitschrift* **10** blz. 104-111 (1909) en *Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung* **18** blz. 75-88 (1909). Voor een Engels vertaling, zie Lorentz et al. (1952).
- [9] (en) Einstein, Albert, 1926, " Space-Time, (<http://www.britannica.com/eb/article-9117889>)" *Encyclopedia Britannica*, 13e editie
- [10] (en) Matolcsi, Tamás. *Spacetime Without Reference Frames*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1994

Schwarzschildradius

De **Schwarzschildradius** of **-straal** (genoemd naar Karl Schwarzschild, die het effect in 1916 bedacht heeft) is de grensradius of -straal van een rond object (meestal een zwart gat) vanaf waar de ontsnappingsnelheid gelijk staat aan de snelheid van het licht.

Deze grens is een waarnemingshorizon, aangezien de buitenstaander geen informatie meer kan verwerven over wat er zich afspeelt binnen deze grens. Als een object eenmaal voorbij de waarnemingshorizon gaat kan het niet meer ontsnappen aan het zwaartekrachtsveld dat eraan ten grondslag ligt.

De Schwarzschildradius is recht evenredig aan de massa van het object. De meeste hemellichamen hebben een Schwarzschildradius die vele malen kleiner is dan de straal van het object: zo is die van de zon 3 km en die van de aarde 9 mm. Binnen in deze objecten bevindt zich natuurlijk geen waarnemingshorizon: de zwaartekracht die een lichaam in het binnenste van een bolvormig hemellichaam ondervindt is gelijk aan die van de deelbol van het hemellichaam dat zich 'onder' het object bevindt (bijvoorbeeld voor een object in een grot in de aarde neemt de waargenomen zwaartekracht dus met de diepte continu af om in het middelpunt van de aarde nul te bedragen - het voorwerp wordt dan aan alle kanten even hard aangetrokken). Zou men het hemellichaam echter zover kunnen samenpersen dat al zijn massa binnen zijn Schwarzschildstraal valt dan heeft het lichaam wel een waarnemingshorizon.

Is de Schwarzschildradius groter dan de straal van het object, dan spreken we van een zwarte gat.

Formule voor de Schwarzschildstraal

De Schwarzschildstraal is evenredig met de massa. De twee andere factoren die van invloed zijn, zijn constanten:

- De gravitatieconstante
- De lichtsnelheid

De formule voor de Schwarzschildstraal luidt als volgt:

$$r_s = \frac{2Gm}{c^2}$$

Waarin

- r_s de Schwarzschildstraal is, in [m]
- G de Gravitatieconstante is, deze bedraagt $6,67 \times 10^{-11}$ [Nm²/kg²];
- m de massa van het object is, in [kg]
- c de lichtsnelheid is, deze bedraagt 299 792 458 [m/s];

De samengestelde constante

$$\frac{2G}{c^2}$$

is ongeveer gelijk aan $1,48 \times 10^{-27}$ [m/kg].

Dit betekent dat de vergelijking herschreven kan worden tot

$$r_s \approx m \times 1,48 \times 10^{-27}$$

Waarin

- r_s de Schwarzschildstraal is, in [m]
- m de massa van het object is, in [kg]

Signatuur (natuurkunde)

In natuurkunde, meer bepaald algemene relativiteitstheorie, bedoelt men met de **signatuur** van een metriek het verschil in het aantal *positieve* en *negatieve* eigenwaarden van de metriek. Indien er p positieve en q negatieve eigenwaarden zijn, is de signatuur $p - q$, maar soms is men meer specifiek, en heeft het dan over een (p,q) -signatuur. Indien $q = 0$, spreekt men van een **Euclidische signatuur**. Indien er slechts één negatieve (of slechts één positieve) eigenwaarde is, kan men dit interpreteren als een unieke tijdscoördinaat, en spreekt men van een **Lorentzianse signatuur**.

Voorbeeld

In speciale relativiteitstheorie is de metriek vlak, en kan deze dus in diagonale vorm gebracht worden over de gehele ruimtetijd, met op de diagonaal p maal +1 en q maal -1. In dat geval is de signatuur dus $p-q$. Er zijn drie ruimte- en één tijdsdimensie, dus de diagonaal-elementen van de metriek zijn gegeven door $(-,+,+,+)$ in **mostly plus** conventies, en door $(+,-,-,-)$ in **mostly minus** conventies. In het eerste is de signatuur van de vierdimensionale ruimtetijd dus +2, onder de andere conventies, is de signatuur -2.

Singulariteit (natuurkunde)

Een **singulariteit** is in de kosmologie een punt met een oneindig klein volume en een oneindige grote dichtheid. De ruimte-tijd is hier zo sterk gekromd, dat ruimte en tijd feitelijk ophouden te bestaan. Dit heeft onder meer tot gevolg dat ook de in de gewone natuurkunde geldende wetten in een singulariteit niet meer geldig zijn. Wellicht vinden er in of in de buurt van een singulariteit allerlei processen plaats die in de huidige exacte wetenschap nog onbekend zijn.

Volgens de oerknaltheorie is het hele heelal ontstaan uit een zeer klein punt, dat in de buurt van een singulariteit kwam. Een echte singulariteit was dit echter (vermoedelijk) niet.

De algemene relativiteitstheorie veronderstelt verder voor het huidige heelal minstens twee soorten singulariteiten: het centrum van een zwart gat en zogeheten naakte singulariteiten, dat wil zeggen de zichtbare tegenhangers van zwarte gaten (zonder gebeurtenissenhorizon). Van het bestaan van dit laatste verschijnsel is men niet geheel overtuigd, maar er zijn sterke aanwijzingen dat er behalve zwarte gaten inderdaad ook naakte singulariteiten bestaan.

Sneller dan het licht

Sneller dan licht (Faster Than Light, FTL) is een term die verwijst naar het transport van informatie of materie met een snelheid groter dan de lichtsnelheid. Dit concept komt veel voor in sciencefiction, maar wordt in het algemeen als onwaarschijnlijk beschouwd door de wetenschap, vanwege de speciale relativiteitstheorie. Volgens de theoretische natuurkunde zijn er echter in principe mogelijkheden om FTL te bereiken.

Beperkingen

Volgens de theorie van Einstein is het niet mogelijk dat een voorwerp (of informatie) een snelheid heeft die hoger is dan de lichtsnelheid, 299.792.458 m/s. Omdat de dichtstbijzijnde sterren, niet zijnde onze eigen zon, op enkele lichtjaren (de afstand die een voorwerp op lichtsnelheid aflegt in een jaar) afstand van ons verwijderd zijn zou een voorwerp dat minder dan de lichtsnelheid heeft er jaren over doen het dichtstbijzijnde zonnestelsel te bereiken. Ook een communicatiesignaal zou deze tijd nodig hebben om de regio te bereiken, zodat communicatie vrijwel onmogelijk is. Bovendien zou het behalen van de lichtsnelheid door een voorwerp oneindig veel energie kosten. Hierbij moet opgemerkt worden dat bij efficiënte methoden van energieomzetting deze energie bij het afremmen weer teruggewonnen zou kunnen worden.

Oplossingen

Er bestaan verscheidene theorieën over het omzeilen van de beperkingen van de lichtsnelheid. De meeste methoden zijn gebaseerd op het buigen van ruimte, dan wel het gebruikmaken van bestaande buigingen in (tijd)ruimte. Enkele (fictieve) sneller-dan-licht technieken/apparaten zijn:

- Holtzmanngenerator
- Hyperruimte
- Inter-melkweg-spoel
- Subruimte-/Transwarpcorridors
- Teleportatie
- Warp
- Wormgaten

De Hitchhiker's Guide to the Galaxy bevat diverse satirische voortstuwingsmethoden:

- Oneindige-onwaarschijnlijkheidsaandrijving (*Infinite improbability drive*)
 - Bistromatische aandrijving (*Bistromathic drive*)
-

De weerwort, een communicatiemiddel uit de werelden van Ursula Le Guin, is door diverse andere schrijvers overgenomen.

Externe link

Faster Than Light volgens de NASA ^[1] (gearchiveerd op archive.org)

Referenties

[1] <http://web.archive.org/web/20070208190514/http://www.nasa.gov/centers/glenn/research/warp/warpstat.html>

Tijdreizen

Met **tijdreizen** doelt men op reizen naar de toekomst of terugreizen naar het verleden, eventueel met behulp van een tijdmachine.

Reizen naar de toekomst

Men zou kunnen zeggen dat "reizen naar de toekomst" de normale gang van zaken is, namelijk het normaal voortschrijden van de tijd. Men doelt met deze uitdrukking echter meestal op een procedure die door de reiziger als minder lang wordt ervaren, en waarbij hij minder verouderd dan overeenkomstig de verstreken tijd in de wereld waarin hij terugkeert. Dit is inderdaad mogelijk volgens de relativiteitstheorie, mits men ook ruimtelijk reist. Dit is het verschijnsel van de tijddilatatie en de tweelingparadox: iemand die van een basis die met constante snelheid beweegt vertrekt en er weer terugkomt ervaart minder verstreken tijd dan de op de basis verstreken tijd. Dit is experimenteel bevestigd.

Van dit fenomeen merken we in het dagelijks leven echter niets, doordat het alleen meetbaar is voor objecten die zich verplaatsen met een snelheid nabij die van het licht. Op die manier kan (in theorie) een waarnemer zijn tijd 'bevrozen' en zo op een later tijdstip terugkeren. Praktisch gesproken is dit soort tijdreizen echter nog veraf: geen van de huidige ruimteschepen haalt immers een snelheid die vergelijkbaar is met die van het licht. Het snelste voertuig dat ooit door mensen vervaardigd is (Voyager 1) haalt een snelheid van 17,07 km/s, een fractie van de 300.000 km/s.

Tijdreizen en natuurkunde

Tot nu toe is niet gebleken dat tijdreizen anders dan als boven genoemd mogelijk is.

Tijdreizen naar de toekomst zou in theorie mogelijk zijn met behulp van de volgende methoden: ^[1]

- Reizen met een snelheid die de snelheid van het licht benadert (zie boven)
- Het gebruik van kosmische snaren ^[2]
- Wormgaten en warp Alcubierre aandrijving ^[3]
- Rond een zwart gat vliegen, de gravitatie is zo sterk dat de tijd in het ruimteschip vertraagt t.o.v de aarde, dus als je weer op aarde terug zou komen ben je in de toekomst beland.

In de moderne natuurkunde worden vaak gedachte-experimenten uitgevoerd over tijdreizen. Er bestaan modellen waarmee tijdreizen mogelijk zouden zijn, maar volledig ontwikkeld zijn deze momenteel nog niet. Er bestaat bovendien geen experimenteel bewijs dat deze modellen juist zouden zijn, terwijl een experimenteel bewijs de enige manier is in de natuurkunde om de juistheid van een theorie vast te stellen. Om deze modellen te testen zou men een zwart gat of een wormgat moeten manipuleren om de tijd-ruimtestructuur te vervormen. Het praktische bezwaar hiertegen is dat men hier astronomische hoeveelheden energie voor nodig heeft (in de grootteorde van de jaarlijkse energieproductie van de zon), althans volgens de huidige stand van kennis. Wellicht zijn er nog andere methoden om

dit te testen maar heden (2012) is hierover nog niets bekend. Natuurkundigen als Paul Davies en Kip Thorne denken ondanks deze moeilijkheden dat tijdreizen toch mogelijk is. Andere geleerden vinden van niet omdat het strijdig zou zijn met het belangrijke causaliteitsprincipe.

Tijdreizen van atomen

Kan een reis in de tijd plaatsvinden binnen hetzelfde parallelle universum waarin het object zich voor de tijdreis bevindt? Een reis is in dit geval niets meer dan het verplaatsen van atomen. Dit reizen gebeurt met als variabelen de tijd en plaats. In theorie is het aantal atomen waaruit het heelal of een parallel universum op een gefixeerd punt in de tijd is opgebouwd, een vaststaand getal.

Zou men binnen hetzelfde parallelle universum bijvoorbeeld 1 duizendste seconde terugreizen in de tijd naar dezelfde plaats, dan zou men zichzelf kunnen ontmoeten. Echter de twee lichamen zouden bestaan uit exact dezelfde atomen, met als overeenkomst dat ze afkomstig zijn uit hetzelfde parallelle universum, maar met als verschil dat ze afkomstig zijn van twee verschillende tijdstippen. Bij een reis naar een ander parallel universum doet zich hetzelfde voor, maar bestaan drie mogelijke overeenkomsten, of de objecten bestaan uit dezelfde atomen, of uit andere, of ze hebben gemeenschappelijk voorkomende atomen.

Feit blijft wel dat er binnen één parallel universum dan twee dezelfde atomen aanwezig zullen zijn. De vraag rijst dan ook of het mogelijk is dat een atoom op één punt in de tijd op twee plaatsen binnen één parallel universum kan voorkomen? Als dit onmogelijk is, lijkt ook het maken van een tijdreis onmogelijk. Stel dat tijdreizen wel mogelijk is, en zou een atoom daadwerkelijk in stoffelijke zin een tijdreis kunnen maken, dan zou volgens de relativiteitstheorie het heelal van het parallel universum waarheen het atoom reisde, een stijging geven in de hoeveelheid massa en energie. Of nu één, alle of substantiële hoeveelheden aan atomen van één parallel universum een tijdreis zouden maken, naar allemaal een tweede parallel universum, zouden in beide universa de fundamentele natuurkundige principes veranderen. Het is dan ook mogelijk dat tijdreizigers zelf, en eventuele objecten die ze meenemen op hun reis, in theorie in twee parallelle universa, hoe miniem of desastreus dan ook, de natuurkundige wetten zouden beïnvloeden.

Wil men als in bovenstaand verhaal als ruimtereiziger een ramp uit het verleden exact aanschouwen, en daarvoor terugreizen in de tijd, dan moet de reis bij voorkeur binnen hetzelfde parallel universum gebeuren. In een willekeurig parallel universum kan die ramp namelijk of exact hetzelfde, of anders, of helemaal niet hebben plaatsgevonden. De kans dat de ramp eveneens heeft plaatsgevonden in een willekeurig parallel universum is aanwezig, maar kan dus ook op nul worden gesteld. De meest recente schatting van het aantal bestaande parallelle universa binnen het multiversum ligt op 10 tot de macht 500. De tijdreiziger moet bij zijn reis dan ook de beschikking hebben over een methode om niet gedurende de reis in een ongewenst parallel universum te komen, en hij moet waarschijnlijk later ook weer terug naar zijn eigen tijd en plaats.

Tijdreizigers naar het heden

Tot op heden zijn geen personen of objecten waargenomen waarvan kon worden vastgesteld dat zij door middel van tijdreizen uit een andere tijd naar het heden zijn gereisd. Sommige onderzoekers menen echter dat UFO's in werkelijkheid tijdmachines zijn waarmee onze verre nakomelingen uitstapjes naar het verleden (ons heden) maken. Zij beweren dat er vaak opvallend veel meldingen van UFO's zijn op plaatsen waar even later een grootschalige ramp plaatsvindt zoals natuurcatastrofen of door mensenhand veroorzaakte rampen als grote veldslagen of terreurdaden. Als dit volgens de bovenstaande bewering tijdreizigers zijn, dan lijken deze de ultieme 'ramptoeristen' te zijn.

Achtergrond

Paradoxen bij tijdreizen

Bij het denken over tijdreizen ontstaan vaak paradoxen zoals de 'grootvaderparadox'. Deze kan als volgt geformuleerd worden: *"Als ik terugga in de tijd en ik dood mijn grootvader, hoe is het dan mogelijk dat ik besta?"*. De mogelijkheid van tijdreizen zet dan ook het hele begrip van causaliteit op zijn kop. Een mogelijke oplossing volgens sommige kosmologen is dat bij iedere ingreep in een tijdlijn in het verleden een nieuwe parallelle tijdlijn ontstaat zodat er geen paradox meer is. Vanaf de ingreep bestaan er nu twee takken naast elkaar: de oorspronkelijke ongewijzigde en de nieuwe met een gewijzigd verder verloop naar de toekomst.

In het bovenstaande geval van de grootvaderparadox zou dan het volgende zijn gebeurd: Ik ga terug in de tijd. Op het moment dat ik arriveer in het verleden is er een ingreep in de tijdlijn en ontstaat er op hetzelfde moment een nieuwe parallelle tijdlijn. Zo zijn er vanaf dat moment twee tijdlijnen of parallelle universums die 'naast elkaar' bestaan in het multiversum: Een lijn waar ik in het verleden teruggereisd ben en eventueel mijn grootvader vermoord. En de 'originele' tijdlijn waar er in het verleden niets ernstigs met mijn grootvader gebeurd is zodat ik gewoon geboren ben om later naar het verleden te kunnen reizen.

Rimpeleffect en vlindereffect

Een verschijnsel bij tijdreizen is het zogenaamde "rimpeleffect" (Engels: "ripple effect"). Dat houdt in dat wanneer een tijdreiziger iets verandert in het verleden, het heden en de toekomst automatisch mee veranderen. Ook veranderen de geheugens van mensen zodat ze zich alleen de nieuwe, veranderde, gebeurtenis herinneren. Dit rimpeleffect hoeft niet altijd meteen op te treden, maar kan ook vertraagd plaatsvinden of in verschillende stappen. Doorgaans is alleen de tijdreiziger immuun voor dit effect, waardoor hij zich nog wel de originele gebeurtenis herinnert.

Een gerelateerd verschijnsel is het vlindereffect (butterfly effect), wat inhoudt dat een kleine, ogenschijnlijk onbelangrijke ingreep in het verleden, op lange termijn toch grote gevolgen kan hebben voor de toekomst. Hier wordt onder andere op ingespeeld in het verhaal *A Sound of Thunder* en in de film *The Butterfly Effect*.

Tijdlus

Een tijdlus is een effect verbonden met tijdreizen, waarbij gesteld wordt dat het verleden niet veranderd kan worden daar alles al vaststaat. Als een tijdreiziger teruggaat in de tijd staat vooraf al vast wat voor effect zijn aanwezigheid zal hebben op het verleden, daar het feitelijk al een keer gebeurd is. Een voorbeeld; een tijdreiziger leest in een geschiedenisboek over een ernstig ongeluk dat in een ver verleden heeft plaatsgevonden en besluit terug in de tijd te gaan om dit te voorkomen, maar eenmaal in het verleden blijkt hij door een samenloop van omstandigheden zelf de veroorzaker te zijn van dit ongeluk. Dit gegeven komt onder ander voor in de aflevering *No Time Like the Past* van *The Twilight Zone*.

Zo'n tijdlus kan leiden tot een kip-en-eiprobleem. Voorbeeld: als een tijdreiziger naar de toekomst gaat, daar een apparaat bemachtigt dat in zijn eigen tijd nog niet bestaat, dit mee terugneemt naar het verleden, en dan in het verleden het apparaat in productie neemt, wie is dan de uitvinder van het apparaat? Dit is een uitgangspunt in de *Terminator*-filmreeks, waarin het computernetwerk Skynet gemaakt is met behulp van technologie die door Skynet zelf vanuit de toekomst naar het verleden is gestuurd.

Reizen naar het verleden

Het begrip tijdreizen is altijd een inspiratiebron geweest voor fictie. Hierin gebeurt dit vaak met behulp van een tijdmachine. Hiermee kan men vaak zowel vooruit als achteruit in de tijd.

Literatuur

Tijdreizen is bijzonder aantrekkelijk voor veel mensen met creatieve beroepen om over te filosoferen. Tijdreizen is dan ook een thema dat veel voorkomt in sciencefiction. In Washington Irving's *Rip Van Winkle* (1819) slaapt het hoofdpersonage zo lang dat hij ontwaakt in de toekomst. In Charles Dickens' *A Christmas Carol* (1843) reist Ebenezer Scrooge ook naar zijn verleden en toekomst, maar dit gebeurt nog in de vorm van een droom. Mark Twain schreef een verhaal over een tijdreis in 1889, *A Connecticut Yankee in King Arthur's Court*. Het is het fictieve verhaal van een 19e eeuwse Amerikaan die terecht kwam in de tijd van Koning Arthur. H.G. Wells was de eerste schrijver die een moderne sf-roman aan tijdreizen wijdde: *De Tijdmachine* (*The Time Machine*) uit 1895.

Film

In de jaren 1985-1990 kwamen drie delen *Back to the Future* uit. Andere films die 'tijdreizen' als centrale thema hebben, zijn onder meer: *The Time Machine* (1960) en *The Time Machine (remake)* (2002), naar de gelijknamige roman van H.G. Wells (1895), *The Time Tunnel* (1966), *The Final Countdown* (1980), *Voyagers!* (1982), *Bill and Ted's Excellent Adventure* (1989), *Les Visiteurs* (1993), *Timecop* (1994), *Twelve Monkeys* (1995), *Donnie Darko* (2001), *Time Changer* (2002), *Timeline* (2003), *The Butterfly Effect* (2004), *A Sound of Thunder* (2005), *Kruistocht in spijkerbroek* (2006) (naar de gelijknamige roman van Thea Beckman (1973)), *Déjà Vu* (2006) en *Frequently Asked Questions About Time Travel* (2009) *Spy Kids: All the Time in the World in 4D* (2011).

De in 1984 uitgebrachte film *The Philadelphia Experiment* is in dit verband extra interessant, omdat de makers claimden dat hún script gebaseerd was op een ware gebeurtenis: In 1943 zou als gevolg van een experiment, waarbij door (grootschalige) manipulatie van magnetische velden getracht werd militaire objecten (voor radar) onzichtbaar te maken, een compleet slagschip van de Amerikaanse marine geteleporteerd zijn, en zouden twee bemanningsleden van dit schip per ongeluk *via de hyperruimte* in het jaar 1983 zijn beland. De in 2005 voor televisie vervaardigde driedelige Amerikaans-Britse miniserie *The Triangle* borduurt voort op dit verhaal (dat door de Amerikaanse marine overigens steeds in alle toonaarden is ontkend) en doet er zelfs nog een aantal flinke scheppen bovenop. Zie ook: Philadelphia-experiment.

Televisie

- *Catweazle*
- *Quantum Leap*
- Mr. Peabody & Sherman in *The Rocky & Bullwinkle Show*.
- *Time Squad*
- De *The Twilight Zone*- aflevering "No Time Like The Past".
- In *The Simpsons*-aflevering "Treehouse Of Horror V" reist Homer Simpson in het tweede segment ook terug in de tijd.
- In de *Futurama*-afleveringen "Roswell Ends Well" en "The Late Philip J. Fry" vormen tijdreizen ook een groot deel van de plot.
- In de film van *Phineas and Ferb*

Strips

- In *Suske en Wiske* worden heel vaak tijdreizen gemaakt, meestal via Professor Barabas' teletijdmachine.
- In het Neroalbum *De Rode Keizer* reizen Nero en co per tijdmachine terug naar het Oude Rome.
- Het *Piet Pienter en Bert Bibber*album *De tijdmachine* draait ook rond dit thema.

Oneliner

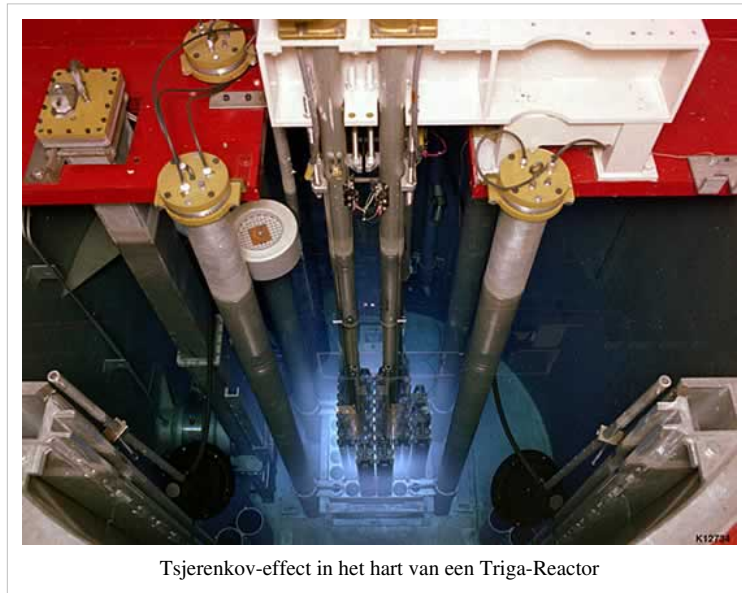
Een bekende oneliner is: 'there's no future in time travel' (er zit geen toekomst in tijdreizen).

Referenties

- [1] Gott, J. Richard (2002). Time Travel in Einstein's Universe. p.33-130
- [2] Op zoek naar kosmische snaren, Knack.be (<http://www.knack.be/nieuws/wetenschap/op-zoek-naar-kosmische-snaren-site72-section45-article39906.html>) en zwarte gaten
- [3] in 1994 gesuggereerd door de Mexicaanse theoretische natuurkundige Miguel Alcubierre

Tsjerenkov-effect

Het **Tsjerenkov-effect** slaat op de elektromagnetische straling die een elektrisch geladen deeltje afgeeft, wanneer dit zich door een medium voortplant met een snelheid groter dan de fasesnelheid van het licht in dat medium. Deze **Tsjerenkovstraling** (ook *Čerenkovstraling*, *Cerenkovstraling* of *Cherenkovstraling*) is bijvoorbeeld goed zichtbaar in foto's van ontblote kernreactoren, waarbij duidelijk een blauwe gloed waar te nemen is. Het effect is vernoemd naar Pavel Tsjerenkov, de natuurkundige die in 1958 de Nobelprijs voor de Natuurkunde kreeg voor de ontdekking van dit effect.

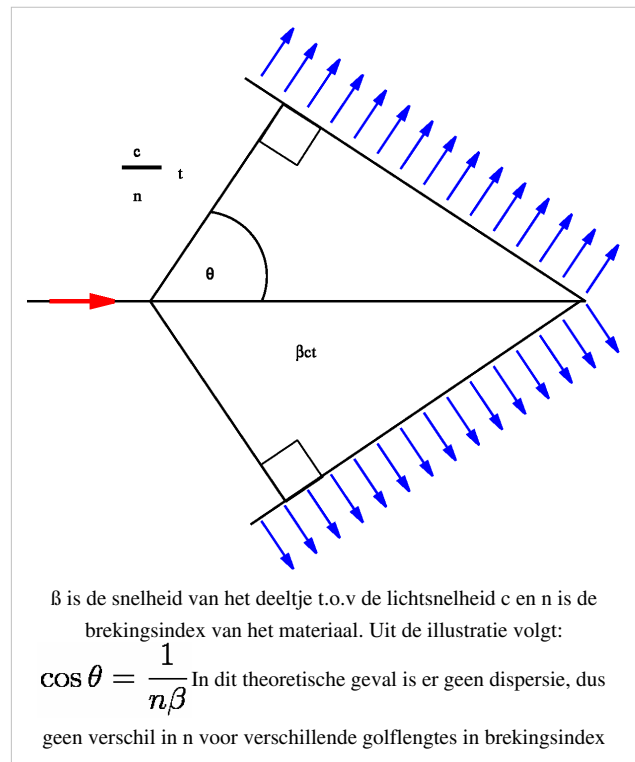


Tsjerenkov-effect in het hart van een Triga-Reactor

De oorsprong van deze straling kan op het eerste gezicht vreemd klinken, aangezien in de relativiteitstheorie van Einstein gepostuleerd wordt dat er niets sneller dan de snelheid van het licht (c) kan gaan. Dit heeft echter alleen toepassing op de absolute snelheid van het licht, namelijk in het luchtledige. Als licht zich door materie moet voortplanten neemt de snelheid macroscopisch gezien af, soms zelfs aanzienlijk. Zo is in water met brekingsindex 1,33 de snelheid van het licht nog maar $1 / 1,33 = 0,75$ keer de lichtsnelheid in vacuüm. Dit komt door de steeds voorkomende zeer kort durende interacties van het licht met de watermoleculen.

Als zich hoogenergetische deeltjes door een medium bewegen, brengen ze elektronen van dat medium uit hun evenwichtstoestand. Deze losgemaakte elektronen zullen in een isolator weer terugvallen en een foton uitzenden. Zolang de hoogenergetische deeltjes de snelheid van het licht niet overschrijden zullen de tijdens interacties gevormde fotonen elkaar uitdoven, maar in het geval van een deeltje, dat sneller dan deze snelheid beweegt, wordt een coherent golffront gevormd. De straling is gericht volgens een kegel achter het deeltje. De openingshoek van de kegel is kleiner naarmate het deeltje sneller beweegt.

De kegel van coherente fotonen is vergelijkbaar met de geluidskegel veroorzaakt door een vliegtuig of kogel die zich met snelheden hoger dan de geluidssnelheid bewegen. De Tsjererkov-straling heeft een continu spectrum met een maximum in het ultraviolet toenemend met hogere frequenties, maar doordat de brekingsindex steeds verder afneemt bij kortere golflengte wordt ze bij zeer hoge frequenties beperkt. Het menselijk oog neemt alleen de violette en blauwe straling waar. Doordat de gevoeligheid van het oog voor violette straling gering is ten opzichte van blauw nemen we Tsjererkov-straling waar als blauw. Wanneer we de straling met het oog kunnen waarnemen wijst dat op een grote activiteit doordat het grootste gedeelte als onzichtbare straling vrijkomt. De hoeveelheid Tsjererkov-straling is evenredig met het aantal geladen deeltjes en met hun energie. De hoeveelheid energie die vrijkomt per lengte-eenheid wordt beschreven door de Frank-Tammformule.



De straling wordt ook gebruikt voor detectie van neutrino's: zie Super-Kamiokande.

Vierde dimensie

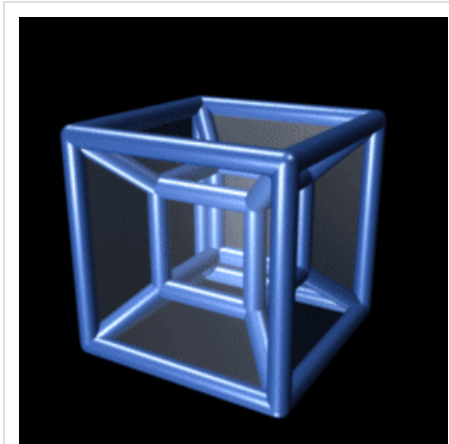
De **vierde dimensie** is een extra onafhankelijke verplaatsingsrichting in de ruimte.

Tijd is te interpreteren als een vierde dimensie (zie ruimte-tijd); een andere mogelijkheid is het opvatten van de vierde dimensie als een extra ruimtelijke dimensie, die voor driedimensionale wezens, zoals de mens, niet waarneembaar is. Er wordt daarom wel gezegd dat het derhalve wetenschappelijk niet mogelijk is om aan te tonen dat een vierde ruimtelijke dimensie al dan niet zou kunnen bestaan.

Geschiedenis

In een boek uit 1969 beschrijft D. Burger dat deze vierde ruimtelijke dimensie wel degelijk bestaat. Het zou een gevolg zijn van het feit dat de ruimte waarin de mensheid leeft, niet euclidisch is. De vierde dimensie is gerelateerd aan de gekromde ruimte en het uitdijend heelal. Om begrip te kweken voor deze vierde dimensie die door de mensheid niet aangetoond kan worden, maar slechts kan worden beredeneerd, haalt Burger onder meer de roman *Flatland, a romance of many dimensions, by a Square* aan, een boekje uit 1884 van de schrijver Edwin A. Abbott. In dit boekje wordt in verhaalvorm een wereld (*Flatland*) beschreven die slechts twee dimensies kent, en waarin een driedimensionale figuur uit Ruimteland op bezoek komt. De figuur uit Ruimteland kan door de platlanders niet in haar driedimensionale gedaante gezien worden, maar slechts worden beredeneerd.

De film *Dimensions* behandelt ook de vierde dimensie met onder andere het projecteren van vierdimensionale objecten naar drie dimensies evenals het bovenstaande verhaal over het ervaren van de derde dimensie door



Roterende schaduw van een tesseract, die rond een enkele as en een enkel vlak roteert.

tweedimensionale wezens.

Kristallografie

In de kristallografie wordt er ook gebruikgemaakt van iets dat eventueel als een soort "vierde dimensie" beschouwd zou kunnen worden, in het geval dat kristalroosters niet meer eenvoudig berekend kunnen worden met drie kristallografische richtingen. Dit is het geval bij hexagonale kristalroosters. Omdat de ribben van het rooster geen hoeken van 90 graden met het grondvlak maken, maar hoeken van 60 graden, wordt er een vierde as geïntroduceerd. Daadwérkelijk sprake van een vierde dimensie is er uiteraard niet, de 'vierde as' is immers te schrijven als een lineaire combinatie van de overige assen.

Meer dimensies

Het bestaan van vier dimensies is voor mensen relatief eenvoudig te begrijpen. Er bestaan theorieën die tot elf dimensies voorspellen. (Zie M-theorie)

Externe links

- Hypercube: a 4D game (Java-applet over de navigatie door vier dimensies) ^[1]

Bronnen, noten en/of referenties

- Dr. D. Burger, *De vierde dimensie*, AO-reeks boekje 1283, uitgave van stichting IVIO (1969)

Referenties

[1] <http://www.harmwal.nl/hypercube/>

Vierimpuls

In de speciale relativiteitstheorie, een deelgebied van de natuurkunde, is de **vierimpuls** de veralgemening van de klassieke drie-dimensionale impuls naar de vier-dimensionale ruimtetijd. Impuls is een vector in drie dimensies; op gelijke wijze is vierimpuls een viervector in de ruimtetijd. De contravariante vierimpuls van een deeltje met drie-impuls is

$$\vec{p} = (p_x, p_y, p_z)$$

en energie E .

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E/c \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

Vierstroom

Het begrip **vierstroom** is een term uit de speciale relativiteitstheorie en theoretische natuurkunde, nauw gerelateerd aan het begrip van elektrische stroomdichtheid. Deze wordt samen met de ladingsdichtheid tot één object verenigd, om zo een viervector te vormen. Op deze manier kan men op eenvoudige wijze (met de technieken van speciale relativiteitstheorie) bepalen hoe de gemeten stroomdichtheid verandert indien men overstapt naar een ander inertiaalstelsel.

Uitleg

In relativiteitstheorie worden veel drie-dimensionale vectoren uitgebreid naar zogeheten viervectoren, door het toevoegen van een extra component. Zo worden bijvoorbeeld de drie ruimtelijke coördinaten samen met de tijdscoördinaat in één vector opgenomen, welke zo op natuurlijke wijze de positie van een gebeurtenis in de ruimtetijd weergeeft. In klassieke elektrodynamica, worden de elektrische stroomdichtheid en ladingsdichtheid als afzonderlijke grootheden beschreven. Vanuit het standpunt van de speciale relativiteit, blijkt het natuurlijk om deze objecten samen te nemen, in één vector, die men dan de vierstroom noemt. Deze is dus gedefinieerd als:

$$J^\mu = (c\rho, \mathbf{j})$$

waarbij dus ρ de ladingsdichtheid is, en \mathbf{j} de gewoonlyke elektrische stroomdichtheid.

De behoudswet van lading (ook wel de continuïteitsvergelijking) is gewoonlijk genoteerd als:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0$$

Men kan dit op een zeer eenvoudige manier herschrijven met behulp van de vierstroom:

$$\partial_a J^a = 0$$

waarbij ∂_a de afgeleide naar de a-de ruimtetijdscoördinaat voorstelt. (Ook wel viergradiënt genoemd.)

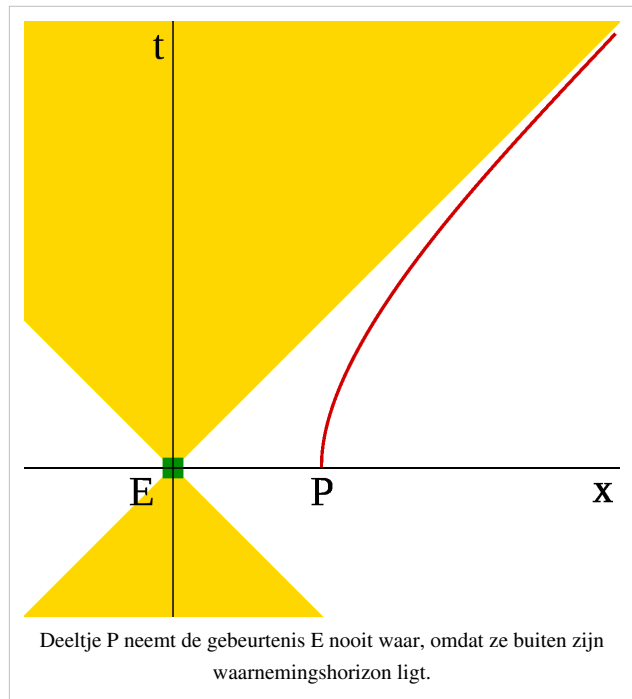
De eenvoudige vorm van fundamentele behoudswetten is een typisch fenomeen in relativiteitstheorie, en draagt bij tot zijn wiskundige elegantie.

Waarnemingshorizon

Een **waarnemingshorizon** of gebeurtenissenhorizon is in de kosmologie de grens van waarachter informatie (in de vorm van materie of licht) een bepaald ander punt niet meer kan bereiken. Een waarnemingshorizon is relatief en kan zich voor verschillende waarnemers op verschillende plaatsen bevinden.

Algemeen

Een waarnemingshorizon is niet altijd statisch. Als gevolg van de algemene snelheidslimiet die zegt dat niets zich sneller verplaatst dan het licht, onttrekken ook gebeurtenissen zich aan waarneming vanaf bepaalde plaatsen. Een zonneuitbarsting zal zich pas na minimaal 8 minuten op aarde openbaren, de waarnemingshorizon 'is' hier een bolschil die zich vanuit de gebeurtenis uitbreidt met de snelheid van het licht.



Een andere manier om een waarnemingshorizon te bekijken is het vervangen van een ruimtelijke as door de tijd-as. Wanneer we de z-as buiten beschouwing laten, zal de bolschil om de zonneuitbarsting verworden tot een zich uitbreidende cirkel. Wanneer we nu de tijd-as als z-as gebruiken wordt deze cirkel een kegel, met de top bij de uitbarsting en zich uitbreidend in de 'richting' van de toekomst. Licht komend van de uitbarsting zal zich nu langs het kegeloppervlak bewegen. Alles wat langzamer dan licht reist bevindt zich binnen de kegel. Deze kegel is dus de waarnemingshorizon, niets van de uitbarsting zal waarneembaar zijn buiten deze kegel. Op het tijdstip van de uitbarsting zien we dat de aarde zich buiten de kegel bevindt, de aarde bevindt zich pas na ongeveer acht minuten binnen de kegel.

Zwart gat

De meest bekende waarnemingshorizon is die van een zwart gat. Deze horizon is een met het zwarte gat concentrische bolschil, met een straal die de Schwarzschildstraal genoemd wordt. Alles wat zich binnen deze waarnemingshorizon afspeelt onttrekt zich aan waarneming van buitenaf als gevolg van de extreme zwaartekracht. Stephen Hawking was van mening dat alle materie (en de informatie die deze bevat) die voorbij de waarnemingshorizon kwam voor altijd verloren was, maar heeft deze mening in 2004 herzien (Zie ook Hawkingstraling).

Waarneembare heelal

Het heelal wat wij om ons heen waarnemen heeft een waarnemingshorizon van circa 46,5 miljard lichtjaar. Dat wil dus zeggen dat wij nooit iets zullen kunnen waarnemen wat verder weg ligt dan deze afstand. Een algemene misvatting is, dat de waarnemingshorizon 14 miljard lichtjaar zou zijn omdat het heelal ongeveer 14 miljard jaar oud is, zodat het licht van de meest verweggelegen (theoretisch waarneembare) objecten in die tijd maximaal 14 miljard lichtjaar afgelegd kan hebben. Wat hierbij vergeten wordt, is dat het heelal niet statisch is, maar expandeert. De ruimte (afstand) die een foton heeft afgelegd, expandeert nadat dat foton er aan voorbij is gegaan. Hierdoor is de maximale afstand van theoretisch waarneembare objecten groter dan 14 miljard lichtjaar.^{[1][2]}

Referenties

- [1] Frequently Asked Questions in Cosmology (http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology_faq.html#DN)
- [2] Misconceptions about the Big Bang (<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=misconceptions-about-the-2005-03&page=5>)

Wereldlijn

Algemene relativiteitstheorie
$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$
(de Einstein-vergelijking)
Achtergrond
Speciale relativiteit Equivalentieprincipe · Wereldlijn Coördinaat-onafhankelijkheid Wiskundige achtergrond: tensoren
Vergelijkingen
Einstein-vergelijking Friedmann-vergelijking ADM-formalisme
Oplossingen
Schwarzschildmetriek Reissner-Nordströmmetriek Kerrmetriek
Experimentele verificatie
Gravitationeel lenseffect Zwarte gaten Perihelium-precessie
Gevorderde onderwerpen
Kaluza-Klein-theorie Kwantumgravitatie
Wetenschappers
Einstein · Minkowski · Eddington Lemaître · Schwarzschild Friedmann · Chandrasekhar Hawking

Een **wereldlijn** is een concept uit de relativiteitstheorie, dat op een abstracte manier het afgelegde pad van een voorwerp in de ruimtetijd beschrijft. Het is nauw verwant aan het begrip traject, maar is meer aangepast aan de relativiteitstheorie door ruimte en tijd op een gelijke manier te behandelen.

Uitleg

Stel dat men een bewegend deeltje wil beschrijven. In de Newtoniaanse mechanica, wordt het pad van een deeltje beschreven door zijn positie-coördinaten te geven als functie van de tijd:

$$\vec{x} = \vec{x}(t)$$

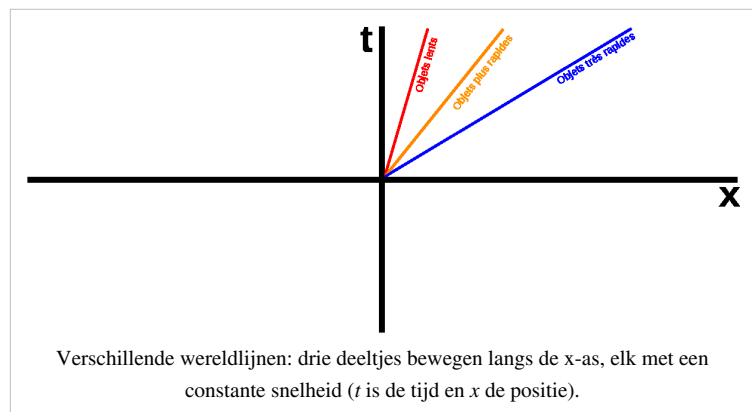
Indien men datzelfde deeltje wilt beschrijven in de relativiteitstheorie, is de bovenstaande vergelijking nogal onnatuurlijk. In de relativiteitstheorie worden tijd en ruimte immers niet als afzonderlijke grootheden gezien, maar coördinaten die gezamenlijk één object, de ruimtetijd, beschrijven. De tijd is dus geen absolute grootheid. Daarom beschrijft men in de relativiteitstheorie het pad van een deeltje liever als een welbepaalde lijn *in de ruimtetijd*. Men neemt dan een parameter die het pad beschrijft, maar niet noodzakelijk gelijk is aan de tijd. Als men deze parameter τ noemt, schrijft men in de relativiteitstheorie dus iets als

$$(t, \vec{x}) = (t(\tau), \vec{x}(\tau))$$

Het gehele pad van het deeltje wordt op deze manier een kromme in de ruimtetijd, en is dus in zekere zin één object. Dit object noemt men de *wereldlijn*. In principe is de grootheid τ (waarmee men de wereldlijn parametrizeert) willekeurig gekozen, maar meestal neemt men hiervoor de eigentijd van het deeltje.

