

Elektrina

Petr Heřman
Ústav biofyziky, UK 2.LF

Elektrostatika:

Souvislost a analogie s mechanikou.

Elektron (v antice) = ??

Elektrostatika:

Souvislost a analogie s mechanikou.

Elektron (v antice) = jantar

Jak souvisí jantar s elektřinou??

Elektrostatika:

Souvislost a analogie s mechanikou.

Jak souvisí jantar s elektrinou:

Mechanické působení (tření)

=> nový fenomén (elektrina)

=> nová fyzikální disciplína

Analogie elektřiny s mechanikou:

	Mechanika:	Elektřina:
částice:	hmotnost	??

Analogie elektřiny s mechanikou:

	Mechanika:	Elektřina:
částice:	hmotnost	náboj
zákon zachování:	hmoty	??

Analogie elektřiny s mechanikou:

	Mechanika:	Elektřina:
částice:	hmotnost	náboj
zákon zachování:	hmoty	náboje
silová interakce:	Newtonův gravitační	?? zákon

Analogie elektřiny s mechanikou:

	Mechanika:	Elektřina:
částice:	hmotnost	náboj
zákon zachování:	hmoty	náboje
silová interakce:	Newtonův gravitační	Coulombův zákon
silové pole:	gravitační	??

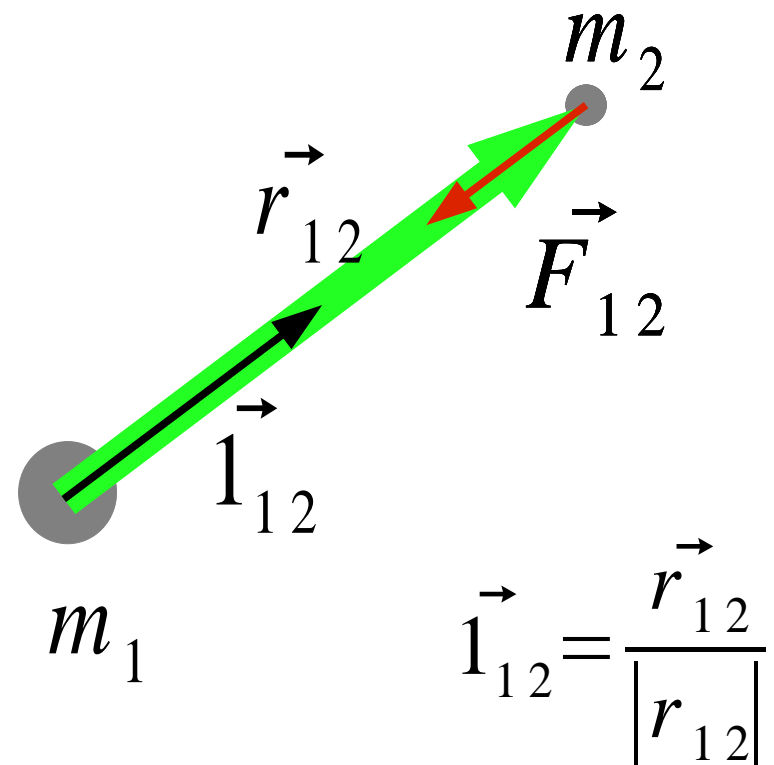
Analogie elektřiny s mechanikou:

	Mechanika:	Elektřina:
částice:	hmotnost	náboj
zákon zachování:	hmoty	náboje
silová interakce:	Newtonův gravitační	Coulombův zákon
silové pole:	gravitační	elektrostatické

Silové interakce mezi částicemi:

Připomeneme Newtonův gravitační zákon:

$$\vec{F}_{12} = -\kappa \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{l}_{12}$$



$$\kappa = ?? = 6,670 \cdot 10^{-11} [??]$$

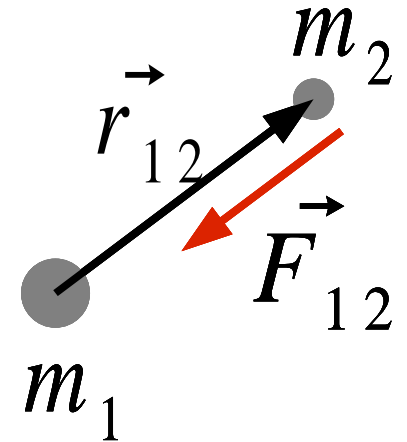
$$\vec{l}_{12} = \frac{\vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|}$$

Silové interakce mezi částicemi:

Newtonův
gravitační
zákon:

$$\vec{F}_{12} = -K \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

K = gravitační konstanta = $6,670 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

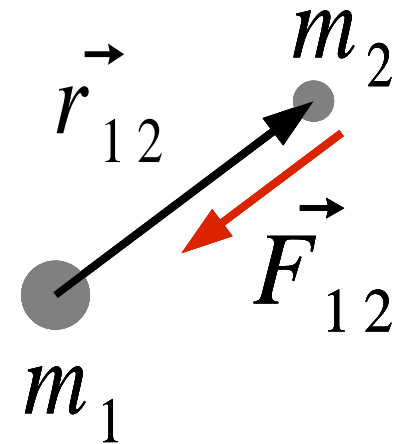


Silové interakce mezi částicemi:

Newtonův
gravitační
zákon:

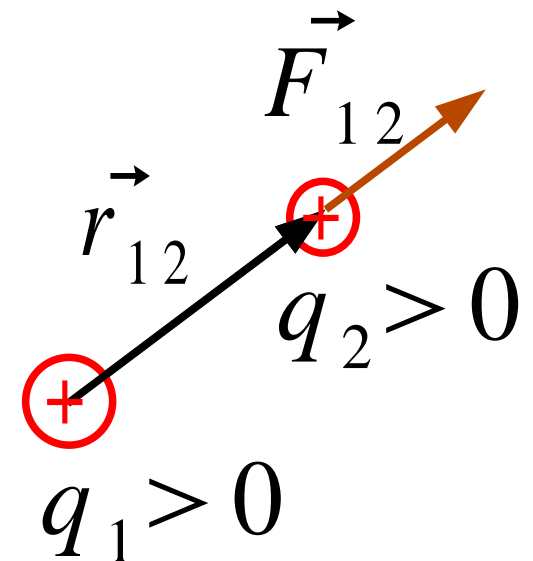
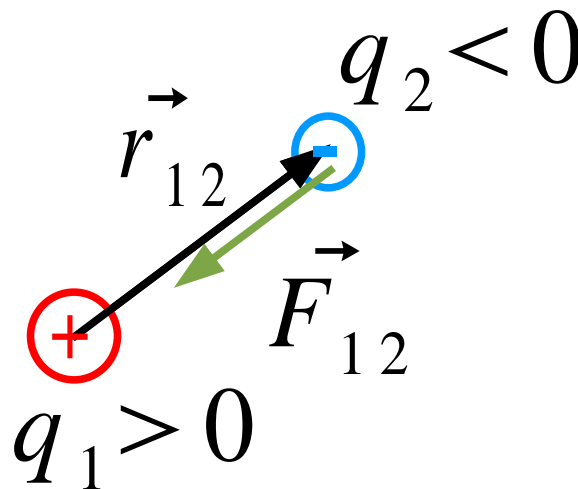
$$F_{12} = -K \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

K = gravitační konstanta = $6,670 \cdot 10^{-11} [N m^2 kg^{-2}]$



?? zákon:

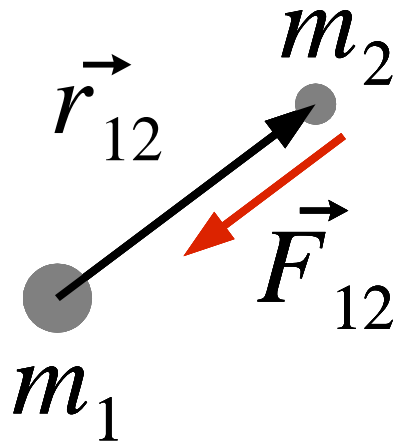
$$F_{12} = ? ?$$



Silové interakce mezi částicemi:

Newtonův
gravitační
zákon:

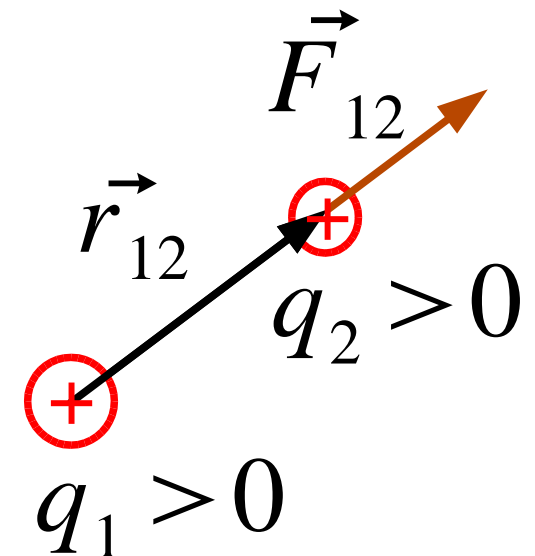
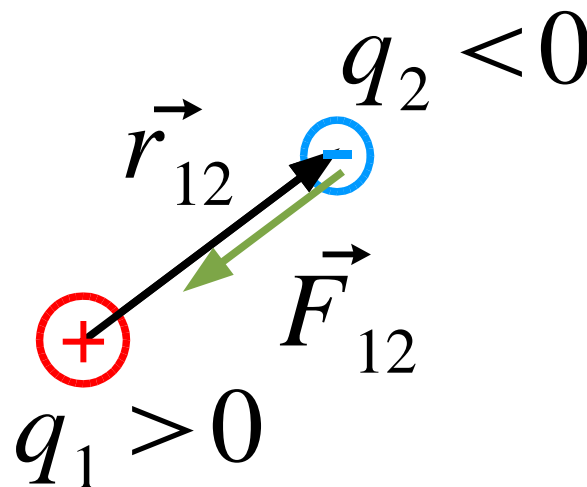
$$\vec{F}_{12} = -\kappa \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{1}_{12}$$



κ = gravitační konstanta = $6,670 \cdot 10^{-11} [N m^2 kg^{-2}]$??

Coulombův
zákon:

$$\vec{F}_{12} = ??$$

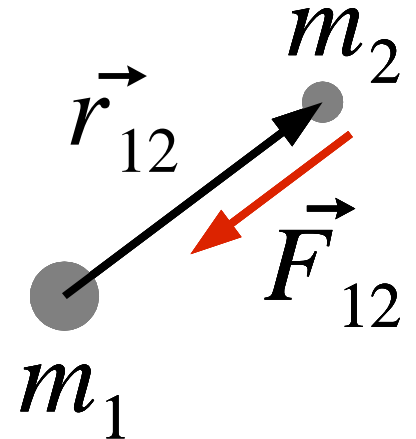


Silové interakce mezi částicemi:

Newtonův
gravitační
zákon:

$$\vec{F}_{12} = -\kappa \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{1}_{12}$$

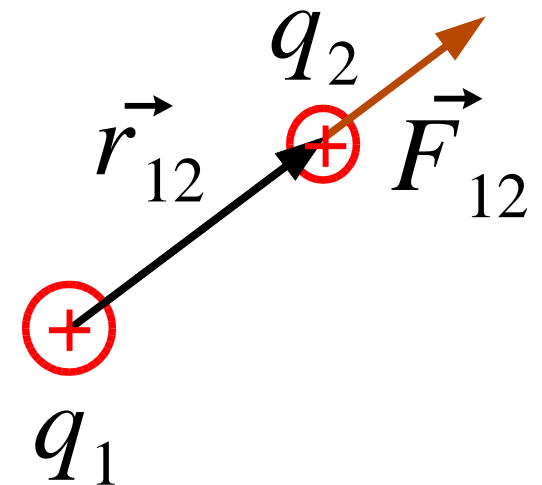
κ = gravitační konstanta = $6,670 \cdot 10^{-11} [N m^2 kg^{-2}]$



Coulombův
zákon:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{1}_{12}$$

$\epsilon_0 = ?? = 8,854 \cdot 10^{-12} [??]$

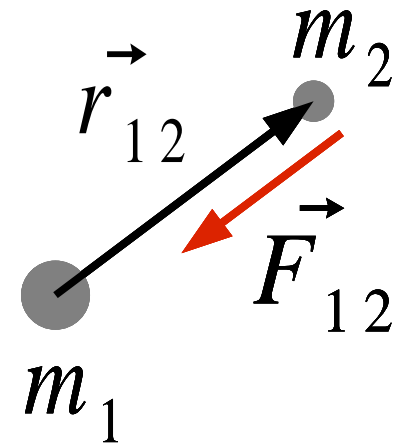


Silové interakce mezi částicemi:

Newtonův
gravitační
zákon:

$$\vec{F}_{12} = -K \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{1}_{12}$$

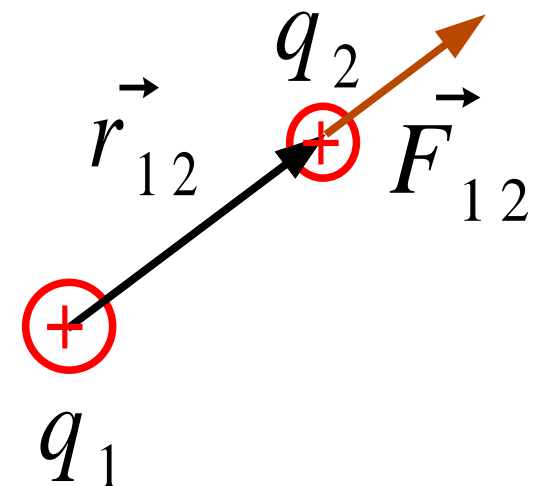
K = gravitační konstanta = $6,670 \cdot 10^{-11} [N m^2 kg^{-2}]$



Coulombův
zákon:

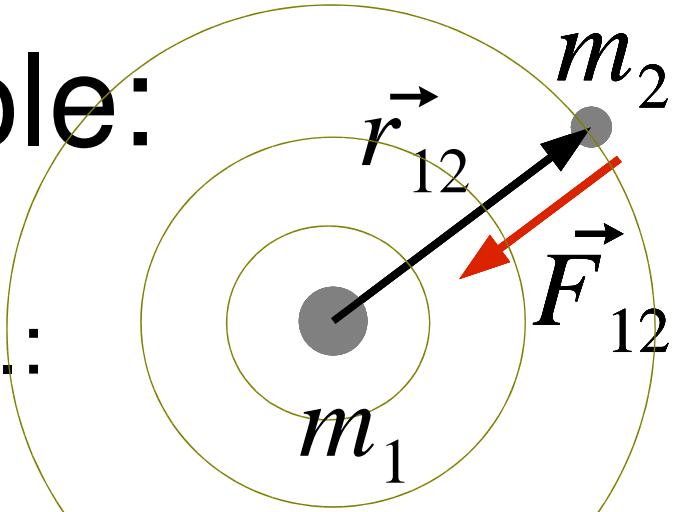
$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{1}_{12}$$

ϵ_0 = permitivita vakua = $8,854 \cdot 10^{-12} [F m^{-1}]$



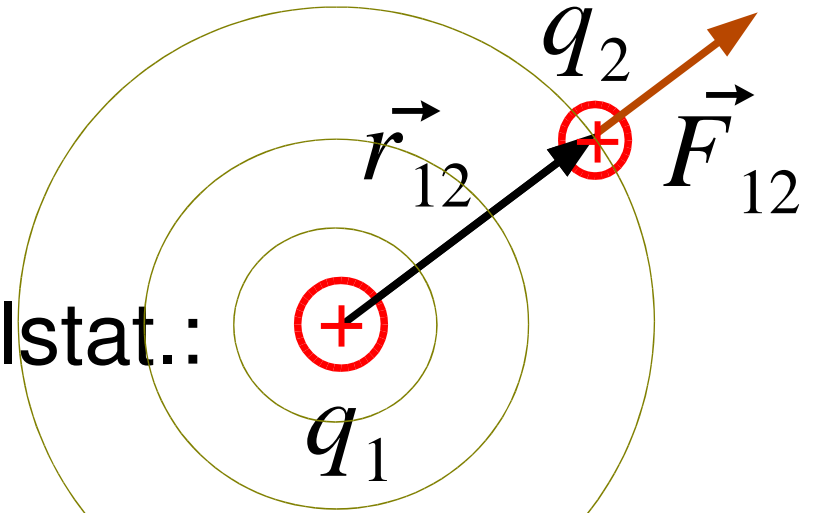
Pole:

Grav.:



$$\vec{F}_{12} = -\kappa \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{1}_{12}$$

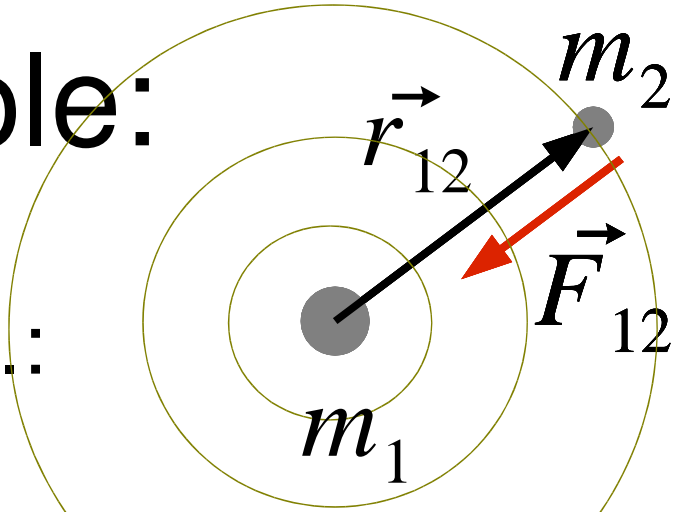
Elstat.:



$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{1}_{12}$$

Pole:

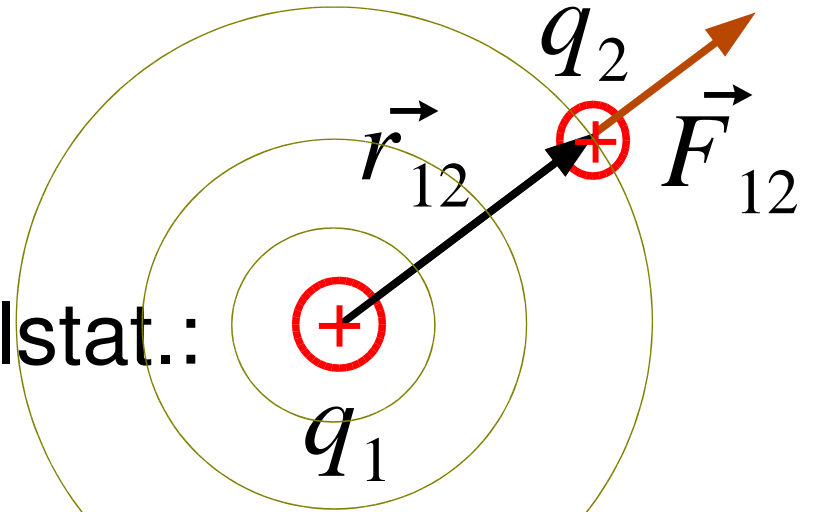
Grav.:



$$\vec{F}_{12} = -\kappa \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{1}_{12}$$

$$\vec{F}_{12} = -\kappa \frac{m_1}{r^2} \vec{1}_{12} \cdot m_2$$

Elstat.:



$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{1}_{12}$$

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \vec{1}_{12} \cdot q_2$$

Intenzita pole

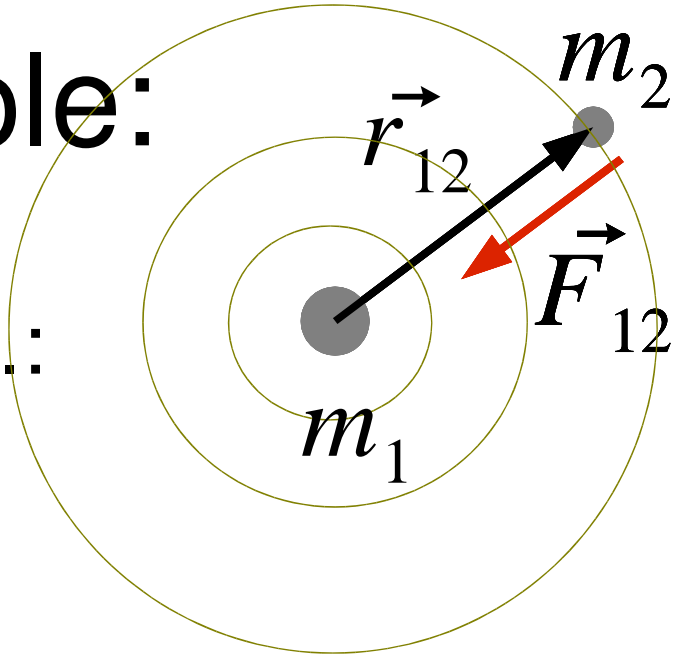
$$\vec{F}_{12} = \vec{E}_1(\vec{r}) \cdot m_2$$

Jak vypočtu $\vec{E}_1(\vec{r})$??

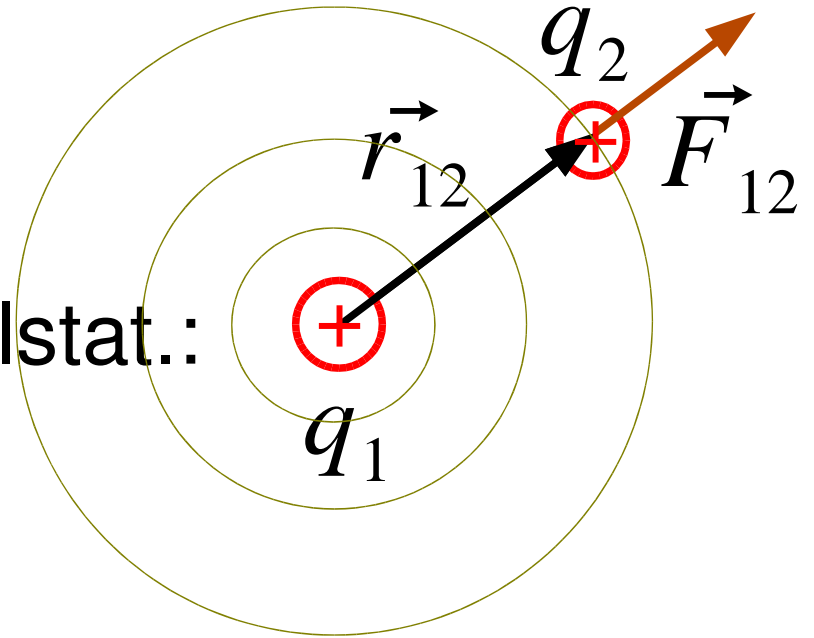
$$\vec{F}_{12} = \vec{E}_1(\vec{r}) \cdot q_2$$

Pole:

Grav.:



Elstat.:



$$\vec{F}_{12} = -\kappa \frac{m_1}{r^2} \vec{1}_{12} \cdot m_2$$

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \vec{1}_{12} \cdot q_2$$

Intenzita pole:

$$\frac{\vec{F}_{12}}{m_2} = -\kappa \frac{m_1}{r^2} \vec{1}_{12} = \vec{E}_1(\vec{r})$$

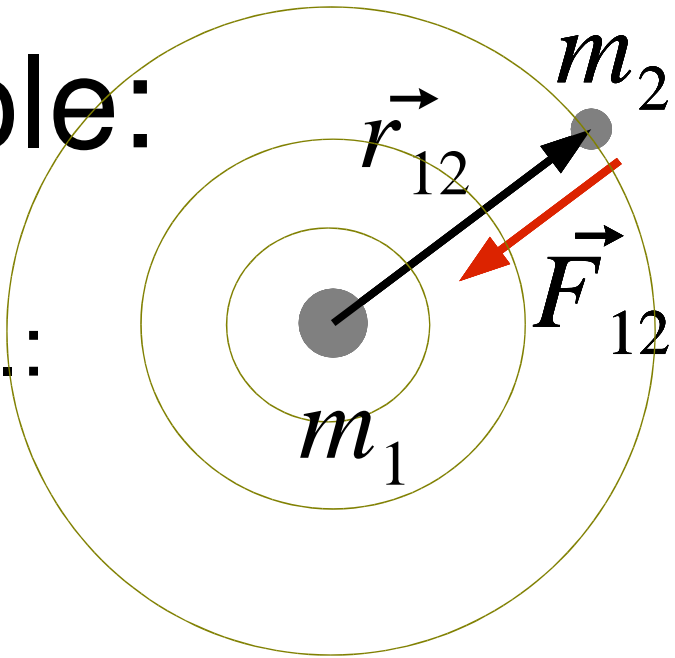
$$\frac{\vec{F}_{12}}{q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \vec{1}_{12} = \vec{E}_1(\vec{r})$$

[??]