Weergave

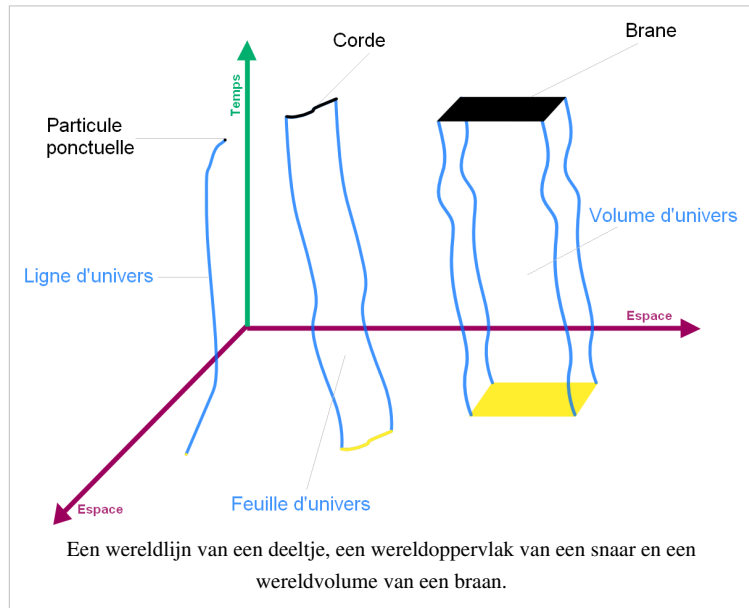
Het is eenvoudig om de bovenstaande uitleg wat concreter te maken met een afbeelding. Stel dat op tijdstip $t = 0$ drie deeltjes vertrekken, en zich bewegen langs de x-richting, met constante snelheid. De tekening rechts geeft weer wat (voor elk van de deeltjes) de positie is als functie van de tijd. (De tijd is wel verticaal weergegeven.) Anderzijds kan men dit ook bekijken als volgt: voor elk deeltje is de overeenkomstige lijn precies de verzameling van punten in de *ruimtetijd* waar het deeltje is geweest. Die drie rechten zijn dus de drie wereldlijnen van de deeltjes.



Meerdimensionale objecten

Men kan nu de bovenstaande uitleg herhalen voor meerdimensionale objecten. In de snaartheorie worden bijvoorbeeld kleine trillende snaartjes bestudeerd, die zich verplaatsen door de ruimte(tijd). Zo een snaartje is een object met dimensie 1: het heeft immers een lengte. Als we kijken naar alle punten in de ruimtetijd die door een snaar doorlopen worden, zien we een tweedimensionaal oppervlak. Die wordt ook wel het *wereldoppervlak* van de snaar genoemd. Bovendien zijn er in de snaartheorie (en zijn nauwe verwanten, M-theorie en F-theorie) ook meerdimensionale objecten relevant: branen.

Als een braan ruimtelijke dimensie p heeft (een trillend oppervlak bijvoorbeeld heeft dimensie 2), dan is zijn *wereldvolume* een $p+1$ -dimensionaal oppervlak in de ruimtetijd. Dit zijn dus hoger dimensionale veralgemeningen van het begrip wereldlijn.



Relatie met het begrip traject

In de klassieke mechanica wordt soms gesproken van *het traject* of *de baan* van een voorwerp. Daarmee bedoelt men de verzameling van punten in de ruimte waar een voorwerp voorbijkomt in zijn beweging. Dat is erg gelijkaardig aan het begrip wereldlijn, maar er is een klein verschil. In de terminologie van de eerste sectie, is de baan van een deeltje gegeven door de kromme

$$x(t)$$

in de Newtoniaanse beschrijving. Het is dus een kromme die geheel in de ruimte ligt, en geparаметriseerd wordt door t . Het is dus eigenlijk de projectie van de wereldlijn (gelegen in de ruimtetijd) op een ruimtelijk deelvlak. Als men bijvoorbeeld een planeet beschouwt in een twee-dimensionale wereld, welke beweegt rond een ster, is de baan een cirkel rond deze ster (dat is dus een kromme in het twee-dimensionale vlak), terwijl de wereldlijn (als men de tijd verticaal voorstelt) een spiraal is in de driedimensionale ruimte.

Externe links

- Leestekst ^[1] over de Minkowski-ruimte, ruimtetijd en wereldlijnen.
- ^(en) Wereldlijnen ^[2] en relativiteitstheorie kort uitgelegd.

Referenties

[1] <http://www.nentjes.info/Tijd/tijd-b.htm#a>

[2] <http://www.bbc.co.uk/dna/h2g2/A3086039>

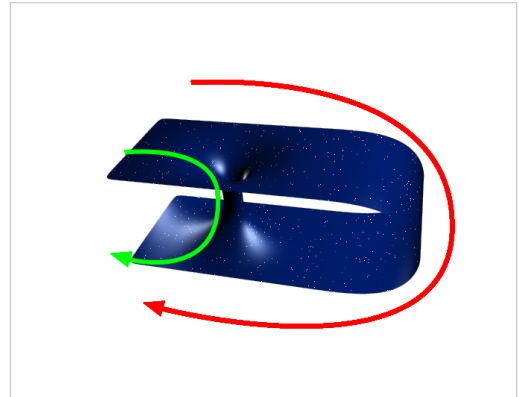
Wormgat

Een **wormgat**, ook bekend als een **Einstein-Rosen brug**, is een hypothetische mogelijkheid binnen de ruimtetijd. In de normale ruimte kan men tussen twee punten niet sneller reizen dan het licht, maar volgens de theorie van een wormgat bestaat er een "korte weg" in het universum. Via deze korte weg is het dan mogelijk om sneller naar een ander punt in de ruimte te reizen dan wanneer je zou "omreizen" via de normale weg, ook al zou je dat doen met de snelheid van het licht.

Geschiedenis

De term wormgat werd bedacht door de Amerikaanse theoretisch natuurkundige John Wheeler in 1957. Echter, was het idee van wormgaten al getheoretiseerd in 1921 door de Duitse wiskundige Hermann Weyl in verband met zijn analyse van de massa in termen van het elektromagnetisch veld.

De naam wormgat komt van de analogie die vroeger gebruikt werd om dit uit te leggen: beeld je in dat het universum de schil van een appel is, en een worm van de éne zijde van de appel naar de andere zijde wil geraken. Als de worm op de schil van de appel blijft is de kortste afstand de helft van de omtrek van de appel. Maar als de worm in plaats van rond te gaan, een gat (wormgat) graaft recht door de appel, is de afstand merkbaar minder, namelijk de diameter van de appel.



Theoretische basis

Het is onbekend of wormgaten mogelijk zijn binnen de algemene relativiteitstheorie (ART). Alle bekende oplossingen van de ART die wormgaten toelaten, vereisen het bestaan van materie die een negatieve energiedichtheid heeft. Toch is het nog niet wiskundig bewezen dat dit een absolute vereiste is voor wormgaten, noch is het bewezen dat die speciale materie niet kan bestaan. En aangezien er nog geen theorie van de Kwantumgravitatie bestaat, is het onmogelijk te zeggen of wormgaten mogelijk zijn of niet.

Veel fysici geloven dat wormgaten niet mogelijk zijn omdat ze theoretische problemen opwerpen, zoals de mogelijkheid tot tijdreizen, en dat de wetten van de fysica ze verbieden. Dit alles blijft speculatie.

Tijdgaten

Een wormgat zou tijdreizen mogelijk kunnen maken. Dit zou kunnen bereikt worden door één einde van het wormgat te versnellen ten opzichte van het andere einde, en deze twee eindes later terug te brengen. Voor het versnelde wormgat zou dan minder tijd voorbijgegaan zijn dan voor het wormgat dat is blijven staan (relativistische tijddilatatie). Dit zou dus betekenen dat alles wat het stationaire wormgat zou binnengaan, het versnelde wormgat zou buitenkomen op een tijdstip voor het object binnenging. Dit wordt een "tijdgat" genoemd. Men denkt dat het misschien niet mogelijk is om een wormgat in een tijdmachine te veranderen op deze wijze, maar sommige mathematische modellen tonen aan dat virtuele deeltjes continu door een tijdgat zouden reizen met een steeds toenemende intensiteit. Toch kan men ook denken aan een theorie van wormgaten als gaten in de tijd en dat het *lijkt* of de reissnelheid hoger is dan de lichtsnelheid, maar dat is een illusie. Wij kunnen reizen naar ver afgelegen sterrenstelsels in een fractie van de tijd die men nu denkt nodig te hebben, met een fractie van de lichtsnelheid.

Sciencefiction

In sciencefiction komen vaak wormgaten voor om vreemde en onalledaagse situaties te scheppen en als handig transportmiddel. Voorbeelden:

- In de televisieserie *Star Trek* komen wormgaten voor en in een 'spin off' van deze serie, *Deep Space Nine* spelen de avonturen zich af rond het ruimtestation Deep Space 9, dat is gestationeerd bij een wormgat; een belangrijk knooppunt in het ruimteverkeer tussen twee kwadranten.
- Ook in de televisieserie *Stargate SG-1* reist men vaak door wormgaten om zo in minder dan een seconde op een planeet vele lichtjaren verder te zijn.
- Een bekende sf-roman is *Eon* van Greg Bear: hierin komt een wormgat voor dat een heel universum op zichzelf is: de Weg. Via dit reuzenwormgat kan men ook in andere universa komen.
- De *Star Wars*-films hebben een zogenaamd Hyperruimte, dit is een soort parallel universum dat ze bereiken en verlaten via een wormgat.
- In de film *Donnie Darko* blijken gebeurtenissen samen te hangen met een bestaand wormgat.
- In de televisieserie *Farscape* belandt hoofdpersonage John Crichton per wormgat in een afgelegen universum. Later zal hij ook de kennis krijgen om wormgaten te voorspellen, iets wat hem veel achtervolgers oplevert. Aan het eind van de serie worden wormgaten ook als wapen ingezet.
- In de televisieserie *Sliders* reizen de hoofdpersonen door wormgaten naar parallelle universa.
- In de film *Contact* reist de hoofdpersoon door een wormgat door de ruimte.
- In de film *Déjà vu* keert het hoofdpersonage terug in de tijd via het principe van een wormgat.
- In het spel *Halo 2* ontsnapt het ruimteschip met de profeet *Regret* aan boord via een wormgat van de aarde. hierbij werd een hele stad vernietigd. *Master Chief* volgde het schip door het wormgat en kwam zo aan bij de tweede *Halo*.
- In het spel *EVE Online* is reizen door wormgaten een mogelijke vorm van reizen. Zo is het mogelijk op zonnestelsels te komen die nog nooit eerder zijn ontdekt. *EVE Online* is een massively multiplayer online game net zo als *World of Warcraft*, maar dan is het ruimte-gebaseerd.
- In de film *Thor* wordt er van de ene dimensie naar de andere dimensie gereisd door middel van een wormgat.

Zwaartekrachtspotentiaal

In een zwaartekrachtsveld is de **gravitatiepotentiaal** of **zwaartekrachtspotentiaal** de potentiaal met betrekking tot de zwaartekracht; dit is de arbeid die verricht moet worden om één massa-eenheid vanuit een referentiepunt in een gekozen punt te krijgen.

De versnelling van de zwaartekracht is een vector die het tegengestelde is van de gradiënt van de zwaartepotentiaal.

Vlakken die punten in de ruimte met gelijk gravitatiepotentiaal verbinden, worden equipotentiaalvlakken genoemd. De zwaartekracht staat overal loodrecht op een equipotentiaalvlak.

Meestal wordt het oneindige als referentie genomen; de zwaartekrachtspotentiaal is dan altijd negatief en evenredig aan het kwadraat van de ontsnappingsnelheid.

Gravitatiepotentiaal bij de Aarde

Het gravitatiepotentiaal van de Aarde is, zelfs als het door de rotatie veroorzaakte verschil tussen de evenaar en de polen wordt meegerekend, niet overal gelijk door verschillen in dichtheid en structuren binnenin de Aarde en onregelmatigheden in het aardoppervlak, zoals gebergten. Omdat de massa van de Aarde niet helemaal gelijk verdeeld is, is de aantrekkingskracht van de Aarde niet overal even groot.

Deze verschillen in gravitatiepotentiaal zorgen ervoor dat wat we als loodrecht ervaren, maar zelden een lijn is door het exacte zwaartepunt van de Aarde. De geoïde beschrijft de grillige vorm die de zeespiegel zou krijgen onder invloed van de verschillen in zwaartekrachtspotentiaal, als er geen land was en het water vrij spel had.

Hoogtemetingen

Metingen met een waterpas volgen altijd de geoïde, terwijl metingen met bijvoorbeeld GPS geen invloed ondervinden van de verschillen in zwaartekrachtspotentiaal. Om deze verschillende meetwijzen met elkaar te kunnen vergelijken is de zwaartekrachtspotentiaal nauwkeurig in kaart gebracht in het zogenaamde geoïdemodel.

Zelfs op het kleine oppervlak van Nederland zijn de verschillen waarneembaar gebleken; zo is in de provincie Groningen en delen van Friesland en Drenthe duidelijk een daling in de geoïde waar te nemen en rond de heuvels van Limburg een stijging. Zwaardere gesteentes liggen in dit noordelijke gebied dieper dan in omliggende gebieden waardoor een schietlood opzij wordt getrokken. Het gesteente onder de grond bij Limburg is veel zwaarder dan de gebieden ten noorden ervan en zal een schietlood iets naar zich toe trekken.

Gravitatieput

Een gravitatieput (*gravity well*) is een gebied met sterk negatieve zwaartekrachtspotentiaal en dus een grote ontsnappingsnelheid. Op een ruimtereis zijn dit met name de oppervlakte en omgeving van een hemellichaam met een groot quotiënt van massa en diameter. Bij een bolvorm komt dit neer op een groot product van straal in het kwadraat en dichtheid. Een sterke gravitatieput is lastig als tussenstation of locatie waarvan men weer terug wil keren, door de grote benodigde delta-v. Voor de delta-v is het daarbij gunstig als het landen door een atmosfeer of door gebruik van airbags geen delta-v kost. De hoeveelheid benodigde raketbrandstof stijgt exponentieel met de totale delta-v als onderweg nergens brandstofvoorraden zijn of brandstof kan worden geproduceerd. Het landen op, en weer opstijgen van een hemellichaam dat een flinke gravitatieput vormt wordt echter doenlijker als ter plaatse wel brandstof aanwezig is of kan worden geproduceerd.

De sterkte van de gravitatieput loopt op in de volgorde planetoïde, Maan, Mars, Aarde, Jupiter (de laatste heeft overigens geen vaste oppervlakte). De Aarde is dus zelf een vrij sterke gravitatieput (maar wel met een atmosfeer waardoor geen brandstof nodig is voor de landing), en Mars wel minder, maar toch nog vrij aanzienlijk. Er zijn dan ook nog geen Marsstenen mee teruggebracht naar de Aarde, al zijn daar wel plannen voor (waarbij nog een andere

complicatie is dat men het risico zoveel mogelijk wil uitsluiten dat eventuele gevaarlijke micro-organismen van Mars de Aarde zouden kunnen besmetten), en bij plannen voor bemande ruimtevaart naar Mars gaat men soms uit van niet terugkeren of ter plaatse brandstof produceren voor de terugvlucht. Mede vanwege de geringe gravitatieput staat voor de Verenigde Staten een bemande vlucht naar een planetoïde eerder op het programma.

Zwaartekrachtsveld

Een **zwaartekrachtsveld** of **gravitatieveld** is een natuurkundig krachtveld dat van invloed is op de beweging van alles wat zich in dat veld bevindt. Zowel deeltjes en voorwerpen die massa hebben als deeltjes zonder rustmassa (zoals licht) worden in een zwaartekrachtsveld versneld, vertraagd of van richting veranderd. Op kosmische schaal is het zwaartekrachtsveld verantwoordelijk voor een bepaalde kromming van het heelal, die de historische en toekomstige ontwikkeling van het heelal bepaalt.

Zwaartekrachtsvelden worden veroorzaakt door de aanwezigheid van massa. De zwaartekrachtswet van Newton (1687) beschreef hoe groot het veld van een bepaalde massa is; het hangt af van de hoeveelheid massa en de afstand tot die massa. In de moderne algemene relativiteitstheorie van Einstein (1916) wordt het zwaartekrachtsveld meestal beschreven als een kromming van de vierdimensionale ruimtetijd. In principe is het echter ook mogelijk een beschrijving in de vorm van een veld te geven. De theorie beschrijft verder hoe het zwaartekrachtsveld afmetingen en tijdsduren beïnvloedt.

Wiskundige beschrijving

Wiskundig kan een zwaartekrachtsveld beschreven worden als een vectorveld \vec{g} . Hierin is \vec{g} de versnelling van de zwaartekracht, ook wel valversnelling genoemd. Het zwaartekrachtsveld is een potentiaalveld: het kan beschreven worden als de gradiënt van een potentiaal ϕ , waarbij $\vec{g} = -\text{grad } \phi$.

Volgens de zwaartekrachtswet van Newton is

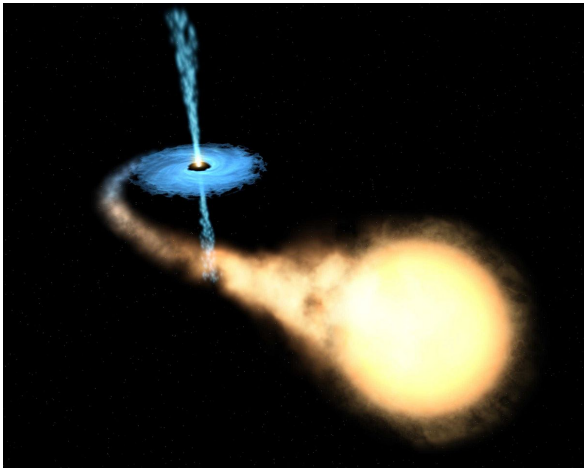
$$\vec{g} = -G \frac{M}{|\vec{r}|^3} \vec{r},$$

waarin G de gravitatieconstante is (ca. $6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$) en \vec{r} de voerstraal van de bron met massa M tot de plaats in het veld.

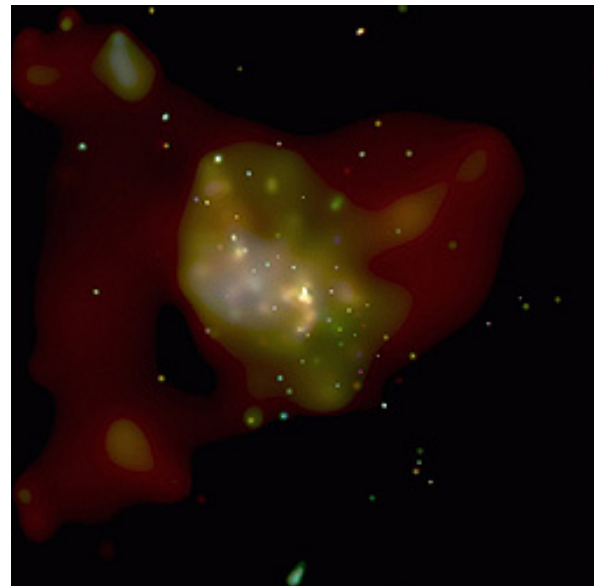
Dichtbij het aardoppervlak is het zwaartekrachtsveld vrijwel homogeen, zodat het eenvoudig te beschrijven is: de potentiaal is in gebruikelijke coördinaten:

$$\phi = g \cdot z \text{ en het veld } \vec{g} = (0, 0, -g).$$

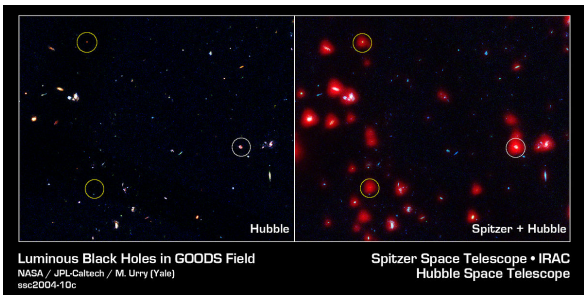
Zwart gat



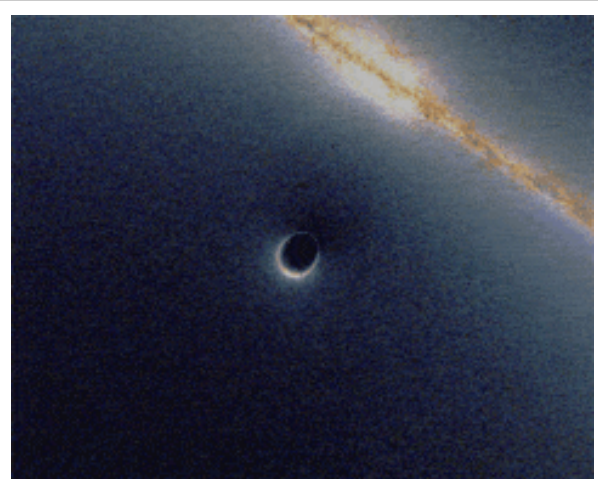
Een *artist's impression* van een zwart gat met een begeleiderster (geel) die zijn Roche-lob gevuld heeft. Gas uit de begeleider valt naar het zwarte gat en vormt een accretieschijf (blauw). Een deel wordt haaks met veel energie uitgespuwd in de vorm van fontein ("jets") aan beide polen.



Deze opname laat in valse kleuren het centrum van de Melkweg zien. De heldere punt in het midden is een uitbarsting van röntgenstraling in de buurt van Sagittarius A*. De stralingsintensiteit nam in enkele minuten extreem toe, hield ongeveer 3 uur aan om daarna snel uit te doven. Waarschijnlijk betrof het hier gas dat in het zwarte gat viel. NASA/MIT/F. Baganoff *et al*



De röntgenstraling die gedetecteerd werd in het gebied binnen de cirkels duidt op zwarte gaten in het centrum van een versterrenstelsel. De stelsels zijn hier te zien in zichtbaar en infrarood licht en het blijkt dat de infrarode beelden van twee bronnen helderder zijn, waarschijnlijk omdat infrarode straling minder geblokkeerd wordt door stof tussen de bron en de waarnemer.



Simulatie van een zwaartekracht lens ten gevolge van een zwart gat dat het beeld van een passerend melkwegstelsel in de achtergrond vervormt en even een ring van licht veroorzaakt. Bij echte waarnemingen gaat het vaak om kleinere beeldjes van melkwegstelsels en quasars dan in deze simulatie.

Beluister

Volgens de algemene relativiteitstheorie is een **zwart gat** een gebied waaruit niets, zelfs licht niet, kan ontsnappen, vanwege de extreme vervorming van de ruimtetijd door de zwaartekracht van een zeer compacte enorme massa. Rond een zwart gat is er een denkbeeldig oppervlak dat als grens optreedt, de waarnemingshorizon, vanwaar licht

nog net aan de zwaartekracht van het zwarte gat kan ontsnappen.

Geschiedenis

De eerste ideeën over het bestaan van zwarte gaten dateren uit 1790 toen de Engelse geoloog John Michell en de Franse wiskundige Pierre-Simon Laplace onafhankelijk van elkaar het bestaan van onzichtbare sterren veronderstelden. Ze berekenden aan de hand van de wetten van Newton de massa en de omvang van objecten waarvan de ontsnappingsnelheid groter zou zijn dan de lichtsnelheid.

Volgens hen was het voor materie in theorie mogelijk om aan hun sterren te ontsnappen. Dat de lichtsnelheid de maximale snelheid was werd in 1905 aannemelijk gemaakt door Albert Einstein in zijn speciale relativiteitstheorie.

In 1916 publiceerde Einstein de algemene relativiteitstheorie, een nieuwe theorie over de zwaartekracht. Enkele maanden later vond Karl Schwarzschild het door de relativiteitstheorie voorspelde zwaartekrachtsveld voor een puntmassa, waaruit de theoretische mogelijkheid van een waarnemingshorizon bleek. Schwarzschild zelf beschouwde deze horizon niet als fysisch realistisch; de waarnemingshorizon bleek later echter wel degelijk betekenis te hebben en wordt tegenwoordig geïnterpreteerd als de "rand" van het zwarte gat.

J. Robert Oppenheimer, de latere vader van de Amerikaanse atoombom, en zijn student H. Snyder kwamen in 1939 met de eerste nauwkeurige berekening van de vorming van een zwart gat uit een gasbol volgens de algemene relativiteitstheorie.

Roy Kerr vond in 1963 een familie van exacte oplossingen van Einsteins vergelijkingen zonder elektrische lading die later op zwarte gaten bleken te slaan. Deze oplossingen beschrijven roterende zwarte gaten. Algemene oplossingen voor de Einstein-Maxwell vergelijkingen met rotatie én lading werden daarna gevonden door Newman en anderen in 1965. Met de Kerr-Newman geometrie kunnen draaiende (on)geladen zwarte gaten worden beschreven.

In 1967 introduceerde de Amerikaanse theoretisch natuurkundige John Wheeler - die eerder onder meer aan de waterstofbom had gewerkt - de naam *zwart gat* voor dergelijke objecten. De bondige uitspraak "Een zwart gat heeft geen haar" (No hair theorema: *A black hole has no hair*) is ook van hem afkomstig. Wheeler bedoelde dat een zwart gat eigenlijk een eenvoudig voorwerp is. Alle eigenschappen zijn af te leiden uit zijn massa, elektrische lading en impulsmoment.

Eigenschappen

Volgens het no-hair theorema wordt een zwart gat beschreven door slechts drie parameters:

1. massa,
2. elektrische lading en
3. impulsmoment.

Zwarte gaten zijn daarmee de "eenvoudigste" objecten uit de natuurkunde.

Indeling

Naar massa

Er worden vier soorten zwarte gaten onderscheiden:

- Miniatuur zwarte gaten: met afmetingen tussen die van een proton (10^{-15} meter) en een Planckdeeltje (10^{-35} meter). Ze verdampen door hawkingstraling in een fractie van een seconde. Dit type zwarte gat is volgens Stephen Hawking niet ontstaan door zijn eigen zwaartekracht, maar door druk van buitenaf en zou tijdens de oerknal kunnen hebben bestaan. Als blijkt dat de Planckschaal in de orde van TeV is, is het mogelijk om in de Large Hadron Collider die bij CERN in Genève is gebouwd deze zwarte gaten te produceren. Dan zouden verschillende kosmologische theorieën experimenteel getest kunnen worden (de eerste test vond plaats op 10 september 2008). Volgens sommige theorieën bestaat het *kwantumschuim* eveneens uit miniatuur zwarte gaten die

volgens de onzekerheidswetten inherent aan de kwantumwereld voortdurend in en uit de virtuele ruimte schieten.

- Stellaire zwarte gaten: met een massa van omstreeks 5 tot 100 zonnemassa's die ontstaan zijn uit een supernova van een zware ster.
- Middelgrote zwarte gaten: met een massa van 500 tot 1000 zonnemassa's. Over de evolutie van dit soort zwarte gaten is nog weinig bekend. Dit type werd door de Chandra X-ray Observatory ontdekt in het stelsel M82 op een afstand van 600 lichtjaar van het centrum. Bij het melkwegstelsel ESO 243-49 (met roodverschuiving $z = 0,0224$) werd met de XMM-Newton satelliet het zwarte gat 2XMM J011028.1-460421 (HLX-1) gevonden met een massa van minstens 500 zonnemassa's. ^[1]
- Superzware zwarte gaten: met een massa van meer dan een miljoen keer de massa van de zon. Ze worden aangetroffen in de centra van sterrenstelsels.

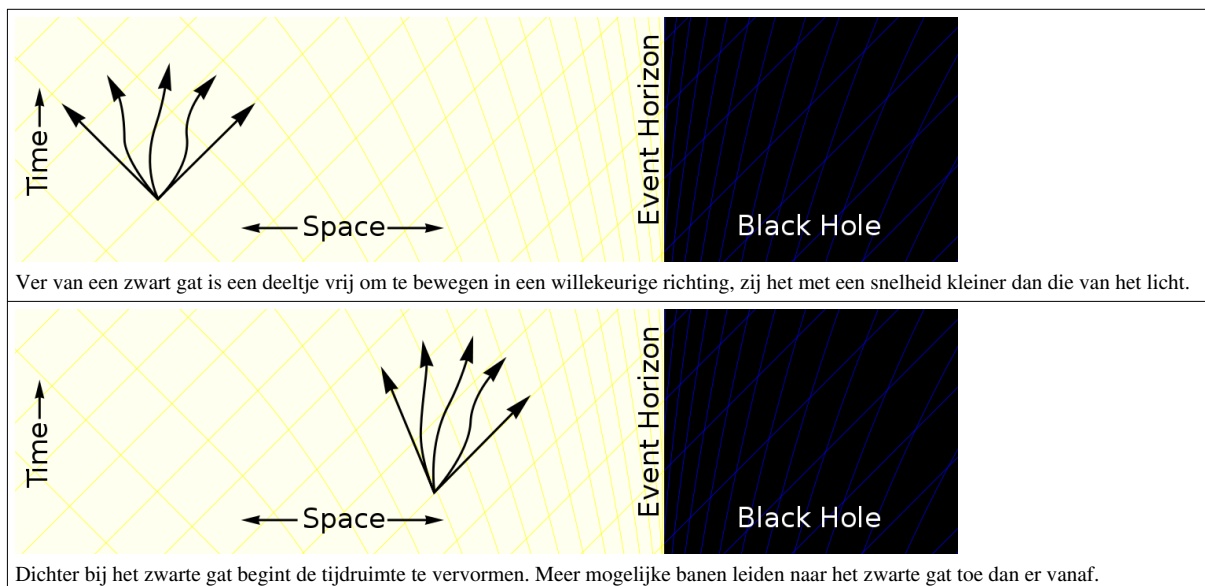
Soort zwart gat	Massa	Grootte
Miniatuur	tot $\sim M_{\text{Maan}}$	tot $\sim 0,1$ mm
Stellair	$\sim 10 M_{\text{Zon}}$	~ 30 km
Middelzwaar	$\sim 10^3 M_{\text{Zon}}$	$\sim 10^3$ km $\sim R_{\text{Aarde}}$
Superzwaar	$\sim 10^5 - 10^9 M_{\text{Zon}}$	$\sim 0,001 - 10$ AU

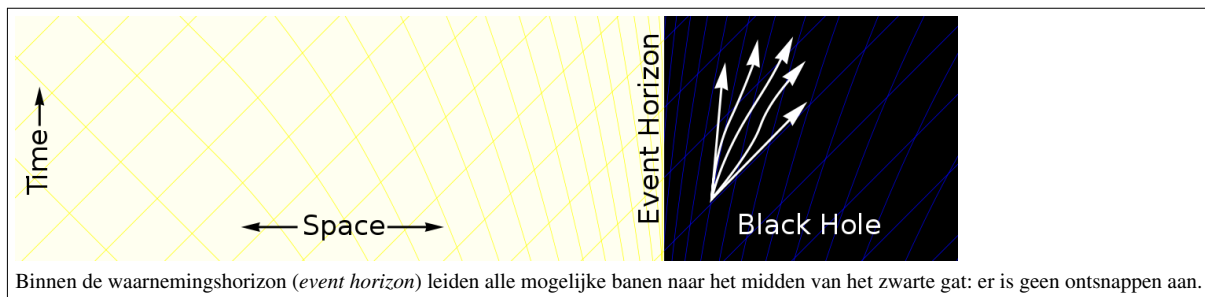
Naar impulsmoment en lading

Er kunnen vier soorten zwarte gaten worden onderscheiden op grond van hun impulsmoment (J) en elektrische lading (Q). Als $J > 0$ draait het zwarte gat. De massa (M) is altijd positief. De meetkunde-varianten (metrieken) waarmee deze soorten beschreven worden, staan in bijgaande tabel. De Schwarzschildmetriek beschrijft een ongeladen, niet-draaiend zwart gat. Het is de oplossing van de Einstein-vergelijkingen in vacuüm met bolsymmetrie. De Kerrmetriek beschrijft een ongeladen, draaiend zwart gat.

	$M > 0$	
	$J = 0$	$J \neq 0$
$Q = 0$	Schwarzschildmetriek	Kerrmetriek
$Q \neq 0$	Reissner-Nordströmmetriek	Kerr-Newmanmetriek

Inval door de waarnemingshorizon





► *Zie Waarnemingshorizon voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Kenmerkend aan een zwart gat is de waarnemingshorizon - de grens in de tijdruimte die als een ventiel voor licht en materie werkt: die kunnen er alleen van buiten naar binnen doorheen. Waarneming van wat binnen de waarnemingshorizon geschiedt is dus onmogelijk van buitenaf.^[2]

De algemene relativiteitstheorie voorspelt dat een grote massa de tijdruimte zo vervormt, dat voorwerpen binnen de waarnemingshorizon alleen naar het zwart gat kunnen invallen - zie figuur.^[3]

Volgens een waarnemer ver van een zwart gat vandaan lopen klokken dichterbij een zwart gat langzamer.^[4] Door deze gravitationele tijdsdilatatie lijkt een voorwerp dat naar een zwart gat valt steeds langzamer te bewegen en er oneindig lang over te doen.^[5] Ook andere processen lijken vertraagd: uitgezonden licht heeft een kleinere frequentie en vertoont naast verzwakking gravitationele roodverschuiving.^[6] Vlak voordat het voorwerp de waarnemingshorizon bereikt, wordt het voorwerp zo lichtzwak dat het van buiten de waarnemingshorizon niet meer kan worden gezien. (Van binnen de waarnemingshorizon was en bleef de invallende lichtbron in principe altijd zichtbaar, omdat licht altijd van buiten de waarnemingshorizon naar binnen kan.)

Maar voor een waarnemer die zelf invalt treden deze effecten niet op: zijn of haar klok blijft even snel lopen en na een eindige tijd wordt de waarnemingshorizon bereikt, hoewel de plaats ervan lokaal niet waar te nemen is.^[7] Helaas loopt het door spaghettificatie slecht af met deze waarnemer.

Als het zwarte gat niet draait, is de waarnemingshorizon bolvormig en ligt hij op een afstand van de Schwarzschildstraal van het centrum van het zwarte gat. Deze straal is evenredig met de massa M van het zwarte gat^[8] volgens de formule

$$r_{\text{ss}} = \frac{2GM}{c^2} \approx 2,95 \frac{M}{M_{\text{Zon}}} \text{ km}$$

met r_{ss} de Schwarzschildstraal, c de lichtsnelheid en G de gravitatieconstante en M_{Zon} de zonsmassa. Deze formule geldt voor zwarte gaten met elektrische lading Q en impulsmoment J nul (kan een factor 2 schelen voor andere zwarte gaten). Dus voor een stilstaand zwart gat met een zonsmassa ligt de waarnemingshorizon op een afstand van 2,95 km van het centrum. Draaiende zwarte gaten hebben een waarnemingshorizon die vervormd en niet bolvormig is.

De beschrijving van de waarnemingshorizon zoals de algemene relativiteitstheorie die geeft is een benadering, die mogelijk voor kwantumeffecten moet worden bijgesteld.^[9]

Vorming en evolutie

Ontstaan

De meeste zwarte gaten zijn de overblijfselen van hypernova- of supernova-explosies. Als de kern van de exploderende ster meer dan ongeveer 5 keer zo zwaar is als de zon (de Oppenheimer-Volkofflimiet), implodeert de kern van de ster uiteindelijk tot een zwart gat, door gevolg van de enorme zwaartekracht die op de ster drukt en het uiteindelijk wint van de massa van de ster. Volgens de algemene relativiteitstheorie kan deze massa worden opgevat

als geconcentreerd in een singulariteit. Dit kan een punt, een ring of een bol zijn - daarover zijn de geleerden het niet in alle gevallen eens.

De zeer zware zwarte gaten die in de centra van sommige sterrenstelsels te vinden zijn en een massa van enkele miljoenen zonsmassa's hebben, zijn waarschijnlijk kort na de oerknal ontstaan. Sinds kort zijn er ook zwarte gaten bekend met een massa van enkele duizenden zonsmassa's maar hoe die ontstaan zijn is nog niet duidelijk. Het is niet bekend wat zich in en rond de singulariteit precies afspeelt, aangezien de algemene relativiteitstheorie op zulke kleine afstanden niet meer exact geldig is. Om dit probleem op te lossen, zal de relativiteitstheorie gecombineerd moeten worden met de kwantummechanica tot een nog onbekende theorie van de kwantumzwaartekracht. De snaartheorie en de daarvan afgeleide M-theorie zijn hypothesen die dit proberen door één universele basistheorie op te stellen.

Bij een kernmassa tussen de 3 en 5 maal de massa van de zon eindigt de ster als een quarkster. Bij een kernmassa tussen 1,4 en 3 maal de massa van de zon eindigt de ster na een supernova als neutronenster. Bij een massa kleiner dan 1,4 maal de massa van onze zon blijft een witte dwerg over, die vervolgens zeer langzaam afkoelt tot zwarte dwerg.

Verdampen door hawkingstraling

De Engelse natuurkundige Stephen Hawking toonde in 1974 theoretisch aan dat zwarte gaten langzaam moeten verdampen. Volgens de onzekerheidswetten in de kwantumwereld ontstaan op de waarnemingshorizon voortdurend paren deeltjes en antideeltjes. Normaal heffen deze deeltjes zich bijna onmiddellijk weer op door onderlinge annihilatie zodat het energie effect weer nul is. Bij een zwart gat gebeurt het echter soms dat een deeltje in het zwarte gat valt en dat het andere ontsnapt in de ruimte. Met andere woorden: er komt straling uit. Dit wordt ook wel 'hawkingstraling' genoemd. De energie hiervoor wordt onttrokken aan het zwarte gat. Dit wordt iets kleiner. Hoe kleiner het zwarte gat hoe sneller dit zal gaan. Na een tijd kan zo een zwart gat helemaal 'verdampen'. Aanvankelijk werd door sommige natuurkundigen gedacht dat de informatie die verloren ging doordat er bij het ontstaan van een zwart gat materie in viel, voorgoed verdwenen was. Hawking sloot samen met Kip Thorne een weddenschap over deze vraag af met John Preskill, die beweerde dat de informatie niet definitief verloren ging. In 2004 verloor Hawking deze weddenschap door zelf op een conferentie bekend te maken dat hij een mechanisme had gevonden waardoor de informatie die in het zwarte gat was verdwenen, weer vrij kon komen bij het verdampen van het zwarte gat.

Waarneming

De moeilijkheid met het waarnemen van zwarte gaten in het heelal is dat ze door hun sterke zwaartekrachtsveld geen licht kunnen uitstralen. Waarneming van deze hemellichamen is daardoor alleen indirect mogelijk, bijvoorbeeld door het gedrag van sterren in de onmiddellijke nabijheid te bestuderen.

Röntgenstraling

Gas van een nabije ster wordt naar het zwarte gat getrokken en gaat er een baan omheen beschrijven, daarbij een zogenaamde *accretieschijf* (aangroeijschijf) vormend. Doordat de materie aan de binnenkant van de schijf sneller draait dan de lagen die er wat meer vandaan liggen, ontstaat er wrijving. Deze wrijving veroorzaakt röntgenstraling, die men kan waarnemen met een röntgentelescoop (zie röntgenastronomie). Het bestaan van andere zwarte gaten is afgeleid uit de bewegingen van één enkele ster of een dubbelster die om iets heen draaien wat niet zichtbaar is.

Sagittarius-A*

In het centrum van de Melkweg bevindt zich naar alle waarschijnlijkheid een zwart gat: Sagittarius A*. De massa hiervan kan bepaald worden door de banen van sterren te bestuderen die zich in de buurt van het centrum van de Melkweg bevinden. Hij wordt geschat op circa 3,7 miljoen zonsmassa's.

Zwaartekracht lens

Een zwaartekracht lens doet zich voor als het licht van een verre heldere bron zoals een quasar door een zwaar hemellichaam wordt afgebogen. Dit heet in het Engels *gravitational lensing*. Het is een van de waarnemingen waarmee de voorspellingen van de algemene relativiteitstheorie getoetst kunnen worden. Volgens die theorie vervormt een massa de omliggende ruimte en moet licht deze kromming volgen wat een lens-effect geeft.

Een bron kan dankzij een zwaartekracht lens voor de waarnemer soms verscheidene beelden voor de waarnemer opleveren. Als bron, zwaar hemellichaam en waarnemer op een lijn liggen, leidt de symmetrie tot een ringvormig beeld, een *Einsteinring*.

Omdat elk zwaar object zulke effecten kan geven, worden sommige lens-effecten aan de hemel waarschijnlijk niet door afzonderlijke zwarte gaten maar door verre melkwegstelsels veroorzaakt.

Voorbeelden

De Chandra X-ray Observatory heeft in september 1999 en oktober 2000 opnamen gemaakt van het centrum van ons melkwegstelsel. Daar werd een enorm zwaar zwart gat waargenomen met de massa van 2,6 miljoen zonnemassa's. Dit zwarte gat wordt in verband gebracht met de radiobron Sagittarius A*. Met de Europese XMM-Newton satelliet worden regelmatig waarnemingen gedaan van zwarte gaten (officieel: mogelijke zwarte gaten, "black hole candidates").

In onze Melkweg hebben we behalve Sagittarius A* in het centrum nog een aantal mogelijke zwarte gaten die dichterbij staan. Het gaat steeds om röntgendubbelsterren die via een accretieschijf gas aan hun begeleider onttrekken. Hun massa's liggen tussen de drie en twaalf zonsmassa's.^{[10][11]}

Naam	Massa in zonsmassa's M _☉	Omlooptijd van begeleider (dagen)	Afstand tot de Aarde (lichtjaar)
2XMM J011028.1-460421 (HLX-1) ^[12]	>500	-	
MAXI J1409-619 bevat dit systeem een zwart gat?	onbekend	onbekend	-
4U 1543-475	8-10	1,1	~24000
A0620-00	9-13	0,33	~3500
Cygnus X-1	7-13	5,6	6000-8000
GRO J1655-40	6-6,5	2,8	5000-10000
GRO J0422+32	3-5	0,21	~8500
GS 2000+25	7-8	0,35	~8800
GX 339-4		1,75	~15000
GRS 1124-683	6,5-8,2	0,43	~17000
Sagittarius A	3,7 miljoen	-	~25000
V404 Cygni	10-14	6,5	7800 ^[13]
XTE J1118+480	6,4-7,2	0,17	6200
XTE J1550-564	10-11	1,5	~17000

XTE J1819-254	10–18	2,8	< 25000
---------------	-------	-----	---------

Verder lezen

- Begelman, M.C. & Rees, M.J.: *Zwarte gaten in het heelal*
- Chandrasekhar, Subrahmanyan: *The mathematical theory of black holes*, Clarendon Press Oxford, 1984
- Misner, Charles W., Thorne, Kip S. & Wheeler, John Archibald: *Gravitation*, Freeman, San Francisco, 1970 en latere uitgaven
- Novikov, I.: *Zwarte gaten. De sleutel tot het ontstaan van het heelal*, Contact, 1991
- Shapiro, Stuart L. & Teukolsky, Saul A.: *Black holes, white dwarfs and neutron stars. The physics of compact objects*, Wiley, New York 1983
- Thorne, Kip S.: *Black holes and time warps. Einstein's outrageous legacy*, Norton, New York 1994 en latere uitgaven (goed leesbaar, populair maar exact, aanbevolen)

Externe links

- Simulatie bij waarnemingen door Wilms en anderen met Europese XMM-Newton satelliet van MCG-6-30-15 ^[14]
- AstronomieAntwoorden (dr Louis Strous): Zwarte gaten ^[15]
- Zwart gat neemt hapje ster (Kennislink artikel) ^[16]
- Zwarte Gaten ^[17] (UvA)
- Bewijs voor zwart gat in melkwegstelsel (Volkskrant artikel) ^[18]
- Amusante en educatieve animaties over zwarte gaten ^[19]
- Interessante film ^[20] (engels)

Noten

- [1] Farrell, S. A. e.a.: *An intermediate-mass black hole of over 500 solar masses in the galaxy ESO 243-49''*, *Nature* 460, 73-75, 2 July 2009
- [2] Wheeler, J. Craig (2007). *Cosmic Catastrophes* (2nd ed.), Cambridge University Press, ISBN 0-521-85714-7, p. 179
- [3] Anatomy of a Black Hole (<http://archive.ncsa.uiuc.edu/Cyberia/NumRel/BlackHoleAnat.html>). Geraadpleegd op 2009-03-25.
- [4] Carroll, Sean M. (2004), *Spacetime and Geometry*, Addison Wesley, ISBN 0-8053-8732-3, p. 217
- [5] Carroll, Sean M. (2004), *Spacetime and Geometry*, Addison Wesley, ISBN 0-8053-8732-3, p. 218
- [6] Inside a black hole (http://nrumiano.free.fr/Estars/int_bh.html). Geraadpleegd op 2009-03-26.
- [7] Carroll, Sean M. (2004), *Spacetime and Geometry*, Addison Wesley, ISBN 0-8053-8732-3, p. 222
- [8] Black Holes (http://web.archive.org/web/20060913170030/http://www.physics.eku.edu/Yoder/116_BH.htm). Gearchiveerd van het origineel (http://www.physics.eku.edu/Yoder/116_BH.htm) op September 13, 2006. Geraadpleegd op 2009-03-25.
- [9] Physical nature of the event horizon (<http://www.ias.ac.in/jarch/pramana/51/693-698.pdf>). Geraadpleegd op 2009-03-25.
- [10] J. Casares: *Observational evidence for stellar mass black holes*. Preprint (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0612312>)
- [11] M.R. Garcia et al.: *Resolved Jets and Long Period Black Hole Novae*. Preprint (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0302230>)
- [12] Farrell, S. A. e.a.: *An intermediate-mass black hole of over 500 solar masses in the galaxy ESO 243-49''*, *Nature* 460, 73-75, 2 July 2009
- [13] SRON: Distance to black hole no longer a secret (http://www.sron.nl/index.php?option=com_content&task=view&id=2465&Itemid=754) J.C.A. Miller-Jones (NRAO), P.G. Jonker (SRON), V. Dhawan (NRAO), W. Briskin (NRAO), M.P. Rupen (NRAO), G. Nelemans (Radboud University Nijmegen) and E. Gallo (MIT), *The first accurate parallax distance to a black hole*. *Astrophysical Journal*, 1 dec 2009
- [14] <http://www.gsfc.nasa.gov/topstory/20011015blackhole.html>
- [15] <http://www.astro.uu.nl/~strous/AA/nl//antwoorden/zwarte-gaten.html>
- [16] <http://www.kennislink.nl/web/show?id=108128>
- [17] <http://staff.science.uva.nl/~dcslob/lesbrieven/michiel/Zwartgat.html>

[18] http://www.govertschilling.nl/artikelen/archief/2002/0210/021017_vk.htm

[19] <http://www.rug.nl/sciencelinx/blackholegame/index.html>

[20] <http://www.space.com/10025-ep-1-eruption-space-time.html>



Zie de categorie *[/wiki/Commons:Category:Black hole?uselang=nl#mw-subcategories Black hole]* van Wikimedia Commons voor meer mediabestanden.