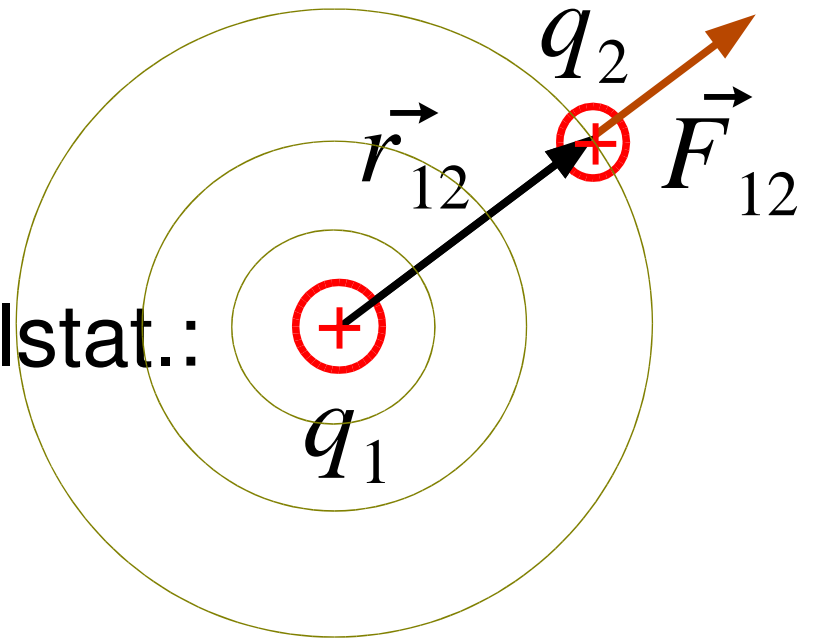
[??]

Pole:

Grav.:



Elstat.:



$$\vec{F}_{12} = -\kappa \frac{m_1}{r^2} \vec{1}_{12} \cdot m_2$$

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \vec{1}_{12} \cdot q_2$$

Intenzita pole:

$$\frac{\vec{F}_{12}}{m_2} = -\kappa \frac{m_1}{r^2} \vec{1}_{12} = \vec{E}_1(\vec{r})$$

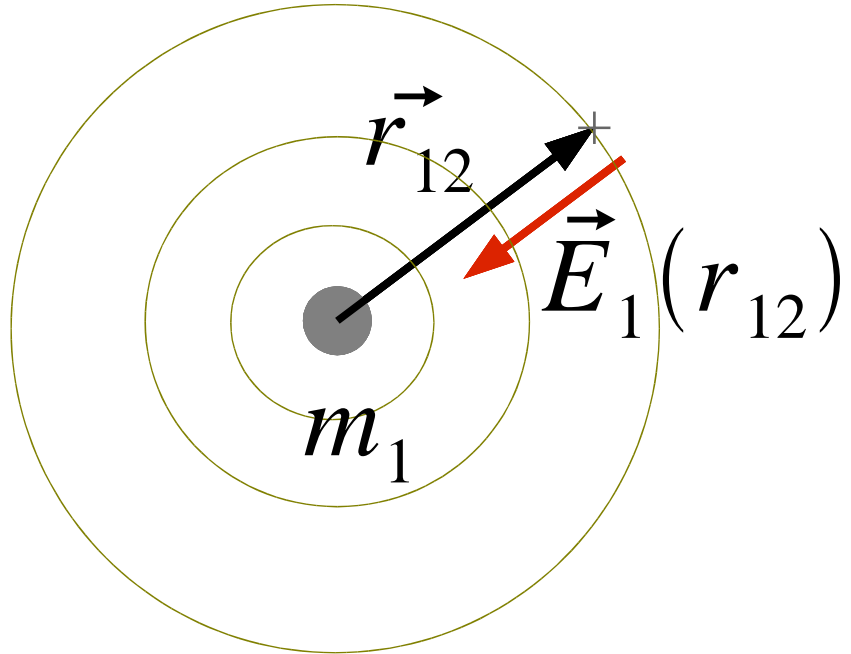
[N/kg]

$$\frac{\vec{F}_{12}}{q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \vec{1}_{12} = \vec{E}_1(\vec{r})$$

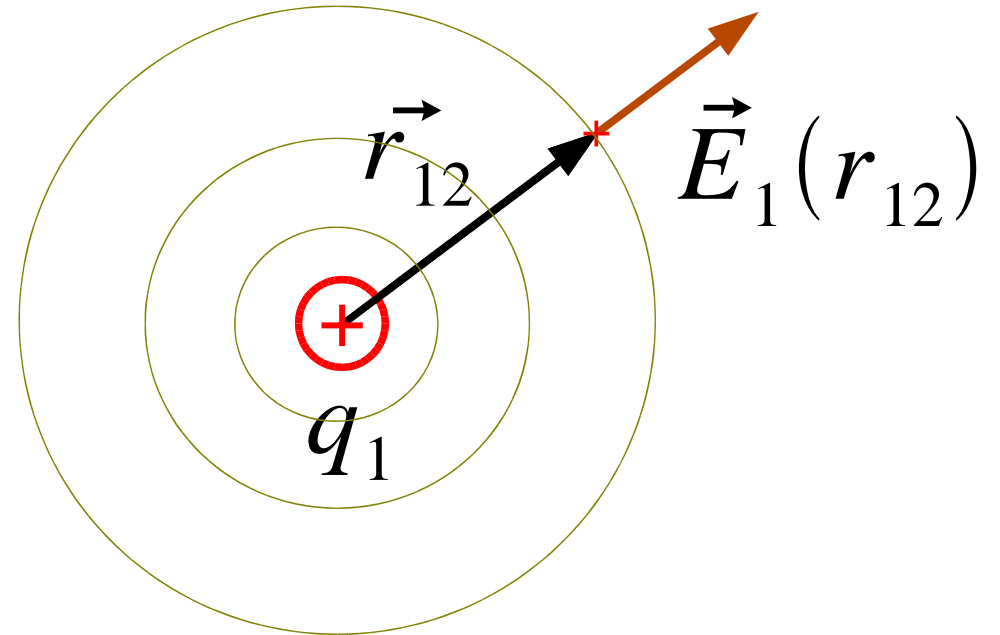
[N/??]