Stersoorten

Bestaande soorten: Blauwe reus · Blauwe achterblijver · Cepheïde · Dubbelster · Dwerfster · Gele dwerg · Hoofdreeks · Hyperreus · Lichtsterke blauwe variabele · Magnetar · Neutronenster · Nova · Pulsar · Rode dwerg · Rode reus · Superreus · T Tauri-ster · Vampierster · Veranderlijke ster · Visuele dubbelster · Witte dwerg · Wolf-Rayetster

Theoretische soorten: Preonster · Q-ster · Quarkster · Zwarte dwerg

Astronomie

Disciplines: astrobiologie · astrochemie · astrofysica · kosmologie · planetologie · röntgenastronomie

Hemellichamen: komeet · manen (Maan) · meteoroiden · planeet (Aarde · dwergplaneet · exoplaneet) · planetoïden · ster (dubbelster · Zon) · zwart gat

Stelsels: heelal · supercluster (Virgosupercluster) · cluster (Lokale Groep) · sterrenstelsel (Melkweg) · planetenstelsel (zonnestelsel)

Het einde: Big Crunch · Big Chill · Big Rip

Overigen: atmosfeer · heelal · messierobject · multiversum · oerknal · sterrenbeeld

Speciale relativiteitstheorie

Gelijktijdigheid

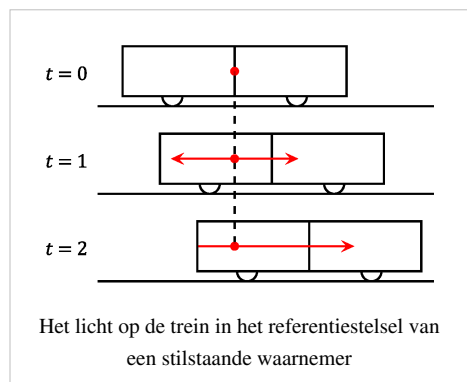
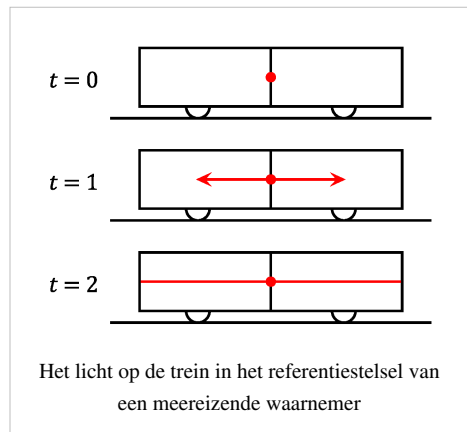
Speciale relativiteitstheorie
$E = m c^2$
(de massa-energiere relatie)
Achtergrond
Lichtsnelheid · Lorentzinvariantie Inertiaalstelsel Wetten van Maxwell
Fundamentele begrippen
Lorentztransformatie · Ruimtetijd Viervector · Minkowski-ruimte Lengtecontractie · Tijddilatatie Gelijktijdigheid
Gevorderde onderwerpen
Massa-energiere relatie Tweelingparadox EPR-paradox
Experimenten
Michelson-Morley-experiment Fizeau-experiment energieproductie bij kernreacties
Wetenschappers
Einstein · Maxwell · Minkowski Lorentz · Poincaré

Men spreekt van **gelijktijdigheid** als twee gebeurtenissen op hetzelfde moment plaatsvinden. In het dagelijks leven is dat vanzelfsprekend, maar de relativiteitstheorie toont aan dat gelijktijdigheid tot op zekere hoogte ook relatief is: van twee verschillende ruimtetijdposities kan de ene ondubbelzinnig in tijd na de andere zijn, maar in de overige gevallen hangt hun gelijktijdigheid af van het inertiaalstelsel. Dit is het geval als het eventuele tijdsverschil in ieder geval te kort is voor een signaal van de ene naar de andere ruimtetijdpositie (of dit zo is hangt niet af van het inertiaalstelsel). Zie ook ruimte-, licht- en tijdachtige intervallen.

De relativiteit van gelijktijdigheid kunnen we laten zien in een gedachte-experiment van een rijdende trein met in het midden daarvan een lamp. We beschouwen daarnaast een meereizende waarnemer, eveneens in het midden van de trein, en een stilstaande waarnemer op het station. Wanneer de twee waarnemers elkaar passeren geeft de lamp een lichtflits af.

Voor de meereizende waarnemer is de afstand van de lichtbron tot de voorkant en de achterkant van de trein naar de lamp gelijk. Hij ziet het licht daarom tegelijkertijd beide kanten bereiken.

De stilstaande waarnemer ziet de achterkant van de trein daarentegen bewegen in de richting van het punt waar de lamp de lichtflits afgaf. Ook ziet hij de voorkant van de trein zich van dit punt verwijderen. Het licht plant zich voor beide waarnemers en in alle richtingen met een eindige, gelijke snelheid voort, namelijk de lichtsnelheid. Dat volgt uit de speciale relativiteitstheorie. De stilstaande waarnemer ziet daarom dat het licht eerst de achterkant van de trein bereikt en pas later de voorkant, dus niet gelijktijdig.



Inertiaalstelsel

In de natuurkunde is een **inertiaalstelsel** een coördinatenstelsel waarin voorwerpen, waar geen kracht op werkt, stilstaan of een eenparig rechtlijnige beweging maken. Dat betekent dat in zo'n stelsel de bewegingswetten van Newton hun eenvoudigste vorm hebben: voorwerpen veranderen alleen van snelheid als er een kracht op ze werkt en dan is de versnelling evenredig met die kracht. In het Latijn betekent iners: werkeloos, waardeloos, traag.

Hoewel het begrip inertiaalstelsel een belangrijke rol speelt in de relativiteitstheorie, is het vermoedelijk toch zo dat aan inertiaalstelsels *absolute* eigenschappen werden toegedicht. Een inertiaalstelsel zou in de absolute ruimte stil staan, of zich eenparig rechtlijnig voortbewegen. Echter een coördinatenstelsel in vrije val in een gravitatieveld is volgens bovenstaande definitie (lokaal althans) dus ook een inertiaalstelsel.

Het aardoppervlak is geen inertiaalstelsel omdat onze planeet draait, en nogal snel ook. Voor veel bewegingen op grote schaal moet rekening gehouden worden met die draaiing. Vaak worden dan schijnkrachten ingevoerd, ook wel "inertiaalkrachten" genoemd. Zie bijvoorbeeld de Corioliskracht en de middelpuntvliedende kracht.

Het begrip "absolute ruimte"

Het begrip "absolute ruimte" is ontstaan in de tijd van Newton, al werd het toen al niet aanvaard door zijn tegenstanders de "relationisten", zoals Leibniz en Huygens. Newton ging ervan uit dat de absolute ruimte werd bepaald en begrensd door de "vaste sterren". Door later ontstane inzichten bleken die sterren echter ook allemaal te bewegen.

Het fundament waarop Newton zijn stelsel bouwde, "de absolute ruimte" bleek dus niet te bestaan. Ondanks deze ontdekking bleef men de wetten van Newton gebruiken in (dus lokale) inertiaalstelsels vanwege de eenvoud ervan.

Volgens Newton is een coördinatenstelsel dat ten opzichte van de absolute ruimte een versnelde beweging uitvoert geen inertiaalstelsel. Een "aan zichzelf overgelaten" massa in dat stelsel, zal ten opzichte van dat stelsel zelf gaan versnellen. Het versnelt in de tegenovergestelde richting waarin het stelsel zich in de absolute ruimte versnelt en wel met dezelfde grootte.

Dit is te verklaren uit het feit dat een "aan zichzelf overgelaten" massa volgens Newton zal stilstaan ten opzichte van de absolute ruimte. Het vreemde is nu dat het inertiaalstelsel gerelateerd is aan de absolute ruimte en niet aan andere massa's.

De vraag is: "Hoe kan een abstractie zoals de absolute ruimte invloed hebben op massa's." Het antwoord is: "De eigenschappen van de (oneindige) absolute ruimte worden bepaald door alles wat er zich in bevindt" Men mag zich dus de ruimte niet voorstellen als een leeg plaatselijk vacuüm. Alle verder weg gelegen objecten tezamen hebben invloed.^[1] Die invloed wordt verdisconteerd in de eigenschappen van de abstractie "massatraagheid". Men kan hieruit de conclusie trekken dat inertiaalstelsels ten opzichte van elkaar in rust zijn of zich eenparig rechtlijnig bewegen. Dat is alleen zo binnen het denksysteem van Newton.

De natuurkundige Erik_Verlinde schrijft de zwaartekracht, het gedrag van massa's onderling, toe via de snaartheorie aan kwantummechanische effecten. Op deze manier komt er via een omweg toch weer een soort idee van "ether" terug.

Relativiteit

Alle "vaste" sterren uit de tijd van Newton worden nu begrepen als bewegend en elkaar onderling beïnvloedend. De absolute ruimte bestaat niet meer. De anomalie in het Newtoniaanse denken door het bestaan van inertiaalstelsels "in vrije val" is hiervoor een bewijs. Dit kan men bijvoorbeeld waarnemen in een ruimtevaartuig dat zich in een baan om de aarde beweegt. Ook daar zijn de bewegingswetten van Newton geldig hoewel het stelsel in versnelling is ten opzichte van de aarde. Dit noemt men nu een "lokaal inertiaalstelsel"; het speelt een rol in de relativiteitstheorie.

We bekijken daarom nu alles relatief.

Strikt genomen is een coördinatenstelsel op aarde ook geen inertiaalstelsel vanwege de invloed van de zwaartekracht en de versnelling van de aarde in de ruimte. Echter wanneer die zwaartekracht (als versnellende kracht) in het coördinatenstelsel wordt gedefinieerd, kunnen door die aanname de effecten hiervan meegenomen worden in de berekening. Meestal zijn de wetten van Newton dan wel weer geldig.

In de praktijk zijn bovenstaande abstracties niet zo erg belangrijk, verwaarloosbare invloeden van buiten een stelsel hinderen de berekeningen niet. Het moeten dan wel echt verwaarloosbare invloeden zijn. Een inertiaalstelsel op het oppervlak van de aarde voor de berekening van een kogelbaan zal in de praktijk geen nadeel ondervinden van het feit dat het versneld is ten opzichte van het inertiaalstelsel in ons zonnestelsel dat gebruikt wordt om de baan van de planeten te berekenen.^[2] En dit laatste stelsel zal weer geen invloed ondervinden van een inertiaalstelsel in het centrum van onze melkweg.

In feite komt het eigenlijk slechts hierop neer: als de wetten van Newton toepasbaar zijn, mag je ze toepassen. De toetssteen is dan: binnen een inertiaalstelsel zal een aan zichzelf overgelaten voorwerp stilstaan of eenparig rechtlijnig bewegen.

Beperkingen

Wanneer een voorwerp in zo'n inertiaalstelsel versnelt of vertraagt, mag dat dus *alleen* veroorzaakt worden door een -ten opzichte van het coördinatenstelsel gedefinieerd- zwaartekrachtsveld of een uitwendige kracht. Dit laatste door de aantrekking van een ander voorwerp of als reactiekracht van bijvoorbeeld een straalmotor.

Wanneer men de wetten van Newton zou willen toepassen binnen een *niet*-inertiaalstelsel, zou men de effecten van de krachten van het hele versnellende heelal (binnen het denkkader van Newton) moeten compenseren. Dat zal niet lukken omdat alle vereenvoudigingen geïntroduceerd door het begrip massa-traagheid van een voorwerp niet meer mogen worden toegepast. We zouden bijvoorbeeld alle bestaande massadeeltjes in het heelal ten opzichte van elkaar moeten berekenen volgens de gravitatiewet ($F = G m_1 m_2 / r^2$) inclusief hun traagheidseffecten. De introductie van het begrip inertiaalstelsel is dus puur ten behoeve van de vereenvoudiging van de berekening.

Achtergrond

Als we berekeningen willen uitvoeren op stilstaande en bewegende voorwerpen, maken we gebruik van een berekeningsmethode en een coördinatenstelsel. Bijvoorbeeld een baan van een afgeschoten kogel op aarde met een bepaalde massa volgens de wetten van Newton. Bij het toepassen van de wetten van Newton is dat echter niet altijd toegestaan. Men mag niet zomaar willekeurig een coördinatenstelsel kiezen. Het stelsel dient een inertiaalstelsel te zijn, volgens de beschrijving die hierboven is genoemd.

Waarom?

Stel dat we een danseres aanschouwen die in een kort rokje een pirouette draait. Ze doet haar armen verticaal omhoog en ze gaat sneller ronddraaien. Haar rokje spreidt zich hierbij horizontaal uit.

Doordat ze haar armen omhoog doet, wordt haar massa meer geconcentreerd in het centrum, zodat het traagheidsmoment kleiner wordt. Omdat de rotatie-energie niet verandert (er gaat weinig rotatie-energie verloren door wrijving van de lucht en de balletschoentjes), maar gemiddeld genomen over een kleinere radius verdeeld is, zal de rotatiesnelheid toenemen. Zie de Wet van behoud van impulsmoment. De middelpuntvliedende kracht van het rokje overwint deels de zwaartekracht waardoor het rokje zich opricht.

Stel dat we een coördinatenstelsel kiezen dat even snel ronddraait als het meisje. Het meisje draait dan niet meer ten opzichte van het coördinatenstelsel. Nu gebeurt er iets vreemds: het meisje doet haar armen omhoog en we zien het rokje omhoog gaan, terwijl hier geen reden voor lijkt zijn. Er is toch geen rotatie-energie en er is geen middelpuntvliedende kracht meer: het meisje staat tenslotte stil ten opzichte van ons coördinatenstelsel!

Waar zit de fout in de redenering?

Verklaring: We hadden de wetten van Newton niet in het draaiende coördinatenstelsel mogen toepassen, want het is geen inertiaalstelsel. Een aan zichzelf overgelaten voorwerp in het met het danseresje meedraaiende coördinatenstelsel zal niet blijven stilstaan of zich eenparig rechtlijnig bewegen: het zal, afgezien van de zwaartekracht, cirkels beschrijven. Het stelsel is in versnelling (een rotatie is een versnelling) ten opzichte van het overheersende lokale inertiaalstelsel van de wereld. Om de wetten van Newton toe te passen, moeten we een ten opzichte van de wereld stilstaand of eenparig rechtlijnig bewegend coördinatenstelsel kiezen, anders heeft de wereld daar ter plaatse te veel invloed. Dan pas mag men de rest van de wereld voor de berekening verwaarlozen en zich alleen richten op de berekening van het draaiende meisje. We werken dan alleen met de zwaartekracht van de aarde daar ter plaatse en met de rotatie-energie en massa-traagheid van het meisje.

Hierbij komt meteen een discussiepunt naar voren bij de wetten van Newton. Newton gaat uit van een absolute ruimte die een absoluut coördinatenstelsel in zich draagt. Volgens de relationisten (onder andere Leibniz en Einstein) is er niet zo iets als een absolute ruimte: alles is relatief. Einstein verklaart ruimtelijke banen door aan te nemen dat de ruimte zelf gekromd is door versnellingen, rotaties en de zwaartekracht. Zie de ideeën van Einstein in zijn speciale relativiteitstheorie en algemene relativiteitstheorie.

Noten en referenties

- [1] Het was de natuurkundige/filosoof Ernst Mach die deze gedachtegang naar voren heeft gebracht. Het is de inspiratiebron geweest voor Einstein bij de ontwikkeling van zijn relativiteitstheorie. zie:traagheid
- [2] Als de versnelling ten gevolge van de rotatie van de Aarde niet verwaarloosbaar is, dus bij een berekening waarbij de kogel een grote afstand aflegt, heeft deze echter wel degelijk consequenties voor een kogelbaan, zie hiervoor bij het artikel over Corioliskrachten.

Lengtecontractie

Speciale relativiteitstheorie
$E = m c^2$
(de massa-energiere relatie)
Achtergrond
Lichtsnelheid · Lorentzinvariantie Inertiaalstelsel Wetten van Maxwell
Fundamentele begrippen
Lorentztransformatie · Ruimtetijd Viervector · Minkowski-ruimte Lengtecontractie · Tijddilatatie Gelijktijdigheid
Gevorderde onderwerpen
Massa-energiere relatie Tweelingparadox EPR-paradox
Experimenten
Michelson-Morley-experiment Fizeau-experiment energieproductie bij kernreacties
Wetenschappers
Einstein · Maxwell · Minkowski Lorentz · Poincaré

Wanneer twee objecten ten opzicht van elkaar in beweging zijn, nemen ze elkaar qua lengte korter waar dan ze bij stilstand zouden doen. Dit fenomeen is waarneembaar bij zeer hoge snelheden, die de lichtsnelheid benaderen. Het wordt **lengtecontractie**, **Lorentzcontractie**, **Lorentz-Fitzgeraldcontractie** of **lengtekrimp** (contractie = krimping) genoemd en is een eigenschap van de Lorentztransformatie. Het vindt ook plaats bij lage snelheden maar is dan niet meetbaar.

Concreet, als een voorwerp dat een lengte l_0 bij stilstand heeft beweegt met een snelheid v ten opzichte van een waarnemer, lijkt dat voorwerp dan slechts een lengte l te hebben, met

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{l_0}{\gamma}$$

met γ de Lorentz-factor.

De lengtecontractie wordt vaak afgeleid van de tijddilatatie. Beide fenomenen zijn een gevolg van de speciale relativiteitstheorie. De lengtecontractie kan ook rechtstreeks worden afgeleid uit de formules voor de Lorentztransformatie.

Omtrek van een ronddraaiende schijf

Bij een ronddraaiende schijf verandert de straal niet, terwijl de omtrek kleiner wordt door lengtecontractie. De helft van het quotient van omtrek en straal is daardoor kleiner dan pi (π), bijvoorbeeld gelijk aan 3 als de buitenkant van de schijf een tangentiële snelheid heeft van bijna 0,3 keer de lichtsnelheid. Voor een schijf met een straal van 1 meter komt dat neer op 14 miljoen toeren per seconde. Bij een sneldraaiende pulsar kan de helft van het quotiënt gelijk zijn aan 3,13.

Verwante fenomenen

- Tijdsdilatie
- Relativistische massa
- Ehrenfest-paradox

Lorentz-groep

In de natuurkunde en de groepentheorie, een deelgebied van de wiskunde, is de **Lorentz-groep** de groep van alle Lorentz-transformaties van de Minkowski-ruimtetijd, de klassieke setting voor alle (niet-zwaartekracht) natuurkundige fenomenen.

De wiskundige vorm van

- De kinematische wetten van de speciale relativiteitstheorie,
- De veldvergelijkingen van Maxwell in de theorie van het elektromagnetisme,
- De vergelijking van Dirac in de theorie van het elektron,

zijn elk invariant onder Lorentz-transformaties. Daarom kan men zeggen dat de Lorentz-groep een fundamentele symmetrie van veel van de bekende fundamentele natuurwetten uitdrukt.

Axioma's en definitie

Basis voor iedere groep is de samenstelling van twee elementen. Je kunt twee transformaties samenstellen door ze na elkaar uit te voeren. Dit betekent dat je tijd en plaats in een stelsel S eerst omrekent naar een stelsel S' dat beweegt ten opzichte van S en vervolgens naar een derde stelsel S'' dat beweegt ten opzichte van S' . Het resultaat is een transformatie van S naar S'' . Net als voor iedere groep gelden voor de groep van Lorentztransformaties de volgende axioma's:

- Wanneer L en L' Lorentztransformaties zijn, is de samenstelling $L'' = LL'$ zelf ook een Lorentztransformatie.
- Er is een éénheidstransformatie L zodat voor iedere Lorentztransformatie L' geldt $LL' = L$.
- Voor iedere Lorentztransformatie L' is er een bijbehorende inverse Lorentztransformatie L'' zodat $L'L'' = L$.

Een verzameling transformaties die aan deze eigenschappen voldoet noemt men een groep. De verzameling van alle Lorentztransformaties is zo'n groep. Een groep heeft bijzondere eigenschappen. Met behulp van groepentheorie is het daardoor mogelijk afleidingen efficiënter uit te voeren. De verzameling van (lineaire) coördinatentransformaties vormt een groep. De deelgroep daarvan waarbij tijd en afstand invariant is vormen de Galileotransformaties uit de klassieke mechanica.

De Lorentz-groep wordt nu gedefinieerd als de verzameling van alle coördinatentransformaties waarbij de lichtsnelheid invariant is. Het is eenvoudig in te zien dat deze verzameling aan de drie axioma's voldoet. Immers

wanneer twee transformaties allebei de lichtsnelheid niet veranderen doet de samenstelling dat ook niet. De éénheidstransformatie verandert de lichtsnelheid niet en de inverse van een transformatie die de lichtsnelheid niet verandert doet dat zelf ook niet. Doordat de "lorentzgroep" aan de drie axioma's voldoet vormt deze dus inderdaad een groep.

Lorentzfactor

De **lorentzfactor**, ook wel **dilatatiefactor** genoemd, is de factor waarmee in de relativiteitstheorie de tijddilatatie en de lengtecontractie wordt beschreven. De factor, die genoemd is naar de Nederlandse natuurkundige Hendrik Lorentz, is gedefinieerd als:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Hierin is v de snelheid van een object ten opzichte van een referentiekader en c de lichtsnelheid ($3,00 \cdot 10^8$ m/s). Voor snelheden die de lichtsnelheid naderen, gaat γ naar oneindig en voor snelheden groter dan de lichtsnelheid wordt het imaginair. Dit staat in direct verband met het feit dat geen enkel object sneller kan reizen dan het licht.

De factor γ komt naar voren in de lorentztransformaties, die de grondslag vormen voor de speciale relativiteitstheorie. Hierdoor komt deze factor veelvuldig voor in deze theorie, zoals in de uitdrukkingen voor tijddilatatie en lengtecontractie.

Energie

Een ander voorbeeld is de totale energie E van een deeltje dat zich met snelheid v voortbeweegt:

$$E = \gamma mc^2$$

waar m de rustmassa van het deeltje is. In de praktijk wordt vaak de energie van een deeltje genormaliseerd met het energie-equivalent van zijn rustmassa (mc^2), wat dus simpelweg γ oplevert. Om deze reden wordt γ ook wel de genormaliseerde energie of kortweg energie van een deeltje genoemd.

Voor een stilstaand deeltje is de energie gelijk aan

$$E = mc^2$$

de beroemde massa-energiere relatie van Albert Einstein.

Voor snelheden veel kleiner dan de lichtsnelheid kan γ worden benaderd met

$$\gamma \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2$$

en de energie van een deeltje met een lage snelheid is dus:

$$E = \gamma mc^2 = mc^2 + \frac{1}{2} \frac{mc^2 v^2}{c^2} = mc^2 + \frac{1}{2} mv^2$$

De tweede term is de bekende klassieke uitdrukking voor de kinetische energie van een deeltje met massa m en snelheid v . De energie van het deeltje gaat naar oneindig indien zijn snelheid de lichtsnelheid nadert. Het is (voor een deeltje met massa) dus onmogelijk om de lichtsnelheid te bereiken.

Transformatie

Een voorwerp dat met een snelheid 'v' beweegt heeft lorentzfactor $\gamma(v) = (1 - (v/c)^2)^{-0.5}$. Wanneer hetzelfde voorwerp wordt geobserveerd door een waarnemer die met een snelheid 'u' beweegt in dezelfde richting als het voorwerp (in een ander inertiaalstelsel dus), heeft het voorwerp een andere snelheid v' en dus ook een andere lorentzfactor $\gamma(v') = (1 - (v'/c)^2)^{-0.5}$. Deze kan ook rechtstreeks worden bepaald met behulp van de transformatie van relativistische snelheid ($v' = (v - u)/(1 - uv/c^2)$):

$$\begin{aligned}\gamma(v') &= \frac{1}{\sqrt{1 - (v'/c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v/c - u/c}{1 - uv/c^2}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{(1 - uv/c^2)^2 - (v/c - u/c)^2}{1 - uv/c^2}}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\frac{(1 - uv/c^2)^2 - (v/c)^2 - (u/c)^2}{1 - uv/c^2}}} = \frac{1 - uv/c^2}{\sqrt{(1 - (v/c)^2)(1 - (u/c)^2)}} = \gamma(v)\gamma(u)(1 - uv/c^2)\end{aligned}$$

De lorentzfactor in het nieuwe stelsel is dus gelijk aan de lorentzfactor in het oude stelsel vermenigvuldigd met de lorentzfactor van de waarnemer en een factor die ook bij de snelheidstransformatie voorkomt. Deze transformatie is nodig om grootheden als massa, impuls en energie tussen stelsels te transformeren.

Wanneer het voorwerp en de waarnemer niet in dezelfde richting bewegen moet rekening worden gehouden met de component v_e evenwijdig aan 'u' en de component v_l loodrecht op 'u'. Ook voor die tweede component is een transformatie van de relativistische snelheid. De transformatie van de lorentzfactor wordt nu als volgt uitgevoerd:

$$\begin{aligned}\gamma(v') &= \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_e/c - u/c}{1 - uv_e/c^2}\right)^2 - \left(\frac{\sqrt{1 - (u/c)^2} v_l/c}{1 - uv_e/c^2}\right)^2}} \\ &= \frac{1 - uv_e/c^2}{\sqrt{(1 - (v_e/c)^2 - (v_l/c)^2)(1 - (u/c)^2)}} = \gamma(v)\gamma(u)(1 - uv_e/c^2)\end{aligned}$$

De uitdrukking blijft dus hetzelfde. Alleen moet in de laatste component niet de totale snelheid van het voorwerp worden gebruikt maar de evenwijdige component ervan.

Lorentzinvariantie

Speciale relativiteitstheorie
$E = m c^2$
(de massa-energie relatie)
Achtergrond
Lichtsnelheid · Lorentzinvariantie Inertiaalstelsel Wetten van Maxwell
Fundamentele begrippen
Lorentztransformatie · Ruimtetijd Viervector · Minkowski-ruimte Lengtecontractie · Tijddilatatie Gelijktijdigheid
Gevorderde onderwerpen
Massa-energie relatie Tweelingparadox EPR-paradox
Experimenten
Michelson-Morley-experiment Fizeau-experiment energieproductie bij kernreacties
Wetenschappers
Einstein · Maxwell · Minkowski Lorentz · Poincaré

In de relativiteitstheorie is **Lorentzinvariantie** het verschijnsel dat een bepaalde eigenschap niet afhangt van het inertiaalstelsel waarin men werkt. Dit betekent dat, wanneer men een Lorentztransformatie uitvoert om naar een andere waarnemer over te gaan, de uitdrukking in kwestie niet essentieel verandert. Onder Lorentztransformaties rekent men in deze context alle symmetrieën van de ruimtetijd die de oorsprong invariant laten: Lorentzboosts (overgang op een ander inertiaalstelsel) en rotaties van de ruimte. De postulaten van de speciale relativiteitstheorie komen neer op de eis van Lorentzinvariantie van de natuurwetten.

Lorentzcovariantie van een grootheid

Een begrip zeer nauw verwant met de invariantie is **Lorentzcovariantie** of de *manier* waarop een grootheid transformeert onder de Lorentztransformaties. Hierin onderscheidt met *scalaires*, *viervectoren*, *spinoren* en meer algemeen *tensoren*.

Scalaire grootheden

Scalaires zijn grootheden die niet veranderen onder invloed van Lorentztransformaties. Een voorbeeld hiervan is het invariante lijnelement

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2.$$

Een ander voorbeeld is de rustmassa van een deeltje.

Lorentztransformatie

Onder een Lorentztransformatie in, bijvoorbeeld de x -richting, en met snelheid v , vinden we dat de getransformeerde positie gelijk is aan

$$\begin{aligned} x' &= \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} (x - vt) , \\ y' &= y , \\ z' &= z , \\ t' &= \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \left(t - \frac{vx}{c^2} \right) . \end{aligned}$$

Daarbij geven x, y, z en t positie en tijd aan in een stelsel S en x', y', z' en t' in een stelsel S' dat beweegt ten opzichte van S . Wanneer twee gebeurtenissen (x_0, y_0, z_0, t_0) en (x_1, y_1, z_1, t_1) gescheiden zijn door een afstand s_{01} dan vindt men voor de afstand in S' :

$$\begin{aligned} s_{01}'^2 &= (x_1' - x_0')^2 + (y_1' - y_0')^2 + (z_1' - z_0')^2 - (ct_1' - ct_0')^2 \\ &= \frac{(x_1 - x_0 - v(t_1 - t_0))^2}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 - \frac{(ct_1 - ct_0 - (x_1 - x_0)v/c)^2}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \\ &= (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 - (ct_1 - ct_0)^2 = s_{01}^2 \end{aligned}$$

Zodat: s_{01}^2 een voorbeeld is van een invariante grootheid.

Viervectoren

➤ Zie *viervector* voor het hoofdartikel over dit onderwerp.

Een viervector is elke grootheid die zich gedraagt als de positievector (t, x, y, z) zelf. Deze positievector wordt kort als x_μ genoteerd. Andere viervectoren zijn de vier-snelheid: de afgeleide van de positie-viervector naar de eigentijd:

$$u^\mu = \frac{dx^\mu}{d\tau} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \left(c, \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right) ,$$

en de vier-impuls: de vier-snelheid vermenigvuldigd met de rustmassa:

$$p^\mu = \left(\frac{E}{c}, p^x, p^y, p^z \right) .$$

Spinoren

Spinoren zijn grootheden die worden gebruikt om fermionen te beschrijven. De golf functie van een elektron is bijvoorbeeld een spinor.

Tensoren

Als we de transformatie van viervectoren noteren als (met Einstein-sommatieconventie)

$$v'^{\mu} = R^{\mu}_{\nu} v^{\nu}$$

met R^{μ}_{ν} een zekere matrix, dan wordt een algemene tensor $A^{\alpha\beta\gamma\dots}_{\kappa\lambda\mu\dots}$ (met een zeker aantal indices) gedefinieerd als een grootheid die onder Lorentztransformaties transformeert als

$$A'^{\alpha_1\alpha_2\alpha_3\dots}_{\beta_1\beta_2\beta_3\dots} = R^{\alpha_1}_{\mu_1} R^{\alpha_2}_{\mu_2} R^{\alpha_3}_{\mu_3} \dots R^{\nu_1}_{\beta_1} R^{\nu_2}_{\beta_2} R^{\nu_3}_{\beta_3} \dots A^{\mu_1\mu_2\mu_3\dots}_{\nu_1\nu_2\nu_3\dots}$$

Hierin is R^{ν}_{μ} de inverse matrix van R^{μ}_{ν} .

Viervectoren zijn speciale gevallen van tensoren met slechts één index (zij zijn dus tensoren van rang 1), en scalaren zijn tensoren zonder indices (tensoren van rang 0). Als tensoren van rang 2 zijn er bijvoorbeeld de Minkowskitensor:

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & -1 & & \\ & & -1 & \\ & & & -1 \end{pmatrix}.$$

Een ander voorbeeld is de elektromagnetische tensor

$$F_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & E_x/c & E_y/c & E_z/c \\ -E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ -E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ -E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}.$$

Een voorbeeld van een tensor van rang 4 is de Riemanntensor $R^{\mu}_{\nu\alpha\beta}$ die de kromming van de ruimtetijd beschrijft.

De positie van de indices (boven- of onderaan) duidt aan of de grootheid covariant of contravariant transformeert.

Contracties

De contractie van twee tensoren is weer een tensor. Een contractie bestaat eruit dat een covariante en een contravariante index gelijk worden gesteld, waarna erover wordt gesommeerd. Dit gebeurt met de Minkowskitensor als men een covariante index contravariant wil maken of omgekeerd:

$$x_{\mu} = \eta_{\mu\nu} x^{\nu}.$$

Hier wordt in het rechterlid de index ν gecontraheerd. Op deze manier associeert men een scalair met elke viervector:

$$x^2 = x_{\mu} x^{\mu} = x^{\mu} x^{\nu} \eta_{\mu\nu}$$

waar x^2 een scalair is.

Lorentzcovariantie van een gelijkheid

De natuurwetten horen Lorentzinvariant te zijn. Dit betekent dat, als we de natuurwetten neerschrijven in één referentiestelsel, ze dezelfde moeten blijven na Lorentztransformatie naar een ander referentiestelsel. Om dit te bereiken, horen beide leden van elke gelijkheid hetzelfde transformatiegedrag te hebben.

De wet van behoud van lading kan covariant geschreven worden. Ten eerste hebben we de viervector van de ladingsstroombichtheid $j^\mu = (c\rho, j_x, j_y, j_z)$, met ρ de ladingsdichtheid en (j_x, j_y, j_z) de stroomvector. Ten tweede is ook de afgeleide naar de positie een viervector:

$$\partial_\mu = \left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) .$$

De wet van behoud van lading kan dan worden geschreven als

$$\partial_\mu j^\mu = 0$$

waar nu beide leden scalaren zijn.

Een ander voorbeeld zijn de Maxwellvergelijkingen, die de vorm hebben:

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = -\mu_0 j^\nu .$$

In beide leden staat een viervector.

Lorentz-schending

Schending van de Lorentz-invariantie refereert aan theorieën die bij benadering relativistisch zijn als het gaat om daadwerkelijke experimenten (er zijn een heel aantal van dergelijke experimentele tests uitgevoerd), maar toch kleine of verborgen Lorentz-schendende correcties bevatten. Er zijn hiervoor verschillende scenario's:

- De natuurwetten zijn op een fundamenteel niveau wel Lorentzinvariant, maar deze symmetrie is spontaan gebroken. Dit zou er onder andere toe leiden dat het graviton niet massaloos meer is en dat gravitatie zich trager dan het licht voortplant.
- De natuurwetten zijn invariant onder een variant van de Lorentz-groep. Deze variant moet zich tot de gewone Lorentz-groep herleiden voor lage energieën.

Tot op heden zijn nog geen schendingen van de Lorentz-symmetrie waargenomen, zodat deze modellen slechts speculatief zijn.

Externe links

- (en) <http://www.physics.indiana.edu/~kostelec/faq.html> en <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2005-5> over Lorentzschending

Lorentztransformatie

De **lorentztransformatie**, genoemd naar zijn ontdekker, de Nederlandse natuurkundige Hendrik Antoon Lorentz, vormt de basis van de speciale relativiteitstheorie. Deze theorie werd geïntroduceerd om de tegenstrijdigheden tussen de theorieën van elektromagnetisme en klassieke mechanica uit de wereld te helpen.

De lorentztransformatie is een groepstransformatie die wordt gebruikt om de coördinaten van de tijdruimte van het ene coördinatensysteem S over te dragen op een ander coördinatensysteem S' , waarbij S' en S ten opzichte van elkaar een snelheid v in de x -richting hebben.

Definitie

Door de lorentztransformatie wordt tussen de tijdruimte-coördinaten (x, y, z, t) in S en (x', y', z', t') in S' de volgende relatie gelegd, ervan uitgaande dat de beide oorsprongen van de twee coördinatensystemen op elkaar moeten liggen, ofwel $(0,0,0,0)$ in S moet hetzelfde zijn als $(0,0,0,0)$ in S' .

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - vt) \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)\end{aligned}$$

hierin is

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

de zogenaamde lorentzfactor en c de lichtsnelheid.

Vaak wordt als tijdcoördinaat $\tau = ct$ gekozen, de afstand die het licht in vacuüm aflegt in de tijd t . Noemen we de verhouding van de snelheid v tot de lichtsnelheid

$$\beta = \frac{v}{c},$$

dan worden de relaties:

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - \beta\tau) \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \gamma(\tau - \beta x)\end{aligned}$$

met

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Lorentzinvariantie

➤ *Zie lorentzinvariantie voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Grootheden die onder de lorentztransformatie niet veranderen, worden *lorentzinvariant* genoemd. Het tijdruimte-interval is een lorentzinvariant. Verder geldt dat als elke oplossing voor een bewegingsvergelijking een oplossing van diezelfde vergelijking blijft na lorentztransformatie, dat deze vergelijking een lorentzinvariant is. Alle fundamentele vergelijkingen in de natuurkunde zijn Lorentzinvariant, inclusief de Maxwellvergelijkingen van het elektromagnetisme. Dat wil zeggen dat dezelfde vergelijkingen kunnen worden gebruikt om de natuurkunde te beschrijven vanuit elk willekeurig standpunt, eenparig bewegend of niet.

Door eenvoudige berekening is na te gaan dat de volgende uitdrukking gelijk (invariant) blijft onder de lorentztransformatie:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - d\tau^2$$

Deze grootte heet daarom *lorentzinvariant*.

Contractie

➤ *Zie lorentzcontractie voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Een van de eigenschappen van de tijdruimte die uit de lorentztransformatie volgt is de *lorentzcontractie*: het feit dat wanneer iets een snelheid heeft die dichtbij de lichtsnelheid ligt, de afgelegde weg korter lijkt dan voor iemand die stilstaat. Dit effect wordt onder andere gebruikt in een *undulator* op een synchrotron.

Lorentzcontractie wordt ook wel *Lorentz-FitzGeraldcontractie* genoemd, aangezien de Ierse natuurkundige George Francis FitzGerald onafhankelijk van Lorentz dezelfde contractie had voorgesteld.

Geschiedenis

Lorentz ontdekte in 1900 dat de later naar hem vernoemde transformatie de Maxwellvergelijkingen onveranderd laat (maar de Duitse natuurkundige Woldemar Voigt vond ze al eerder). Albert Einstein ontwikkelde later de speciale relativiteitstheorie, die hierop gebaseerd is.

De lorentz-groep

➤ *Zie lorentz-groep voor het hoofdartikel over dit onderwerp.*

Net als alle coördinatentransformaties hebben de lorentztransformaties een aantal bijzondere eigenschappen. Je kunt namelijk twee transformaties samenstellen door ze na elkaar uit te voeren. Dit betekent dat je tijd en plaats in een stelsel S eerst omrekenet naar een stelsel S' dat beweegt ten opzichte van S en vervolgens naar een derde stelsel S'' dat beweegt ten opzichte van S'. Het resultaat is een transformatie van S naar S''. Voor het samenstellen gelden een aantal axioma's:

- Wanneer L en L' lorentztransformaties zijn, is de samenstelling L'' = LL' zelf ook een lorentztransformatie.
- Er is een éénheidstransformatie L zodat voor iedere lorentztransformatie L' geldt LL' = L'.
- Voor iedere lorentztransformatie L' is er een bijbehorende inverse lorentztransformatie L'' zodat L'L''' = L.

Een verzameling transformaties die aan deze eigenschappen voldoet noemt men een [[Groep (wiskunde)|groep]]. De verzameling van alle lorentztransformaties is zo'n groep. Een groep heeft bijzondere eigenschappen. Met behulp van groepentheorie is het daardoor mogelijk afleidingen efficiënter uit te voeren. De verzameling van Gallileotransformaties uit de klassieke mechanica vormt ook een groep. De groep van alle mogelijke transformaties

waarin de lichtsnelheid invariant is vormt de zogenaamde lorentz-groep.

Afleiding: Twee dimensies

De lorentztransformatie wordt afgeleid door transformaties te zoeken waarin de lichtsnelheid invariant is. Over het algemeen wordt hierbij uitgegaan van twee dimensies: de x-coördinaat en de tijd. Als men uitgaat van een lineaire transformatie, dan is die in de meest algemene vorm te schrijven als:

$$x' = \alpha x + \delta t \quad \text{en} \quad t' = \beta x + \gamma t$$

Hierbij zijn x en t in het laboratoriumstelsel S, x' en t' in het waarnemer stelsels S' dat met een snelheid 'v' beweegt ten opzichte van S en α , β , δ en γ nog te bepalen functies van die snelheid. Een lichtstraal wordt in S beschreven met: $x = ct$. In S' heeft deze ook de lichtsnelheid en wordt dus beschreven met: $x' = ct'$. Hetzelfde geldt voor een lichtstraal in de andere richting ($x = -ct \rightarrow x' = -ct'$). Dit levert de volgende vergelijkingen:

$$+\alpha ct + \delta t = +c(\beta ct + \gamma t) \quad \text{en} \quad -\alpha ct + \delta t = -c(-\beta ct + \gamma t)$$

Door deze te combineren vindt men eenvoudig $\delta = c^2\beta$ en $\alpha = \gamma$. De transformatie wordt vereenvoudigd tot:

$$x' = \gamma x + \beta c^2 t \quad \text{en} \quad t' = \beta x + \gamma t$$

Beschouw als volgende stap de oorsprong van S'. Deze wordt beschreven met $x = vt$, maar ook met $x' = 0$, zodat:

$$x' = \gamma vt + \beta c^2 t = 0$$

Hieruit volgt $\beta = -v\gamma/c^2$ en dus:

$$x' = \gamma(v)(x - vt) \quad \text{en} \quad t' = \gamma(v)(-vx/c^2 + t)$$

Nu rest alleen nog het bepalen van de functie $\gamma(v)$. Beschouw hiervoor een derde stelsel S'' dat ten opzichte van S' beweegt met snelheid -v. Er volgt een transformatie van S naar S'':

$$x'' = \gamma(-v)(x' - vt') = \gamma(-v)\gamma(v)((x - vt) - v(-vx/c^2 + t)) = \gamma(v)^2(1 - (v/c)^2)x$$

$$t'' = \gamma(-v)(-v'x/c^2 + t') = \gamma(-v)\gamma(v)(-v(x - vt)/c^2 + (-vx/c^2 + t)) = \gamma(v)^2(1 - (v/c)^2)t$$

Hierbij is gebruikt dat vanwege symmetrie: $\gamma(-v) = \gamma(v)$. Voor kwalitatieve veranderingen maakt het immers niet uit welke kant men op beweegt. Er volgt direct dat S en S'' niet ten opzichte van elkaar bewegen, zodat S'' hetzelfde stelsel moet zijn als S met: $x'' = x$ en $t'' = t$. Daarmee vindt men uiteindelijk:

$$\gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

Hiermee is de lorentztransformatie in één dimensie afgeleid, dat wil zeggen voor de plaats-coördinaat in de richting van 'v'. Om aan te tonen dat alleen een lineaire transformatie mogelijk is, of om de transformatie van richtingen loodrecht op 'v' (hier y en z) af te leiden, heeft men een iets uitgebreidere analyse nodig.