Intenzita pole:

Gravitační:



Elektrostatické:



Intenzita pole bodového zdroje:

$$\vec{E}_1(\vec{r}) = -\kappa \frac{m_1}{r^2} \vec{1}_{12} [N/kg]$$

$$\vec{E}_1(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \vec{1}_{12} [N/C]$$

Pole více bodových zdrojů:

Nehomogenní: $\vec{E}(\vec{r}) \neq konst(\vec{r})$

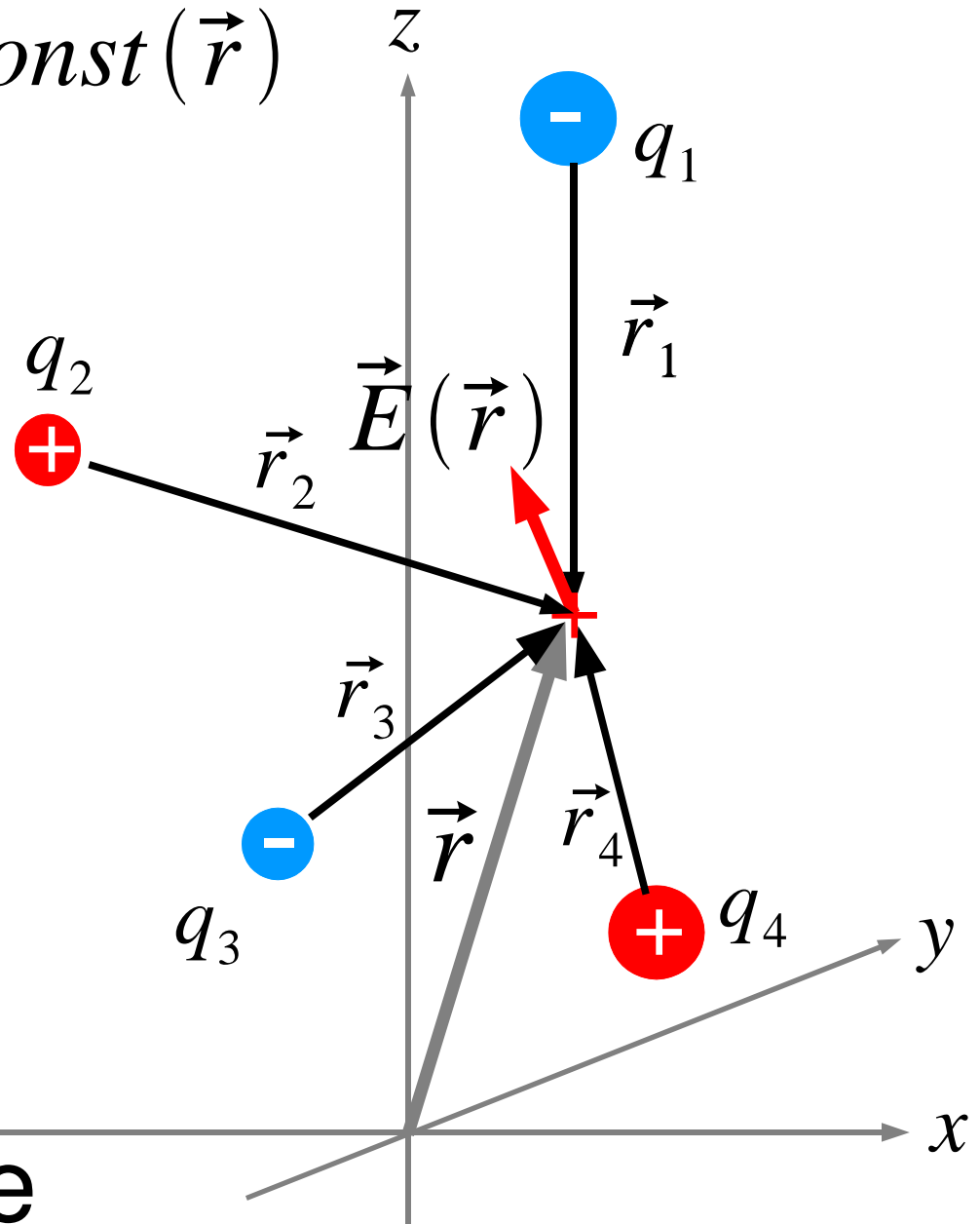
Gravitační:

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\kappa \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{r_i^2} \vec{1}_i$$

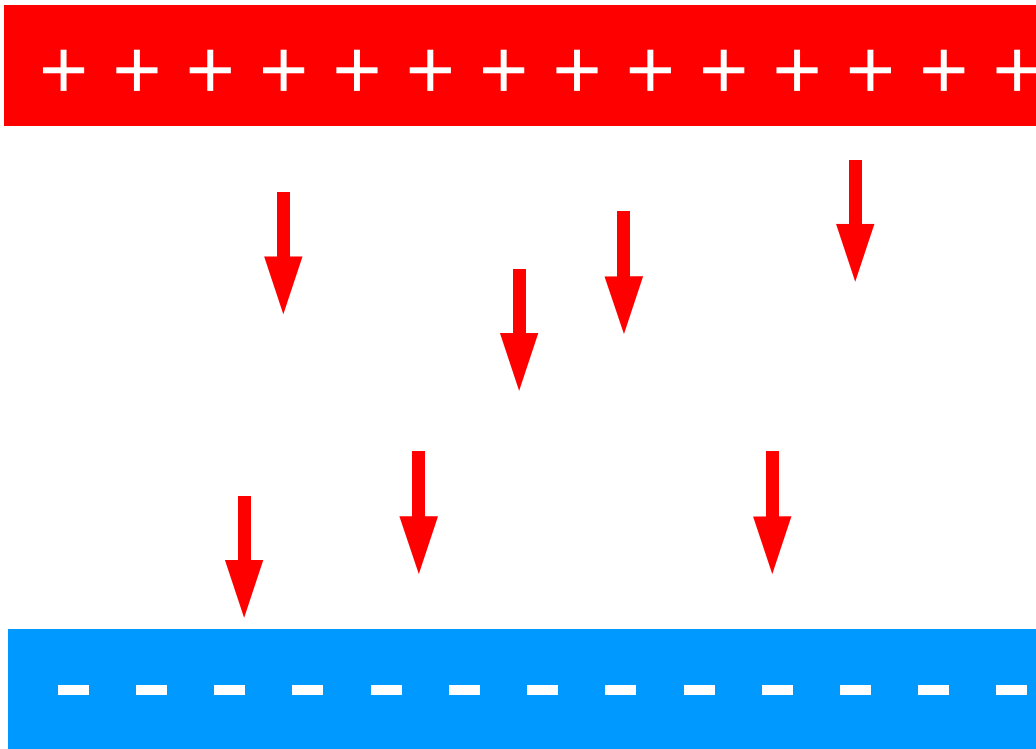
Elektrostatické:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \vec{1}_i$$

Princip superposice



Homogenní pole:



$$\vec{E}(\vec{r}) = \textit{konst}(\vec{r})$$

(pro libovolné \vec{r})

(zvláštní případ principu superposice)

Potenciál pole $V(\vec{r})$

Hledáme skalární funkci vektorové proměnné $V(\vec{r})$ takovou, aby platilo:

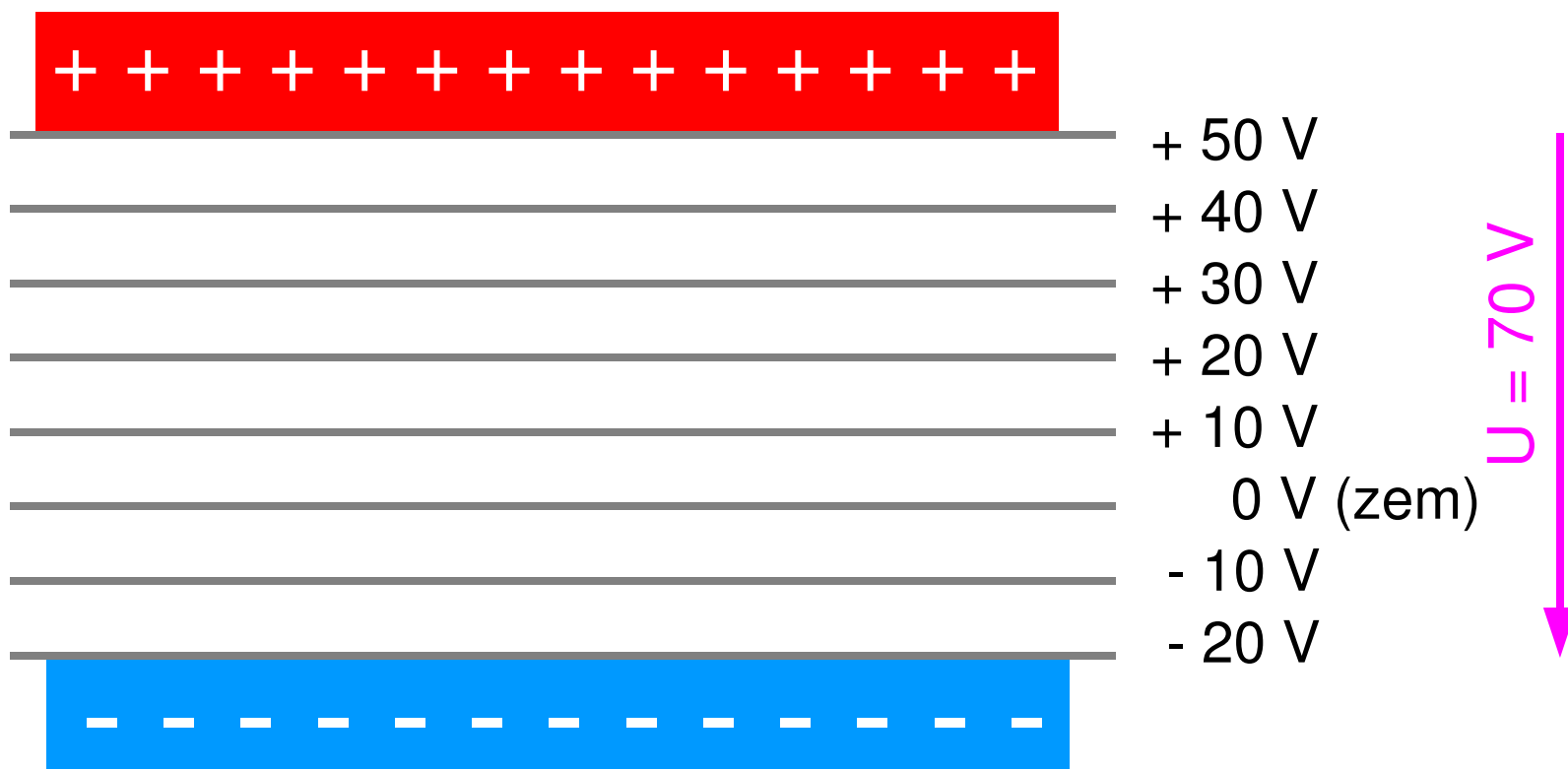
$$\vec{E}(\vec{r}) = -\mathit{grad} V(\vec{r})$$

Potenciál homogenního pole:

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\text{grad } V(\vec{r}) \quad (\text{platí vřdycky})$$

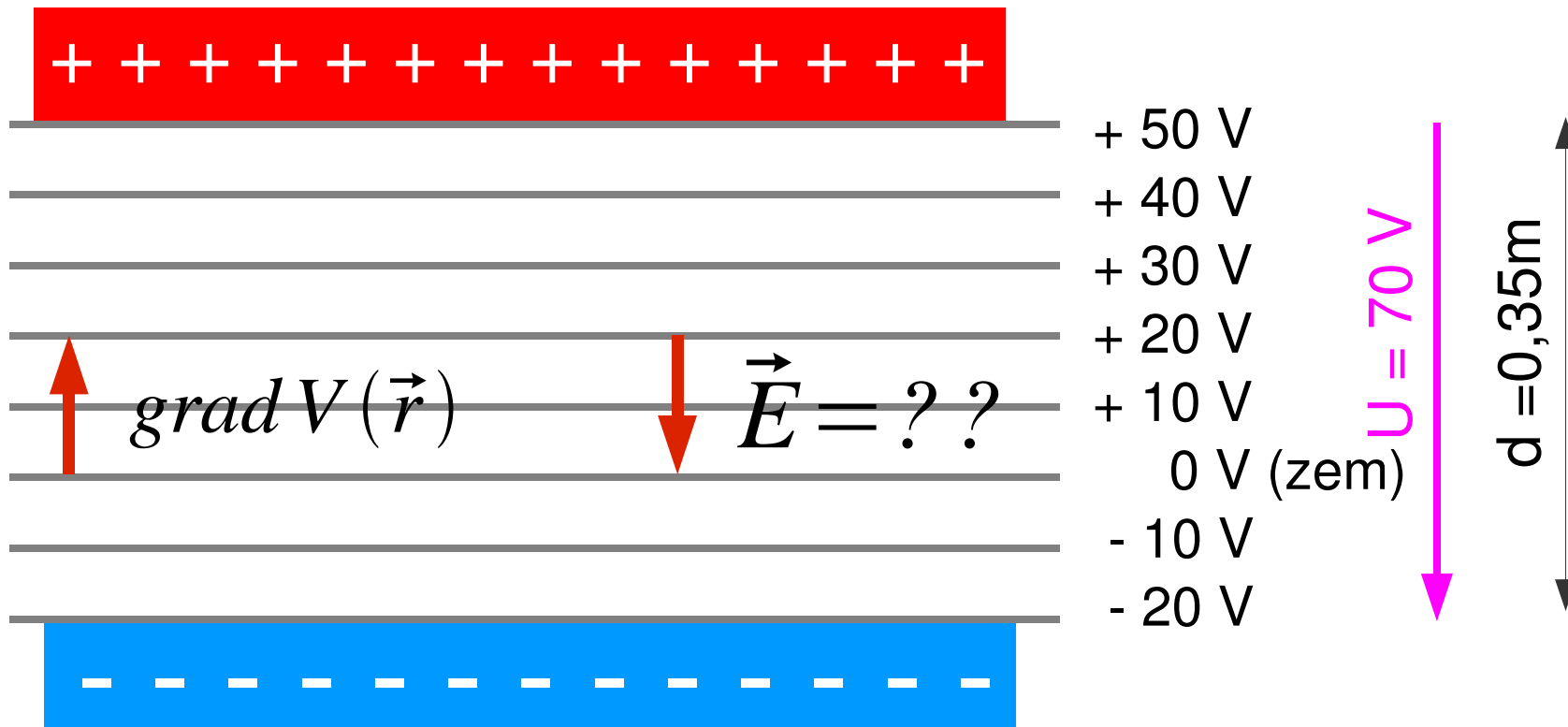
Pokud má být: $\vec{E}(\vec{r}) = \textit{konst}(\vec{r})$

pak musí být $V(\vec{r})$ lineární funkcí \vec{r}



Intenzita homogenního pole:

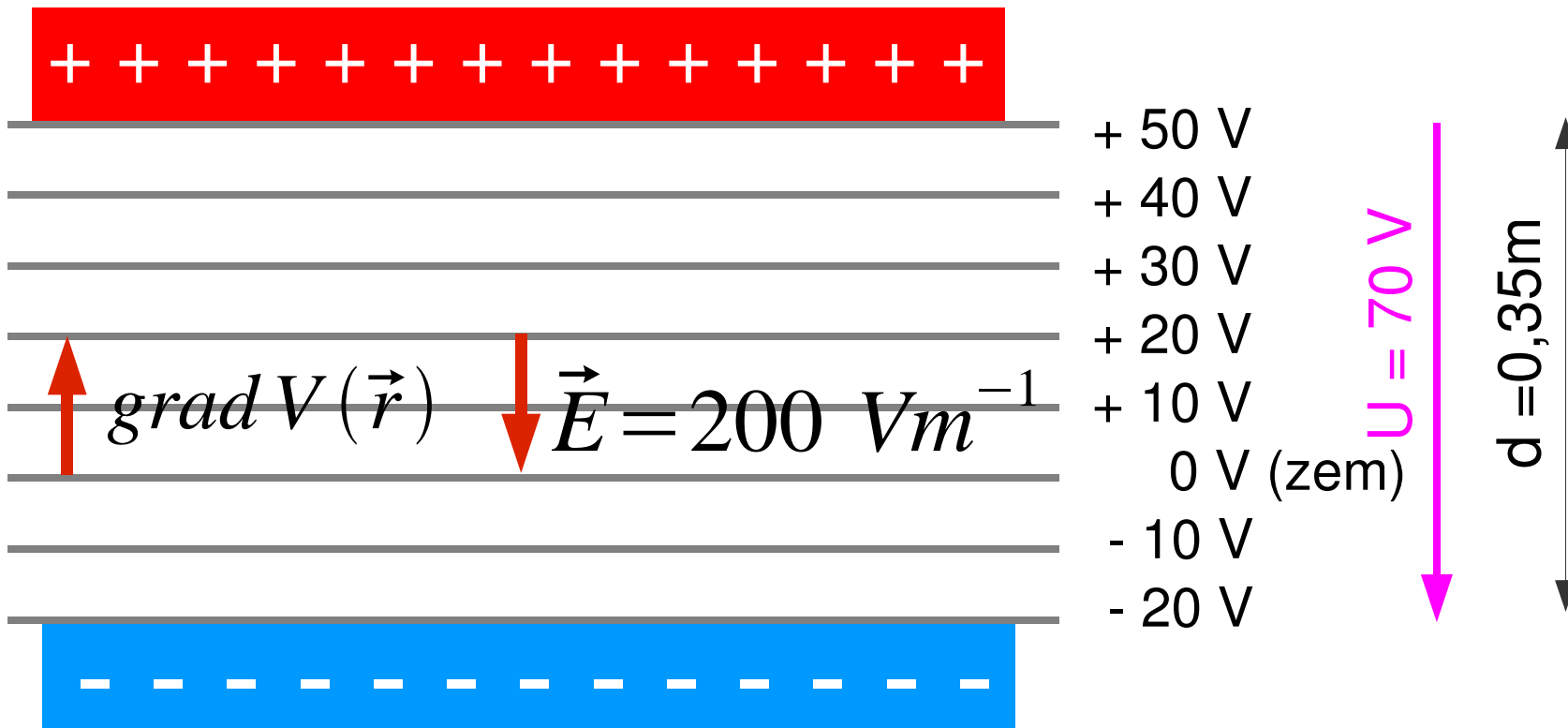
$$\vec{E}(\vec{r}) = -\text{grad } V(\vec{r}) \quad (\text{platí vždycky})$$