Afleiding: Derde dimensie

In veel afleidingen van de lorentztransformatie, wordt de transformatie van 'y' en 'z' (de coördinaten loodrecht op de beweging van de waarnemer) afgedaan als triviaal omdat zij in ieder stelsel dezelfde waarde hebben. Inderdaad is het voldoende om te controleren dat de lichtsnelheid bij een gegeven transformatie invariant is (bijvoorbeeld met snelheidstransformatie) om deze te kunnen gebruiken in de relativiteitstheorie. Toch is het de vraag of de transformaties waarbij y en z niet transformeren de enige mogelijkheid zijn. Om dit engszins te onderzoeken kan men lichtstralen beschouwen die in stelsel S op $t=0$ worden uitgezonden vanaf de y-as op een punt $y = y_0$ (en $x=0$). Afhankelijk van de richting kan deze lichtstraal de x-as bereiken op tijdstip $t = t_1$ en positie $x = x_1$ ($y = 0$), waarbij $y_0^2 + x_1^2 = ct_1^2$. In een stelsel S' wordt het bereiken van de x-as gemeten op $x' = \gamma(x_1 - ut)$ en $t' = \gamma(t - ux_1/c^2)$. Volgens de lorentztransformatie zou de lichtstraal in dit stelsel moeten zijn uitgezonden op $t'=0$, $x'=0$, $y'=y_0$. Wij controleren de afstand:

$$\begin{aligned}
\sqrt{(y_0 - 0)^2 + (0 - \gamma(x_1 - ut))^2} &= \sqrt{y_0^2 + (\gamma(x_1 - ut))^2} \\
&= \gamma \sqrt{((1 - (u/c)^2)((ct)^2 - x_1^2) + (x_1 - ut)^2)} \\
&= \gamma \sqrt{((ct)^2 + (ux_1/c)^2 - 2x_1ut)} = \gamma \sqrt{(ct - ux_1/c)^2} = ct'
\end{aligned}$$

De gegeven tijd klopt dus ook in stelsel S' met de afstand. Omdat dat niet voor één lichtstraal geldt maar voor lichtstralen die in alle mogelijke richtingen op alle mogelijke plekken de x-as snijden is dit ook de enige mogelijke tijd en plaats vanwaar de lichtstraal waarop de lichtstraal in S' kan zijn uitgezonden. Hiermee is geenszins bewezen dat de gegeven lorentztransformatie de enige mogelijke, maar wel dat het waarschijnlijk is dat alleen transformaties waarbij voor de y- en z-as geen contractie optreedt mogelijk zijn.

Relativistische impuls

De **relativistische impuls** is de grootheid uit de relativiteitstheorie die de plaats inneemt van de impuls uit de klassieke mechanica. De impuls van een voorwerp hangt af van de massa en de snelheid. Van belang is behoud van impuls, dat wil zeggen dat de impuls behouden blijft als twee (of meer) voorwerpen kracht op elkaar uitoefenen. Binnen de speciale relativiteitstheorie is het nodig om nieuwe transformaties van plaats, tijd en daardoor ook snelheid te introduceren om er voor te zorgen dat deze aan het relativiteitsprincipe voldoen. Bij deze relativistische transformaties blijft de impuls uit de klassieke mechanica niet meer behouden. Daardoor is het nodig een nieuwe definitie te ontwikkelen.

De relativistische impuls speelt een cruciale rol binnen de speciale relativiteitstheorie voor het beschrijven van dynamica, dat wil zeggen de beweging van voorwerpen door krachten. Met behulp van de relativistische impuls kan ook de relativistische massa en de relativistische energie gedefinieerd worden waardoor men komt tot de massa-energielatie: het beroemde $E = mc^2$. Ook is het mogelijk de relativistische kracht te definiëren.

Noodzaak en definitie

In de klassieke mechanica is impuls van een bewegend voorwerp gedefinieerd als het product van massa en snelheid:

$$p_{\text{klassiek}}(v) = mv.$$

De eenheid van dit moment is 'kg m/s'. Wanneer twee voorwerpen op elkaar botsen of op een andere manier kracht op elkaar uitoefenen verandert de totale impuls niet. Dit is het behoud van impuls. Wanneer er een externe kracht op een voorwerp wordt uitgeoefend verandert de impuls wel. De toename van de impuls per seconde is gelijk aan de kracht. Binnen de speciale relativiteitstheorie voldoet deze definitie echter niet. Dit blijkt alleen al uit het feit dat de impuls eindeloos toe kan nemen wanneer men maar lang genoeg een kracht uitoefent. Dit suggereert dat de snelheid ook eindeloos toe kan nemen, terwijl een snelheid binnen de relativiteitstheorie nooit hoger kan worden dan de snelheid van het licht. Er zijn nog andere bezwaren, maar in ieder geval blijkt hieruit de noodzaak om een nieuwe definitie van de impuls te geven.

Binnen de speciale relativiteitstheorie is het met behulp van de lorentztransformatie mogelijk om plaats, tijd en snelheid van een voorwerp te bestuderen in verschillende inertiaalstelsels. Dit betreft de relativistische kinematica. Maar, zonder introductie van de impuls is het niet om massa en kracht te bestuderen. Daarmee gaan we over naar de relativistische dynamica. Voor de definitie van de impuls gaan we uit van de massa 'm' (in kg) die het voorwerp heeft in rust of bij snelheden ver onder de lichtsnelheid. Beweegt het voorwerp met een snelheid 'v' (in m/s) dan is het relativistische moment gedefinieerd als:

$$p(v) = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma(v)mv.$$

De eenheid van dit moment is 'kg m/s' net als in de klassieke mechanica. Verder is $\gamma(v) = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$ de lorentzfactor. Wanneer de snelheid veel lager is dan de lichtsnelheid ('c') kan de noemer uit deze breuk worden verwaarloosd en is de impuls gelijk aan het product van massa (m_0) en snelheid. Voor grotere snelheden wordt de noemer (veel) kleiner dan een, zodat het relativistische moment groter is dan het klassieke moment. Wanneer de snelheid de lichtsnelheid nadert, wordt de impuls oneindig groot. Dit drukt het principe uit de relativiteitstheorie uit, dat de snelheid van het licht niet te halen is. De impuls geeft hiervoor feitelijk een betere indicatie dan de snelheid zelf. Immers, wanneer een voorwerp de snelheid van het licht nadert, kan het nog wel worden versneld door een kracht uit te oefenen. De kracht zorgt voor een regelmatige toename van de snelheid, maar bij een gelijke toename van de impuls neemt de snelheid steeds minder toe. Om de snelheid van het licht te halen is oneindig veel tijd nodig, of een oneindig grote kracht.

Gevolg: Relativistische dynamica

Wanneer het relativistisch moment eenmaal gedefinieerd is, is het mogelijk beweging van voorwerpen door krachten te beschrijven. Daarvoor worden andere grootheden gedefinieerd.^[1] Om te beginnen is dit de relativistische massa. Door te vast te houden aan de klassieke definities van moment als product van massa en snelheid definieert men een relativistische massa $m_R(v) = m\gamma(v)$. Deze massa neemt toe met de snelheid en wordt oneindig wanneer de snelheid gelijk wordt aan de lichtsnelheid. Dit geeft een eenvoudig inzicht waarom het zo moeilijk is een deeltje of voorwerp nog te versnellen als het al bijna de lichtsnelheid heeft. Voor de dynamische beschrijving van beweging in de speciale relativiteitstheorie is deze relativistische massa niet echt nodig. Sommige wetenschappers prefereren het om alleen de rustmassa te gebruiken.

Een tweede grootheid is de kracht. Deze wordt net als in de klassieke mechanica ook binnen de relativiteitstheorie gedefinieerd als de verandering van de impuls gedeeld door de tijd: $F(v) = dp(v)/dt$. Er is natuurlijk alleen sprake van een kracht als de snelheid, en dus de impuls verandert in de tijd. Een derde zeer belangrijke grootheid is de energie. Deze volgt weer uit de definitie van kracht, doordat de verandering van de energie van een voorwerp gelijk is aan de uitgeoefende arbeid, dat wil zeggen het product van kracht en afgelegde weg. Hieruit volgt dat de energie van een bewegend voorwerp toeneemt door de snelheid met $E = (m\gamma(v) - m)c^2 = \Delta mc^2$. Dit illustreert de massa-energie relatie. Uit de studie van inelastische botsingen blijkt dat ook andere vormen van energie leiden tot massaverandering waardoor men komt tot het bekende $E = mc^2\gamma(v) = m_Rc^2$.

Transformatie van impuls (en energie)

Wanneer rustmassa (m) en snelheid (v) van een voorwerp bekend zijn kan de impuls worden berekend. Een bewegende waarnemer observeert het voorwerp met een andere snelheid (v') en dus ook met een andere impuls. Het is mogelijk de transformatie van het impuls rechtstreeks te bestuderen. Voor een waarnemer die beweegt met snelheid 'u' in dezelfde richting als het voorwerp geldt met transformatie van de relativistische snelheid: $v' = (v - u)/(1 - uv/c^2)$. Daardoor transformeert ook de Lorentzfactor:

$$\gamma(v') = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v/c - u/c}{1 - uv/c^2}\right)^2}} = \frac{1 - uv/c^2}{\sqrt{(1 - (v/c)^2)(1 - (u/c)^2)}} = \gamma(v)\gamma(u)(1 - uv/c^2)$$

Met deze transformatie vindt men voor de impuls:

$$p(v') = \gamma(v')mv' = \gamma(u)\gamma(v)m(v - u) = \gamma(u)(p(v) - \gamma(v)mu)$$

Voor de waarnemer is de impuls dus vergroot met de lorentzfactor ($\gamma(u)$). Daarnaast komt er een bijdrage bij die afhangt van de snelheid van de waarnemer. Dit laatste gebeurt ook met de impuls in de klassieke mechanica. Het is de moeite om ook de transformatie van de energie $E = \gamma(v)mc^2$ te beschrijven, want deze gaat op bijna dezelfde wijze:

$$E(v') = \gamma(v')mc^2 = \gamma(u)\gamma(v)m(1 - uv/c^2)c^2 = \gamma(u)(E(v) - p(v)mu)$$

Wanneer 'u' en 'v' niet dezelfde richting hebben moeten de componenten van de impuls evenwijdig aan en loodrecht op 'u' worden onderscheiden. Het blijkt dat de evenwijdige component transformeert zoals hierboven terwijl de loodrechte component door de transformatie niet verandert^[1]. Zo komt men tot de algemene transformatie:

$$p'_{\parallel} = \gamma(u)(p_{\parallel} - \gamma(v)mu) = \gamma(u)(p_{\parallel} - Eu/c^2)$$

$$p'_{\perp} = p_{\perp}$$

$$E' = \gamma(u)(E - \gamma(v)mu v) = \gamma(u)(E - p_{\parallel}u)$$

Merk op dat deze transformatie sterk lijkt op de Lorentztransformatie voor ruimte en tijd. Moment en energie zijn binnen de relativiteitstheorie aan elkaar verwant als ruimte en tijd.

Behoud van impuls (eenvoudig geval)

De definitie van relativistische impuls moet dusdanig zijn dat er behoud van impuls is in alle mogelijke inertiaalstelsels. Bestuderen wij dit eerst voor een eenvoudig geval van een symmetrische centrale elastische botsing tussen deeltjes 'A' en 'B'. Dit kan worden beschreven in één dimensie. Deeltje 'A' heeft voor de botsing snelheid 'v' en na de botsing snelheid '-v'. Deeltje 'B' heeft voor de botsing snelheid '-w'. Uit symmetrie blijkt dan dat dit deeltje na de botsing snelheid 'w' moet hebben. Onderzoek nu de impuls in een stelsel S' dat met snelheid 'u' in dezelfde richting beweegt als 'A' en 'B'. Bij deze botsing is impuls behouden mits de verhouding tussen m_A en m_B correct is. Vanwege de symmetrie is de impuls voor en na de botsing omgekeerd van teken en moet dus wel gelijk zijn aan nul:

$$p_{A0} + p_{B0} = \gamma(v)m_A v - \gamma(w)m_B w = 0$$

Hieruit volgt de gevraagde massaverhouding. Onderzoeken we nu de impuls in een stelsel S' dat met snelheid 'u' in dezelfde richting beweegt als 'A' en 'B'. In dit stelsel vinden we met snelheidstransformatie de snelheden en vervolgens de impulsen voor de botsing:

$$p'_{A0} = \gamma((v-u)/(1-uv/c^2))m_A((v-u)/(1-uv/c^2)) = \gamma(u)\gamma(v)m_A(v-u)$$

$$p'_{B0} = \gamma((-w-u)/(1+uw/c^2))m_B((-w-u)/(1+uw/c^2)) = \gamma(u)\gamma(w)m_B(-w-u)$$

Hierbij is net als in de vorige sectie gebruikgemaakt van de transformatie van de Lorentzfactor. Deze uitdrukkingen lijken op die voor stelsels S, met extra termen. Voor de totale impuls vinden we:

$$p'_{A0} + p'_{B0} = \gamma(u)\gamma(v)m_A(v-u) + \gamma(u)\gamma(w)m_B(-w-u) = -\gamma(u)(\gamma(v)m_A + \gamma(w)m_B)u$$

Analoog vinden we na de botsing:

$$p'_{A1} = \gamma(u)\gamma(v)m_A(-v-u)$$

$$p'_{B1} = \gamma(u)\gamma(w)m_B(w-u)$$

$$p'_{A1} + p'_{B1} = -\gamma(u)(\gamma(v)m_A + \gamma(w)m_B)u$$

De totale impuls is niet meer nul in S' maar op wel op dezelfde manier verandert voor en na de botsing. Daarom is ook in dit stelsel (en dus in alle vergelijkbare stelsels) de impuls behouden. Dit eenvoudige geval vergde al aardig wat rekenwerk. Veel daarvan was analoog aan wat bij de transformatie van impuls (en energie). Voor het algemene geval kunnen daar beter gebruik van maken.

Behoud van impuls en energie (het algemene geval)

Met behulp van deze transformaties is veel eenvoudiger aan te tonen dat behoud van impuls (en energie) invariant is tussen inertiaalstelsels. Beschouw hiervoor twee deeltjes 'A' en 'B' die met elkaar botsen of op een andere manier kracht op elkaar uitoefenen. Dit wordt waargenomen in twee stelsels: S en S'. Met behulp van de transformatieformules voor impuls en energie wordt de totale impuls en energie voor de botsing wordt geschreven als:

$$\begin{aligned} p'_{A||} + p'_{B||} &= \gamma(u)(p_{A||} - E_A u/c^2 + p_{B||}) - E_B u/c^2 = \gamma(u)((p_{A||} + p_{B||}) - (E_A + E_B)u/c^2) \\ p'_{A\perp} + p'_{B\perp} &= p_{A\perp} + p_{B\perp} \\ E'_A + E'_B &= \gamma(u)(E_A - p_{A||} + E_B - p_{B||}) = \gamma(u)((E'_A + E'_B) - (p_{A||} + p_{B||})) \end{aligned}$$

Terwijl na de botsing:

$$\begin{aligned} p'_{A||1} + p'_{B||1} &= \gamma(u)((p_{A||1} + p_{B||1}) - (E_{A1} + E_{B1})u/c^2) \\ p'_{A\perp1} + p'_{B\perp1} &= p_{A\perp1} + p_{B\perp1} \\ E'_{A1} + E'_{B1} &= \gamma(u)((E_{A1} + E_{B1}) - (p_{A||1} + p_{B||1})) \end{aligned}$$

wanneer nu in stelsel S impuls (en energie) behouden is:

$$p_{A||} + p_{B||} = p_{A||1} + p_{B||1} \quad , \quad p_{A\perp} + p_{B\perp} = p_{A\perp1} + p_{B\perp1} \quad , \quad E_A + E_B = E_{A1} + E_{B1}$$

Vindt men met de bovenstaande transformaties eenvoudig:

$$p'_{A||} + p'_{B||} = p'_{A||1} + p'_{B||1} \quad , \quad p'_{A\perp} + p'_{B\perp} = p'_{A\perp1} + p'_{B\perp1} \quad , \quad E'_A + E'_B = E'_{A1} + E'_{B1}$$

Dit betekent dat impuls (en energie) ook in S' behouden zijn. Aangezien de transformatie van $P_{||}$ afhangt van de energie en vice versa, is het niet mogelijk om behoud van impuls en energie apart van elkaar aan te tonen. Dit geldt overigens ook in de klassieke mechanica. In symmetrische gevallen is het wel mogelijk behoud van impuls apart te onderzoeken omdat de symmetrie er dan voor zorgt dat energie behouden is. Maar, voor het algemene geval is de bovenstaande aanpak onvermijdelijk.

Vier-impuls

Omdat energie en impuls aan elkaar verwant zijn worden ze in een meer geavanceerde aanpak beschreven met behulp van viervectoren:

$$[E, cp]$$

waar E de energie is en de relativistische impuls P (drie-impuls):

$$E = \gamma mc^2 \quad , \quad p = \gamma mv$$

Ook geldt een invariantie. De lengte van het vier-impuls van een deeltje wordt als volgt gedefinieerd:

$$[E, cp]^2 = c^2 p \cdot p - E^2$$

Deze lengte is invariant (blijft constant). Dat wil zeggen dat alle waarnemers voor een gegeven deeltje dezelfde waarde vinden. Dit volgt uit de transformatieformules voor 'p' en 'E'.

Afleiding

Om binnen de speciale relativiteitstheorie te kunnen rekenen (kracht en beweging relativistische dynamica) is het voldoende dat een relativistische impuls is gedefinieerd zodat behoud van impuls geldig is in alle inertiaalstelsels. Toch blijft de vraag of er misschien een andere definitie mogelijk is. Men kan uitgaan van alle mogelijke functies 'p(v)' en onderzoeken welke voldoen. Recent is dit kort en elegant beschreven door Hu^[2]. In het meest algemene geval zijn 'v' en 'p(v)' drie-dimensionale vectoren. Het is echter eenvoudig in te zien dat p(v) altijd dezelfde richting heeft als v terwijl de grootte alleen afhankelijk is van de grootte van v. Dit komt doordat de functie niet mag veranderen door ruimtelijke rotaties, b.v. om 'v' zelf:

$$p(v) = h(|v|)v$$

Het is nu zaak de functie 'h(|v|)' te bepalen zodat de resulterende functie p(v) aan de behoudswet voldoet. Dit is niet mogelijk met één-dimensionale botsingen, maar wel wanneer wordt uitgegaan van twee dimensies. We gaan uit van een symmetrische elastische botsing tussen twee identieke deeltjes ('A' en 'B'). Deeltje 'A' heeft in de (horizontale) x-richting voor én na de botsing een snelheid 'v' terwijl de snelheid in de (verticale) y-richting omklapt van 'w' naar '-w'. Deeltje 'B' heeft voor én na de botsing horizontale snelheid '-v' terwijl de verticale snelheid omklapt van '-w' naar 'w'. Dit is een volledig symmetrische voorstelling van een niet-centrale elastische botsing. Door het juiste inertiaalstelsel te kiezen kan iedere elastische botsing op deze manier beschreven worden, maar dat is voor de afleiding niet van belang. Van belang is wel dat men vanwege de symmetrie eenvoudig ziet dat de impuls in dit stelsel behouden is. De snelheid van de twee deeltjes is immers gelijk en verandert niet door de botsing. Alleen de verticale snelheidscomponent klapt om. Hierdoor is de totale impuls voor en na de botsing zelfs gelijk aan nul. We introduceren nu een waarnemer met horizontale snelheid 'v'. Voor deze waarnemer heeft deeltje 'A' dus een horizontale snelheid van nul. De horizontale snelheid van deeltje 'B' volgt met relativistische snelheidstransformatie en is $-2v/(1+v^2)$. Met dezelfde transformatie vindt men voor de verticale snelheden (voor de botsing):

$$\text{Voor deeltje A: } \frac{w}{\sqrt{1-v^2}}.$$

$$\text{Voor deeltje B: } -\frac{w\sqrt{1-v^2}}{1+v^2}.$$

Na de botsing klapt van de twee verticale snelheden alleen de richting om. Maar, anders dan in het klassieke geval, is de verticale snelheid van twee deeltjes voor deze waarnemer niet gelijk. Voor de impuls volgt, ook voor dit stelsel, met symmetrie dat de horizontale component behouden is. Immers, de grootte van de snelheid van elk van de deeltjes is onveranderd na de botsing, de horizontale snelheid van 'A' is nul en die van 'B' verandert niet. Voor de verticale component van de impuls geldt (voor de botsing):

$$\text{Voor deeltje A: } h\left(\frac{w}{\sqrt{1-v^2}}\right) \frac{w}{\sqrt{1-v^2}}$$

$$\text{Voor deeltje B: } -h\left(\sqrt{\left(\frac{2v}{1+v^2}\right)^2 + \left(\frac{w\sqrt{1-v^2}}{1+v^2}\right)^2}\right) \frac{w\sqrt{1-v^2}}{1+v^2}$$

Aangezien ook de verticale impuls van de twee deeltjes na de botsing slechts van richting omklapt moet de grootte van deze twee impulsen gelijk zijn. Daaruit is de functie h() te bepalen. Dit gaat echter veel eenvoudiger door nu aan te nemen dat w veel kleiner is dan v.^[2] Deeltje 'A' is voor de waarnemer nu niet-relativistisch zodat h() voor dit deeltje gelijk is aan de (rust)massa 'm'. Voor deeltje 'B' geldt dat de bijdrage van w in h() kan worden weggelaten zodat:

$$m \frac{w}{\sqrt{1-v^2}} = h\left(\left|\frac{2v}{1+v^2}\right|\right) \frac{w\sqrt{1-v^2}}{1+v^2}$$

en dus:

$$h\left(\left|\frac{2v}{1+v^2}\right|\right) = m \frac{1-v^2}{1+v^2} = m \sqrt{1 - \left(\frac{2v}{1+v^2}\right)^2} = m\gamma\left(\frac{2v}{1+v^2}\right)$$

Hiermee is aangetoond dat $h(|v|) = \gamma(v)m$ het product van rustmassa en lorentzfactor. Hoewel hiermee nog niet is aangetoond dat de gebruikelijke definitie van impuls in alle gevallen voldoet aan de wet van behoud van impuls. Dat is hierboven al gedaan. Maar wel is aangetoond dat dit de enige mogelijke definitie is voor de relativistische impuls.

Rustmassa

De **rustmassa** (m_0) is de massa van een deeltje dat zich in rust bevindt. De *rustenergie* van een deeltje is de energie-inhoud van een deeltje in rust, en die is volgens de massa-energie relatie $E = mc^2$ direct gerelateerd aan de rustmassa. In de speciale relativiteitstheorie is deze rustmassa gelijk aan de **invariante massa** van een deeltje.

Relativistische massa

In de speciale relativiteitstheorie kan men een snelheidsafhankelijke massa definiëren, waarbij de momentane waarde van de massa afhankelijk is van de snelheid; er is dan een **massatoename** bij toenemende snelheid. Deze snelheidsafhankelijke massa noemt men wel *relativistische massa*. Dit effect is pas merk- of meetbaar wanneer de lichtsnelheid voldoende benaderd wordt. Er is steeds meer energie nodig om het deeltje te versnellen naarmate het de lichtsnelheid nadert.

De massa m_v bij een gegeven snelheid v kan worden gedefinieerd door de massa-energie relatie toe te passen op de *totale* energie van het bewegende systeem (rustenergie plus kinetische energie):

$$E_{\text{tot}} = m_v c^2$$

waarmee bij een rustmassa m_0 de 'relativistische massa' gelijk wordt aan:

$$m_v = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = m_0 \gamma$$

waarbij geldt:

- m_v is de 'relativistische massa' bij de gegeven snelheid
- m_0 is de rustmassa
- v is de gegeven snelheid
- c is de lichtsnelheid
- γ is de Lorentzfactor

Om de lichtsnelheid te bereiken is dan een oneindige hoeveelheid energie nodig, waardoor een deeltje met massa nooit de lichtsnelheid kan bereiken. Fotonen hebben geen rustmassa en bewegen zich in een vacuüm met de lichtsnelheid. De relativistische massa kan dan niet bepaald worden uit de directe formule daarvoor, maar wel door gebruik te maken van de fundamentele definitie en de uitdrukking voor de energie van een foton:

$$E = m_v c^2 = h\nu$$

met ν (nu) de frequentie en h de constante van Planck, dus

$$m_v = h\nu/c^2$$

Een andere manier om dit te bekijken is dat elk "massaloos" deeltje met de lichtsnelheid moet bewegen om een zekere energie te kunnen hebben en dus te bestaan.

Beschrijving in termen van alleen rustmassa

Een meer gangbare wijze van beschrijven van de relativiteitstheorie, is te zeggen dat de massa constant is (en gelijk aan de rustmassa), maar de impuls van een deeltje gelijk is aan $\gamma m v$ in plaats van $m v$. Beide wijzen van beschrijven zijn vanuit mathematisch gezichtspunt precies gelijk, dat wil zeggen, ze geven precies dezelfde meetbare resultaten. In de praktijk wordt echter de voorkeur gegeven aan een beschrijving met constante massa.

Snelheidstransformatie

Relativistische snelheid is een begrip dat samenhangt met de speciale relativiteitstheorie en waarmee wordt aangegeven hoe de snelheid van een beweging wordt waargenomen door waarnemers in verschillende inertiaalstelsels. Dit wordt berekend met behulp van de lorentztransformatie. Het begrip relativistische snelheid is nodig om tegenstrijdigheden tussen elektromagnetisme en klassieke mechanica uit de wereld te helpen.

Galileotransformatie (klassieke mechanica)

In de klassieke mechanica kunnen snelheden eenvoudig van elkaar worden afgetrokken. Wanneer een voorwerp een snelheid \vec{v} heeft en degene die het voorwerp waarneemt beweegt zelf met een snelheid \vec{u} , is dan heeft voorwerp ten opzichte van de waarnemer een snelheid:

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}$$

De snelheden worden aangegeven door vectoren. Ze hebben grootte en richting. Wanneer voorwerp en waarnemer in dezelfde richting bewegen worden de snelheden eenvoudig van elkaar afgetrokken. Een bijzonder geval is wanneer de waarnemer even snel beweegt als het voorwerp. Het voorwerp heeft dan voorwerp voor de waarnemer een snelheid van '0', het voorwerp stil. Wanneer voorwerp en waarnemer niet in dezelfde richting bewegen worden de snelheden als vector opgeteld. Daardoor kan niet alleen de grootte maar ook de richting van de snelheid voor de waarnemer anders zijn.

Relativistische snelheidstransformatie

Binnen de speciale relativiteitstheorie is deze aanpak niet mogelijk. Stel namelijk dat de waarnemer een lichtstraal waarneemt. De lichtstraal beweegt met de lichtsnelheid 'c'. Volgens de klassieke transformatie zou de lichtstraal voor een bewegende waarnemer een lagere snelheid hebben (als de waarnemer in dezelfde richting beweegt als de lichtstraal) of zelfs een hogere snelheid (als de waarnemer de andere kant op beweegt). Dit is niet mogelijk aangezien volgens de speciale relativiteitstheorie een lichtstraal dezelfde snelheid heeft voor elke waarnemer, zolang die met een constante snelheid beweegt. Door hier consequent aan vast te houden is de lorentztransformatie afgeleid.

Wanneer een voorwerp in een stelsel S beweegt met snelheid \vec{v} met componenten v_x , v_y en v_z een waarnemer beweegt met snelheid 'u' in positieve richting langs de x-as. Dan zijn de snelheden van het voorwerp in het stelsel S' van de waarnemer:

$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - uv_x/c^2}$$

$$v'_y = \frac{1}{\gamma(u)} \frac{v_y}{1 - uv_x/c^2} = \sqrt{1 - (u/c)^2} \frac{v_y}{1 - uv_x/c^2}$$

$$v'_z = \frac{1}{\gamma(u)} \frac{v_z}{1 - uv_x/c^2} = \sqrt{1 - (u/c)^2} \frac{v_z}{1 - uv_x/c^2}$$

Hierbij is $\gamma(u) = \frac{1}{\sqrt{1 - (u/c)^2}}$ de lorentzfactor.

Vereenvoudigde afleiding: evenwijdige snelheden

De transformatie kan het meest eenvoudig worden beschreven wanneer de waarnemer evenwijdig beweegt aan het voorwerp. Zonder beperking der algemeenheid is deze beweging langs de x-as en begint in de oorsprong, zodat hij wordt beschreven met $x = v t$. Wanneer de waarnemer met snelheid 'u' in dezelfde richting beweegt vindt men met behulp van de lorentztransformatie:

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} = \frac{vt - ut}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} = \frac{v - u}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} t$$

$$t' = \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} = \frac{t - uvt/c^2}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} = \frac{1 - uv/c^2}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} t$$

Zowel plaats als tijd zijn getransformeerd in het stelsel van de waarnemer. De twee zijn wel beide evenredig. De snelheid in het stelsel van de waarnemer is de evenredigheidsconstante.

$$v' = \frac{x'}{t'} = \frac{v - u}{1 - uv/c^2}$$

Dit stemt overeen met v'_x hierboven.

Met plussen in plaats van minnen hebben we de formule voor het "optellen" van snelheden.

Algemene afleiding

In het algemeen wordt de snelheid van een beweging beschreven met drie componenten: ' v'_x ', ' v'_y ' en ' v'_z '. Een beweging kan worden beschreven met behulp van plaats en tijd. Een beweging langs de x-as die begint in de oorsprong wordt beschreven met $x = v t$. Wanneer een waarnemer met snelheid 'u' beweegt in dezelfde richting vinden we met behulp van de lorentztransformatie:

$$x' = \frac{(v - u)t}{\sqrt{1 - (u/c)^2}}, \quad y' = \frac{v_y t}{\sqrt{1 - (u/c)^2}}, \quad z' = \frac{v_z t}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} \text{ en } t' = \frac{1 - uv_x/c^2}{\sqrt{1 - (u/c)^2}} t$$

Op dezelfde manier als hierboven vinden we nu hoe de snelheid wordt getransformeerd:

$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - uv_x/c^2}, \quad v'_y = v_y \frac{\sqrt{1 - (u/c)^2}}{1 - uv_x/c^2} \quad \text{en} \quad v'_z = v_z \frac{\sqrt{1 - (u/c)^2}}{1 - uv_x/c^2}$$

Duidelijk is het verschil tussen snelheidscomponent in de richting van 'u' en de twee snelheidscomponenten loodrecht daarop. Men maakt dan ook vaak gebruik van de evenwijdige component en de loodrechte component van de snelheid

Invariantie van de lichtsnelheid

De relativistische snelheidstransformatie is nodig omdat bij de klassieke transformatie de lichtsnelheid niet voor alle waarnemers hetzelfde is. Bekijken we nu hoe dat met de nieuwe transformatie gaat. Neem daarvoor nogmaals de beweging van een lichtstraal. Voor een lichtstraal die evenwijdig aan 'u' beweegt met snelheid $v = c$ vinden we:

$$v' = \frac{v - u}{1 - uv/c^2} = \frac{c - u}{1 - uc/c^2} = \frac{c - u}{1 - u/c} = \frac{c - u}{1 - u/c} \frac{c}{c} = \frac{(c - u)c}{c - u} = c$$

Voor een lichtstraal die loodrecht beweegt op 'u', bij voorbeeld met ' $v'_y = c$ ' vinden we:

$$v'_x = \frac{v_x - u}{1 - uv_x/c^2} = \frac{-u}{1 - u0/c^2} = -u$$

$$v'_y = c \frac{\sqrt{1 - (u/c)^2}}{1 - u0/c^2} = c \sqrt{1 - (u/c)^2} = \sqrt{c^2 - u^2}$$

$$v'_z = 0 \frac{\sqrt{1 - (u/c)^2}}{1 - u0/c^2} = 0$$

De lichtstraal heeft in het nieuwe stelsel een snelheid:

$$v' = \sqrt{v'^2_x + v'^2_y + v'^2_z} = c$$

In beide gevallen blijkt de lichtstraal ook in het nieuwe stelsel met de lichtsnelheid te bewegen. Wanneer men lichtstralen in alle mogelijke richtingen onderzoekt blijkt dit steeds te gelden zodat deze transformatie aan de voorwaarden van de speciale relativiteitstheorie voldoet.

Speciale relativiteitstheorie

Speciale relativiteitstheorie
$E = m c^2$
(de massa-energiere relatie)
Achtergrond
Lichtsnelheid · Lorentzinvariantie Inertiaalstelsel Wetten van Maxwell
Fundamentele begrippen
Lorentztransformatie · Ruimtetijd Viervector · Minkowski-ruimte Lengtecontractie · Tijddilatatie Gelijktijdigheid
Gevorderde onderwerpen
Massa-energiere relatie Tweelingparadox EPR-paradox
Experimenten
Michelson-Morley-experiment Fizeau-experiment energieproductie bij kernreacties
Wetenschappers
Einstein · Maxwell · Minkowski Lorentz · Poincaré

De **speciale relativiteitstheorie** is een natuurkundige theorie gepubliceerd door Albert Einstein in 1905. De theorie gaat ervan uit dat waarnemers in inertiaalstelsels die ten opzichte van elkaar een eenparige beweging uitvoeren niet kunnen bepalen wie van beiden een "absolute beweging" uitvoert en wie stilstaat. Het artikel in het wetenschappelijke tijdschrift *Annalen der Physik* van Einstein droeg de titel "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" (*Over de elektrodynamica van bewegende lichamen*). De theorie heeft als postulaat dat de lichtsnelheid in vacuüm hetzelfde is voor alle waarnemers die met constante snelheid bewegen.

Later, in 1915, publiceerde Einstein de algemene relativiteitstheorie, waarin ook versnelde bewegingen en zwaartekrachtsvelden in beschouwing genomen worden.

Historische achtergrond

Tot Einsteins tijd nam men met Newton aan dat er "absolute beweging" bestond, zodat rust en beweging twee van elkaar te onderscheiden toestanden zijn. Beweging werd beschouwd als het tegenovergestelde van "rust" (ether). De ether is het medium waarvan men tot en met de tijd van Ernst Mach dacht dat het de lege ruimte vulde en ook voorwerpen doordrong. Deze ether moest in de eerste plaats bestaan om het theoretisch mogelijk te maken dat licht zich voortplant door de lege ruimte. Licht was immers volgens Huygens en Fresnel een golf en golven hadden, zo meende men, een veerkrachtig medium nodig om zich in voort te planten. De lichtsnelheid ten opzichte van de ether zou dan een andere waarde hebben dan de lichtsnelheid die wij op

aarde meten, omdat de aarde zich met een bepaalde snelheid door de ether beweegt. Dit in analogie met de situatie bij geluid, waar de snelheid ten opzichte van de lucht constant is. Als een waarnemer zich op een rijdende wagen bevindt zal hij een andere geluidssnelheid meten, dan wanneer de wagen stil zou staan.

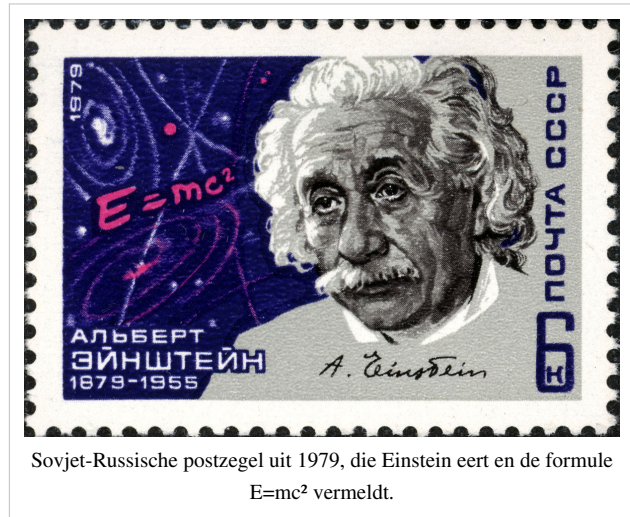
Einstein onderzocht de wetten van Maxwell voor elektriciteit en magnetisme en bedacht dat het bijvoorbeeld voor de krachten niet mag uitmaken of je een metalen staaf in een magneetveld beweegt, of omgekeerd. Theoretisch komt dit in orde als de lichtsnelheid onafhankelijk van de beweging van de waarnemers is. Daarom postuleerde Einstein

1. de lichtsnelheid c heeft in elk inertiaalstelsel dezelfde waarde
2. in elk inertiaalstelsel gelden dezelfde natuurwetten.

Deze postulaten zorgden voor een revolutie in de opvattingen over ruimte en tijd. Je weet niet of je stilstaat, dan wel met constante snelheid beweegt. Je kunt ook niet meer spreken van ruimte, tijd en dus snelheid als absolute entiteiten zoals Newton deed, maar alleen van relatieve ruimte en tijd. De ether was daarmee overbodig geworden. De lichtsnelheid is de grootst mogelijke snelheid en tevens de som van de gecombineerde bewegingen van elk voorwerp door de ruimte én door de tijd. Volgens het tweede postulaat kun je je absolute snelheid nooit weten, dus is er tegenspraak. Deze theorie impliceert dus dat het voor deeltjes met een rustmassa ongelijk aan nul onmogelijk is om de snelheid van het licht te bereiken en dat bij snelheden die de snelheid van het licht naderen, massa en tijd veranderen en wel op een manier die tegen onze dagelijkse ervaring indruist.

Deze aannames waren door Einstein niet uit de lucht gegrepen: Galilei, Leibniz en Ernst Mach hadden eigenlijk al een begin gemaakt wat relativiteit betreft. Galilei formuleerde al dat in een eenparig bewegingssysteem dezelfde natuurwetten gelden als in een stilstaand systeem. Die aanname stuitte op een probleem, toen men probeerde licht als elektromagnetische golf te beschrijven: men dacht dat er een ether moest zijn, waarin die golf zich voortplante, en dus zou er een 'absoluut' stilstaand referentiekader bestaan. Einstein bracht het relativiteitsprincipe terug en verbond er allerlei conclusies aan.

Hoe gek het ook klinkt, deze theorie was al voor het uitkomen ervan bewezen in het 'mislukte' experiment van Michelson en Morley om het bestaan van de ether aan te tonen. De Iers-Britse natuurkundige George FitzGerald en de Nederlandse natuurkundige Hendrik Lorentz hadden, voordat Einstein met zijn theorie kwam, al een eerste aanzet gegeven om dit te verklaren met de Lorentz-FitzGeraldcontractie: zij postuleerden dat voorwerpen die de lichtsnelheid naderen, verkort worden in de bewegingsrichting. Ook namen zij aan dat bewegende klokken vertraagd worden. In feite waren de belangrijkste formules van de speciale relativiteitstheorie hiermee al bekend. Einstein plaatste ze in een algemeen theoretisch kader, dat hij later nog verder zou uitbouwen tot de algemene relativiteitstheorie. Henri Poincaré had al eerder de lichtsnelheid aangemerkt als de maximale snelheid en



aangegeven dat de lengte van tijdsintervallen op verschillende plaatsen relatief is. Dit alles werd gesystematiseerd in de speciale relativiteitstheorie.

Beschrijving

Postulaten

De speciale relativiteitstheorie van Einstein (1905) beschrijft de beweging van objecten waar geen krachten op werken. Het gaat uit van twee postulaten:

- Elke waarnemer die zich eenparig beweegt ondergaat dezelfde natuurwetten
- De lichtsnelheid in vacuüm is onafhankelijk van de snelheid van de bron

Omdat het onder deze regels zo moet zijn dat een lichtstraal voor twee waarnemers die ten opzichte van elkaar bewegen toch dezelfde snelheid moet hebben, gelden de normale regels van de Newtoniaanse mechanica niet meer - volgens deze theorie zou iemand die zich in dezelfde richting beweegt als een lichtstraal een lagere snelheid moeten meten dan iemand die zich in tegenovergestelde richting beweegt.

Er gelden nieuwe regels om tijden, plaatsen - en dus afstanden - maar ook elektrische en magnetische velden van het ene naar het andere stelsel om te rekenen. De formules die tussen twee inertiaalstelsels heen en weer schakelen heten Lorentztransformatie. Deze wordt meestal als matrix L genoteerd en moet voldoen aan de volgende regel: $L\eta L^T = \eta$, waarbij η de Minkowski-ruimtetijd-tensor is.

Gevolgen

Enkele gevolgen van deze postulaten zijn:

- **Tijd** is niet universeel, maar is verschillend voor waarnemers die ten opzichte van elkaar bewegen;
 - Gelijktijdigheid is relatief: twee gebeurtenissen die volgens de ene waarnemer gelijktijdig gebeuren, kunnen volgens een andere waarnemer na elkaar gebeurd zijn
 - Tijd dilateert: voor jou loopt de tijd van stelsels die ten opzichte van jou bewegen, langzamer dan jouw eigen tijd.
- **Lengtes** zijn relatief (de Lorentzcontractie): objecten die ten opzichte van jou bewegen, zijn voor jou korter dan dezelfde objecten wanneer ze stilstaan.

Voorbeeld: Er zijn twee stelsels, die met een snelheid v in de x -richting ten opzichte van elkaar bewegen. Tijd t en positiecoördinaten x, y, z worden door een waarnemer die met snelheid v beweegt als volgt gemeten als t' en x', y', z' :

$$\begin{cases} t' = \gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right) \\ x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z, \end{cases}$$

met $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ de Lorentz-factor en c de lichtsnelheid in vacuüm.

- **Kracht, impuls, energie en massa** worden verschillend gemeten door waarnemers S en S' die ten opzichte van elkaar bewegen.

Bijvoorbeeld:

$$m_{S'} = \gamma m_S$$

Dus een massa die snel beweegt ten opzichte van een waarnemer is toegenomen volgens die waarnemer. Ook de elektrische en magnetische velden worden verschillend gemeten in stelsels die ten opzichte van elkaar bewegen..

- **Snelheden** kunnen niet zomaar worden opgeteld of afgetrokken, zoals in de Galileïse relativiteit. De som of het verschil van snelheden mag nooit boven de lichtsnelheid uitkomen. Als in het ene stelsel S een voorwerp beweegt met een snelheid w , dan meet een waarnemer in een ander stelsel met snelheid v in dezelfde richting ten opzichte van S een snelheid w' volgens

$$w' = \frac{w - v}{1 - \frac{wv}{c^2}}$$

wat altijd onder de lichtsnelheid blijft (zie ook snelheidstransformatie).

Versnellen tot een snelheid groter dan de lichtsnelheid c is ook niet mogelijk. Opgelet, dit betekent niet dat de relativiteitstheorie snelheden groter dan de lichtsnelheid uitsluit. Het betekent alleen dat de lichtsnelheid een soort grens is: voorwerpen die een initiële snelheid hebben die lager dan c is, kunnen niet versneld worden tot c of groter. Omgekeerd kunnen voorwerpen die een initiële snelheid hebben groter dan c niet vertraagd worden tot c of lager. Een hypothetisch elementair deeltje met een snelheid groter dan die van het licht is het tachyon.

- **Massa en energie** zijn equivalent, in de zin dat ze met elkaar corresponderen, volgens de bekende formule: $E=mc^2$. Soms is massa zelfs om te zetten in energie, zoals in chemische reacties en kernreacties.

Een Minkowski-diagram, genoemd naar de bedenker Hermann Minkowski, stelt ons in staat bizarre effecten zoals tijddilatatie en lengtecontractie op een kwalitatieve manier te begrijpen, zonder formules.

Veel voorkomende vergissingen

Hoewel de speciale relativiteitstheorie reeds meer dan 100 jaar oud is, wordt de theorie nog steeds beschreven als onderdeel van de moderne natuurkunde. Dit is vooral in contrast met de klassieke natuurkunde (ontwikkeld vóór 1900), die vrij veel fenomenen uit het dagelijks leven goed beschrijft en nog steeds een groot deel van het curriculum van de natuurkunde, gegeven in het middelbaar onderwijs, uitmaakt. Hoewel de speciale relativiteitstheorie een zekere vertrouwde vereist om deze echt te begrijpen, is de theorie niet *onbegrijpelijk* en geen *sciencefiction*. De theorie is reeds met verschillende experimenten rechtstreeks getest, en wordt veel gebruikt in een aantal toegepaste domeinen. (Zoals sterrenkunde, deeltjesfysica, GPS-navigatiesystemen, ...)

Toen de kwantummechanica opkwam, was een aantal wetenschappers (zoals ook Einstein zelf) van mening dat deze de speciale relativiteitstheorie rechtstreeks tegensprak. Een schijnbare tegenstrijdigheid is de zogeheten EPR-paradox. Dit gedachte-experiment lijkt te suggereren dat de kwantummechanica toelaat dat informatie sneller reist dan het licht. Dat zou in tegenspraak zijn met de speciale relativiteitstheorie, welke stelt dat niets (en dus ook geen informatie) sneller kan reizen dan het licht. Een beter begrip van het experiment leidt echter tot de conclusie dat kwantummechanica wel aanleiding geeft tot *correlaties* tussen niet causaal gerelateerde gebeurtenissen, maar dit is niet hetzelfde als *oorzakelijke verbanden*. Op die manier spreken beide theorieën elkaar dus niet tegen.

Tijddilatatie

Speciale relativiteitstheorie
$E = m c^2$
(de massa-energie relatie)
Achtergrond
Lichtsnelheid · Lorentz invariantie Inertiaalstelsel Wetten van Maxwell
Fundamentele begrippen
Lorentztransformatie · Ruimtetijd Viervector · Minkowski-ruimte Lengtecontractie · Tijddilatatie Gelijktijdigheid
Gevorderde onderwerpen
Massa-energie relatie Tweelingparadox EPR-paradox
Experimenten
Michelson-Morley-experiment Fizeau-experiment energieproductie bij kernreacties
Wetenschappers
Einstein · Maxwell · Minkowski Lorentz · Poincaré

Tijddilatatie, **tijdsdilataie** of **tijdsrek** (dilataie = uitrekking) is het verschijnsel dat volgens een stilstaande waarnemer de tijd van een bewegende waarnemer trager verloopt. Het effect is uiterst gering bij alledaagse snelheden, maar wordt merkbaar als de snelheid de lichtsnelheid nadert. Een veel aangehaald voorbeeld om de consistentie van dit effect aan te tonen, is de tweelingparadox. Tijddilatatie wordt verklaard door de speciale relativiteitstheorie en kan eenvoudig afgeleid worden uit het gedachte-experiment met de Lorentzklok.

Afleiding van de formule

Tijdsdilatie volgt uit de waarneming dat de lichtsnelheid voor alle waarnemers gelijk is. [1] [2] [3] [4]

Doordat de lichtsnelheid c altijd dezelfde blijkt te zijn, tellen snelheden van voorwerpen en licht niet op. Dus als een lichtbron op ons afkomt, is de lichtsnelheid niet groter dan als de bron van ons af beweegt of stil staat. Dit heeft gevolgen voor de tijd- en lengtemeting (tijddilatatie en lengtecontractie).

Beschouw een klok die bestaat uit twee spiegels A en B, waartussen een lichtflits op en neer gaat. De tussenafstand is L , en de klok tikt telkens als een spiegel, zeg A, bereikt wordt.

In het stelsel waarin de klok in rust is, legt de lichtflits een afstand van $2L$ af. Dit kost een tijdsinterval van

$$\Delta t = \frac{2L}{c}$$

Maar vanuit het gezichtspunt (stelsel) van een waarnemer die met snelheid v naar links beweegt (diagram rechtsonder), legt de lichtflits een langere weg $2D$ af. Omdat de lichtsnelheid constant bleek voor alle waarnemers kost de route tussen de spiegels nu meer tijd, dus de klok loopt volgens de bewegende waarnemer langzamer.

De totale tijd op en neer tussen de spiegels wordt:

$$\Delta t' = \frac{2D}{c}$$

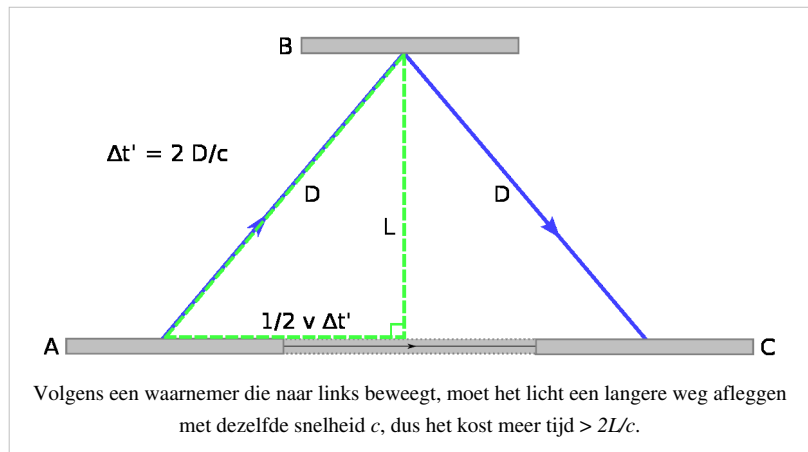
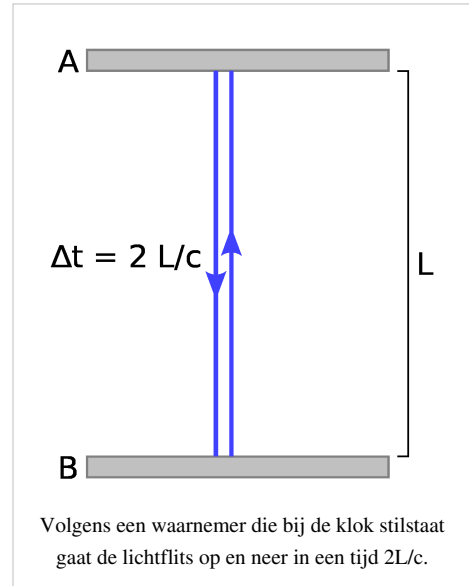
Tijdens de op-en-neer beweging van het licht is de waarnemer horizontaal over een afstand $v\Delta t'$ opgeschoven. Het licht beweegt op en neer langs de lange, schuine zijden van twee rechthoekige driehoeken met andere zijden $\frac{1}{2}v\Delta t'$ en L . De lengte van de halve weg wordt met de stelling van Pythagoras

$$D = \sqrt{\left(\frac{1}{2}v\Delta t'\right)^2 + L^2}$$

D invullen geeft na omwerken en worteltrekken voor $\Delta t'$:

$$\Delta t' = \frac{2L/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

waaruit met definitie van $\Delta t = \frac{2L}{c}$ volgt dat



$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Omdat v kleiner is dan c en daardoor $\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ groter is dan 1, wordt $\Delta t'$ groter dan Δt . Een bewegende waarnemer ziet de klok langzamer lopen. Voorbeeld: een stilstaand muon (elementair deeltje) valt in $\Delta t = 2,20 \cdot 10^{-6}$ seconden uit elkaar. Als je met een bewegend muon meereist, meet je deze zelfde vervaltijd. Maar als je op aarde staat en de muonen met een snelheid $v = 0,994 c$ (c is de lichtsnelheid) de dampkring invallen, duurt het volgens jou 9x langer ($\Delta t'$) voor ze uit elkaar vallen (zie ook Experimentele verificatie hieronder):

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - 0,994^2}} = \frac{\Delta t}{\sqrt{0,01196}} = \Delta t/0,1094 = 9,14\Delta t$$

Grootte van het effect

De tijdsdilatactie kan rechtstreeks worden afgeleid uit de formules voor de Lorentztransformatie. Uit de Lorentztransformatie volgt voor de relatie tussen de tijdsduur t die, volgens de waarnemer, door het bewegende object ervaren wordt en de tijdsduur t_0 die de waarnemer ervaart:

$$t = t_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{t_0}{\gamma}$$

Daarin is

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

de Lorentz-factor. Omdat $0 < v^2 < c^2$, is de Lorentzfactor groter dan 1. Hieruit volgt:

$$t < t_0,$$

dus de tijd t van het bewegende object verloopt trager dan de tijd t_0 van de waarnemer. Om het onderscheid te maken met de tijd gemeten door stilstaande waarnemers, noemt men t ook wel de eigentijd van de bewegende waarnemer.

Bij snelheden in wat gemakshalve het dagelijks leven (onder aardse omstandigheden) genoemd kan worden, is dit effect zeer klein. Het kan dan alleen met de nauwkeurigste klokken gemeten worden. In de buurt van de lichtsnelheid wordt het echter zeer groot. Als de lichtsnelheid bereikt zou worden, zou de tijd van het object volgens de waarnemer stilstaan. Voor een object (met een zekere massa) is dat echter onmogelijk, omdat het oneindig veel energie zou vergen.

Wederkerigheid

Het lijkt er op dat de tijddilatatie hiermee een objectieve methode geeft om te bepalen welke waarnemer stilstaat en welke beweegt: de waarnemer wiens klok het snelst loopt, staat stil. Dit is echter niet het geval; de relativiteitstheorie gaat er juist vanuit dat alle snelheden (behalve de lichtsnelheid c) relatief zijn. Dus terwijl de eerste waarnemer ervan overtuigd is dat de klok van de tweede te traag loopt, vindt de tweede waarnemer datzelfde van de klok van de eerste.

Dit klinkt onmogelijk, maar het kan wel, doordat ook het begrip gelijktijdigheid relatief is. Volgens de eerstgenoemde waarnemer is bijvoorbeeld het moment dat zijn klok 1 uur aangeeft, *gelijktijdig* met het moment dat de klok van de ander een half uur aangeeft – de ander zou dus vertraagde tijd hebben. Maar volgens de ander was dat moment, waarop zijn klok een half uur aangaf, juist gelijktijdig met het moment waarop de klok van de eerste een kwartier aangaf – dus die had vertraagde tijd. Wie van de twee "gelijk" heeft is op geen enkele manier na te gaan, want de genoemde klok-aflezingen gebeuren op verschillende plaatsen. Ook met licht- of radiosignalen is het niet objectief vast te stellen, want die signalen doen ook enige tijd over het afleggen van de afstand, en ook over die

tijdsduur zouden de waarnemers het niet eens worden.

Ter illustratie van de tijddilatatie heeft Albert Einstein de tweelingparadox bedacht, een gedachte-experiment waarbij twee waarnemers van elkaar denken dat de tijd van de ander vertraagd is.

Experimentele verificatie

Tijddilatatie is meer dan een theoretische constructie. Men heeft experimenteel aangetoond dat het effect echt bestaat:

- In de hogere atmosfeer worden door botsing tussen kosmische straling en de atmosferische deeltjes muonen gevormd. Die deeltjes zijn zeer instabiel en vervallen bijna onmiddellijk: ze hebben een halfwaardetijd van $\tau = 2,20 * 10^{-6}$ seconden. Zelfs met een snelheid die de lichtsnelheid benadert, zouden ze niet lang genoeg bestaan om bij de aardbodem te komen. Toch kunnen daar veel muonen gemeten worden. Dat komt omdat deze muonen zo snel gaan dat de tijd voor hen trager gaat en ze dus in hun eigen "tijdservaring" lang genoeg overleven om een grotere afstand te kunnen overbruggen dan men op grond van de halfwaardetijd (en dus levensverwachting) verwacht.

Met andere woorden: een 'eigen' seconde (eigentijd) van een muon dat beweegt tegen de lichtsnelheid verloopt voor een stilstaande waarnemer trager dan een seconde die deze waarnemer 'op het eigen horloge' ervaart. De eerder genoemde halfwaardetijd is dan ook uitgedrukt in seconden voor een stilstaande waarnemer, maar wordt in feite in de beleving van de stilstaande waarnemer uitgerekt (de tijddilatatie) door de snelheid die het deeltje heeft. Een dergelijk gedocumenteerd experiment werd in 1941 uitgevoerd door de natuurkundigen D. Hall en Bruno Rossi, op twee verschillende hoogtelokaties bij Mount Washington in het noordoosten van de Verenigde Staten (hoogteverschil bijna 2000m). In 1963 werd dit experiment herhaald door de Amerikanen David H. Frisch en James H. Smith die hun werk op film vastlegden.

Op de website hyperphysics staat een dergelijke berekening met een vergelijking van de waarnemingen in de stelsels van het inval en de waarnemer op aarde.^[5]

- Op aarde kan dit effect met een deeltjesversneller waargenomen worden; elementaire deeltjes kunnen met behulp van elektrische velden gemakkelijk tot dichtbij de lichtsnelheid versneld worden.
- Men heeft snelle vliegtuigen uitgerust met zeer nauwkeurige atoomklokken. Na een reis rond de aarde bleken de klokken iets minder tijdsduur gemeten te hebben dan klokken die op aarde waren gebleven.

Externe link

- Applet met simulatie van het verschil in tijdmeting in een raket en daarbuiten ^[6]

Bronnen, noten en/of referenties

Tweelingparadox

Speciale relativiteitstheorie
$E = m c^2$
(de massa-energie relatie)
Achtergrond
Lichtsnelheid · Lorentzinvariantie Inertiaalstelsel Wetten van Maxwell
Fundamentele begrippen
Lorentztransformatie · Ruimtetijd Viervector · Minkowski-ruimte Lengtecontractie · Tijddilatatie Gelijktijdigheid
Gevorderde onderwerpen
Massa-energie relatie Tweelingparadox EPR-paradox
Experimenten
Michelson-Morley-experiment Fizeau-experiment energieproductie bij kernreacties
Wetenschappers
Einstein · Maxwell · Minkowski Lorentz · Poincaré

De **tweelingparadox** is een gedachte-experiment in de speciale relativiteitstheorie (SR). Een astronaut maakt een ruimtereis waarin hij lang met zeer hoge snelheden reist. Wanneer hij terugkomt op aarde, blijkt hij jonger te zijn dan zijn tweelingbroer, die op aarde is gebleven. Dit resultaat, de tijddilatatie van bewegende lichamen, wordt voorspeld door de speciale relativiteitstheorie.

Tweeledige paradox

Deze paradox is tweeledig:

- enerzijds lijkt het tegenstrijdig dat de tweelingbroers verschillende leeftijden kunnen hebben,
- anderzijds lijkt de situatie voor beide broers symmetrisch te zijn.

Dit laatste kan eenvoudig worden weerlegd: snelheid is weliswaar relatief, maar de thuisblijvende broer wordt niet versneld (als we de vrij kleine versnelling van de aarde negeren) en de reizende wel, op zijn minst bij het omkeren.

Het is dan ook geen paradox maar een opmerkelijk verschijnsel dat bevestigd wordt in experimenten. Het omkeren (dat zelf niet onder de SR valt) doet de tijddilatatie niet teniet.

Drie inertiaalstelsels

De verwarring ontstaat doordat er niet twee, maar drie relevante inertiaalstelsels zijn:

1. een waarin de thuisblijver in rust blijft,
2. een waarin de reiziger op de heenweg is, en
3. een waarin hij op de terugweg naar huis is.

Zowel bij zijn vertrek als bij zijn aankomst en het omkeren verandert de reiziger van referentiestelsel. Het gevolg daarvan is dat de leeftijd van de reizende broer aan tijddilatatie onderhevig is. Dit is een effect veroorzaakt door de verandering in de definitie van gelijktijdigheid wanneer er van stelsel gewisseld wordt.

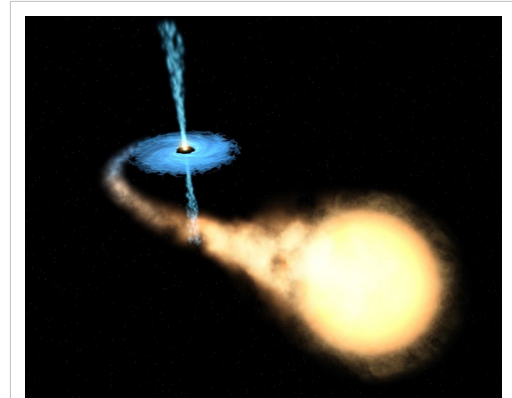
In de SR bestaat er niet zoiets als een absolute tijd. Het huidige moment is gedefinieerd als een aantal gebeurtenissen die *gelijktijdig* gebeuren voor een waarnemer. De notie van gelijktijdigheid hangt af van het referentiestelsel, dus wisselen tussen stelsels vereist een aanpassing van onze opvatting over het huidige moment.

Zwart gat

Accretieschijf

Een **accretieschijf** is een schijf rond een hemellichaam waarin gas en stof uit de omgeving zich ophoopt. Omdat deze materie vrijwel altijd impulsmoment bezit, zal het – voordat het op een zwart gat, een neutronenster of een witte dwerg valt – zich eerst verzamelen in een platte, snel roterende schijf eromheen. De materie in de binnenste delen van deze schijf wordt verhit tot miljoenen kelvin en kan daarbij röntgenstraling uitzenden. Soms ontstaat daarbij een microquasar (zie SS 433).

Accretieschijven zijn ook waargenomen in röntgendubbelsterren, waar gas van een gewone ster overstromt naar de compacte begeleider.



Artist impression van een accretieschijf bij een zwart gat

Accretieschijf bij de vorming van normale sterren

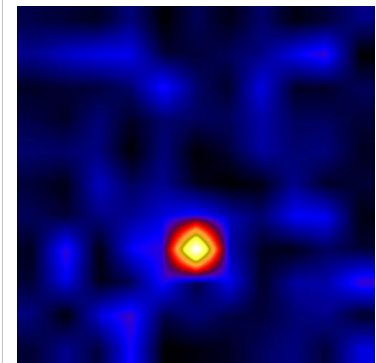
Ook bij de samentrekking van een gaswolk tot een ster vormt zich een accretieschijf, die een protoplanetaire schijf genoemd wordt. Hierbij loopt de temperatuur evenwel veel minder hoog op dan in de bovengenoemde gevallen, namelijk slechts tot enkele duizenden graden.

Door nog niet in alle details opgehelderde processen (waarschijnlijk de werking van magnetische velden op een plasma) wordt een deel van deze accretieschijf vervolgens weer naar buiten gedreven, waarbij de temperatuur daalt en een groot deel van het draaiingsimpulsmoment van de samentrekkende ster op de uitgedreven massa wordt overgedragen. Wanneer de temperatuur in delen van deze schijf voldoende gedaald is, kristalliseren zich achtereenvolgens korrels uit van nikkelijzer, silicaten en ijs, waaruit zich vervolgens planetesimalen, ofwel protoplaneten, vormen.

Indien de accretieschijf bijzonder veel materie bevat, kan er zich een dubbelster vormen.

Cygnus X-1

Cygnus X-1 is een röntgenbron (*X-ray source*) in het sterrenbeeld Zwaan (Cygnus). Deze bron van röntgenstraling is hoogstwaarschijnlijk een zwart gat. De naam komt van het feit dat dit de eerst ontdekte röntgenbron in het sterrenbeeld Zwaan is. Deze ontdekking leverde het eerste belangrijke bewijs voor het bestaan van zwarte gaten.



Registratie door NASA van de röntgenstraling uitgezonden door Cygnus X-1

Al in 1962 bestond het vermoeden dat in dit sterrenbeeld een sterke röntgenbron aanwezig was. Dit werd bevestigd door waarnemingen met de Uhuru-röntgentelescoop in 1970. In 1971 ontdekten L.L.E. Braes en G.K. Miley van Sterrewacht Leiden, en, onafhankelijk daarvan, R.M. Hjellming en C.M. Wade van het Amerikaanse National Radio Astronomy Observatory (NRAO), radiostraling van Cygnus X-1. Hun nauwkeurige positiebepalingen met de Westerbork Synthese Radio Telescoop en de NRAO interferometer leidden tot de identificatie van de röntgenbron met de zeer zware, blauwe ster AGK2 +35 1910 = HDE 226868. ^[1] ^[2] ^[3] Cygnus X-1 is waarschijnlijk een zwart gat van minstens tien zonnemassa's en een doorsnede van ongeveer 300



Impressie van hoe het zwarte gat (rechts) materiaal opneemt van de blauwe reus HDE 226868

km. Het vormt een dubbelster met HDE 226868. De röntgenstraling ontstaat doordat gas uit de grote ster in het zwarte gat wordt gezogen. Het vormt daarbij een accretieschijf. Hierin wordt de massa zo sterk versneld dat deze röntgenstraling gaat uitzenden.

Referenties

- [1] Braes, L.L.E.; Miley, G.K. (1971). "Physical Sciences: Detection of Radio Emission from Cygnus X-1". *Nature* **232**:246. Bibcode: 1971Natur.232Q.246B (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1971Natur.232Q.246B>).
- [2] Hjellming, R.M.; Wade, C.M. (1971). "Radio Emission from X-Ray Sources". *The Astrophysical Journal* **168**: L21-L24. Bibcode: 1971ApJ...168L..21H (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1971ApJ...168L..21H>).
- [3] Braes, L.L.E.; Miley, G.K. (1971). "Variable Radio Emission from X-Ray Sources". *Veröffentlichungen Remeis-Sternwarte Bamberg* **9** (100): 173-175. (IAU Colloquium Nr.15, Bamberg, Duitsland, 31 augustus-3 september, 1971. Bibcode: 1972VeBam.100..... (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1972VeBam.100.....>)).

Reissner-Nordströmmetrik

Algemene relativiteitstheorie
$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$
(de Einstein-vergelijking)
Achtergrond
Speciale relativiteit Equivalentieprincipe · Wereldlijn Coördinaat-onafhankelijkheid Wiskundige achtergrond: tensoren
Vergelijkingen
Einstein-vergelijking Friedmann-vergelijking ADM-formalisme
Oplossingen
Schwarzschildmetrik Reissner-Nordströmmetrik Kerrmetrik
Experimentele verificatie
Gravitationeel lenseffect Zwarte gaten Perihelium-precessie
Gevorderde onderwerpen
Kaluza-Klein-theorie Kwantumgravitatie
Wetenschappers
Einstein · Minkowski · Eddington Lemaître · Schwarzschild Friedmann · Chandrasekhar Hawking

Reissner-Nordströmmetrik (genoemd naar Hans Reissner en Gunnar Nordström) is een exacte, asymptotisch vlakke, statische en sferisch symmetrische oplossing van de Einstein-vergelijkingen. Het beschrijft hoe een elektrisch geladen zwart gat er zou uitzien volgens de algemene relativiteitstheorie. Ondanks de sterke gravitationele aantrekking, zou in een realistische situatie waarbij een zwart gat gevormd wordt, de nettolading uitgestoten worden tijdens het in elkaar klappen van de ster. Men verwacht bijgevolg dat er weinig of geen van de zwarte gaten in ons

heelal van dit type zijn. Vanuit theoretisch standpunt zijn deze objecten (net als alle andere types van zwarte gaten) echter zeer interessant, en zijn het onderwerp van intense studie binnen het domein van de theoretische fysica.

Geschiedenis en context

Nadat Einstein zijn theorie van algemene relativiteitstheorie publiceerde, groeide de interesse naar exacte oplossingen van de theorie. Voor de voorganger van deze theorie, de gravitatie-theorie van Newton, is het immers evident welk krachtveld wordt opgewekt door een puntmassa. In relativiteitstheorie is dat niet zo eenvoudig te zien. Daarom dat men geïnteresseerd was in analoge uitdrukkingen voor de fysica rondom een puntmassa. In relativiteitstheorie is de zwaartekracht het gevolg van de kromming van de ruimtetijd, en is het analoog van een krachtveld gegeven door de metriek. Men vroeg zich dus af of het mogelijk was zulk een metriek op te schrijven voor een puntmassa, welke exact aan de Einstein-vergelijkingen voldeed. Omwille van de complexiteit van de (niet-lineaire) vergelijkingen die men hiervoor moet oplossen, dacht Einstein aanvankelijk zelf dat er geen exacte oplossingen te vinden zouden zijn. Het was dan ook een verrassing dat amper een jaar na het publiceren van zijn theorie (in 1916) een exacte oplossing verscheen. Deze werd gevonden door Karl Schwarzschild. Niet veel later, in 1918, vonden Reissner en Nordström een oplossing van een *geladen* puntmassa. Net als de Schwarzschild-oplossing, heeft de oplossing van Reissner en Nordström typisch een horizon. Eerst dacht men dat dit een artefact was, zonder fysische betekenis. Pas later begreep men dat, indien men de massa van een voorwerp samenperst in een punt, het object een zwart gat vormt. Omdat voor de oplossingen van Schwarzschild en Reissner-Nordström de massa in één punt wordt verondersteld, heeft de oplossing automatisch de structuur van een zwart gat. De geometrie op grotere afstand is evenwel analoog aan de geometrie van een niet-singulier object met dezelfde lading en massa.

De oplossing

De metriek van Reissner-Nordström die een puntmassa met massa M en lading Q , ziet er uit als volgt:

$$ds^2 = f(r)c^2 dt^2 - \frac{1}{f(r)} dr^2 - r^2(\sin^2 \theta d\varphi^2 + d\theta^2)$$

Hierbij is t de tijdscoördinaat, r de radiële parameter en zijn θ en ϕ de azimutale en polaire hoek, en c is de lichtsnelheid. Indien men werkt in natuurlijke eenheden (waarbij de lichtsnelheid c , de gravitatieconstante G en de constante van Coulomb k allen gelijk aan 1 zijn), is de functie f gegeven door

$$f(r) = 1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{r^2}.$$

Indien men in SI-eenheden wenst te werken, ziet deze functie er uit als volgt:

$$f(r) = 1 - \frac{2GM}{c^2 r} + \frac{Q^2 G}{4\pi\epsilon_0 c^4 r^2}$$

Men kan eenvoudig nagaan dat het geval $Q = 0$ inderdaad de Schwarzschild-oplossing geeft, welke de geometrie rond een ongeladen massa beschrijft. Indien $Q \neq 0$, is er ook een elektrisch veld aanwezig rond het zwart gat. De elektromagnetische vierpotentialiaal is gegeven door:

$$A_\mu = (\Phi, 0, 0, 0) = \left(\frac{Q}{r}, 0, 0, 0\right)$$

In SI-eenheden staat er nog een factor $4\pi\epsilon_0$ extra in de noemer. De letter Φ staat voor de elektrische potentialiaal.

Horizon en singulariteiten

Voor een algemene metrik wordt een waarnemingshorizon typisch gekarakteriseerd door een punt waar de g_{00} -component van de metrik nul wordt. In dit geval wil dat zeggen dat (in natuurlijke eenheden):

$$1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{r^2} = 0$$

Men kan dit gemakkelijk oplossen, en noteert de oplossingen met r_+ en r_- . Ze zijn expliciet gegeven door

$$r_{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - Q^2}$$

Er kunnen zich verschillende situaties voordoen:

- Als $Q < M$, zijn er twee horizons. Dat is dus anders dan bij de Schwarzschild-oplossing, waar er slechts één horizon aanwezig is.
- Als $Q = M$, vallen beide horizons samen. Dit noemt men een extremaal zwart gat. De Hawking-temperatuur is dan nul.
- Als $Q > M$ zijn er geen horizons. In dat geval is het singuliere punt r *zichtbaar* van buitenaf, en spreekt men dan van een naakte singulariteit. Veel fysici denken dat dit soort oplossingen fysisch ontoelaatbaar zijn. (Dus omwille van *fundamentele* redenen niet kunnen voorkomen in de natuur.)

Bronnen

- Reissner, H, *Über die Eigengravitation des elektrischen Felds nach der Einsteinschen Theorie*, Ann. Physik, 50, 106-120. (1916).
- Nordström, G, *On the Energy of the Gravitational Field in Einstein's Theory*, Proc. Kon. Ned. Akad. Wet., 20, 1238-1245. (1918).



Externe links

- Charged Black Holes: The Reissner-Nordström Geometry (Engels) ^[1]

Referenties

[1] <http://casa.colorado.edu/~ajsh/rn.html>

Sagittarius A

Sagittarius A	
	
Een opname van NASA's Chandra X-Ray Observatory	
Type	Bron van radiostraling
Overige aanduidingen	AX J1745.6-2900, SAGITTARIUS A, W 24, Cul 1742-28, SGR A, [DGW65] 96, EQ 1742-28, RORF 1742-289, [SKM2002] 28
Massa	Sgr A*: 3,7 miljoen zonnemassa
Waarnemingsgegevens ^[1]	
Standaardepoche	J2000
Rechte klimming	17 ^h 45 ^m 12 ^s
Declinatie	-28° 48' 18"
Sterrenbeeld	Boogschutter (<i>Sagittarius</i>)
Portaal  Astronomie	

Sagittarius A (Sgr A) is een compacte bron van radiostraling in het centrum van ons melkwegstelsel. Ze staat in de richting van het sterrenbeeld Boogschutter (*Sagittarius*). Sgr A bestaat uit drie onderdelen:

- Sgr A East - het restant van een supernova
- Sgr A West - een gebied van geïoniseerde gassen en andere materie
- Sgr A* - een puntbron met intense radiostraling

Waarnemingen aan Sagittarius A hebben volgens astronomen aangetoond dat er zich een supermassief zwart gat bevindt in het centrum van de Melkweg op de positie die ruwweg overeenkomt met die van Sgr A* (*spreek uit Sagittarius A-ster*). Dit zwarte gat heeft een massa van zo'n 3,7 miljoen maal die van de zon.^{[2][3]} In 2005 hebben wetenschappers met de Chandra X-Ray Observatory van de NASA signalen opgevangen in het röntgen-deel van het elektromagnetische spectrum die waarschijnlijk afkomstig waren van materie die in het zwarte gat 'verdween'.

In 2012 concluderen Sera Markoff en andere astronomen dat Sgr A* per dag gemiddeld één grote planetoïde opslokt. Dit blijkt uit röntgenuitbarstingen die zijn waargenomen met onder andere de Amerikaanse röntgentelescoop Chandra.^[4]

Bronnen, noten en/of referenties

- **(en)** Chandra Catches Milky Way Monster Snacking (http://chandra.harvard.edu/press/01_releases/press_090501flare.html), Chandra Press Room, 5 september 2001
- **(en)** Sagittarius A East: Scientists Discover Supernova May Control Activity in the Center of Our Galaxy (http://chandra.harvard.edu/photo/2001/sgr_a/), Chandra Photo Album

Schwarzschildmetriek

Algemene relativiteitstheorie
$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$
(de Einstein-vergelijking)
Achtergrond
Speciale relativiteit Equivalentieprincipe · Wereldlijn Coördinaat-onafhankelijkheid Wiskundige achtergrond: tensoren
Vergelijkingen
Einstein-vergelijking Friedmann-vergelijking ADM-formalisme
Oplossingen
Schwarzschildmetriek Reissner-Nordströmmetriek Kermetriek
Experimentele verificatie
Gravitationeel lenseffect Zwarte gaten Perihelium-precessie
Gevorderde onderwerpen
Kaluza-Klein-theorie Kwantumgravitatie
Wetenschappers
Einstein · Minkowski · Eddington Lemaître · Schwarzschild Friedmann · Chandrasekhar Hawking

Schwarzschildmetriek (genoemd naar Karl Schwarzschild) is een exacte, asymptotisch vlakke, statische en sferisch symmetrische oplossing van de Einstein-vergelijkingen. Eenvoudiger uitgedrukt: het beschrijft hoe een zwart gat er uit ziet volgens de algemene relativiteitstheorie.

Geschiedenis en context

De algemene relativiteitstheorie van Einstein volgde de gravitatie-theorie van Newton op als een meer precieze beschrijving van zwaartekracht. Hoewel eleganter, is de theorie van Einstein wiskundig moeilijker. Ook de evolutie van gravitationele systemen is moeilijker te beschrijven. De relatief eenvoudige gravitatiewet van Newton wordt immers vervangen door de (veel ingewikkeldere) Einstein-vergelijkingen. Toen Einstein zijn theorie publiceerde, was het niet duidelijk of er wel exacte oplossingen van zijn vergelijkingen zouden bestaan. (Oorspronkelijk dacht hij zelf van niet.) Daarna werd echter wel gezocht, aangezien zo een oplossing veel inzicht zou verstrekken in de geometrie en gravitatie rondom een puntmassa in relativiteitstheorie. Het was dan ook een verrassing dat amper een jaar na het publiceren van zijn theorie (in 1916) een exacte oplossing verscheen. Deze werd gevonden door Karl Schwarzschild. De oplossing zegt hoe de metriek er uit ziet rondom een puntmassa. Dat geeft meteen ook inzicht in de beweging van andere kleine massa's in de aanwezigheid van een grote centrale massa. Maar de oplossing die Schwarzschild vond, heeft een bijzondere eigenschap. Er is een punt waar de gravitationele aantrekking zo groot is, dat geen voorwerpen kunnen ontsnappen. Dit noemt men horizon. Hoewel men zou kunnen stellen dat dit de oplossing onrealistisch maakt, heeft dit een diepere betekenis. Vandaag de dag weten we dat, indien men de massa van een voorwerp samenperst in een punt, het object een zwart gat vormt. Omdat voor de oplossingen van Schwarzschild de massa in één punt wordt verondersteld, heeft de oplossing automatisch de structuur van een zwart gat. De straal (afstand tot centrale massa) op dewelke de horizon zich bevindt, noemt men nu de Schwarzschildstraal.

De oplossing

De metriek van Schwarzschild ziet er uit als volgt:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{r_s}{r}} - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

Hierbij is t de tijdscoördinaat, r is de radiële parameter en θ en ϕ zijn de azimutale en polaire hoek. De parameter r_s is gegeven door

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

met G de gravitatieconstante en c de lichtsnelheid.

Horizon

Op een afstand $r = r_s$ van de oorsprong, wordt de metriek singulier: de g_{tt} -component wordt nul en de g_{rr} -component wordt oneindig. Deze plaats (eigenlijk een sfeer) komt overeen met de horizon van het zwart gat. Een voorwerp dat hier voorbijgaat, kan niet meer terugkeren naar de buitenwereld. De straal van het zwart gat is dus r_s , en noemt men de Schwarzschildstraal.

Referenties

- Schwarzschild, K. (1916). Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einstein'schen Theorie. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften* **1**, 189-196.
- Schwarzschild, K. (1916). Über das Gravitationsfeld einer Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften* **1**, 424-?.

Externe links

- Meer uitleg over een (Schwarzschild) zwart gat.^[1]

Referenties

[1] <http://users.telenet.be/stijnc/schwarz.htm>

Spaghettificatie


In de astrofysica wordt met **spaghettificatie** (ook wel bekend als het 'noodle effect') bedoeld het uitrekken van objecten in de lengterichting als gevolg van een grote gradiënt in het zwaartekrachtsveld van een zwart gat, een extreme vorm van getijdenwerking. Hierdoor gaan deze objecten lijken op slierten spaghetti. De kracht is zo enorm dat geen enkel object, ongeacht het materiaal waarvan het is gemaakt, deze kan weerstaan.

De term *spaghettificatie* is afgeleid van een voorbeeld in het boek *A Brief History of Time* (Nederlandse titel: *Het heelal*, ISBN 90 351 0611 3) door Stephen Hawking, waarin hij beschrijft hoe een denkbeeldige astronaut die de waarnemingshorizon van een zwart gat overschrijdt, wordt "uitgerekt als spaghetti".



Spaghettificatie gevisualiseerd.

V404 Cygni

V404 Cygni	
Afbeelding gewenst	
Type	Dubbelster
Fysische gegevens	
Diameter	60 tot 90 km
Massa	10 tot 15 zonnemassa's
Waarnemingsgegevens ^{[1][2]}	
Rechte klimming	20 ^h 24 ^m 03,83 ^s
Declinatie	+33° 52' 02,2"
Sterrenbeeld	Zwaan (<i>Cygnus</i>)
Afstand	10 lichtjaar
Meervoudig	Zwart gat of Q-ster en hoofdreeksster
Portaal  Astronomie	

V404 Cygni is een veranderlijke dubbelster in het sterrenbeeld Zwaan. Het systeem bestaat uit een zwart gat of mogelijk een hypothetische Q-ster en een begeleider uit de hoofdreeks. De Q-ster gedraagt zich als vampierster en vertoonde in de 20e eeuw waargenomen verschillende nova-achtige uitbarstingen. Er heeft zich een accretieschijf om de Q-ster gevormd waar materie van de begeleider zich verzamelt alvorens het de waarnemingshorizon passeert. De begeleider is uitgerekte tot een eivorm onder invloed van de aantrekkingskracht van de hoofdster. De materie vloeit in ongelijke mate naar de accretieschijf, wat het systeem een veranderlijk karakter geeft.

Referenties

voorlopig slot

Paginabronnen en auteurs

Onopgeloste problemen in de natuurkunde *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29315392> *Auteurs:* AleichemAWB, Algont, Annabel, Bdiijkstra, Gerbennn, Gpvos, Hannes Karnoefel, Jpc, Maniago, Meneer, Robin Hood, Sanya3, Siebrand, Simeon, T Houdijk, 4 anonieme bewerkingen

Baryogenese *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32106480> *Auteurs:* Aleichem, Jan Lapère, Simeon, Zanaq

Bolbliksem (natuurverschijnsel) *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32174746> *Auteurs:* A.T.M.Schipperijn, Abigor, Andre Engels, BenTheWikiMan, Coffeemonster, CommonsDelinker, Effeetsanders, Ellywa, Encyacht, ErikvanB, Flounder, Flurp, GijsvdL, Groucho NL, Houtlijm, Ikkebram, Jeroen, Joris, Josq, Kleuske, Laban, Maiella, Maniago, Mmeulens, MrBlueSky, Nijdam, Pannenkoek, PauloCalipari, Q e, Quistnix, Rene Pijlman, Rob Hooft, Romaine, Silver Spoon, Simeon, Subzerop, Svdmolten, Tdevries, Trijnstel, UIC, UsagiM, Wiki13, WikiFB2, WikiwikiJan, YoshiDaSilva, 38 anonieme bewerkingen

Donkere materie *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32279848> *Auteurs:* ArjanH, Ben Pirard, Capaccio, Caseman, Count Iblis, Dandy, Danielm, De Wikischim, Deelnemer8, Driripeter, Ellywa, ErikvanB, Grashoofd, Handige Harrie, HandigeHarry, Hanneke x, Hansmuller, HenkvD, Hobbema, Jacobon, Jan Lapère, JaxTeller, Jesper, JoJan, Kalsermar, Lexw, Lignomontanus, Look Sharp!, Lvg, Lymantria, MHD, Maartie, Maniago, Michiel1972, Mpm, MrBlueSky, Mrgreen71, Nboobe, Npovmaniac, Paul B, Rasbak, Rene Pijlman, René Torenstra, Robin Hood, RoboRex, Silver Spoon, Simeon, Six, Snaily, Sswelm, Taketa, The Banner, Wicket, Woudloper, 44 anonieme bewerkingen

Higgsboson *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32220251> *Auteurs:* Ad.herveille.wiki, Albert Marinus, Andre Engels, BKannen, BasvanPelt, Bernard55, BertS, BvdG, Chris, Driripeter, Dtielemans, DustSpinner, Edwtie, Elarax, Ellywa, ErikvanB, Extinguished Fire, Fotoni, Galactica261958, Handige Harrie, JRB, Jacobon, Jan Lapère, Klaas1978, Kleuske, Look Sharp!, Lvg2, Løde, M Hendriks, Marcelvr, Mexicano, MrBlueSky, Mtcv, MuDavid, Muizj, Otto ter Haar, PHouben, Paul B, PauloCalipari, PieterJanR, Qsq, Qwertuus, RenéV, Rob Hooft, Romaine, Rudolphous, Silver Spoon, Simeon, Sjoerd22, TeunSpaans, Tfa1964, Wammes Waggel, Wijnburger, 75 anonieme bewerkingen

Higgsveld *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32055107> *Auteurs:* Andre Engels, BvdG, Chris, Driripeter, ErikvanB, Galactica261958, Ilse(a), JRB, Jeroen, Joganeez, Kleuske, Look Sharp!, Lvg2, Michiel1972, MuDavid, PHouben, Sakke, Simeon, 10 anonieme bewerkingen

Licht van Hessdalen *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31850794> *Auteurs:* Grmb176, Hobbema, Ino mart, 1 anonieme bewerkingen

Magnetische monopool *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30770929> *Auteurs:* Andre Engels, BKannen, Capaccio, Hansmuller, JRB, Japiot, Kens, Machaerus, Paul B, Pompidom

Melkwegstelseldraaiingsprobleem *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31275707> *Auteurs:* Danielm, Gpvos, Rex, Wikix, 4 anonieme bewerkingen

Naga Vuurballen *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31029204> *Auteurs:* Ino mart, Mathonius, Vis met 1 oog

Pioneeranomalië *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32177352> *Auteurs:* Handige Harrie, Maiella, Xaviervd, Zanaq, 7 anonieme bewerkingen

Protonverval *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30356616> *Auteurs:* Algont, Carl Willems, DennisPeeters, Gpvos, Jan Lapère, Jeroen, Rex, 1 anonieme bewerkingen

Theorie van alles *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32088290> *Auteurs:* Bongers Niels, BvdG, De Wikischim, Ellywa, ErikvanB, Hannes Karnoefel, Mexicano, Moartn, MoiraMoira, Paul B, Ribashka, Riki, Rochus Verkerk, RonaldB, Simeon, Wikilu, 11 anonieme bewerkingen

Veldentheorie van alles *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29062449> *Auteurs:* ErikvanB, FakirNL, Ribashka, Zedutchgandalf

Byblos-syllabenreeks *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=28666942> *Auteurs:* Cicero, Davin, Deertje, DéRahier, Essor, Hans van Deukeren, MWAK, Maiella, Mathonius, MrBlueSky, Riki, Simeon, Tdevries, 4 anonieme bewerkingen

Cypro-Minoïsch schrift *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30438660> *Auteurs:* BlackCat, Heureka, Machaerus, Simeon

Fermiparadox *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32274091> *Auteurs:* Adelphos, Advance, Alex1, BertS, Davin, Dinsdagskind, ErikvanB, Felix2036, Gap9551, Handige Harrie, Hannes Karnoefel, JRB, Jan Duimel, Joopwiki, KoenB, Maiella, Mpm, Rex, Riki, SebHoiting, Simeon, Stephan202, Svdmolten, T Houdijk, Torero, Tr606, Udfruduhu, 16 anonieme bewerkingen

Lineair A *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31361506> *Auteurs:* Andre Engels, Ben Pirard, Compro, Deertje, Fokkelman, Friedrich Tellberg, Fuss, Gpvos, Hans van Deukeren, Heureka, JWZG, Jack2, Karel Anthonissen, Kleuske, Koosg, Kwiki, Leodb, Lotje, Luxie, MWAK, Machaerus, Mexicano, Michiel1972, Riki, Simeon, Sonty567, Vels, 18 anonieme bewerkingen

Schijf van Phaistos *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31740025> *Auteurs:* Bassieenadriaanfan, Baswerkhoven, Bekend, Caseman, Chompas, Cumulus, Dartelaar, Dolfy, EKvdB, Ekim, Ellywa, Encyacht, Erwin, Evil berry, Flitskikker, Floris V, Flyingbird, Golradir, Hans van Deukeren, JePeAWB, Lector, Lexw, MWAK, Maniago, Michiel1972, Mister J., MrBlueSky, Onderwijsgek, Palica, Rcoo, RoboRex, Serassot, Simeon, Vis met 1 oog, Waterkant, Zanaq, 23 anonieme bewerkingen

Onopgeloste vraagstukken in de wiskunde *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32343524> *Auteurs:* Bdiijkstra, Capaccio, Den Hieperboree, Mkr

Harmonisch-delergetal *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31935231> *Auteurs:* Klever

Lychrel-getal *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31017116> *Auteurs:* Dryke, Madyno, Simeon, Tsagld, 2 anonieme bewerkingen

Perfect getal *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32261615> *Auteurs:* -Maarten-, A3, Abnormaal, Advance, BesselDekker, Bob.v.R, Capaccio, Danielp, Dedalus, Dryke, Duns, Erik Baas, Evanherk, Evil berry, Falcongij, Floris V, Funnyplay, Gap9551, Guyvago, Hanhil, JRB, Jeroeningelbrecht, JorisVDB, Jvbertum, KKoolstra, KittenKlub, Klever, Lexw, Madyno, Mexicano, Michiel1972, MrBlueSky, Rex, Rob Hooft, SWCV2AB, Serassot, Simeon, Spuugvuur, TBloemink, Tomgriep, Vels, Willemdd, Znajoje, 26 anonieme bewerkingen

Probleem van Burnside *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=26335286> *Auteurs:* JRB

Problemen van Landau *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31374522> *Auteurs:* JRB, Kwiki, Spraakverwarring

Rieselgetal *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31853639> *Auteurs:* A3, B222, Bob.v.R, Dryke, Erik Baas, Filmfreak, Freestyle, JRB, Ptheijne, Simeon, 2 anonieme bewerkingen

Sierpiński-getal *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31791508> *Auteurs:* A3, Andre Engels, B222, Bdiijkstra, Filipvanlaenen, JRB, Lymantria, Phsmitt, Riki, Scorso, Simeon, Spuugvuur, Xyzy, 2 anonieme bewerkingen

Spiraal van Ulam *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31919636> *Auteurs:* Bob.v.R, Capaccio, JRB, Lymantria, Qwertuus, Simeon, 1 anonieme bewerkingen

Vermoeden *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32201545> *Auteurs:* Chielio0ow, JRB, Qwertuus, Sietske, 1 anonieme bewerkingen

ABC-vermoeden *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31706220> *Auteurs:* Andre Engels, Driripeter, DéRahier, Edoderoo, Filmfreak, Florrat, Irmalover, JRB, Jesper, Martinod, Nijdam, Qwertuus, 6 anonieme bewerkingen

Vermoeden van Andrica *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31935675> *Auteurs:* Algont, Capaccio, JRB, Riki, Simeon, Xario, 1 anonieme bewerkingen

Vermoeden van Brocard *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32024283> *Auteurs:* JRB, MADe, Riki, Simeon

Vermoeden van Collatz *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32317614> *Auteurs:* Annabel, Filmfreak, JRB, Lost, Lymantria, Riki, S.f.h., Simeon, SimonDeDanser, Teunie, VanBuren, Yetti4, 6 anonieme bewerkingen

Elliptisatievermoeden van Thurston *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=25328610> *Auteurs:* JRB, W.D. Sparling

Vermoeden van Goldbach *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30708101> *Auteurs:* Andre Engels, Bearsuit, Bob.v.R, Capaccio, Driripeter, Fruggo, JRB, Kwiki, Lymantria, Puckly, Riki, TeunSpaans, Youandme, Ype, 13 anonieme bewerkingen

Vermoeden van Legendre *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29648581> *Auteurs:* Capaccio, Glatissant, JRB, Riki, Simeon, 1 anonieme bewerkingen

- Vermoeden van Poincaré** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29295739> *Auteurs:* Alex1, Avانبijleveld, BertS, ErikvanB, Eve, JRB, Jarune, Lieven Smits, PeterMeuris, Rdoehmen, Rex, Riki, Rudolphous, Ruud van vliet, Stigin, 13 anonieme bewerkingen
- Regulier priemgetal** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29018176> *Auteurs:* FakirNL, JRB, Lieven Smits, Simeon, Taketa, 1 anonieme bewerkingen
- Riemann-hypothese** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29474785> *Auteurs:* 3wisemen, Andre Engels, Blueknight, Capaccio, Erud, Floris V, Hansmuller, JRB, Kristof vt, Lymantria, M441, MarkIJbema, Mexicano, RenéV, Rolandmath, Simeon, Sixtus, Stijnvanerp, TeunSpaans, Wimpus, 4 anonieme bewerkingen
- Stelling van Fermat** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31570603> *Auteurs:* Andre Engels, B222, Bdiijkstra, Bearsuit, Bemoeial, Berkoet, BertS, Bob.v.R, Dammit, Drirpeter, Druzhnik, Ed de Jonge, Ellywa, Erik Baas, ErikWarmelink, Erwin, Forrestjunky, Frank Romein, Handige Harrie, JRB, Jan Arkesteijn, JanTurin, Lieven Smits, Madyno, Mexicano, Michiel1972, MrBlueSky, MrTintinnabulum, Qwertys, R.Langendam, Riki, Robrecht, RonaldB, Roomtrain, Rydel, Sent, Sirsimon, Snoop, UrsaMajor, Vis met 1 oog, Whooptidoo, Woodcuttery, 45 anonieme bewerkingen
- Standaardmodel van de deeltjesfysica** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32105755> *Auteurs:* Bartux, BasvanPelt, BvdG, Drirpeter, Edwtie, Ellywa, Erik Baas, Erik Zachte, Handige Harrie, HandigeHarry, JRB, Jan Lapère, Jesper, Kleuske, Koos Jol, Logosun, Lvg, Marc1990, Mexicano, Michiel1972, Nijdam, Otto ter Haar, PHouben, Paul B, Pjetter, Robb, Romaine, Sjoerd22, Sswelm, TeunSpaans, Tfa1964, Titusvh, Wammes Waggel, 24 anonieme bewerkingen
- Algemene relativiteitstheorie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32352305> *Auteurs:* AGL, Annabel, Aribashka, Baudje, Capaccio, ChristiaanPR, Christoffel K, Cvdenzen, Db-inf, De Wikischim, DirkD, Drirpeter, DéRahier, Ellywa, ErikvanB, Erwin, Evanherk, Fruggo, GijsvdL, Goudsbloem, Groeneme, Groucho NL, Handige Harrie, Hansmuller, JRB, Jonge415, Kitearcollection, Lieven Smits, Matthijs0402, Megaman en m, MrBlueSky, NielsB, Perelaar, Pieter1, Pompidom, QuintenB, Rex, Ribashka, Rob Hoof, Simeon, Sixtus, Sjoerd22, Sonty567, Stigin, VanBuren, Vholten, Willemo, Zandramas, 31 anonieme bewerkingen
- Anti-de Sitter-metriek** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31745823> *Auteurs:* Aribashka, B222, ErikvanB, JRB, Jan Lapère, Japiot, Jvherturn, Ribashka, Viridiflavus, 1 anonieme bewerkingen
- Causale structuur** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=26641067> *Auteurs:* JRB, Mexicano
- De Sitter-metriek** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32111008> *Auteurs:* 3wisemen, Aribashka, JRB, Japiot, Ribashka, Sustructu, Warddr
- Einstein-vergelijking** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32262460> *Auteurs:* Aribashka, Capaccio, Euty, FakirNL, Hansmuller, JRB, Mexicano, Ribashka, Sustructu, Wiki13, 4 anonieme bewerkingen
- Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-metriek** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=24367855> *Auteurs:* JRB
- Gravitationele tijdsdilatie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=28221194> *Auteurs:* JuriaanH, MrBlueSky, Paulvdsteln, The Mastermind
- Kerrmetriek** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32178418> *Auteurs:* Aribashka, ErikvanB, Golradir, MrBlueSky, 2 anonieme bewerkingen
- Metrische uitdijing van de ruimte** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29822151> *Auteurs:* Aleichem, Aribashka, Smile4ever
- Naakte singulariteit** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31764215> *Auteurs:* Aribashka, Blueknight, De Wikischim, Devon1980, ErikvanB, 1 anonieme bewerkingen
- Penrose-diagram** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=27094997> *Auteurs:* JRB
- Scalaire kromming** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=28089960> *Auteurs:* Aribashka, JRB, MrBlueSky, Ribashka, Sonuwe, 1 anonieme bewerkingen
- Susskind-Hawking battle** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31745803> *Auteurs:* BKannen, ErikvanB, Heureka, Ixynix, Jan Lapère, Maniago, Mathonius, The Banner, 2 anonieme bewerkingen
- Tensoren in de algemene relativiteitstheorie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31738571> *Auteurs:* Aribashka, ErikvanB, JRB, Madamlamadam, Maniago, MrBlueSky, Rwbest, 3 anonieme bewerkingen
- Zwaartekrachtsgolf** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31305062> *Auteurs:* Fr33ke, JRB, Servjen
- Christoffelsymbolen** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31276226> *Auteurs:* Aribashka, JRB, Lieven Smits
- Einstein-tensor** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31435330> *Auteurs:* 3wisemen, Aribashka, Hansmuller, Heureka, JRB, Ribashka, Vis met 1 oog
- Elektromagnetische veldtensor** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32127545> *Auteurs:* Aribashka, De Wikischim, ErikvanB, Grashoofd, JRB, Rwbest
- Energie-impuls-tensor** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31894352> *Auteurs:* Aribashka, Capaccio, Hansmuller, JRB, Lolsimon, Ribashka, Sustructu, 1 anonieme bewerkingen
- Metriek** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=28699022> *Auteurs:* Aribashka, Bob.v.R, DirkD, ErikvanB, Hardscarf, JRB, Maiella, Multichill, Nijdam, Serassot, Simeon, Ype, 1 anonieme bewerkingen
- Ricci-tensor** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=28903382> *Auteurs:* Aribashka, Capaccio, Hansmuller, JRB, Kwiki, Onrandom, Ribashka
- Viergradiënt** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=25140585> *Auteurs:* Aribashka, Ribashka
- Vierpotentiaal** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32000263> *Auteurs:* Aribashka, Gossesol, Grashoofd, Kwiki
- Viervector** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31997480> *Auteurs:* Advance, Aribashka, JRB, Klaas1978, Krinkle, Patrick, Ribashka, Vis met 1 oog, 3 anonieme bewerkingen
- Kwantummechanica** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32348875> *Auteurs:* Koen, 3wisemen, Aamske, Advance, Aljen, Ameulen1, Andre Engels, ArAge, BKannen, Bemoeial, BertS, Carl Willems, China Crisis, Ciell, De Wikischim, Deadstar, Drirpeter, Dryke, Ellywa, ErikvanB, Evanherk, Famuller, Floris V, Flyingbird, Fruggo, Gid, Gpvos, Gyte75, HHahn, Hajo, Handige Harrie, HandigeHarry, Hannes Karnoefel, Hansmuller, Hanuman deeva, Hoopje, JRB, Jan Lapère, Jcb, Jcwf, Jeanpaulmars, Joepjongen, Jupiler, JuriaanH, Kraaiennest, Krivi007, Lexw, Lord Aide, Luna, Lvg, Lymantria, MADe, Madyno, Mexicano, Michiel1972, MrBlueSky, Mtcv, Muijz, PHouben, Paul B, Peter Bruin, Porcius, Quantum, Rbakels, Rene Pijlman, Ribashka, Riki, RoboRex, Romaine, Ruudvandenhooff, Sambo, Serassot, Slinger, Troefkaart, Viv3210, Walter, Webkid, Willemo, Woudpiek, Wutsje, Yorian, Ype, Zbisasimone, 97 anonieme bewerkingen
- Aharonov-Bohm-effect** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32265048> *Auteurs:* Aribashka, Gladi8or2, JRB, Snaily, 2 anonieme bewerkingen
- Algemene bespreking van Bose-Einsteincondensatie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30378154> *Auteurs:* AGL, Adnergie, CyeZ, Erik Baas, JZ85, Jeroen, Mexicano, Ravingwolf, Romaine, Sanuk, Sawims, Shade, 4 anonieme bewerkingen
- Annihilatie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32275907> *Auteurs:* Andre Engels, Ciell, Daankloek, Erwin, Johan Lont, Joris, Michiel1972, Paul B, 6 anonieme bewerkingen
- Antimaterie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32175368> *Auteurs:* Advance, Aleichem, Andre Engels, Antsen02, Bartux, Brimz, BvdG, Ciell, De2011, Drirpeter, Elgewen, Erwin, Evanherk, Flyingbird, Galwaygirl, Gammo123, Geus, Handige Harrie, HandigeHarry, JRB, Jan Lapère, Kleuske, Lexw, Lord Aide, MartinD, Mastadc, Mexicano, Michiel1972, Oliphaunt, PHouben, Patrick, PieterDP, PieterJanR, Rasbak, Ravingwolf, Riki, Rob Hoof, Sixtus, Thijsvgalen, ViVa, Wessen, Wilinckx, Youbuntu, 34 anonieme bewerkingen
- Atoomkern** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32344840> *Auteurs:* Advance, Andre Engels, Bartux, BvdG, Capaccio, Ciell, Evanherk, Groucho NL, Jan Lapère, Jcwf, JePeAWB, Joël, Klaas1978, Koekrommel, Maasje, MacHanzzz, Martinevos, Mexicano, Michiel1972, Mion, Mtcv, Patrick, Rob Hoof, RoboRex, Scipius, Sswelm, Viridiflavus, chsfpc10.chem.ncsu.edu, conversion script, 10 anonieme bewerkingen
- Biofoton** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31629060> *Auteurs:* 3wisemen, Beetjedwars, Bjornlammers, Ciell, Diogenes, Drirpeter, Evanherk, JRB, Jeroen, Joost-de-draaier, Jvherturn, Kmach, Madyno, Meglosko, Notum-sit, Oepsja, Paul B, PieterJanR, R.schwab, Romaine, Toth, TvdM, Wutsje, Zwitsler123, 1 anonieme bewerkingen
- Bloch-vector** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=21869734> *Auteurs:* Ciell, JRB, PepijnvdG, Simeon, 3 anonieme bewerkingen

Born-Oppenheimerbenadering Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=23434081> Auteurs: Effeetsanders, HHahn, Kadeike, Paul B, Robb, 3 anonieme bewerkingen

Bose-Einsteincondensaat Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31895047> Auteurs: AGL, Apdency, Balenman, BeFab4ever, Bemoeial, Bontenbal, Capaccio, Caseman, Ciell, Daniëlm, De Wikischim, De man die bakt, Edoderoo, Ellywa, Erik Wannee, Evanherk, GerhardK, Haddendaddendoedenda, Hansmuller, Jcwf, Johan Lont, Kadeike, Lexw, Maiella, Metacarpus, Michiel1972, Nijdam, Paul B, PeetXan, PieterJanR, Quistnix, Roelzzz, Shade, Simeon, Sixtus, Supersymmetry, TimDeCink, Tuganax, 22 anonieme bewerkingen

Bose-Einsteinstatistiek Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30833350> Auteurs: Capaccio, Daniëlm, Drirpeter, Hansmuller, Johan Lont, Mexicano, Paul B

Braan Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=28779273> Auteurs: Chielbuseyne, JRB, Jarune, Lvg2, Paul B, Ribashka

Clebsch-Gordan-coëfficiënten Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31720440> Auteurs: Alankomaat, BakkertjeWouter, Blueknight, ErikvanB, JRB, Kattenkruid, Michiel1972, Paul B, Pompidom, Sguckel, Tkarmar, 1 anonieme bewerkingen

Complete verzameling van commuterende observabelen Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=25324622> Auteurs: Aribashka, JRB

Constante van Dirac Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30427443> Auteurs: Antisthenes, Bdijskstra, Bemoeial, HHahn, Handige Harrie, JRB, Madyno, Trewal, 1 anonieme bewerkingen

Constante van Planck Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31755595> Auteurs: Aaargh, Andre Engels, Antisthenes, Ap, Bas042, Bdijskstra, Bemoeial, BertS, BvdG, Capaccio, Caseman, Ellywa, Erwin, Handige Harrie, Hans van Deukeren, Hansmuller, Hephaestion 01, JRB, Jan Lapère, Japiot, Jasperdoomen, Lvg, Madyno, Michiel1972, Patrick, Pit, Rietvogel, Riki, Rob Hooft, SgtH3nry3, Trewal, 10 anonieme bewerkingen

Correspondentieprincipe Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32345656> Auteurs: Aiko, BertS, Capaccio, Japiot, Jvhertrum, LeRoc, Ninane, OekelWm, Peter b, Ribashka, Simeon, Wutsje, Zbasisimone, 1 anonieme bewerkingen

CP-symmetrie Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32046412> Auteurs: Aardappel83, Drirpeter, ErikvanB, Erwin, Handige Harrie, Herbee, JRB, JoJan, Patrick, 2 anonieme bewerkingen

CPT-symmetrie Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=27235277> Auteurs: Drirpeter, JRB, 2 anonieme bewerkingen

De Haas-van Alphen-effect Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32066709> Auteurs: Den Hieperboree, JRB, Jaapkroe, Jvhertrum, Kwiki

Decoherentie Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30056355> Auteurs: BKannen, Capaccio, De Wikischim, ErikvanB, Hansmuller, Mick2, Paul B, 1 anonieme bewerkingen

Deuteron Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=28740154> Auteurs: Armando-Martin, Chielbuseyne, Handige Harrie, JorisvS, Mrgreen71

Dichtheidsfunctionaaltheorie Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31450032> Auteurs: Annabel, CaAI, Dryke, Johan Lont, Kwiki, Maiella, Paul B, Snaily, T.vanschaik, 2 anonieme bewerkingen

Dichtheidsmatrix Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29841836> Auteurs: Capaccio, JRB, Paul B

Dirac-operator Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31464806> Auteurs: Chriszaal, JRB

Dirac-vergelijking Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31934624> Auteurs: Hansmuller, JRB, Pompidom

Diracnotatie Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=25231832> Auteurs: Aribashka, Bob.v.R, Capaccio, Emiel, Erwin, JRB, Mischko, Nearyan, Qwertys, Yorian, 2 anonieme bewerkingen

Diraczee Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=27036893> Auteurs: Erwin, Guyvago, HHahn, JRB, Johjak, Kwiki, MuDavid, Yopohari, 4 anonieme bewerkingen

Dualiteit van golven en deeltjes Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32347454> Auteurs: Andre Engels, BvdG, Casimir, Drirpeter, Ellywa, Erwin, Flyingbird, Fruggo, Groucho NL, Gyte75, JRB, Jan Duimel, Jan Lapère, Kiwix, Laartje, Lvg2, Michiel1972, Ms2ger, Oscar, Paul B, Rene, Sindala, Vanelburg, 8 anonieme bewerkingen

Elektron Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31992383> Auteurs: Andre Engels, Ap, Bemoeial, BvdG, Capaccio, ChrisN, Cicero, De Wikischim, DirkBesbrugge, DirkD, Ellywa, Erik Baas, Erwin, Flyingbird, GerhardK, HHahn, Handige Harrie, HandigeHarry, Hannes Karnoefel, Hansmuller, JEMebius, JRB, Jan Duimel, Jan Lapère, Jeroen, Jhintzbe, JorisvS, Joël, JurriaanH, Kiwix, Kleuske, Koektrommel, Lvg, Madamlamadam, Mexicano, Michiel1972, Mikedebie, MrBlueSky, Nijdam, O'Barend, Oscar, Patrick, Paul B, Pyrobass, Quistnix, RenéV, Riki, Rob Hooft, RoboRex, Simeon, Sixtus, Sjoerd22, Svdmolen, Tfa1964, Thijs!, Tuganax, Vyasa, Wikichemicus, Woudloper, Woudpiek, Youbuntu, 58 anonieme bewerkingen

Elektronenconfiguratie Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29466180> Auteurs: Bartux, Capaccio, De Wikischim, Demeter, Edwtie, Ellywa, Erik Zachte, HenkvD, Jan Lapère, Lvg, Maniago, Michiel1972, Mrgreen71, Paul B, Rex, RoboRex, Sixtus, Vis met 1 oog, Walter, 10 anonieme bewerkingen

Elektronenschil Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29532980> Auteurs: Andre Engels, Bas042, BasvanPelt, Bdijskstra, Casperinfo, Djjojo7, DéRahier, Ellywa, Erik Zachte, Erwin, FakirNL, Grashoofd, HHahn, HJoren, Handige Harrie, Hardscarf, Jan Lapère, Jcwf, Johan Lont, Joël, Kleuske, Lvg, Michiel1972, Mrgreen71, Mtcv, Pantalone, Paul B, RoboRex, Sjesja, T.vanschaik, TOM, Tau'olunga, Thijshuberts, Vis met 1 oog, We El, Ype, Zweije, 24 anonieme bewerkingen

Elementair deeltje Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32202880> Auteurs: Advance, Andre Engels, BertS, BlackCat, BvdG, Drirpeter, DéRahier, ErikvanB, Erwin, JRB, Joël, MTr, Mexicano, Puckly, Romaine, RonaldB, Sjoerd22, Sonty567, Sswelm, Tasje, Wammes Waggel, Woudpiek, Yakiv Gluck, 10 anonieme bewerkingen

EPR-paradox Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32351995> Auteurs: AGL, Aribashka, BasvanPelt, Bemoeial, Cvdenzen, Dryke, F-j123, Handige Harrie, HandigeHarry, Hansmuller, JRB, Kareltehaes, Maiella, Mkr, Ribashka, Toonzetter, Woudpiek, 14 anonieme bewerkingen

Excitatie (kwantummechanica) Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32178361> Auteurs: Capaccio, De Wikischim, Handige Harrie, Mathiflip, Mpotse, Trewal, Woudloper

Fermi's gulden regel Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31948835> Auteurs: Hansmuller, Vis met 1 oog

Fermi-Diracstatistiek Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31371288> Auteurs: BertS, Davin, Drirpeter, Mexicano, Rasputin, Sietske, Timvdc, Wesoparius, Westermarck, 2 anonieme bewerkingen

Fermi-niveau Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30470333> Auteurs: Bajoro, BertS, Davin, Dogbert66, Erwin, HHahn, Michiel1972, Neet, Rob Hooft, Ronaldvd, Sietske, 2 anonieme bewerkingen

Fermion Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32106831> Auteurs: Andre Engels, Bartux, BvdG, Drirpeter, Ellywa, Evanherk, JRB, Jan Lapère, Jcwf, Klaas1978, Lvg, Mexicano, Michiel1972, Nijdam, PHouben, Tfa1964, Titusvh, Zweije, 8 anonieme bewerkingen

Feynman-Kac-formalisme Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29530326> Auteurs: BertS, Drirpeter, JRB, Lexw, Lieven Smits, 2 anonieme bewerkingen

Fijnstructuur Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31793184> Auteurs: Capaccio, Hobbema, Logosun, Wiki13

Fonon Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30405669> Auteurs: De Wikischim, Gpvos, Hansmuller, Jcwf, Mexicano, Rex, RoboRex, Yvonne Sloomman, 3 anonieme bewerkingen

Foto-elektrisch effect Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31476187> Auteurs: Bjornlammers, Brynnar, Caseman, ChrisN, Ctxppc, DieterM, DéRahier, ErikvanB, Flyingbird, Groucho NL, Handige Harrie, Hansmuller, JeeB, MTr, MacHanzzz, Mastadc, Michiel1972, MigGroningen, MrBlueSky, Pieterpv, Simeon, T Houdijk, Treeleaf, W.D. Sparling, We El, Willemvanbeirendonck, 20 anonieme bewerkingen

Foton Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32107676> Auteurs: Ap, Bemoeial, BertS, BvdG, Capaccio, Dapsv, DéRahier, Ellywa, Erik Zachte, Erwin, Fizzix, Flurps, Gertjan R., Handige Harrie, HandigeHarry, Hansmuller, JRB, Joep Vullings, Klaas1978, Koen, Lieven Smits, LimoWreck, Mion, MrBlueSky, Obarskyr, PHouben, Palica, Patrick, PieterJanR, RoboRex, Shade, Simeon, Sumurai8, Svdmolen, Vis met 1 oog, Wielewaal, Woudpiek, Yvonne Sloomman, Zweije, 26 anonieme bewerkingen

- Fracton** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30470553> *Auteurs:* Algont, Jcwf, Michiel1972
- Franck-Condon-principe** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30793783> *Auteurs:* Ernie, Grimlock, HHahn, Kwiki, OekelWm, Romaine, T.vanschaik, UAwiki, Van der Hoorn, Wutsje
- Fundamentele natuurkracht** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29753021> *Auteurs:* Andre Engels, Bemoelial, Drirpeter, GilHamiltonTheArm, Handige Harrie, Michiel1972, MoiraMoira, Rob Hooft, Rubseb, Taka, Woudpiek, 6 anonieme bewerkingen
- Gedelokaliseerd elektron** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31659205> *Auteurs:* Capaccio, De Wikischim, HHahn, Kleuske, Maniago, Mrgreen71, Paul B, 5 anonieme bewerkingen
- Generaties van de materie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30195687> *Auteurs:* Andre Engels, Drirpeter, Handige Harrie, Lvg, Michiel1972, PHouben, Paul B, RoboRex, RonaldB, Wammes Waggel, 4 anonieme bewerkingen
- Geometrische fase** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=23471272> *Auteurs:* Lieven Smits, Sixtus, 1 anonieme bewerkingen
- Gestimuleerde emissie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=27177388> *Auteurs:* AGL, Erik Baas, Groucho NL, HHahn, Vis met 1 oog, 5 anonieme bewerkingen
- GMR-effect** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29710309> *Auteurs:* Basvb, Dagoos, Davin, Erwin, Hajo, Ken123, Machaerus, MoiraMoira, Paul B, PieterJanR, Zbisasimone, 5 anonieme bewerkingen
- Golffunctie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31912550> *Auteurs:* Andre Engels, Aribashka, Capaccio, Flyingbird, Handige Harrie, Jack Ver, Jan Lapère, Jcwf, Johan Lont, Lvg, Michiel1972, Mtcv, Nijdam, Richardkiwi, Rob Hooft, Siebrand, Youandme, 4 anonieme bewerkingen
- Golfgetal** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31814018> *Auteurs:* Erwin, Hardscarf, Madyno, Mkr, Mrgreen71, Sawims
- Hartree-Fock-methode** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29506599> *Auteurs:* Capaccio, Effeitsanders, Heureka, Melsaran, Mexicano
- Hermitische matrix** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31255803> *Auteurs:* BartBogaerts, Bob.v.R, CaAl, Gid, Gpvos, Hansmuller, JRB, Madyno, Nijdam, Rex, RonaldB, Tuvic, 4 anonieme bewerkingen
- Hermitische operator** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32170406> *Auteurs:* Capaccio, JRB
- Historisch overzicht van de Bose-Einsteincondensatie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30377959> *Auteurs:* AGL, Algont, Erik Baas, Handige Harrie, Maiella, PieterJanR, Romaine, Shade
- Hypothese van De Broglie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32119012> *Auteurs:* Annabel, Apdency, Bemoelial, BertS, Bicknese, CaAl, Ciell, Dvdvd, Erik Baas, GerhardK, Groucho NL, JRB, Josq, Kleuske, Lexw, Look Sharp!, Madyno, Maurice Van Meenen, MoiraMoira, Morax, Paul B, Peti me, Pieter Kuiper, Shade, Tjako, Woudloper, Wutsje, Zanaq, 71 anonieme bewerkingen
- Ineenstorten van de golffunctie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30039355> *Auteurs:* De Wikischim, JRB, Paul B
- Interferentiecontrast** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29062162> *Auteurs:* De Wikischim, HHahn, Kwiki
- Interpretatie van de kwantummechanica** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30877897> *Auteurs:* 3wisemen, Arakrys, Aribashka, Ayo, BertS, Capaccio, De Wikischim, Drirpeter, Gerritse, Gpvos, Hannes Karnoefel, JRB, Kwiki, Lexw, Luna, Mkr, RC.Martens, Rcoo, SK-luuut, Utrechtse, Van der Hoorn, Vincentse, Woudpiek, Wutsje, 18 anonieme bewerkingen
- Jablonski-diagram** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=27655941> *Auteurs:* Capaccio, Drirpeter, Georgann Rog, Hansmuller, Josq, Maiella, Mrgreen71, Woudloper
- Josephson-junctie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30711625> *Auteurs:* Crowsnest, Drirpeter, Handige Harrie, Mrgreen71, Paul B, PieterJanR, Simeon, Therealwisco, 1 anonieme bewerkingen
- Karakterisering van de Bose-Einsteincondensatie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30377880> *Auteurs:* 3wisemen, AGL, Advance, Capaccio, Danielm, Johan Lont, Mexicano, Romaine, Shade
- Klassieke kwantummechanica** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=15330501> *Auteurs:* DéRahier, Jvherthum, Poefel, Sustructu
- Klein-Gordonvergelijking** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31577099> *Auteurs:* Alex1, BvdG, Erik Wannee, Fontes, Hansmuller, JRB, Lankhorst, Robert Weemeyer, Wiemster, Wiki13, 5 anonieme bewerkingen
- Knoopvlak** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=28534352> *Auteurs:* BKannen, Calorshear, MrBlueSky, T.vanschaik, 1 anonieme bewerkingen
- Kopenhaagse interpretatie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31554233> *Auteurs:* Advance, Ayo, Erik Baas, JRB, Mkr, Raghith, Sokpopje, Sonty567, Vdkdaan, 7 anonieme bewerkingen
- Koppelingsconstante** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32317088> *Auteurs:* Bemoelial, JRB, T.vanschaik, 1 anonieme bewerkingen
- Kwantum** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30641475> *Auteurs:* Annabel, Apdency, Drirpeter, Erik Baas, Galoubet, Grmb176, Hannes Karnoefel, Hansmuller, Henk webwinkel, Imodium, JRB, Joost, Lvg, Madyno, Maikelvanputten, MichielDMN, Paul B, Peti me, Piero, Pjetter, Qantum, Romaine, Shade, Sixtus, Teunie, Tuvic, Wilinckx, Willemo, 19 anonieme bewerkingen
- Kwantumbaau** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=17763662> *Auteurs:* Algont, Groucho NL, Lvg, Michiel1972, Pieter, Simeon
- Kwantumchemie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29076349> *Auteurs:* Bajoro, Brimz, Capaccio, Drirpeter, Handige Harrie, Maiella, Methoxyoxy, Paul B, Puckly, Tdevries, 2 anonieme bewerkingen
- Kwantumchromodynamica** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31663300> *Auteurs:* Aribashka, BasvanPelt, BvdG, Capaccio, FakirNL, Goudsbloem, JRB, Mexicano, MrBlueSky, MuDavid, PHouben, Romaine, Simeon, Woudpiek, 7 anonieme bewerkingen
- Kwantumcomputer** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31755393> *Auteurs:* Adrianix, Advance, C.weissflog, Cuoregr, Douwel, Effeitsanders, Hannes Karnoefel, Imodium, Jeroen, Johan Lont, K. Night, Kleuske, Lexw, Michiel1972, Narayan, Oscar, Paul B, Phidias, Pieterkonings, Rdkleine, Ronn, Wiemster, 25 anonieme bewerkingen
- Kwantumelektrodynamica** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32332580> *Auteurs:* Aleichem, Annabel, Aribashka, Brimz, BvdG, Capaccio, Dryke, Qwertyus, Tuganax, VanBuren, Viridiflavus, Wammes Waggel, 5 anonieme bewerkingen
- Kwantumfluctuatie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31373090> *Auteurs:* Andre Engels, Danielm, Drirpeter, DéRahier, Ellywa, Flying Dutchman, Jan Lapère, Maiella, Michiel1972, Qantum, 2 anonieme bewerkingen
- Kwantumgetal** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31754920> *Auteurs:* Apdency, BKannen, BasvanPelt, Bicknese, HHahn, JRB, Kwiki, Lvg, Michiel1972, Pven, SMMeis, Walter, Wiki13, Woudpiek, 6 anonieme bewerkingen
- Wiskundige structuur van de kwantummechanica** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29683692> *Auteurs:* JRB
- Kwantumoptica** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=28091530> *Auteurs:* Andre Engels, Asfarer, Bontenbal, Danielm, De Wikischim, Foxie001, GermanX, HHahn, Jabiel, Mart1637, Michiel1972, Sawims, Taketa
- Kwantumput** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30261497> *Auteurs:* Erwin, Groucho NL, MADE, Yannick Clybouw

- Kwantumschuim** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31373251> *Auteurs:* Hannes Karnoefel, Michiel1972, Mtcv, Rasbak, 1 anonieme bewerkingen
- Kwantumsprong** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30430700> *Auteurs:* JRB, Maniago, Simeon
- Kwantumtoestand** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30593046> *Auteurs:* Aribashka, BvdG, China Crisis, Erwin, Gravity, Jutta234, Mschindwein, Paul B, Smile4ever
- Kwantumveldentheorie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32010472> *Auteurs:* BertS, BvdG, ErikvanB, Goudsbloem, JRB, Logosun, Mexicano, MuDavid, Otto ter Haar, PieterJanR, Ribashka, Wutsje, 18 anonieme bewerkingen
- Ladingconjugatie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32046405> *Auteurs:* Erwin, Grimlock
- Lagetemperatuurfysica** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=15613182> *Auteurs:* Drirpeter, Erwin
- Laserkoeling** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30780746> *Auteurs:* B kimmel, Bdijskstra, Fruggo, JRB, Leevi, Mion, Moartn, Neet, Sawims, Shade, Sjoerd22, Svdmoln, 2 anonieme bewerkingen
- Leptongetal** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29539866> *Auteurs:* Drirpeter, Hobbema, Japiot, Simeon, Wammes Waggel
- Loop-kwantumzwaartekracht** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=28862719> *Auteurs:* Amantine, Brimz, Capaccio, Eendavid, JRB, Joostvandeputte, Michiel1972, Onderwijsgek, Ribashka, Roelzzz, Simeon, Sixtus, Template namespace initialisation script, 2 anonieme bewerkingen
- Matrixmechanica** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=26869723> *Auteurs:* JRB, Paul B
- Meetprobleem in de kwantummechanica** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=27086692> *Auteurs:* JRB
- Multiversum** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32225409> *Auteurs:* Advance, Alechem, Andre Engels, Beachcomber, Ben Pirard, BoH, Bronzino, Danielm, DéRahier, Ellywa, Fruggo, Gilbertorius, Handige Harrie, Hannes Karnoefel, JRB, Jopin51, LeeGer, MWAK, Mexicano, Michiel1972, Michka777, Ninane, Paul B, Rasbak, Ravingwolf, Silver Spoon, Supersymmetry, Taka, Van der Hoorn, Vis met 1 oog, Woudpiek, 11 anonieme bewerkingen
- Muon** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32199849> *Auteurs:* Bartux, BvdG, Ellywa, Hansmuller, Kadeike, Klaas1978, Koos Jol, Mexicano, Michiel1972, PHouben, PieterJanR, Rob Hooft, Slinger, Stephan202, Typo, 5 anonieme bewerkingen
- Muon-neutrino** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31762705> *Auteurs:* Architeuthis, Drirpeter, Johan N, PHouben, PieterJanR, Silver Spoon, Simeon, Wammes Waggel, Wikix, 1 anonieme bewerkingen
- Kwantumverstregeling** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31679590> *Auteurs:* Arakrys, Bemoelial, ErikvanB, Ilse Winter, JRB, Mick2, Mpm, S711, Snaily, Vis met 1 oog, 7 anonieme bewerkingen
- Neutrino** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31805738> *Auteurs:* 3wisemen, AvatarTeam, BvdG, Capaccio, Davv69, Drirpeter, Ellywa, Erik Wannee, ErikvanB, Han Geurdes, Handige Harrie, HandigeHarry, Hansmuller, Heer van Robaais, JRB, JRB-Europe, Jan Lapère, JanVlaming, JorisvS, Klaas1978, Kleuske, Koektrommel, Koornti, Look Sharp!, Lvg, Michiel1972, MoiraMoira, MrBlueSky, PHouben, Patrick, Paul B, PieterJanR, Pompidom, Rob Hooft, Romaine, RonaldW, Rudi van Hemert, RvanDantzig, Sil0x0000, Sswelm, Stijnvanerp, Svdmoln, Thomibaluba, Tooster, Toth, Treval, Viridiflavus, Wammes Waggel, Weetjesman, 35 anonieme bewerkingen
- Neutron** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32249630> *Auteurs:* Aaargh, BasvanPelt, BvdG, Capaccio, Ellywa, Erik Zachte, Erwin, GilHamiltonTheArm, Hansmuller, Jan Lapère, JelleBell, Joël, Karin, Klaas1978, KoenB, Mexicano, Michiel1972, PHouben, Patrick, Paul B, PieterJanR, Pjetter, Rob Hooft, Simeon, Titusvh, Webkid, Xaliante, 21 anonieme bewerkingen
- Non-lokaal** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=18574569> *Auteurs:* 3wisemen, De Wikischim, Doitashimashite, Door de wol geverfd, Hannes Karnoefel, JRB, Michiel1972, Serassot, Sixtus, WMdeMuynck, 3 anonieme bewerkingen
- Observabele** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=27305874> *Auteurs:* BKannen, JRB
- Oerstof** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32171978> *Auteurs:* .Koen, Beachcomber, Ben Pirard, BesselDekker, Bontenbal, DéRahier, Hajo, Kwiki, Maurits, Mdd, Mexicano, Pantalone, PeHa, Roelzzz, Romaine, Tomgreep, Valère De Brabandere, 5 anonieme bewerkingen
- Onzekerheidsrelatie van Heisenberg** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30554861> *Auteurs:* AlexP, Amarant, Andoar, Andre Engels, Aribashka, Aspfreakout, BertS, De Wikischim, Devon1980, Drirpeter, Ellywa, Erwin, Evanherk, FakirNL, Fruggo, Hajo, Hansmuller, Heureka, Huisma55, Jan Lapère, Lastminuteguy, M441, Madyno, Mathijs Romans, Michaja, Michiel1972, Nijdam, Peter Bruin, Rietvogel, Rob Hooft, Stijnvanerp, Stijnvaulter, Tap tap domination rocks, Thomas-, Wammes Waggel, Wikix, 24 anonieme bewerkingen
- P-braan** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=23139020> *Auteurs:* JRB, Lexw, Ribashka
- Padintegraal** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31737855> *Auteurs:* Aribashka, BertS, Falcongij, Handige Harrie, JRB, Lieven Smits, Madyno, Ravingwolf, 3 anonieme bewerkingen
- Pariteitsymmetrie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31802726> *Auteurs:* BasvanPelt, Erwin, JRB
- Pauli-matrix** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32176721> *Auteurs:* Alankomaat, Hansmuller, JRB, Moddereter, Romaine
- Pentaquark** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31026243> *Auteurs:* Drirpeter, JRB, Jeffzor, Jeroen, Ken123, Newton, Warddr
- Periodiek systeem/Golffuncties** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=24670422> *Auteurs:* Flyingbird, Fuss, HHahn, JePeAWB, Lvg, Michiel1972, Rex, Rob Hooft, 2 anonieme bewerkingen
- Periodiek systeem/Tabel met verkorte benoeming van de elektronenconfiguratie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=20150922> *Auteurs:* Capaccio, Fruggo, Lvg, Michiel1972, Rex, RoboRex, Westermarck, 4 anonieme bewerkingen
- Planckdeeltje** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=27084220> *Auteurs:* BvdG, Capaccio, Gpvos, HandigeHarry, Hannes Karnoefel, Mtcv, Rex, RonaldB, Simeon, 3 anonieme bewerkingen
- Plancklengte** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30368662> *Auteurs:* Andre Engels, Capaccio, Dirk Devlies, Door de wol geverfd, Hannes Karnoefel, Hansmuller, Jasperdoomen, Lvg, Michiel1972, MigGroningen, MoiraMoira, NielsB, Simeon, Superborsuk, T Houdijk, 6 anonieme bewerkingen
- Plancktemperatuur** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31745781> *Auteurs:* Bdijskstra, ErikvanB, JRB, Janlupker, Jantienkuiper, MaEr, Quasar, Tuvic, 5 anonieme bewerkingen
- Plancktijd** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30368683> *Auteurs:* Andre Engels, De Wikischim, Ellywa, HandigeHarry, Hannes Karnoefel, Hansmuller, Lvg, Michiel1972, Simeon, 3 anonieme bewerkingen
- Positron** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31762841> *Auteurs:* Andre Engels, Bdijskstra, Beetjedwars, BvdG, Capaccio, Christophe, CommonsDelinker, Ellywa, Erik Baas, Erik Zachte, Erwin, Handige Harrie, HandigeHarry, HetKantoor, Japiot, Jcwf, JorisvS, Kalsermar, Ken123, Klaas1978, Lord Aide, Michiel1972, MoiraMoira, Patrick, Paul B, PieterJanR, Siebrand, Slinger, TUFOWKTM, Thijs!, Viridiflavus, Vis met 1 oog, White Unicorn, 13 anonieme bewerkingen
- Post-Hartree-Fock** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=19742936> *Auteurs:* Effieetsanders
- Postulaten van de kwantummechanica** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=24645240> *Auteurs:* Capaccio, JRB
- Principe van lokaliteit** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31954173> *Auteurs:* BKannen, De Wikischim, JRB, Keso, Maurits, Paul B, Snaily, Viv3210
- Proton (deeltje)** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31762863> *Auteurs:* Andre Engels, Ap, Bartux, BvdG, Capaccio, Castingpagina, Danielm, Edwtie, Erik Zachte, GerhardK, Gpvos, Handige Harrie, HandigeHarry, JRB, Jan Lapère, Jesper, JorisvS, Joël, Klaas1978, Kristof vt, LennartBols, Lexw, Michiel1972, Mrgreen71, PHouben, Pjetter, Pyrobass, Rex, Riki, Silver

Spoon, Trewal, Webkid, Wikichemicus, 15 anonieme bewerkingen

Quark *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32079014> *Auteurs:* Aaargh, Adnerge, Andre Engels, BvdG, Capaccio, DennisPeeters, Drirpeter, Erik Baas, Fruggo, Garmen, Gid, Handige Harrie, Hens, JRB, Jan Lapère, JorisvS, Joël, Klaas1978, Lignomonanus, Maasje, MacHanzzz, Mexicano, Michiel1972, MrBlueSky, Muizz, PHouben, Pictouquarks, PieterJanR, Rob Hooft, Romaine, Rutger2, Svdmolen, Titusvh, Vincentsc, W.D. Sparling, Wammes Waggel, Woudloper, Woudpiek, Zweistein, 27 anonieme bewerkingen

Quark-gluonplasma *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29952370> *Auteurs:* Drirpeter, DéRahier, Edwtie, GijsvdL, Joep Zander, Joostvandeputte, Maiella, Paul B, Zanaq

Qubit *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30155972> *Auteurs:* ArAge, Cadezo, Daedalus, JRB, Recoo, Simeon, Sixtus, TOM, Thunderbird2, 6 anonieme bewerkingen

Regel van Hund *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=26709374> *Auteurs:* Bjornlammers, Capaccio, FakirNL, Notum-sit, Panian, Richardkiwi, T.vanschaik, Vis met 1 oog, 4 anonieme bewerkingen

Renormalisatie *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32113738> *Auteurs:* Aribashka, DéRahier, EdBever, Handige Harrie, JRB, MuDavid, Ribashka, Sindala, 6 anonieme bewerkingen

Rydberg-formule *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31854278> *Auteurs:* BKannen, Bjornlammers, Caseman, Dryke, DéRahier, Hansmuller, Spraakmakker

Schrödinger-operator *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=27090361> *Auteurs:* JRB, Lieven Smits, Madyno, 1 anonieme bewerkingen

Schrödingervergelijking *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29982337> *Auteurs:* Aribashka, Bas042, Bemoelial, BertS, Capaccio, Drirpeter, DéRahier, Ellywa, Hansmuller, Henna, JRB, Jasperdoomen, Jcwf, Jesper, Lieven Smits, Madyno, Mathijs Romans, Mtcv, Mushlack, Nijdam, Quistinix, Rasbak, Serassot, Snaily, Svdmolen, Tommeij, 12 anonieme bewerkingen

Schrödingers kat *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32242678> *Auteurs:* AleichemAWB, Amarant, ArAge, Aribashka, BenTels, BvdG, Cinaed666, Dartelaar, Evanherk, GDijkstra, Gpvos, JRB, Jari94, JePe, Kameraad Pjotr, Lignomonanus, MADE, Maarten k, Madyno, Maiella, Maxime.Debosshere, Mdd, Michiel1972, MrBlueSky, Rex, Riki, Ronn, Serassot, Simeon, Torero, 22 anonieme bewerkingen

Snaartheorie *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32244352> *Auteurs:* Atalanta, BKannen, BertS, Blueknight, Caenwyr, Capaccio, Caspert, Ceinturion, China Crisis, Dartelaar, De Wikischim, Demophon, Drirpeter, DéRahier, Edwtie, Elia.vw, Ellywa, Feanfan, Fransw, Gerbenm, Gravity, GruffGummi, Handige Harrie, Hannes Karnoefel, Hansmuller, Hardscarf, JRB, Jan Lapère, Jasperiscool, Jeb, Jeroen, Jonge415, Klaas1978, Kramer65, Kwiki, Lexw, Lvg2, Lymantria, Maasje, MadHatter, Mexicano, MigGroningen, MrBlueSky, Niels, NielsB, Otto ter Haar, Perelaar, R.Langendam, R.schwab, RJB, Rex, Ribashka, Ricknl, RonaldB, Rudolphous, Sent, Siebrand, Simeon, StijnHaus, Taka, Tjako, Trias, Vanbruystelghem, Vis met 1 oog, Vortexfive, Warddr, Woudpiek, 59 anonieme bewerkingen

Spin (kwantummechanica) *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31743988> *Auteurs:* Andre Engels, Bemoelial, Capaccio, Carnelain, Denial, Devon1980, Ellywa, Erwin, HHahn, Handige Harrie, HandigeHarry, JRB, Jan Lapère, Krekkie, Laoma, Lvg, MEE, Mexicano, Michiel1972, Mtcv, MuDavid, Niels, Nijdam, Paul B, Sherpa, Sjoerd22, Viridiflavus, Wikix, Yvonne Sloodman, 17 anonieme bewerkingen

Stelling van Bell *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30326587> *Auteurs:* Advance, Drirpeter, ErikvanB, Hindrikjanangerman, JRB, Japiot, Ken123, Mexicano, Paul B, Pj.de.bruin, Riki, Zweistein, 3 anonieme bewerkingen

Stern-Gerlach-experiment *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32323813> *Auteurs:* Aribashka, Capaccio, Drirpeter, Hobbema, Japiot, JetzzDG, Maiella, Mexicano, MrBlueSky, Paul B

Stralingswet van Wien *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31208920> *Auteurs:* Bonaber, HHahn, Hobbema, Livinus, Patrick

Subschil *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=28420561> *Auteurs:* Bemoelial, Grmb176, HHahn, Hardscarf, Lvg, Michiel1972, 1 anonieme bewerkingen

Super-Kamiokande *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31770038> *Auteurs:* DrJos, Drirpeter, Handige Harrie, JRB, Japiot, Jpc, LeRoc, PieterJanR, Teunie, 2 anonieme bewerkingen

Supergeleiding *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31755642> *Auteurs:* Andre Engels, Anneb, Bdiijkstra, Compro, Ctxppc, Davin, Dryke, EVVE, Ellywa, Evanherk, Eve, Flyingbird, HHahn, Handige Harrie, HandigeHarry, Hansmuller, HenkvD, Jessealderliesten, Josq, Klever, Krisvandegoor, Maniago, Michiel1972, Mrgreen71, Muizz, O E P, Paul B, PieterJanR, Pjetter, Rex, Ribashka, Riki, Rob Valk, Svdmolen, W.D. Sparling, WHM de Rijk, Ype, 36 anonieme bewerkingen

Supersymmetrie *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29506622> *Auteurs:* Andre Engels, Danvisser, Drirpeter, Hanneke x, JRB, Lexw, Mexicano, MrBlueSky, Ribashka, 它是我, 1 anonieme bewerkingen

Tau (lepton) *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31896196> *Auteurs:* Aaargh, Basvb, BvdG, Drirpeter, Handige Harrie, J Hazard, Klaas1978, PieterJanR, Wammes Waggel, 2 anonieme bewerkingen

Theorema van Koopmans *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31615450> *Auteurs:* Capaccio, Jvherturn, Robvhoorn

Theoretische chemie *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31716361> *Auteurs:* Annabel, Apendency, Kwiki, Mrgreen71, Sietske, Streppel

Toepassingsmogelijkheden voor Bose-Einsteincondensaten *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30377982> *Auteurs:* AGL, Erik Baas, JZ85, Johan Lont, Romaine, Sawims, Shade, SterkeBak, 3 anonieme bewerkingen

Tunneleffect *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32200380> *Auteurs:* Aribashka, Arrowman, Bluef, Errabee, Hansmuller, Johan Lont, Kadeike, Mathijs Romans, Mexicano, Michiel1972, Quantum, Viridiflavus, 7 anonieme bewerkingen

Tweespletenexperiment *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32154939> *Auteurs:* Aribashka, Bjornlammers, Capaccio, De Wikischim, Dolledre, ErikvanB, JRB, Maiella, Mkr, Mosellanus, ProfoX, RonnieV, Taketa, Vdkdaan, 5 anonieme bewerkingen

Uitsluitingsprincipe van Pauli *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32286083> *Auteurs:* 3wisemen, Algont, Aribashka, Bartux, BvdG, Capaccio, Edwtie, Ellywa, HHahn, Handige Harrie, HansOosting, JRB, Mexicano, Michiel1972, Mtcv, Paul B, Paul K., Rasputin, Rob Hooft, Tap tap domination rocks, 4 anonieme bewerkingen

Ultravioletcatastrofe *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30622688> *Auteurs:* JRB, Patrick

Veel-werelden-interpretatie *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31162866> *Auteurs:* Gpvos, Hannes Karnoefel, JRB, Luna, Maniago

Veld (natuurkunde) *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29243549> *Auteurs:* BvdG, ChristiaanPR, JRB, Kthoelen, Mexicano, MuDavid, Obarskyr, Ribashka, Riki, TeunSpaans, 3 anonieme bewerkingen

Verschuivingswet van Wien *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31025901> *Auteurs:* Bemoelial, Caseman, Drirpeter, HHahn, JRB, Livinus, Madyno, Maiella, Patrick, Vels, Viridiflavus, 1 anonieme bewerkingen

Virtueel deeltje *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31764211> *Auteurs:* Andre Engels, BvdG, Dayra, Ellywa, ErikvanB, Handige Harrie, Hypatia, JRB, Jan Lapère, Michiel1972, Oscar, Paul B, Stephan202, 3 anonieme bewerkingen

Vreemdheid *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29654280> *Auteurs:* Capaccio, Drirpeter, MuDavid, Romaine

Waarschijnlijkheidsamplitude *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31333996> *Auteurs:* Aribashka, Capaccio, De Wikischim, JRB, Richardkiwi, Romaine

Waarschijnlijkheidsinterpretatie van Born *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29098514> *Auteurs:* Hobbema, JRB, Maniago, 1 anonieme bewerkingen

Waterstofatoom *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31817781> *Auteurs:* Bemoelial, Capaccio, JRB, Paul B, T.vanschaik, 2 anonieme bewerkingen

Wentzel-Kramers-Brillouin-benadering *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=27840350> *Auteurs:* Bemoelial, Count Iblis, GijsvdL, Hansmuller, Kwiki, Mexicano, Riki, Thunderbird2, WikiFB2

Wereldkristal *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31873313> *Auteurs:* Algont, Eve, Félix, Jarune, Notum-sit, Zanaq, 3 anonieme bewerkingen

Wet van Planck *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32087758> *Auteurs:* Bemoelial, Fred Lambert, Goudsbloem, Groucho NL, HHahn, Johan Lont, Maiella, Patrick, Paul B, Pompidom, Praseodymium, Riki, 7 anonieme bewerkingen

Deeltje *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30406052> *Auteurs:* Algont, BvdG, Dryke, ErkanKaraagacli, Hansmuller, Pjkoele, Woudpiek, 1 anonieme bewerkingen

Deeltjesfysica *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32020670> *Auteurs:* BvdG, Capaccio, Drirpeter, Edwtie, Ellywa, HHahn, JRB, Johan Lont, Klaas1978, Lexw, Mathonius, Mexicano, Paul B, Rex, Rob Hooft, RoboRex, Sixtus, Sswelm, Th, Wammes Waggel, Woudpiek, 29 anonieme bewerkingen

Antimuon *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=20894832> *Auteurs:* Drirpeter, Johan N, Wammes Waggel, Wikix

Antineutrino *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31815786> *Auteurs:* Andre Engels, Drirpeter, MoiraMoira, Rasbak, Silver Spoon Sokpop, Wammes Waggel, 1 anonieme bewerkingen

Antineutron *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32123439> *Auteurs:* Chielbuseyne, EVVE, Ironicon, MoiraMoira, Romaine, Sindala, Zanaq, 2 anonieme bewerkingen

Antiproton *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31436095> *Auteurs:* BvdG, Carsrac, Effeetsanders, Erwin, Henna, Jdeplecker, Rob Valk, Sindala, Sixtus, 8 anonieme bewerkingen

Antitau *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=20894834> *Auteurs:* Drirpeter, Johan N, Wammes Waggel, Wikix

Atoom *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31992962> *Auteurs:* .Koen, .marc., Advance, Albert Marinus, Alias, Andre Engels, Atalanta, Bartux, BenTheWikiMan, Bob.v.R, Buttonfreak, BvdG, Capaccio, ChrisN, Ciell, Dapsv, De Wikischim, DexieBoy, Dolledre, Dryke, DustSpinner, Edwinb, Edwtie, Ellywa, Errabee, Fizzix, Forrestjunky, Geograaf, GijsvdL, Handige Harrie, Harriechristus, Ilse(a), Jacquemort, Jan Duimel, Jeb, Jewf, Jeroen, Johan Lont, Johan N, Joost, Joost 99, Joël, JurriaanH, K. Night, KKoolstra, Klaas1978, Kleuske, Kthoelen, Le Fou, Look Sharp!, Lvg, Lymantria, Machaerus, Maniago, Mathonius, Mdd, Mexicano, Michiel1972, Mikeдебie, Mixcoat, MoiraMoira, Mordax, MrBlueSky, Mrgreen71, Mtcv, Nijdam, Otto ter Haar, Peterson, Pieter Suurmond, Pit, Pjetter, Pompidom, Pven, Rdohmen, Richardkiwi, Rob Hooft, RoboRex, Romaine, Rutger2, Siebrand, Simeon, Simon96DH, SlimmeHans, Svdmoln, TBloemink, Tim Kristel, Tuvic, Vertrokken, Vinkje83, Vliegenmepper, Waerth, Webkid, Wiki13, Wikichemicus, Willemo, Wolfram, Woodcuttery, 156 anonieme bewerkingen

Baryon *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32106770> *Auteurs:* Albert Marinus, BvdG, Drirpeter, Ellywa, Ernie, Florrat, JRB, Jan Lapère, Klaas1978, Kristof vt, Look Sharp!, Mexicano, Michiel1972, Paul B, PieterJanR, Puckly, Simeon, Tfa1964, Torero, Woudpiek, 6 anonieme bewerkingen

Boson (deeltje) *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32025051> *Auteurs:* Andre Engels, Bemoelial, Capaccio, Drirpeter, Ellywa, ErikvanB, Evanherk, Gid, Goudsbloem, Grashoofd, Handige Harrie, HetKantoor, JRB, Jan D. Berends, Klaas1978, Lvg, Michiel1972, Paul B, Titusvh, Woudpiek, Yvonne Sloomman, 7 anonieme bewerkingen

Elektron-antineutrino *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=27194865> *Auteurs:* Drirpeter, JRB, Johan N, PHouben, PieterJanR, Wammes Waggel, Wikix, 1 anonieme bewerkingen

Elektron-neutrino *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31913139> *Auteurs:* Drirpeter, Johan N, PieterJanR, Vis met 1 oog, Wammes Waggel, Wikix, 1 anonieme bewerkingen

Exotisch deeltje *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29258950> *Auteurs:* Evil berry

Gluon *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31762763> *Auteurs:* BvdG, Ellywa, HandigeHarry, Klaas1978, Logosun, Maasje, MacHanzzz, Mexicano, PHouben, 3 anonieme bewerkingen

Graviton *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29531966> *Auteurs:* Albert Marinus, BvdG, Dryke, DéRahier, Erwin, Handige Harrie, Hannes Karnoefel, JRB, Klaas1978, Maxplanck, Rex, Rob Valk, Serassot, Willem1001, Woudpiek, 5 anonieme bewerkingen

Hadron *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32009354> *Auteurs:* Albert Marinus, BvdG, Drirpeter, Erik Wannee, Erik Zachte, JRB, Klaas1978, Lvg, Mexicano, Michiel1972, Nikai, Puckly, Rob Hooft, RoboRex, Thijs!, Titusvh, Woudpiek, 3 anonieme bewerkingen

Ijkboson *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31940143> *Auteurs:* BasvanPelt, Den Hieperboree, Goudsbloem, Handige Harrie, HenkvD, JRB, Maniago, Mexicano, MoiraMoira, MuDavid, Paul B, 1 anonieme bewerkingen

Ion (deeltje) *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32288603> *Auteurs:* Albert Marinus, Andre Engels, BertS, Berthgmn, BvdG, Capaccio, DéRahier, Edwinb, Ellywa, Erwin, Evanherk, Gerritse, Gjoles, Gpvos, HHahn, Hadya, Handige Harrie, JRB, Jantjuhjh, Joachim, Jurre, Kiwix, Klaas1978, KoenB, Kristof vt, Lolsimon, Madyo, MichielDMN, Mrgreen71, Narayan, Nio17, Nummer 7, Olifant, PJ Geest, Paul B, Porsche-one, Pyrobass, RoboRex, RonaldW, Slinger, Svdmoln, T.vanschak, Webkid, Willemo, 29 anonieme bewerkingen

Kaon *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30373046> *Auteurs:* Albert Marinus, BasvanPelt, Drirpeter, Handige Harrie, JRB, PHouben, Romaine, TOM, Woudpiek, 1 anonieme bewerkingen

Lepton (subatomair deeltje) *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32106877> *Auteurs:* Albert Marinus, Bartux, BoH, BvdG, Drirpeter, Ellywa, Erik Baas, Erik Zachte, Handige Harrie, HandigeHarry, JRB, Klaas1978, Lvg, Michiel1972, Mtcv, Otto ter Haar, PHouben, Paul B, Rob Hooft, Romaine, Simeon, Svdmoln, Tfa1964, Wammes Waggel, We El, 11 anonieme bewerkingen

Majorana-deeltje *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30725688> *Auteurs:* Capaccio, Hansmuller, Hedva, Hverbiesen, JRB, M Krikke, Mexicano, MrBlueSky, PHouben, Paul B, Zanaq, 6 anonieme bewerkingen

Meson *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31760159> *Auteurs:* Albert Marinus, BvdG, Dolfy, Ellywa, JRB, JimmyShelter, Klaas1978, MartinD, Slinger, TeunSpaans, Wammes Waggel, Wiemster, 5 anonieme bewerkingen

Moleculaire entiteit *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31933933> *Auteurs:* Capaccio, De Wikischim, PAvdK

Molecuul *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32120501> *Auteurs:* Afaalchinesees, Andre Engels, Annabel, Aries, Bo W, Bob.v.R, BvdG, Capaccio, Christiaan, CommonsDelinker, Darklaurens, Db-inf, Edoderoo, Elgewen, Ellywa, HHahn, Hans B., Ilmatar, JePeAWB, Joost, Josq, Joël, Klaas1978, Kleuske, Klever, Le Fou, Lexw, Leyo, Lvg, Lvg2, Lycaon, Lymantria, M Hendriks, Machaerus, Madyo, Maniago, Max Payne7, Michiel1972, MoiraMoira, Monique colijn, MrBlueSky, Mrgreen71, Ninane, Ollie B. Bommelding, Oscar, Paul B, Quistnix, Rasbak, Rob Hooft, RoeAntSte, Romaine, Ron kreike, SanderK, Siebrand, Silver Spoon, Sjoerd22, T.vanschak, Thijsshuberts, Top8, VanBuren, Venullian, WH1953, Webkid, Wikichemicus, Woudloper, Zanaq, 53 anonieme bewerkingen

Muon-antineutrino *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=27193336> *Auteurs:* Drirpeter, Johan N, PieterJanR, Wammes Waggel, Wikix, 1 anonieme bewerkingen

Nucleon *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31991599> *Auteurs:* Advance, BvdG, Ellywa, JcJf, Klaas1978, PieterJanR, Svdmoln, 1 anonieme bewerkingen

Pion (natuurkunde) *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31760141> *Auteurs:* Albert Marinus, Aleichem, BvdG, Drirpeter, JRB, Klaas1978, Krizzz, Mexicano, Willemo, Woudpiek, 2 anonieme bewerkingen

Proef van Millikan *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32062941> *Auteurs:* Afaalchinesees, Atvoogt, CodeCaster, CommonsDelinker, Edwtie, Erik Baas, Handige Harrie, JRB, Jw2, Maiella, Mikeдебie, MoiraMoira, Ronn, Sjoerd22, VanBeem, 4 anonieme bewerkingen

Subatomair deeltje *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32264892> *Auteurs:* BvdG, Drirpeter, Erik Baas, ErikvanB, HandigeHarry, Jdvp, Klaas1978, Mdd, Mexicano, PHouben, Patrick, PieterJanR, Pstragier, Qwertys, Sawims, Sswelm, Theauctron, Tuvic, Wammes Waggel, Willemo, Woudpiek, 14 anonieme bewerkingen

Tachyon *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31271716> *Auteurs:* .Koen, Aaron-Tripel, Albert Marinus, Amantine, Andre Engels, Bemoelial, BvdG, ChIshmal, Edoderoo, Ellywa, Evil berry, Handige Harrie, Henk Boelens, JRB, Mbch331, Paul B, Puckly, Qantum, Steinbach, TeunSpaans, Valhallasw, VanBuren, Viv3210, Weetjesman, 12 anonieme bewerkingen

Tau-antineutrino *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=27203727> *Auteurs:* Drirpeter, Johan N, PieterJanR, Wammes Waggel, Wikix

- Tau-neutrino** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31762708> *Auteurs:* Drirpeter, Erik Wannee, Johan N, PHouben, Wammes Waggel, Wikix
- Top-quark** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31868697> *Auteurs:* Advance, Daka, Edwtie, Handige Harrie, Mathonius, Mexicano, Michiel1972, Nico27, PHouben, Paul B, Romaine, RubySS, 10 anonieme bewerkingen
- Vectorboson** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31297557> *Auteurs:* HenkvD, JZ85, Jpc, Logosun, Maniago, Mexicano, MoiraMoira, Wammes Waggel, 1 anonieme bewerkingen
- W-boson** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31778932> *Auteurs:* Bemoeial, BvdG, Drirpeter, Edwtie, JorisvS, Jurre, Klaas1978, Mexicano, PHouben, Paul B, Romaine, Taketa, 4 anonieme bewerkingen
- Z-boson** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31760129> *Auteurs:* BvdG, Carsrac, Drirpeter, Klaas1978, MC Magic, Mexicano, PHouben, Paul B, Romaine, Taketa, 1 anonieme bewerkingen
- Elektromagnetisme** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32321677> *Auteurs:* A Duck, Aribashka, Bemoeial, BertS, Drirpeter, Dryke, Eegee, Ellywa, Encyo, ErikvanB, Erwin, Handige Harrie, Hansmuller, Kthoelen, L0bd0n, Lexw, Listener, Look Sharp!, Marijn3, MoiraMoira, MuDavid, PY7, Rietvogel, Rik G., RoboRex, Romaine, Sswelm, Trijnstel, Tukka, Viridiflavus, Waerth, Рыарь поля, 44 anonieme bewerkingen
- Sterke kernkracht** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30436528> *Auteurs:* Andre Engels, Bemoeial, BvdG, Eve, Goudsbloem, Guido Zuidinga, Handige Harrie, JRB, Jan Lapère, Kadeike, Maasje, MacHanzz, Michiel1972, Ortjens, Oscar, PHouben, Rex, Speur, Titusvh, Venullian, Wiemster, 13 anonieme bewerkingen
- Zwaartekracht** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32174465> *Auteurs:* A3diet, Advance, Algotn, Bart van der Pligt, Bartux, Basvb, Bemoeial, BertS, Blueknight, BvdG, CaAl, Capaccio, Caseman, Cavit, Danielm, De Wikischim, Desertfax, Dolledre, Drirpeter, DustSpinner, Edwinb, Ellywa, Empoor, Enormekever, ErikvanB, Erwin, Evanherk, Flyingbird, Gerbennn, GijsvdL, Gravity, Handige Harrie, Hannes Karnoefel, Hansmuller, Hardloper, Hjvannes, Horus, Ilario, JRB, JWZG, Jack Ver, Jan Lapère, Jcwf, JePe, Joost, Joël, Kester, Kiwix, Klaas1978, Kleuske, Kwiki, Lexw, Look Sharp!, Lymantria, MADe, Madyno, Maiella, Maniago, MartinD, Maurits, Mexicano, Michiel1972, MigGroningen, MoiraMoira, MrBlueSky, Mtcv, Neoweb, Niels, Nijdam, O E P, Oscar, PJ Geest, Patrick, PetitRobert, Pieter Suurmond, Pieter1, Pompidom, Proborc, Puckly, Quistnix, Ravingwolf, Rex, Ribashka, Riki, Rob Hooft, Ron kreike, RonaldB, Rutger2, Sammos, SanderK, Sbj, Selliemar, Serassot, Siebrand, Six, Sixtus, Sjoerd22, Snoop, Stephan202, Stijnvanerp, Sumurai8, Svdmolen, Taketa, TeunSpaans, Tfa1964, The Banner, Theforce222, Typo, Vacio, Verrekijker, Viridiflavus, Viv3210, W.D. Sparling, Walter, Wiki13, Wikiklaas, WikisIsBack, Woodcuttery, Woudloper, Woudpiek, Wroozeleer, Xyboi, Xyzzy, 144 anonieme bewerkingen
- Zwakke kernkracht** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32101825> *Auteurs:* Andre Engels, ArAge, Bemoeial, BvdG, Drirpeter, ErikvanB, H.breukink, Handige Harrie, JRB, Jan Lapère, Mrgreen71, Neet, PieterJanR, Pompidom, Sjoerd22, WouterVH, 9 anonieme bewerkingen
- Asymptotische vrijheid** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=26971081> *Auteurs:* Drirpeter, JRB, Michiel1972, Mtcv, 1 anonieme bewerkingen
- Casimireffect** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32175609> *Auteurs:* 3wisemen, Aleichem, BertS, Chielbuseyne, CommonsDelinker, Ellywa, Gerritse, GijsvdL, Hansmuller, JRB, Jan Lapère, Joachim, Michiel1972, PieterJanR, Qantum, RoboRex, Valhallasw, Westermarck, Wiemster, Wilinckx, 8 anonieme bewerkingen
- Feynmandiagram** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31721418> *Auteurs:* Brimz, Edwinb, JRB, Jdoesburg, Paul B, Pieter Kuiper, RubySS, Sjoerd22, 3 anonieme bewerkingen
- Globale symmetrie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=19407121> *Auteurs:* JRB
- Nulpuntsenergie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31707384> *Auteurs:* Alex1, Beetjedwars, Ben Pirard, Dhyanam, Ellywa, Envvoy, Erik Baas, Galwaygirl, Hannes Karnoefel, Hansmuller, JRB, Jdubbel, JePe, Madyno, Sjoerd22, Taketa, Vis met 1 oog, WouterVH, 12 anonieme bewerkingen
- Spinor** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30357628> *Auteurs:* JRB, Kwiki
- Spontane symmetriebreking** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31828339> *Auteurs:* ErikvanB, Hansmuller, JRB, Paul B, PieterJanR
- Stelling van Noether** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31733195> *Auteurs:* 3wisemen, Advance, BasvanPelt, JRB, Japiot, Maiella, Paul B, Sjoerd22, Sustructu, Woudloper, 3 anonieme bewerkingen
- Vertexoperatoralgebra** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=24742071> *Auteurs:* JRB
- Virasoro-algebra** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=26795577> *Auteurs:* JRB, 1 anonieme bewerkingen
- Yukawa-potentiaal** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29227973> *Auteurs:* 3wisemen, BvdG, Drirpeter, Handige Harrie, JRB, Kwiki, Maniago, Rutger2, Sixtus, Tuvic, Wiemster, 2 anonieme bewerkingen
- Calabi-Yau-variëteit** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31898232> *Auteurs:* Alankomaat, ChristiaanPR, Felixior, George4, Hans Daemen, JEMebius, JRB, Kameraad Pjotr, Madyno, SAMnl, 3 anonieme bewerkingen
- D-braan** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31049893> *Auteurs:* JRB, Maniago, Ribashka, Sonty567, VanBuren
- M-theorie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30758214> *Auteurs:* DéRahier, Edwtie, Hannes Karnoefel, JRB, Kroose, Lena Kinn, Lexw, Lieven Smits, Lvg2, Lymantria, Mvmaastricht, Nick99, Paul B, Ribashka, Sonty567, Supersymmetry, 12 anonieme bewerkingen
- Membraan (M-theorie)** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=17950585> *Auteurs:* De Wikischim, Paul B, Ribashka
- Supergravitatie** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31722689> *Auteurs:* Capaccio, JRB, Kwiki, Lexw, Machaerus, PJ Geest, Ribashka, 1 anonieme bewerkingen
- Absolute ruimte** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29684046> *Auteurs:* JRB, 2 anonieme bewerkingen
- Antizwaartekracht** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29094998> *Auteurs:* Advance, Elektrogast, Ellywa, Fruggo, GijsvdL, Handige Harrie, Hannes Karnoefel, Hansmuller, Jeroen, Johan Lont, Leo44, Lieven Smits, Michiel1972, MoiraMoira, Mschindwein, Paul B, Rex, Riyadi, SanderK, Siebrand, Soecitta, Taka, Tekstman, Vis met 1 oog, Whizz, Ype, 它是我, 8 anonieme bewerkingen
- Ce Teepatl** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29086126> *Auteurs:* Fontes, Nederduivel, Sindala, 33 anonieme bewerkingen
- D'Alembertiaan** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32050068> *Auteurs:* Aribashka, Dr.emmettbrown, Grashoofd, Maiella, Ribashka
- Arthur Eddington** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30593181> *Auteurs:* Aleichem, Andre Engels, Anonimus, Araf, BertS, CommonsDelinker, Dolledre, Dryke, Ellywa, Gouwenaar, Jan Lapère, LeeGer, Paul B, Pethan, Rood-geel-blauw, Taka, Tdevries, Theo, We El, 8 anonieme bewerkingen
- Eenparig cirkelvormige beweging** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30296822> *Auteurs:* Capaccio, Condor3d, Erik Baas, Miellyn, RonaldB, 11 anonieme bewerkingen
- Eenparig rechthoekige beweging** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=23529248> *Auteurs:* Capaccio, Mexicano, RonaldB, Sjoerd22, Wammes Waggel, 2 anonieme bewerkingen
- Eenparig versnelde beweging** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=26492083> *Auteurs:* Algébrico, Arvey, Capaccio, Erwin, JePe, Kleuske, MoiraMoira, MrBlueSky, Pjetter, Rasbak, Sjoerd22, Theobald Tiger, Willemo, 18 anonieme bewerkingen
- Ehrenfest-paradox** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30482099> *Auteurs:* Brimz, Buntje, Capaccio, JRB, Maiella, 2 anonieme bewerkingen
- Eigentijd** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32016957> *Auteurs:* Aribashka, Handige Harrie, Lexw, Mexicano, Patrick, 2 anonieme bewerkingen
- Albert Einstein** *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32188218> *Auteurs:* Koen, 4lloyd, A Duck, AGL, Adnergje, Advance, Aiko, Akoopal, Alankomaat, Albanian222, Aleichem, Alex1, Anachos, Andre Engels, Anja Provoost, Anonimus, Araf, Arant, ArjenW, Art Unbound, BKannen, BWR, Babbel666, Bacon, Balko Kabo, Basvb, Beany, Bemoeial, BenTheWikiMan, Berkoet, BertS, BlackCat, BoH, Bob.v.R, Brimz, BvdG, Canide, Casper, Chaemera, Chris, ChristiaanPR, Cicero, Cinaed666, Clarel, CommonsDelinker, Compro, Conget, CyeZ, Dapsv, Dartelaar, David12345, De Wikischim, Demophon, Dennisdnn, Dimhirwen, Diogenes, Dolfy, Dolledre, Dr. F.C. Turner, Dreis, Drirpeter, Druifkes, Dryke, Dwergronjintje, DéRahier, EdBever,

Edwinb, Effeetsanders, EinNew3, Ellywa, Emmelie, Enormekever, Erik Baas, Erik1980, Erikvd, ErikvanB, Erikweijers, Eros, Errabee, Erwin, EvG, Evanherk, Eve, Evil berry, FakirNL, Fenke, Fontes, Forxin, FrancescoGrassotti, Fransvannes, Freaky Fries, Fruggo, Félix, Gerbennn, Gidonb, GijsvdL, Grashoofd, Grmb176, HHahn, Hajo, Halandinh, Handige Harrie, Hannes Karnoefel, Hans B., Hansmuller, Henk van Haandel, Hoopje, Hulleie, Iijjccoo, Ik.pas.aan, JMMuller, JPWFriesland, JRB, JZ85, Jack Ver, JacobH, Jan Lapère, Jan Servotte, JanB46, Jandahl, Jarune, JePe, JoJan, Joep Vullings, Jonasn, Joost, JurgenG, Jvhertrum, Kalsermar, Karoma, Ken123, Knuga, Koos Jol, Krinkle, Kwibus, Kwiki, Känsterle, Lampje, LeChuck, LeeGer, LeonardoRob0t, Lexw, Lieven Smits, LiveBloid, Lolsimon, Look Sharp!, Luca Masters, Lymantria, Løde, M441, Machomen59, Mallerd, Maniago, Marc-André Aßbrock, MarlonK, Marrakech, Martijn, MartinD, MathiS, Mavabu, Maxam, Mbch331, Mexicano, Michiel1972, MichielDMN, MigGroningen, Mixcoatl, Moartn, MoiraMoira, MrBlueSky, Mtcv, Multichill, Napoleon0478, Niels, Nilfanion, Ninane, Nocturnal, O E P, Obarskyr, OekelWm, Okido, Oscar, Otto ter Haar, Pantalone, Paul B, Paul080, Peterbiezelinge, Peterson, Pieter Suurmond, Pieter1, Pjetter, Pompidom, Quistnix, RJB, Raast, ReWinD, Rex, RhandyGelderland, Ribashka, Richardkiwi, Riki, Rob Hooft, Robert Prummel, RoboRex, Roelzzz, Romaine, RonaldB, RonaldW, Ronaldvd, Rudolphous, SPQRobin, Sabbrabells, SanderK, Sawims, Scipius, Siebrand, Simeon, Simon-sake, Sixtus, Skial, Smile4ever, Stephan202, SterreHart, Stigin, Stijnvanerp, Stridb, Substidue, Sustructu, Svdmolen, Sylvanaaa16, Taka, Taketa, Tdevries, Tfa1964, The Banner, TheCharmedOne, TheFreak, Thijs!, Thijsraets, Thomas-, Tom Meijer, Toth, Treisijs, Troefkaart, Tubantia, Tukka, Tuvic, Ucuha, Ugur Basak, Vanturijn, Veendorp, Vertrokken, VincentdeValk, Vis met 1 oog, WZ, Walter, Wamps, Waterkant, Wikix, Willemo, Woolters, Woudloper, Wutsje, Yorian, Youp.c, Yowal, Zanaq, Zielknijper, Zuydkamp, Zwitser123, conversion script, 390 anonieme bewerkingen

Einstein-De Sittermodel Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=24170814> Auteurs: AlexP, Andre Engels, Berrick, Gouwenaar, Hansmuller, JePeAWB, Johan hidding, MHD, Otto ter Haar, P4b, 6 anonieme bewerkingen

Einsteinring Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29266320> Auteurs: AGL, Advance, Bacon, Bjornlammers, Hansmuller, Jesper, MAde, MHD, Maasje, Pieter1, Rikipedia, 2 anonieme bewerkingen

Einsteins wonderjaar Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31651363> Auteurs: Advance, Basvb, Compro, Hansmuller, JRB, Mexicano, Paul B, Ribashka, Riki, 5 anonieme bewerkingen

Equivalentieprincipe Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29765672> Auteurs: AGL, Aleichem, BKannen, BvdG, DéRahier, Eve, H.N. van Roon, Hansmuller, Japiot, Khx023, Michielsn, Que20, Sjoerd22, Wikiklaas, 7 anonieme bewerkingen

Friedmann-vergelijking Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32162054> Auteurs: Aribashka, Bajoro, Brimz, Jvhertrum, Maiella, MoiraMoira, Otto ter Haar, Simeon, Viridiflavus, 1 anonieme bewerkingen

Gebeurtenis (relativiteit) Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32178425> Auteurs: Albert Marinus, Aribashka, Patrick, Paul B, Rmashhadi

Gesloten tijdachtige kromme Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30556584> Auteurs: Aribashka, ErikvanB, Ribashka

Gravity Probe B Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31834892> Auteurs: Advance, Japiot, Jpc, Kattenkruid, Maniago, PieterJanR, Vis met 1 oog

Invariantie Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29625255> Auteurs: Den Hieperboree, Enruit, Fred Lambert, HHahn, JacobH, MoiraMoira, Rbakels, Richardkiwi, Rudolphous, 1 anonieme bewerkingen

Roy Kerr Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31995254> Auteurs: Aribashka, FakirNL, Hansmuller, JRB, Rudolphous, Sevela.p

Kinetische energie Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31616799> Auteurs: Advance, BartBogaerts, Bdijkstra, BvdG, Ciell, Danielm, DustSpinner, Ed Stevenhagen, Ellywa, Erik009, Gerbrabants22, Hansmuller, Hvdboorn, JZ85, Jack Ver, Johan N, Kjelt1235, Kleuske, KoenB, Maniago, Mexicano, Michiel1972, Patrick, Paul B, Rembert Andy, Romaine, Sjoerd22, Snoop, Steinbach, Van der Hoorn, VanBuren, Wiki13, YoshiDaSilva, 37 anonieme bewerkingen

Kosmologische constante Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31078876> Auteurs: AGL, Andre Engels, Dartelaar, Ed de Jonge, Ellywa, Erik Zachte, Guaka, Handige Harrie, Jan Lapère, Lvg, Michiel1972, Oscar, PieterJanR, Simeon, 2 anonieme bewerkingen

Lichtkegel Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30241058> Auteurs: Capaccio, CommonsDelinker, LyricV, MrBlueSky, Onoes, Patrick, Pompidom, Robb, Simon96DH, Wiki13, 8 anonieme bewerkingen

Lorentzkllok Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=17889326> Auteurs: Handige Harrie, Maiella, 3 anonieme bewerkingen

Lorenz-ijk Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=26278293> Auteurs: Alex1, Erwin, Hansmuller, Michielsn, Paul B, PieterJanR, Sietske, 1 anonieme bewerkingen

Massa-energie relatie Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31701516> Auteurs: Koen, AGL, Aldensusa, Aribashka, Basvb, Bdijkstra, BvdG, Capaccio, Cleonis, CommonsDelinker, Davin, De Wikischim, Errabee, GeeKaa, GijsvdL, HHahn, Hajo, Handige Harrie, Hansmuller, Ischal, Janellegrims, Kleuske, Kwiki, Lexw, Look Sharp!, Mexicano, Mion, MoiraMoira, MrBlueSky, Mwpnl, N lasters, Nilfanion, OlledeBos, Paul B, Qwertuus, Raymond, Ribashka, Riki, Robvhoorn, RonaldB, Rudolphous, Simeon, Speur, Tdevries, Tuvic, Viv3210, Vlip, WDVLD, Wammes Waggel, Wouterjans, Xiutwel, 76 anonieme bewerkingen

Meerdimensionaal Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=25026358> Auteurs: Brimz, Edoderoo, GijsvdL, Groucho NL, Ivory, KoenB, Machaerus, Romaine

Michelson-Morley-experiment Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31613313> Auteurs: Algont, Aribashka, BvdG, Dryke, Effeetsanders, HHahn, Handige Harrie, Joost, JorisvS, Josh, Maiella, Pantalone, Riki, Verrekijker, 3 anonieme bewerkingen

Minkowski-diagram Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31933798> Auteurs: Advance, Aribashka, ErikvanB, JRB, Loran01e, Mastadc, MrBlueSky, Onoes, Patrick, Robb, Vis met 1 oog, 3 anonieme bewerkingen

Minkowski-ruimte Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29261325> Auteurs: Aribashka, ErikvanB, Ghanib, HHahn, Henkvdzee, JRB, Maiella, Patrick, Ribashka, Taketa, 8 anonieme bewerkingen

Ontaarde materie Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31400992> Auteurs: Emvee, Hans van Deukeren, Jan Lapère, Jos.Bergervoet, Kleuske, Krekkie, MrBlueSky, Woudpiek, ZVdP, 2 anonieme bewerkingen

Relativistisch elektromagnetisme Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31948931> Auteurs: Devon1980, ErikvanB, Heureka, Riki, T.vanschäik, 24 anonieme bewerkingen

Relativiteitsprincipe Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31608479> Auteurs: Hansmuller, JRB, Kleuske, Sjoerd22, Zwaard13, 1 anonieme bewerkingen

Relativiteitstheorie Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32299641> Auteurs: Aleichem, Bartux, Bob.v.R, Bramschoenmakers, Christophe, De Wikischim, Dripeter, Ellywa, Errabee, Evanherk, Fr33ke, Félix, Gerben1974, HHahn, Hansmuller, HetKantoor, Ivory, Japa, Japiot, Jcb, JeroenN, Joost, JurgenG, Kalsermar, Kleuske, Koos Jol, Madyno, Maniago, MigGroningen, MoiraMoira, Mtcv, Nijdam, Obarskyr, Oscar, Pantalone, Pieter1, Rex, Ribashka, Riki, Romaine, RonaldB, Rudolphous, Schekinov Alexey Victorovich, Siebrand, Sixtus, Sjoerd22, Snoop, Stigin, Thomasd, Trijnstel, Troefkaart, VanBuren, XCez, Yorian, 51 anonieme bewerkingen

Ruimtetijd Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31725501> Auteurs: Aribashka, Capaccio, De Wikischim, Handige Harrie, HandigeHarry, Hannes Karnoefel, JRB, Jarune, Kiwix, Kristof vt, Lotje, Maniago, Michiel1972, Oscar, Patrick, Paul B, Pompidom, Ribashka, Rlucaasj, RoboRex, Serassot, The Banner, Tuganax, Vliegenmepper, Znajoe, 13 anonieme bewerkingen

Schwarzschildradii Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31766332> Auteurs: Bdijkstra, Caseman, De Wikischim, Denial, ErikvanB, Euty, Handige Harrie, Jasperdoomen, Joosje, Michiel1972, Mschlindwein, Mtcv, Pantalone, Ribashka, Serassot, Snaily, 11 anonieme bewerkingen

Signatuur (natuurkunde) Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=27330614> Auteurs: Aribashka, JRB, Ribashka

Singulariteit (natuurkunde) Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32222780> Auteurs: BKannen, De Wikischim, ErikvanB, JRB, LimoWreck, Nummer 7, 4 anonieme bewerkingen

Sneller dan het licht Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31168093> Auteurs: Gamut, JePe, Kwazel, Lexw, Mexicano, Michka777, MrBlueSky, Riki, Silver Spoon, Sindala, Steinbach, Vis met 1 oog, Waninge, Weetjesman, Wegwezen, Woodcuttery, Zanaq, 2 anonieme bewerkingen

Tijdreizen Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32140959> Auteurs: Afroskater, Aleichem, Andre Engels, Argilio, Arrowman, Beachcomber, Blackpen, CartoonistHenning, Chris, Daka, De Wikischim, Djoen, Dolyf, Dqfn13, EdwinS, Ellywa, Erasmus, ErikvanB, Errie22, Erwin, EvG, Falcongj, Fontes, Frans Bosch, Handige Harrie, Hannes Karnoefel, HetKantoor, Hoopje, Ivo Goedhart, Japiot, Jari94, Jvhertrum, KKoolstra, Kleuske, Knudde Kjell, Lexw, Look Sharp!, MacHanzz, Maniago, Matissej, Mexicano, MichielDMN, Mixcoatl, MoiraMoira, MrBlueSky,

Muijz, Ollie B. Bommeling, Paidiagames, Patrick, Paul K., PauloCalipari, Pfijses, Pulsar51, Ra-men-hotep, RaMPo, Ribashka, Riki, RLucasj, RoboRex, RonaldB, RonaldW, Simeon, Sindala, Taka, Thomas-, Thor NL, Vis met 1 oog, Walter, We El, White Lady of the Woods, Wikix, Willemo, Woudpiek, Wutsje, 96 anonieme bewerkingen

Tsjerenkov-effect *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31776799> *Auteurs:* Advance, Annabel, Denial, Drirpeter, Emmelie, Emvee, Eraburis, Handige Harrie, JRB, M Hendriks, MADe, Paul B, PieterJanR, Riki, Sachavdk, Steinbach, Viridiflavus, Wikix, 1 anonieme bewerkingen

Vierde dimensie *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32328250> *Auteurs:* Ananasboompje, Bdijsktra, Bob.v.R, Bruyninc, Controle, DéRahier, Ischa1, JEMebius, Kleparz, Kwibus, Kwik, Lieven Smits, Mech, Pven, Quichot, R.Langendam, Sietske, Simeon, Six, Sixtus, VanBuren, 11 anonieme bewerkingen

Vierimpuls *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31721335> *Auteurs:* Capaccio, JRB

Vierstroom *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=25104276> *Auteurs:* Aribashka, Den Hieperboree, Ribashka

Waarnemingshorizon *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31744463> *Auteurs:* De Wikischim, Drirpeter, ErikvanB, Eve, Fuss, Kalsermar, Lexw, PeSHr, Snaily, Svdmolen, 5 anonieme bewerkingen

Wereldlijn *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32029400> *Auteurs:* Aribashka, Handige Harrie, JRB, Lymantria, Ribashka

Wormgat *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31950023> *Auteurs:* Arend041, BKannen, Ckdeawaal, Dopey, Ellywa, Floris V, Gerbenn, Guyvago, Handige Harrie, Hannes Karnoefel, Hansmuller, Jerous, Jezpuh, Joepsz, Koos Jol, Kristof vt, Lvg, Maniago, Mexicano, MrBlueSky, Niels, PAVdK, PieterJanR, Ravingwolf, Sindala, Taketa, Tuganax, Van der Hoorn, Vis met 1 oog, W.ouwehand, 39 anonieme bewerkingen

ZwaarteKrachtpotentiaal *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31589711> *Auteurs:* AleichemAWB, BertS, De Wikischim, ErikvanB, Erwin, Goudsbloem, Hobbema, JRB, Joep.b, Kwiki, Maniago, Patrick, Paul B, Sjeffmeekes, T Houdijk, Vis met 1 oog, Woudloper

ZwaarteKrachtsveld *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32257994> *Auteurs:* Aydin1884, BvdG, Dienaar1, Dirkd, Ellywa, Fuss, Gpvos, Hobbema, Jelle allaerts, Johan Lont, Lieven Smits, Neet, Nijdam, PetitRobert, Pieter1, QuintenB, Woudloper, Woudpiek, 2 anonieme bewerkingen

Zwart gat *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32307617> *Auteurs:* 3wisemen, Advance, Andre Engels, Apendy, Aribashka, Armando1992, BKannen, Bartux, Bdijsktra, Bemoel, Ben Pirard, Bergbengels, Blauwvingertje, Caber, Cadezo, Canp, Capaccio, Caseman, Casperinfo, Cepheus, ChrisN, Cicero, CommonsDelinker, Conget, Danielm, De Wikischim, Devon1980, Doitashimashite, Dolledre, Dqfn13, Dr. Bidov, Drirpeter, DustSpinner, DéRahier, Ed Stevenhagen, Edwin, Edwtie, Ellywa, Emelha, Emil Bode, Erik Zachte, ErikvanB, Evanherk, Falcong, Flyingbird, Fontes, Fuss, Galwaygirl, Gbuisman, George4, Golradir, Goudsbloem, Greenday2, Guyvago, Halandinh, Handige Harrie, HandigeHarry, Hannes Karnoefel, Hansmuller, Hobbema, Hoojpe, Jan Lapère, Japa, Jcb, JePeAWB, Jeroen, Jerous, Jesper, Johan N, Jongeduard, Joost, Joris Gillis, Jupiler, Justhg, Jvherturn, K. Night, Kalsermar, Kattenkruid, Ken123, Kenny333, Kens, Kiwix, Kleuske, Koen, KoenB, Kristof vt, Kwiki, Larzzz, Laudaka, Lexw, Lignomontanus, Look Sharp!, Lymantria, Løde, Maasje, MacHanzzz, Maniago, Mathonius, Maurits, Maxime.Debosschere, Meertn, Mexicano, Michiel1972, MoiraMoira, Morax, MrBlueSky, Muzz, Narayan, NegerIn, Niels, Nijdam, Ninane, Nk, Oscar, PHotoPower, Paul B, PeSHr, Peter Bruin, Peter b, Peterherman, PieterJanR, Pjetter, Quistnix, Quertyus, ReWinD, Ribashka, Robin Hood, RoboRex, Romaine, RonaldB, Ruben Ebben, Rudolphous, SanderK, Silent S, Silver Spoon, Simeon, Sindala, Six, Snoop, Sswelm, Sumurai8, T Houdijk, TBloemink, Taka, Taketa, The Mastermind, Trijnstel, Tuvic, VR-Land, VanBuren, Viridiflavus, Wiki13, Wikix, Wilfred2u, WinContro, Woodcuttery, Woudpiek, Wutsje, Xaviervd, 211 anonieme bewerkingen

Gelijktijdigheid *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30438560> *Auteurs:* Aribashka, Erwin, Handige Harrie, Marrakech, Mzwollo, Patrick, Pieter Kuiper, Sjoerd22

Inertiaalstelsel *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32176424> *Auteurs:* -Lars-, Aribashka, ChristiaanPR, De Wikischim, DéRahier, Ellywa, Erwin, Ilario, Jan Duimel, Joachim, Look Sharp!, Madyno, Michiel1972, Nijdam, Rienboutan, Serassot, Simonbr, Sjoerd22, T Houdijk, VanBuren, Viridiflavus, Willemo, 27 anonieme bewerkingen

Lengtecontractie *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31323912> *Auteurs:* Advance, Aribashka, Buntje, HHahn, Handige Harrie, JRB, Pantalone, Patrick, Pauwel, Robb, Ype, 8 anonieme bewerkingen

Lorentz-groep *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29834675> *Auteurs:* Advance, Basvb, Goudsbloem, JRB, Sikory, 4 anonieme bewerkingen

Lorentzfactor *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31956184> *Auteurs:* Aribashka, Bouwhuise, ErikvanB, Handige Harrie, JRB, Madyno, Ronn, Siebrand, Simeon, T Houdijk, Wdevries, Woudpiek, 12 anonieme bewerkingen

Lorentz-invariantie *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=25899639> *Auteurs:* Aribashka, JRB, Madyno, MuDavid, Ribashka, 1 anonieme bewerkingen

Lorentztransformatie *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30608726> *Auteurs:* Advance, Aribashka, Assumpta, Bemoel, DéRahier, Ellywa, ErikvanB, Giele001, Hansmuller, Madyno, Maiella, Mexicano, Mtcv, PieBog, Quichot, Riki, Rob Hoof, RonaldW, Sikory, Yopohari, 22 anonieme bewerkingen

Relativistische impuls *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32072243> *Auteurs:* BKannen, Basvb, Biciklanto-ee, Dqfn13, Ecishere, JRB, Kwiki, Lexw, Maniago, Paul B, Rodejong, Ronn, Youbuntu, 43 anonieme bewerkingen

Rustmassa *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32000520> *Auteurs:* Aleichem, Andre Engels, Aribashka, BvdG, Ellywa, FakirNL, Handige Harrie, HandigeHarry, Joël, Lexw, Michiel1972, Paul B, Pauwel, 6 anonieme bewerkingen

Snelheidstransformatie *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29228232> *Auteurs:* BKannen, ErikvanB, Heureka, Mathonius, Patrick, SamHoste, T.vanschaik, 18 anonieme bewerkingen

Speciale relativiteitstheorie *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31968968> *Auteurs:* AGL, Algont, Amantine, Andre Engels, Aribashka, Bemoel, BertS, BvdG, Camiel.wijffels, Capaccio, Christiaan, DanielTimmermans, Danielm, Dartelaar, De Wikischim, Dersonlwd, DrJos, Drirpeter, DéRahier, Ellywa, ErikvanB, Erwin, Evanherk, Falcong, Fruggo, Gesstudent, Gidonb, HHahn, Handige Harrie, Hannes Karnoefel, Hansmuller, Haumea, HenkvD, IJzeren Jan, Jan Lapère, Jcw, Joey11, Kassie, Khx023, Kleuske, Laudaka, Lexw, Loran01e, Lvg, M441, Madyno, Maniago, Michiel1972, Mtcv, Nijdam, O E P. Pantalone, Patrick, Peter b, Pjetter, Prlytzkofski, QuintenB, Raast, Ribashka, Richardw, Rietvogel, Riki, Rob Hoof, RonaldB, Ryz, Schekinov Alexey Victorovich, Sjoerd22, TeunSpaans, Tool, Uitterdijk, Viv3210, Walter, Winko, Wouterjans, XCeZ, Zanaq, 57 anonieme bewerkingen

Tijddilatatie *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31790190> *Auteurs:* ABoerma, Aribashka, BertS, BvdG, Chroty, Dolledre, Ejmarcus, Germer, Handige Harrie, Hansmuller, JMMuller, Lavachequiri, Madyno, Pauwel, Rex, RockyTDR, Sybren, 29 anonieme bewerkingen

Tweelingparadox *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30228117> *Auteurs:* AGL, Advance, Aribashka, BvdG, China Crisis, Chris, De Wikischim, DennisPeeters, Guyvago, Handige Harrie, Hansmuller, Jan Lapère, Jerous, Johan Lont, Joost, Jorisvb, Jpl, Madyno, Maiella, Mathiflip, Maxime.Debosschere, Mushlack, Nijdam, Patrick, Riki, Torero, 10 anonieme bewerkingen

Accretieschijf *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=32141752> *Auteurs:* 3wisemen, Advance, De Wikischim, Dirk Devlies, ErikvanB, Hobbema, JurgenG, Lignomontanus, MHD, Maniago, Paul B, Robin Hood, WikiFB2, Woudloper, Ype, 3 anonieme bewerkingen

Cygnus X-1 *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31984932> *Auteurs:* Beachcomber, CommonsDelinker, Hajo, ImmenselyFastAudi, Ladsgroup, Ls110858, Maniago, Mike Peel, Paul B, Robin Hood, 2 anonieme bewerkingen

Reissner-Nordströmetriek *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29568896> *Auteurs:* Aribashka, De Wikischim, ErikvanB, Euty, FakirNL, Golradir, JRB, Jarune, Jcw, Maniago, Paul B, PieterJanR, Ribashka, Simeon, Vels, 5 anonieme bewerkingen

Sagittarius A *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29536335> *Auteurs:* Amphicoelias, Caseman, CyrielK, Dandy, Devon1980, Hobbema, Kalsermar, Kens, Maniago, Robin Hood, Selliemar, Wikix, 3 anonieme bewerkingen

Schwarzschildmetriek *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=29568902> *Auteurs:* 3wisemen, Aribashka, ErikvanB, FakirNL, Golradir, Luctor, Maniago, Ribashka, Vels, 4 anonieme bewerkingen

Spaghetificatie *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=30524341> *Auteurs:* Aleichem, BvdG, Caseman, Hajo, Handige Harrie, Jari94, Lexw, Maniago, Patrick, Tuvic, 7 anonieme bewerkingen

V404 Cygni *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=31443207> *Auteurs:* Andre Engels, Devon1980, Familie brouwer, Mathonius, 4 anonieme bewerkingen

Afbeeldingsbronnen, licenties en bijdragers

Image:Crystal txt.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Crystal_txt.png Licentie: onbekend Auteurs: Dake, DieBuche, Rocket000, Túrelío, 1 anonieme bewerkingen

Bestand:Ball_lightning.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Ball_lightning.png Licentie: Public Domain Auteurs: Mahahahaneapneap, Meteor2017, Mons, Saperaud, Waldir, 2 anonieme bewerkingen

Bestand:Ball lightning.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Ball_lightning.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: Original uploader was Srbauer at de.wikipedia

File:NGC 7331 zoomed.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:NGC_7331_zoomed.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: Original uploader was Uber nemo at en.wikipedia Later version(s) were uploaded by Hurricane Devon at en.wikipedia

Bestand:DarkMatterPie.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:DarkMatterPie.jpg> Licentie: Public Domain Auteurs: Original uploader was PeteSF at en.wikipedia

Bestand:PAMELAonResurs-DK.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:PAMELAonResurs-DK.jpg> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Auteurs: -=HyPeRzOnD=- as modified by Aldebaran66 at en.wikipedia

Afbeelding:Commons-logo.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Commons-logo.svg> Licentie: logo Auteurs: SVG version was created by User:Grunt and cleaned up by 3247, based on the earlier PNG version, created by Reidab.

Bestand:CMS Higgs-event.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:CMS_Higgs-event.jpg Licentie: onbekend Auteurs: Lucas Taylor

Bestand:Gluon-top-higgs.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Gluon-top-higgs.svg> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: <http://en.wikipedia.org/wiki/User:JabberWok>

Bestand:BosonFusion-Higgs.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:BosonFusion-Higgs.svg> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: derivative work: ~ Booya Bazooka BosonFusion-Higgs.png: User:Harp 12:43, 28 March 2007

Bestand:Mecanismo de Higgs PH.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Mecanismo_de_Higgs_PH.png Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: YrithinnD

Bestand:GalacticRotation2.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:GalacticRotation2.png> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Auteurs: Created by User:PhilHibbs in Inkscape 0.42

Bestand:Byblos syll signs.gif Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Byblos_syll_signs.gif Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: en:user:Hans van Deukeren

Afbeelding:Clay ball cypro-minoan Louvre AM2226.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Clay_ball_cypro-minoan_Louvre_AM2226.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: User:Jastrow

Afbeelding:Tablet cypro-minoan 2 Louvre AM2336.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Tablet_cypro-minoan_2_Louvre_AM2336.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: User:Jastrow

Bestand:Arecibo message.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Arecibo_message.svg Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: Arne Nordmann (norro)

Bestand:Linear A tablets filt.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Linear_A_tablets_filt.jpg Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: User:Hexagon1

Bestand:Linear A vase filt.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Linear_A_vase_filt.jpg Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: User:Hexagon1, User:Portum

Bestand:PhaistosDisk1.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:PhaistosDisk1.jpg> Licentie: onbekend Auteurs: Original uploader was Ellywa at nl.wikipedia

Bestand:Diskos.von.Phaistos.Seite.A.11-Aug-2004.asb.PICT3371.JPG Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Diskos.von.Phaistos.Seite.A.11-Aug-2004.asb.PICT3371.JPG> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Apalsola, BBlueFiSH.as, Bgag, Helix84, Mdd, Roomba, Wst, 1 anonieme bewerkingen

Bestand:Diskos.von.Phaistos.Seite.B.11-Aug-2004.asb.PICT3370.JPG Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Diskos.von.Phaistos.Seite.B.11-Aug-2004.asb.PICT3370.JPG> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Apalsola, BBlueFiSH.as, Helix84

Bestand:PhaistosDisk2.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:PhaistosDisk2.jpg> Licentie: onbekend Auteurs: Original uploader was Ellywa at nl.wikipedia

Bestand:Phaistos glyph 01.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_01.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn, Stepsheb

Bestand:Phaistos glyph 02.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_02.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 03.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_03.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 04.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_04.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 05.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_05.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 06.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_06.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 07.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_07.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 08.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_08.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 09.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_09.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 10.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_10.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 11.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_11.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 12.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_12.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 13.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_13.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 14.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_14.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 15.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_15.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 16.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_16.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 17.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_17.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 18.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_18.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 19.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_19.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 20.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_20.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 21.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_21.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Everttype, Glenn, Ilmari Karonen, Ukko.de

Bestand:Phaistos glyph 22.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_22.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn, Ilmari Karonen, Ukko.de

Bestand:Phaistos glyph 23.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_23.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 24.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_24.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn, Ilmari Karonen, Ukko.de

Bestand:Phaistos glyph 25.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_25.png Licentie: Public Domain Auteurs: Butko, Dbachmann, Glenn, Ilmari Karonen

Bestand:Phaistos glyph 26.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_26.png Licentie: Public Domain Auteurs: Butko, Dbachmann, Glenn, Ilmari Karonen

Bestand:Phaistos glyph 27.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_27.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 28.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_28.png Licentie: Public Domain Auteurs: Butko, Dbachmann, Glenn, Ilmari Karonen

Bestand:Phaistos glyph 29.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_29.png Licentie: Public Domain Auteurs: Butko, Dbachmann, Glenn, Ilmari Karonen

Bestand:Phaistos glyph 30.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_30.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 31.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_31.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 32.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_32.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 33.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_33.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 34.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_34.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 35.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_35.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 36.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_36.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 37.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_37.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 38.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_38.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 39.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_39.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 40.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_40.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 41.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_41.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 42.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_42.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 43.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_43.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 44.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_44.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 45.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_45.png Licentie: Public Domain Auteurs: Dbachmann, Glenn

Bestand:Phaistos glyph 46.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Phaistos_glyph_46.png Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: Evertpe

Bestand:Ulam 1.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Ulam_1.png Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Original uploader was Grontesca at en.wikipedia

Bestand:Ulam-Spirale1.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Ulam-Spirale1.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: User:Rdb

Bestand:Ulam-Spirale2.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Ulam-Spirale2.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: User:Rdb

Bestand:Sacks spiral.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Sacks_spiral.svg Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: Claudio Rocchini

Bestand:Collatz5.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Collatz5.svg> Licentie: Public Domain Auteurs: Pokipsy76

Bestand:Ricci flow.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Ricci_flow.png Licentie: Public Domain Auteurs: CBM

Bestand:Criticalline.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Criticalline.png> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharelike 2.5 Auteurs: Anarkman, Darapti, Kilom691, Maksim, Slonzor

Bestand:Zeta polar.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Zeta_polar.svg Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Original artwork created by Linas Vepstas <linas@linas.org> User:Linus New smooth and precise plotcurve version by User:Geek3

Bestand:Diophantus-II-8.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Diophantus-II-8.jpg> Licentie: Public Domain Auteurs: Guérin Nicolas, Mdd, Mu, Proteins, Schutz

Bestand:Pierre de Fermat.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Pierre_de_Fermat.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: -

Bestand:Standard Model of Elementary Particles.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg Licentie: Creative Commons Attribution 3.0 Auteurs: MissMJ

Bestand:Elementary particle interactions.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Elementary_particle_interactions.svg Licentie: Public domain Auteurs: en:User:TriTertButoxy, User:Stannered

Bestand:spacetime curvature.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Spacetime_curvature.png Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: User:Johnstone

Afbeelding:1rightarrow.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:1rightarrow.png> Licentie: GNU Lesser General Public License Auteurs: David Vignoni

Afbeelding:Wikisource-logo.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Wikisource-logo.svg> Licentie: logo Auteurs: Nicholas Moreau

Afbeelding:Wikibooks-logo.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Wikibooks-logo.svg> Licentie: logo Auteurs: User:Bastique, User:Ramac et al.

Bestand:HyperboloidOfOneSheet.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:HyperboloidOfOneSheet.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Arssenev, Darapti, Krishnavedala, MathKnight, Perhelion, Svdmolen, 1 anonieme bewerkingen

Bestand:AdS A.PNG Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:AdS_A.PNG Licentie: Public Domain Auteurs: Bulwersator, Ies, Maksim, Van der Hoorn

Bestand:Ergosphere.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Ergosphere.svg> Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: MesserWoland

Bestand:Penrose.PNG Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Penrose.PNG> Licentie: Public Domain Auteurs: en:User:Eric B

Bestand:StressEnergyTensor.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:StressEnergyTensor.svg> Licentie: Creative Commons Attribution-Share Alike Auteurs: Bamse

Afbeelding:Twespletenexperiment.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Twespletenexperiment.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Original uploader was Koen Van den Eeckhout at nl.wikipedia

Bestand:Annihilation.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Annihilation.png> Licentie: Public Domain Auteurs: Jens Langner (<http://www.jens-langner.de/>)

Bestand:Electron-positron-annihilation.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Electron-positron-annihilation.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Belfer00, Dirk Hünninger, Newone, PhoenixV, Pieter Kuiper

Bestand:PositronDiscovery.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:PositronDiscovery.jpg> Licentie: onbekend Auteurs: Carl D. Anderson (1905-1991)

Bestand:Wiktfavicon en.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Wiktfavicon_en.svg Licentie: logo Auteurs: FSII, Mxn, Smurrayinchester, Urhixidur

Bestand:Bouw materie.PNG Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Bouw_materie.PNG Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Original uploader was Joël at nl.wikipedia Later versions were uploaded by Tuganax at nl.wikipedia.

Afbeelding:Blochsphere.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Blochsphere.svg> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Original uploader was MuncherOISpleens at en.wikipedia

Bestand:Bose Einstein condensate.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Bose_Einstein_condensate.png Licentie: Public Domain Auteurs: NIST/JILA/CU-Boulder

Bestand:Brane and dark matter.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Brane_and_dark_matter.svg Licentie: Public Domain Auteurs: Agony-fi

Bestand:CPdiagram.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:CPdiagram.png> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharelike 3.0 Auteurs: Xerxes314

Bestand:Doubleslitexperiment.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Doubleslitexperiment.svg> Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: Koantum, svg version by Trutz Behn

Bestand:RomanW-01.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:RomanW-01.png> Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 1.0 Generic Auteurs: Denniss, Javierme, Jerem43, KES47, Nd, Pseudomoi

Image:Electron orbitals.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Electron_orbitals.svg Licentie: Public Domain Auteurs: Patricia.fidi

Bestand:Elektroniskil 011 Natrium.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Elektroniskil_011_Natrium.svg Licentie: Creative Commons Attribution-Sharelike 2.0 Auteurs: user:GregRobson

Bestand:Eccitazione atomica per assorbimento di un fotone.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Eccitazione_atomica_per_assorbimento_di_un_fotone.svg Licentie: Public Domain Auteurs: User:ARTE

Bestand:Fermi-Verteilung (Temperatur).svg Bron: [http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Fermi-Verteilung_\(Temperatur\).svg](http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Fermi-Verteilung_(Temperatur).svg) Licentie: Public Domain Auteurs: Cepheiden. Original uploader was Cepheiden at de.wikipedia

Bestand:Fotoelektrischeffekt.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Fotoelektrischeffekt.png> Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: EN

Bestand:Fotoelektrisch-effect.gif Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Fotoelektrisch-effect.gif> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Original uploader was DieterM at nl.wikipedia

Bestand:Feynmann Diagram Coulomb.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Feynmann_Diagram_Coulomb.svg Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: User:OliverOberlach, User:joelholdsworth

Bestand:Bohr-atom-PAR.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Bohr-atom-PAR.svg> Licentie: onbekend Auteurs: Original uploader was JabberWok at en.wikipedia

Bestand:Franck-Condon-diagram.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Franck-Condon-diagram.png> Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: Mark M. Somoza

Afbeelding:Benz4.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Benz4.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Selfmade by cacycle, Leyo

Afbeelding:Benz3.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Benz3.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: User:cacycle

Afbeelding:GMR.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:GMR.svg> Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: Guillom, Igge, Nojhan, Pieter Kuiper, 2 anonieme bewerkingen

Afbeelding:Spin-valve GMR.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Spin-valve_GMR.svg Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: Alex-engraver, Biezl, Guillom, Mdd, Pieter Kuiper, 1 anonieme bewerkingen

Bestand:DiffractieElectronesMET.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:DiffractieElectronesMET.jpg> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Original uploader was Oysteinp at en.wikipedia

Bestand:Wavepanel.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Wavepanel.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Bgks, Solon, Teebeutel

Bestand:FRET-Jablonski-diagram.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:FRET-Jablonski-diagram.jpg> Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: Guillom, J3D3, Phi-Gastrein, Pieter Kuiper, 1 anonieme bewerkingen

Afbeelding:AOS-1s-2pz.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:AOS-1s-2pz.png> Licentie: Public Domain Auteurs: Benjah-bmm27, Rmhermen, Sven

Afbeelding:Ch4 hybridization.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Ch4_hybridization.svg Licentie: Public Domain Auteurs: Original uploader was K. Aainsqatsi at en.wikipedia (Original text : K. Aainsqatsi)

Bestand:Multiverse.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Multiverse.png> Licentie: Creative Commons Zero Auteurs: User:Silver Spoon

Bestand:Muon Decay.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Muon_Decay.png Licentie: Public Domain Auteurs: Thymo

Bestand:FirstNeutrinoEventAnnotated.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:FirstNeutrinoEventAnnotated.jpg> Licentie: Public Domain Auteurs: Argonne National Laboratory

Bestand:Quark structure neutron.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Quark_structure_neutron.svg Licentie: Creative Commons Attribution-Sharelike 2.5 Auteurs: User:Harp

Image:HAtomOrbitals.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:HAtomOrbitals.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Admrboltz, Benjah-bmm27, Dbc334, Dbenbenn, Ejdzaj, Falcorian, Hongsy, Kborland, MichaelDiederich, Mion, Saperaud, 6 anonieme bewerkingen

Bestand:Extended Air Shower.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Extended_Air_Shower.jpg Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Original uploader was Beetjedwars at nl.wikipedia

Bestand:Quark structure proton.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Quark_structure_proton.svg Licentie: Creative Commons Attribution-Sharelike 2.5 Auteurs: Made by Arpad Horvath

Bestand:Hydrogen atom.gif Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Hydrogen_atom.gif Licentie: Creative Commons Zero Auteurs: Silver Spoon

Bestand:Blochsphere.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Blochsphere.svg> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Original uploader was MuncherOfSpleens at en.wikipedia

Bestand:Renormalized-vertex.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Renormalized-vertex.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Matt McIrvn

Bestand:Feynman second order.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Feynman_second_order.svg Licentie: Public Domain Auteurs: Nick84

Bestand:selfE.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:SelfE.svg> Licentie: Public Domain Auteurs: Jari Laamanen

Bestand:Schrödinger cat.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Schrödinger_cat.png Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: File:Kamee01.jpg: Martin Bahmann File:Geiger counter.jpg: Boffy b derivative work: Anarkman

Bestand:Point&string.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Point&string.png> Licentie: Public domain Auteurs: Actam, Kilom691, Kurochka, 2 anonieme bewerkingen

Bestand:Crystal wp.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Crystal_wp.png Licentie: GNU Lesser General Public License Auteurs: Dake, Rilegator, Rocket000

Image:RWP-comparison.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:RWP-comparison.svg> Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: sfu

Bestand:Kamiokande89.JPG Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Kamiokande89.JPG> Licentie: onbekend Auteurs: Jnn, LERK, Ronaldino

Bestand:Meissner effect p1390048.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Meissner_effect_p1390048.jpg Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: Mai-Linh Doan

Bestand:Feynman diagram of decay of tau lepton.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Feynman_diagram_of_decay_of_tau_lepton.svg Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: en:User:JabberWok and Time3000

Bestand:Single slit and double slit2.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Single_slit_and_double_slit2.jpg Licentie: Creative Commons Attribution-Sharelike 3.0 Auteurs: Jordgette

Bestand:Double-slit wall sm.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Double-slit_wall_sm.jpg Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Patrick Edwin Moran

Bestand:Wave Diffraction 4Lambda Slit.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Wave_Diffraction_4Lambda_Slit.png Licentie: Public Domain Auteurs: Original uploader was Dicklyon at en.wikipedia

Bestand:Double slit diffraction.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Double_slit_diffraction.svg Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Doubleslitdiffraction.png: Berowell derivative work: Quibik (talk)

Bestand:blackbody-1g.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Blackbody-1g.png> Licentie: Public Domain Auteurs: Darth Kule, Drphysics, Joelholdsworth, Pieter Kuiper

Image:MWI Schrodingers cat.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:MWI_Schrodingers_cat.png Licentie: Creative Commons Attribution-Sharelike 3.0 Auteurs: . Original uploader was Dc987 at en.wikipedia

Bestand:Feynmandiagramm.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Feynmandiagramm.png> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharelike 2.0 Auteurs: user:RolandHagemann

Bestand:Wien Displacement.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Wien_Displacement.png Licentie: Creative Commons Attribution-Sharelike 3.0 Auteurs: User:Linivus

Bestand:Hydrogen-1.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Hydrogen-1.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: user:Bryan_Derksen, user:oo64eva

Bestand:Visible spectrum of hydrogen.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Visible_spectrum_of_hydrogen.jpg Licentie: Creative Commons Attribution-Sharelike 3.0,2.5,2.0,1.0 Auteurs: Jan Homann

Bestand:Max planck.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Max_planck.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: Beao, Divna Jaksic, Factumquintus, Limojoe, Lobo, Lzur, Mstislavl, NicolasDelerue, Nyttend, Pieter Kuiper, Yelm, 1 anonieme bewerkingen

Bestand:Practicalplancker.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Practicalplancker.jpg> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharelike 2.5 Auteurs: Anton

Bestand:RWP-comparison.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:RWP-comparison.svg> Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: sfu

Bestand:BlackbodySpectrum lin 150dpi en.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:BlackbodySpectrum_lin_150dpi_en.png Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: user:Sch

Bestand:BlackbodySpectrum loglog 150dpi en.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:BlackbodySpectrum_loglog_150dpi_en.png Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: user:Sch

Bestand:Inside the CERN LHC tunnel.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Inside_the_CERN_LHC_tunnel.jpg Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Juhanson

Bestand:Hadron-Elektron-Ring-Anlage, Ringbeschleuniger, DESY.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Hadron-Elektron-Ring-Anlage, Ringbeschleuniger, DESY.jpg> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharelike 3.0 Auteurs: Bundesstefan

Bestand:Higgs, Peter (1929)3.jpg Bron: [http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Higgs,_Peter_\(1929\)3.jpg](http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Higgs,_Peter_(1929)3.jpg) Licentie: Creative Commons Attribution-Sharelike 2.0 Auteurs: Gert-Martin Greuel

afbeelding:Quark structure antineutron.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Quark_structure_antineutron.png Licentie: Creative Commons Attribution-Sharelike 3.0 Auteurs: SpinningSpark real life identity: SHA-1 commitment ba62ca25da3fee2f8f36c101994f571c151abee7. Original uploader was Spinningspark at en.wikipedia

File:Antiproton.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Antiproton.svg> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Auteurs: Kulmalukko

Bestand:Atom.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Atom.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: HereToHelp, King of Hearts, Mxn, Saperaud, Svdmolten, 2 anonieme bewerkingen

Bestand:HAtomOrbitals.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:HAtomOrbitals.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Admrboltz, Benjah-bmm27, Dbc334, Dbenbenn, Ejdzzej, Falcorian, Hongsy, Kborland, MichaelDiederich, Mion, Saperaud, 6 anonieme bewerkingen

Bestand:Sciences exactes.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Sciences_exactes.svg Licentie: GNU Lesser General Public License Auteurs: Bayo, Editor at Large, Gmaxwell, Ixfd64, Kanonkas, Kaveh, Victormoz, 6 anonieme bewerkingen

Bestand:A New System of Chemical Philosophy fp.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:A_New_System_of_Chemical_Philosophy_fp.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: haade

File:Baryon-octet-small.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Baryon-octet-small.svg> Licentie: Public Domain Auteurs: Trassiorf

Bestand:Feynman Diagram Y-3g.PNG Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Feynman_Diagram_Y-3g.PNG Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Auteurs: User:DrHjmHam

Bestand:Nitrate-ion-elpot.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Nitrate-ion-elpot.png> Licentie: Public Domain Auteurs: Benjah-bmm27, Cwbn (commons), Logan

Bestand:Meson nonet - spin 0.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Meson_nonet_-_spin_0.svg Licentie: Public Domain Auteurs: User:E2m, User:Stannered

Bestand:Alpha-D-Glucose.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Alpha-D-Glucose.png> Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: Silvercat

Bestand:Water-2D-flat.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Water-2D-flat.png> Licentie: Public Domain Auteurs: Benjah-bmm27, Ricordisamoa

Bestand:Butansaeure.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Butansaeure.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Edgar181, Leyo, Matt314, Oxam Hartog, Rasbak, 1 anonieme bewerkingen

Bestand:Fructose.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Fructose.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: DMacks, Edgar181, Maksim

Bestand:Dichlooretheen.gif Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Dichlooretheen.gif> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Original uploader was Klaas1978 at nl.wikipedia

Bestand:Amedeo Avogadro2.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Amedeo_Avogadro2.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: Juiced lemon, PFHLai

Bestand:Nucleus drawing.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Nucleus_drawing.png Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Auteurs: Cam-Ann

Bestand:Quark structure pion.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Quark_structure_pion.svg Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 Auteurs: User:Harp

Image:Robert-millikan2.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Robert-millikan2.jpg> Licentie: Public Domain Auteurs: photograph by Clark Millikan

Image:Simplified scheme of Millikan's oil-drop experiment.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Simplified_scheme_of_Millikan's_oil-drop_experiment.png Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Abanima, Divide, Electron, Gregors, Pieter Kuiper

Bestand:Top antitop quark event.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Top_antitop_quark_event.svg Licentie: Public Domain Auteurs: Raeky

Bestand:Beta Negative Decay.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Beta_Negative_Decay.svg Licentie: Public Domain Auteurs: Joel Holdsworth (Joelholdsworth)

Image:Lightning strike jan 2007.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Lightning_strike_jan_2007.jpg Licentie: onbekend Auteurs: ComputerHotline, Fir0002, Fsochenm, Julia W, Mhby87, Rocket000, Taxiarchos228, Xavigivax

Bestand:Electromagnetism.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Electromagnetism.svg> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: User:Stannered

Bestand:EM Spectrum3-new.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:EM_Spectrum3-new.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: NASA

Bestand:Universal gravitation.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Universal_gravitation.svg Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Of this SVG, Roland Geider (Ogre); of the original, Vincent Guyot vison

Bestand:Southern ocean gravity hg.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Southern_ocean_gravity_hg.png Licentie: Public Domain Auteurs: Hannes Grobe, AWI

Bestand:Valversnelling in Nederland.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Valversnelling_in_Nederland.svg Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Auteurs: Cavit

Bestand:Casimir plates.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Casimir_plates.svg Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Auteurs: Emok

Bestand:Mexican hat potential polar.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Mexican_hat_potential_polar.svg Licentie: Public Domain Auteurs: RupertMillard

Afbeelding:Yukawa_potentiaal.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Yukawa_potentiaal.jpg Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: Original uploader was Wiemster at nl.wikipedia

Afbeelding:bolgolf.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Bolgolf.jpg> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Original uploader was Wiemster at nl.wikipedia

Bestand:Calabi_yau.gif Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Calabi_yau.gif Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 Auteurs: Nina Hernitschek

Bestand:H W Wallace force field figure 4.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:H_W_Wallace_force_field_figure_4.png Licentie: Public Domain Auteurs: Abdullah Köroğlu, Omegatron, TommyBee, WikipediaMaster

Bestand:Arthur Stanley Eddington.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Arthur_Stanley_Eddington.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: George Grantham Bain Collection (Library of Congress)

Bestand:ECB.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:ECB.png> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0,2.5,2.0,1.0 Auteurs: Quatrostein

Bestand:ECB acceleration.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:ECB_acceleration.png Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Auteurs: Dr.T

Bestand:ECB force.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:ECB_force.png Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Auteurs: Dr.T

Bestand:ERB grafiek.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:ERB_grafiek.png Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0,2.5,2.0,1.0 Auteurs: Quatrostein

Bestand:GraphesMRUA.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:GraphesMRUA.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: No-w-ay

Bestand:Nobel prize medal.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Nobel_prize_medal.svg Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: User:Gusme (it:Utente:Gusme)

Bestand:Einstein1921 by F Schmutzer 2.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Einstein1921_by_F_Schmutzer_2.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: Diego pmc, Emijrp, Frank C. Müller, Hemulen, Lobo, Quibik, Vonvon, Андрей Романенко, 6 anonieme bewerkingen

Bestand:Flag of Germany.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Flag_of_Germany.svg Licentie: Public Domain Auteurs: User:Madden, User:SKopp

Bestand:Albert Einstein signature.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Albert_Einstein_signature.png Licentie: Public Domain Auteurs: Albert Einstein (uploaded to the Commons by Epsom291)

Bestand:Albert Einstein at the age of three (1882).jpg Bron: [http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Albert_Einstein_at_the_age_of_three_\(1882\).jpg](http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Albert_Einstein_at_the_age_of_three_(1882).jpg) Licentie: onbekend Auteurs: .

Bestand:Einstein-matura.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Einstein-matura.jpg> Licentie: Public Domain Auteurs: The authorities of the Canton of Aargau, Switzerland

Bestand:Einstein-with-habicht-and-solovine.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Einstein-with-habicht-and-solovine.jpg> Licentie: Public Domain Auteurs: Adngheim501, Albertomos, Berowell, Fadookie, Fsochenm, Infrogmation, Quibik, Rimshot, 4 anonieme bewerkingen

Bestand:Albert Einstein ETH-Bib Portr 05937.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Albert_Einstein_ETH-Bib_Portr_05937.jpg Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Auteurs: Lucien Chavan / ETH Zürich

Bestand:1911 Solvay conference.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:1911_Solvay_conference.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: Photograph was taken by Benjamin Couprie, 1911, published not long afterwards.

Bestand:Albert Einstein photo 1920.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Albert_Einstein_photo_1920.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: unknown photographer. Scientific Monthly doesn't give photographer credit; the caption reads just "Professor Albert Einstein, University of Berlin"

Bestand:Einstein2.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Einstein2.jpg> Licentie: Copyrighted free use Auteurs: Bestiasonica, Cyn, Deadstar, Enboifre, JdH

Bestand:EinsteinZeemanEhrenfest.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:EinsteinZeemanEhrenfest.jpg> Licentie: Copyrighted free use Auteurs: Bestiasonica, Common Good, Deadstar, JdH, Túrelio

Bestand:Bundesarchiv Bild 102-10804, Berlin, Abreise Einsteins nach Amerika.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Bundesarchiv_Bild_102-10804_Berlin_Abreise_Einsteins_nach_Amerika.jpg Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Germany Auteurs: Lucarelli

Bestand:112mercerc.JPG Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:112mercerc.JPG> Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: Ekem

Bestand:Albert Einstein 1947.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Albert_Einstein_1947.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: Photograph by Oren Jack Turner, Princeton, N.J.

Bestand:1919 eclipse positive.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:1919_eclipse_positive.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: F. W. Dyson, A. S. Eddington, and C. Davidson

Bestand:Albert Einstein (Nobel).png Bron: [http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Albert_Einstein_\(Nobel\).png](http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Albert_Einstein_(Nobel).png) Licentie: Public Domain Auteurs: DIREKTOR, Dirk Hünninger, Divna Jaksic, Eusebius, FSII, Fadookie, Fastfission, Infrogmaton, Juiced lemon, Lobo, Louperivois, Romary, Tholme

Bestand:Niels Bohr Albert Einstein2 by Ehrenfest.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Niels_Bohr_Albert_Einstein2_by_Ehrenfest.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: Common Good, Dark Attisios, EugeneZelenko, Fastfission, Frank C. Müller, JdH, Pieter Kuiper, Stahlkocher, Thuresson, 1 anonieme bewerkingen

Bestand:Einstein Refrigerator.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Einstein_Refrigerator.png Licentie: Public Domain Auteurs: Divna Jaksic, Fastfission, Maksim, WikipediaMaster, 1 anonieme bewerkingen

Bestand:Albert Einstein violin.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Albert_Einstein_violin.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: E. O. Hoppe (1878-1972). Published on LIFE

Bestand:Albert Einstein citizenship NYWTS.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Albert_Einstein_citizenship_NYWTS.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: New York World-Telegram and the Sun staff photographer: Al Aumuller

Bestand:Einstein oppenheimer.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Einstein_oppenheimer.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: BenTels, Eusebius, Fadookie, Fastfission, G.dallorto, JdH, LX, 2 anonieme bewerkingen

Bestand:Albert Einstein WZO photo 1921.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Albert_Einstein_WZO_photo_1921.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: Adnghiem501, Aviados, Fadookie, Fastfission, Hailey C. Shannon, Talmoryair, 1 anonieme bewerkingen

Bestand:Einstein Rings.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Einstein_Rings.jpg Licentie: Public domain Auteurs: ECeDee, Inductiveload, KGyST, Lars Lindberg Christensen, RedAndr, Tubas, 2 anonieme bewerkingen

Afbeelding:Collision Huygens.gif Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Collision_huygens.gif Licentie: Public Domain Auteurs: Deadstar, Mdd, Pieter Kuiper, Sjoerd22

Afbeelding:vomitcomet.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Vomitcomet.jpg> Licentie: Public Domain Auteurs: Responsible?, TheDJ, Wessmann.clp

Afbeelding:Elevator gravity.png Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Elevator_gravity.png Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: Mapos

Bestand:Gravity Probe B Confirms the Existence of Gravitomagnetism.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Gravity_Probe_B_Confirms_the_Existence_of_Gravitomagnetism.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: Gravity Probe B Team, Stanford, NASA

Bestand:SmKIF 5234.JPG Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:SmKIF_5234.JPG Licentie: onbekend Auteurs: Original uploader was Martincz at cs.wikipedia

Bestand:Truck with motion blur.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Truck_with_motion_blur.jpg Licentie: onbekend Auteurs: Cirt, Fir0002, Kadellar, MB-one, Mattes, Specious, Xnatedawgx, YolanC

Bestand:DoubleCone.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:DoubleCone.png> Licentie: Public Domain Auteurs: Lars H. Rohwedder (User:RokerHRO)

Bestand:Einsteinformule.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Einsteinformule.png> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0,2.5,2.0,1.0 Auteurs: Quatrostein

Bestand:E equals m plus c square at Taipei101.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:E_equals_m_plus_c_square_at_Taipei101.jpg Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Crazy Ivan, Harp, Rocket000, Shizhao, SI, 2 anonieme bewerkingen

Bestand:Relativity3 Walk of Ideas Berlin.JPG Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Relativity3_Walk_of_Ideas_Berlin.JPG Licentie: Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported Auteurs: Lienhard Schulz

Bestand:Exercise_Desert_Rock_I_(Buster-Jangle_Dog)_003.jpg Bron: [http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Exercise_Desert_Rock_I_\(Buster-Jangle_Dog\)_003.jpg](http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Exercise_Desert_Rock_I_(Buster-Jangle_Dog)_003.jpg) Licentie: Public Domain Auteurs: Cpl. McCauley

Bestand:Interferometer.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Interferometer.svg> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: User:Stannered

Bestand:Relativity02.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Relativity02.jpg> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Auteurs: Loran01e

Bestand:Relativistic electromagnetism fig1.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Relativistic_electromagnetism_fig1.svg Licentie: Public Domain Auteurs: Ilmari Karonen

Bestand:Relativistic electromagnetism fig5.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Relativistic_electromagnetism_fig5.svg Licentie: Public Domain Auteurs: Ilmari Karonen

Bestand:Relativistic electromagnetism fig6.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Relativistic_electromagnetism_fig6.svg Licentie: Public Domain Auteurs: Ilmari Karonen

Bestand:Albert Einstein 1979 USSR Stamp.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Albert_Einstein_1979_USSR_Stamp.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: П. Бендель

Bestand:TrigaReactorCore.jpeg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:TrigaReactorCore.jpeg> Licentie: Public Domain Auteurs: Bomazi, ChNPP, Pieter Kuiper, Tungsten, 1 anonieme bewerkingen

Bestand:Cherenkov.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Cherenkov.svg> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 Auteurs: User:Harp

Bestand:8-cell-simple.gif Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:8-cell-simple.gif> Licentie: Public Domain Auteurs: Original uploader was JasonHise at en.wikipedia

Bestand:Event-horizon-particle.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Event-horizon-particle.svg> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 1.0 Auteurs: Christopher Thomas, updated to SVG by tiZom

Image:Lignes d'univers.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Lignes_d'univers.svg Licentie: Public Domain Auteurs: Rogilbert

Image:Objets en déplacement.PNG Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Objets_en_déplacement.PNG Licentie: Public Domain Auteurs: Rogilbert

Bestand:Wormhole-demo.png Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Wormhole-demo.png> Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Panzi

Bestand:Accretion disk.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Accretion_disk.jpg Licentie: Public domain Auteurs: 84user, Bebenko, Deljr, Saperaud, 6 anonieme bewerkingen

Bestand:0204flare xray med.jpg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:0204flare_xray_med.jpg Licentie: Public Domain Auteurs: Original uploader was Jan Lapère at nl.wikipedia

Bestand:Ssc2004-10c.jpg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Ssc2004-10c.jpg> Licentie: Public Domain Auteurs: NASA/JPL-Caltech/Yale

Bestand:Black hole lensing web.gif Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Black_hole_lensing_web.gif Licentie: GNU Free Documentation License Auteurs: Urbane Legend (optimised for web use by Alain r)

Bestand:BH-no-escape-1.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:BH-no-escape-1.svg> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Auteurs: Avsa, TimothyRias, Vanessaezekowitz

Bestand:BH-no-escape-2.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:BH-no-escape-2.svg> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Auteurs: Avsa, TimothyRias, Vanessaezekowitz, 2 anonieme bewerkingen

Bestand:BH-no-escape-3.svg Bron: <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:BH-no-escape-3.svg> Licentie: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Auteurs: Avsa, TimothyRias, Vanessaezekowitz

File:Traincar Relativity1.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Traincar_Relativity1.svg Licentie: Creative Commons Attribution-Share Alike Auteurs: User:Acdx

File:Traincar Relativity2.svg Bron: http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Traincar_Relativity2.svg Licentie: Creative Commons Attribution-Share Alike Auteurs: User:Acdx

Bestand:Time-dilation-001.svg *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Time-dilation-001.svg> *Licentie:* Public Domain *Auteurs:* Original uploader was Mdd4696 at en.wikipedia. Later version(s) were uploaded by DVdm at en.wikipedia.

Bestand:Time-dilation-002.svg *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Time-dilation-002.svg> *Licentie:* Public Domain *Auteurs:* Original uploader was Mdd4696 at en.wikipedia. Later version(s) were uploaded by DVdm at en.wikipedia.

Afbeelding:Accretion disk.jpg *Bron:* http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Accretion_disk.jpg *Licentie:* Public domain *Auteurs:* 84user, Bebenko, Deljr, Saperaud, 6 anonieme bewerkingen

Afbeelding:Cygnus_x1_xray.jpg *Bron:* http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Cygnus_x1_xray.jpg *Licentie:* Public Domain *Auteurs:* NASA/Marshall Space Flight Center

Afbeelding:Cygnus_X-1.png *Bron:* http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Cygnus_X-1.png *Licentie:* Copyrighted free use *Auteurs:* ESA

Bestand:Sagittarius A.jpg *Bron:* http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Sagittarius_A.jpg *Licentie:* Public Domain *Auteurs:* Eryn Blaireová, Tevatron, 1 anonieme bewerkingen

Bestand:Portal icon.svg *Bron:* http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Portal_icon.svg *Licentie:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Auteurs:* damian en pascal

Bestand:Spaghettification.jpg *Bron:* <http://nl.wikipedia.org/w/index.php?title=Bestand:Spaghettification.jpg> *Licentie:* GNU Free Documentation License *Auteurs:* Anonymous Dissident, Cosmocurio, Deadstar, Pieter Kuiper

Licentie

Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported
[//creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)