Intenzita homogenního pole:

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\text{grad } V(\vec{r}) \quad (\text{platí vždýcky})$$

$$E = \frac{70 \text{ V}}{0,35 \text{ m}} = 200 \text{ Vm}^{-1} = 200 \text{ NC}^{-1} \quad ??$$



Potenciální energie

gravitační pole: $U(\vec{r}) = m \cdot V(\vec{r}) [J; kg, J kg^{-1}]$

elektrostat. pole: $U(\vec{r}) = q \cdot V(\vec{r}) [J; C, J C^{-1}]$

Práce v potenciálním poli (jakémkoli)

potřebná k přemístění z bodu 1 do bodu 2:

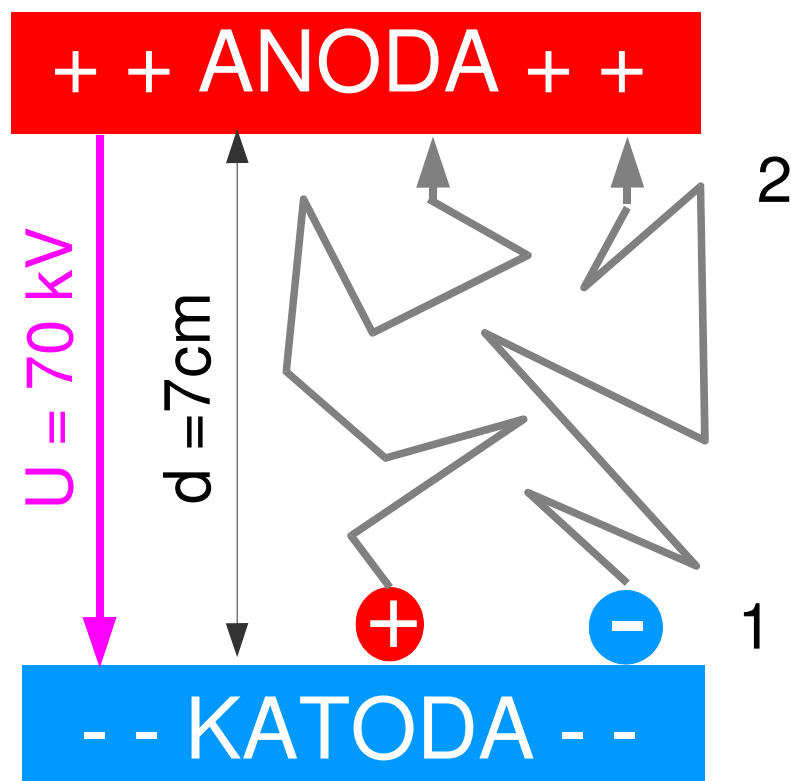
$$W_{12} = U(\vec{r}_2) - U(\vec{r}_1)$$

(To pro případ $U(\vec{r}_2) > U(\vec{r}_1)$. V opačném případě se energie uvolní a může být přeměněna např. v energii kinetickou).

Velikost spotřebované práce či uvolněná energie nezávisí na tvaru a délce dráhy, ale na rozdílu potenciálů. Platí i pro nehomogenní pole.

Částice v elektrostatickém poli:

(Vedení el. proudu v kovech, elektrolytech, v plynech, plazmě a ve vakuu. Princip RTG, CT, urychlovačů, elektroosmózy, galvanoterapie, pohybu iontů přes membránu etc.)



elementární

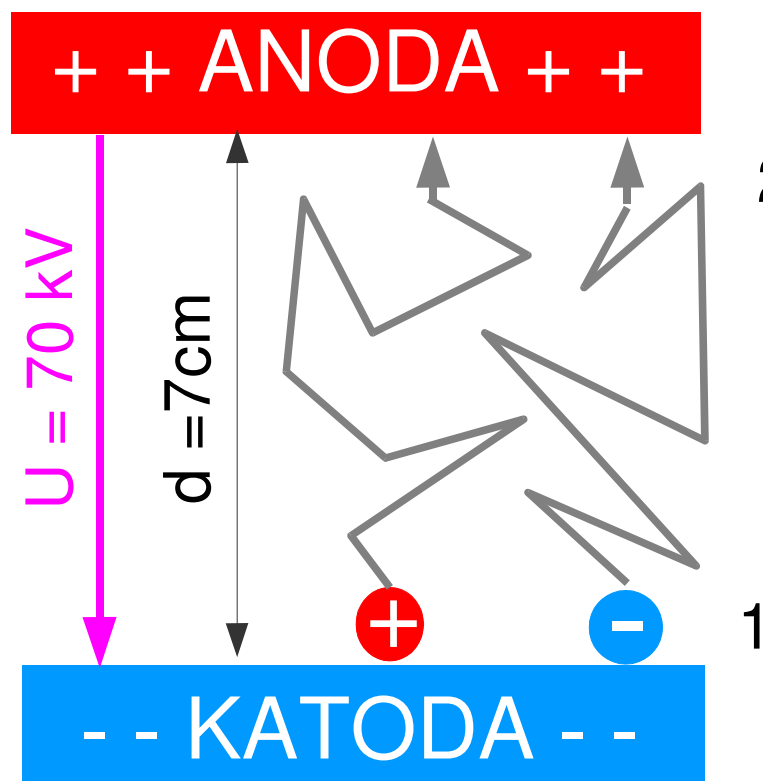
náboj: $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Jaká je práce W_{12} ,
potřebná k přemístění
jedné elementární částice
z místa 1 (z katody)
na místo 2 (na anodu) ??

Potřebná práce: $W_{12} = U(\vec{r}_2) - U(\vec{r}_1) = q \cdot (V(\vec{r}_2) - V(\vec{r}_1))$

proton: $W_{12} = 1,6 \cdot 10^{-19} [C] \cdot 7 \cdot 10^4 [V] = 11,2 \cdot 10^{-15} [J] > 0$

elektron: $W_{12} = -1,6 \cdot 10^{-19} [C] \cdot 7 \cdot 10^4 [V] = -11,2 \cdot 10^{-15} [J] < 0$



Závěr:

2 Protonu je třeba dodat práci.

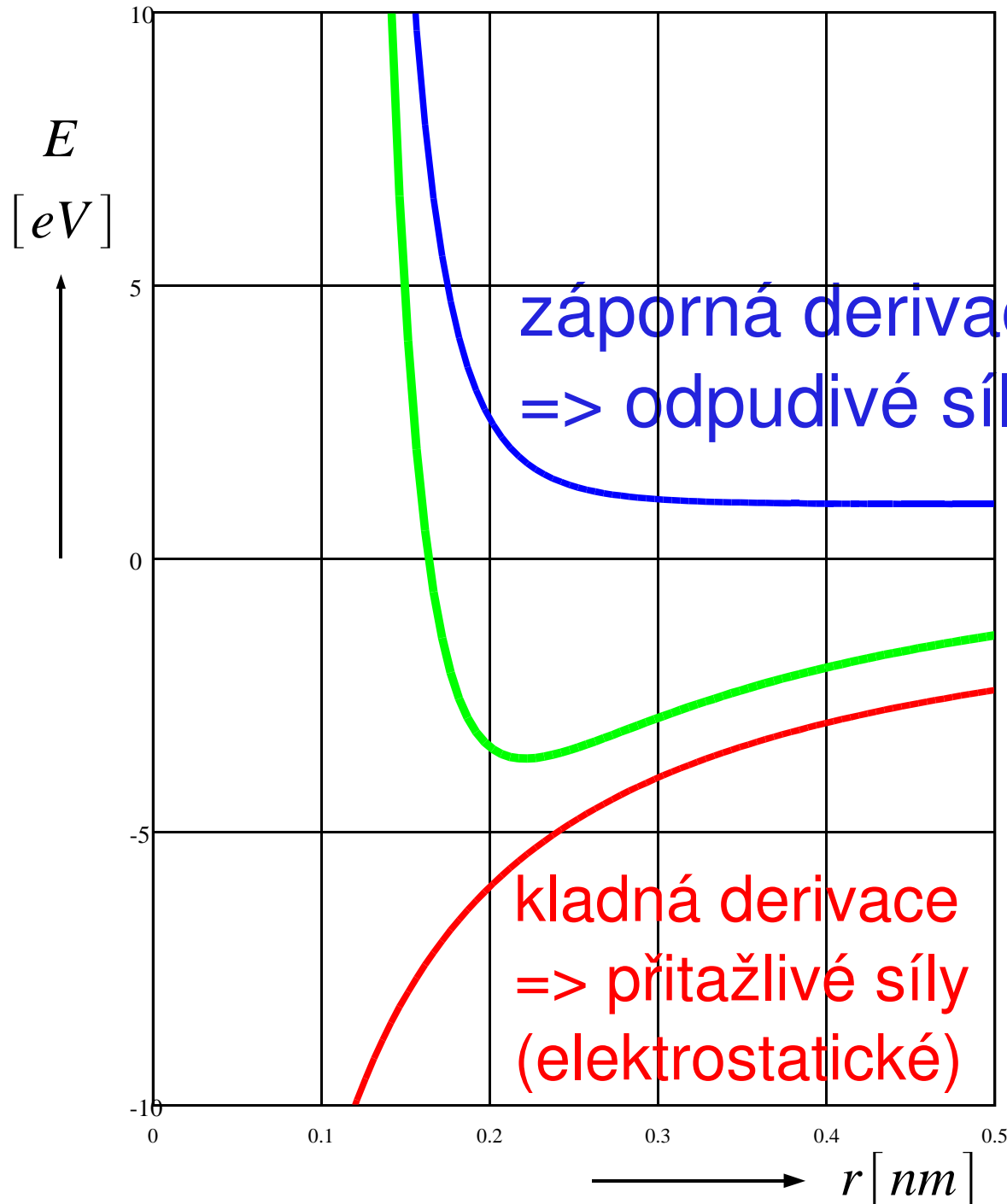
Elektron svým přemístěním může vykonat práci (v elektrolytu, v živém organismu apod.)

anebo (např. ve vakuu) se jeho potenciální energie změní na kinetickou.

D.C.:

1. Spočtete si kinetickou energii a rychlost elektronu z uvedeného příkladu těsně před dopadem na anodu. (Hodnoty přibližně odpovídají situaci v rentgenové lampě.)
2. V praxi používáme vedlejší jednotky 1 eV , případně energii vztahujeme na jednotku látkového množství a pak uvádíme kJ/mol .
Odvodte si vzájemné převodní vztahy.
Předch. výsledek uveďte v různých jednotkách.

Energie iontové vazby



výsledná síla = součet
odpudivých (kladných) a
přitažlivých (záporných)
síly

??

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\text{grad } V(\vec{r})$$

$$\vec{F}(\vec{r}) = -\text{grad } U(\vec{r})$$

Jednorozměrný (zjednodušený) případ:

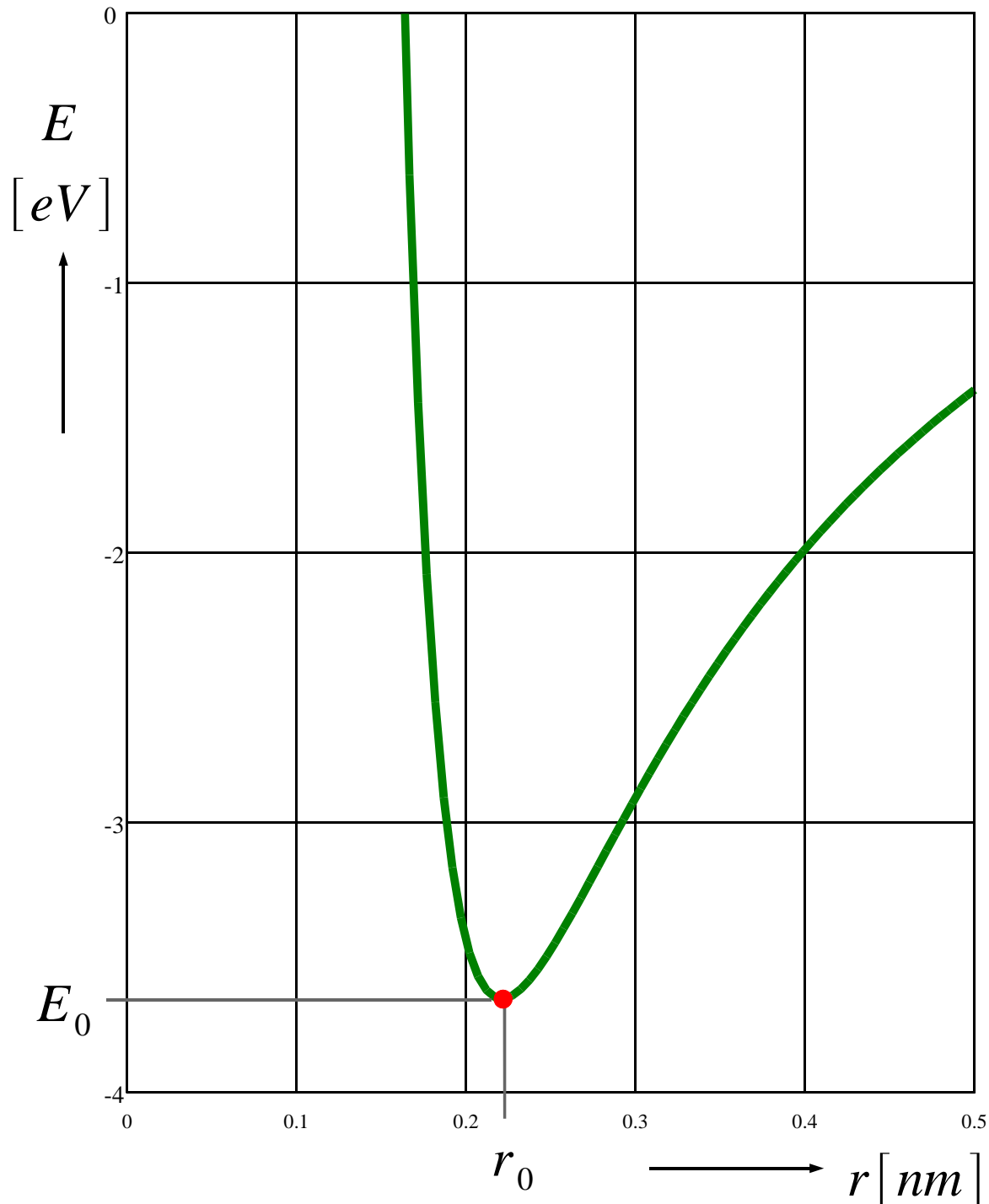
$$F(r) = \frac{-dU(r)}{dr} [N ; J, m]$$

klesající energie ... záporná derivace ...

=> kladná síla (odpudivá)

stoupající energie ... kladná derivace ...

=> záporná síla (přitažlivá)



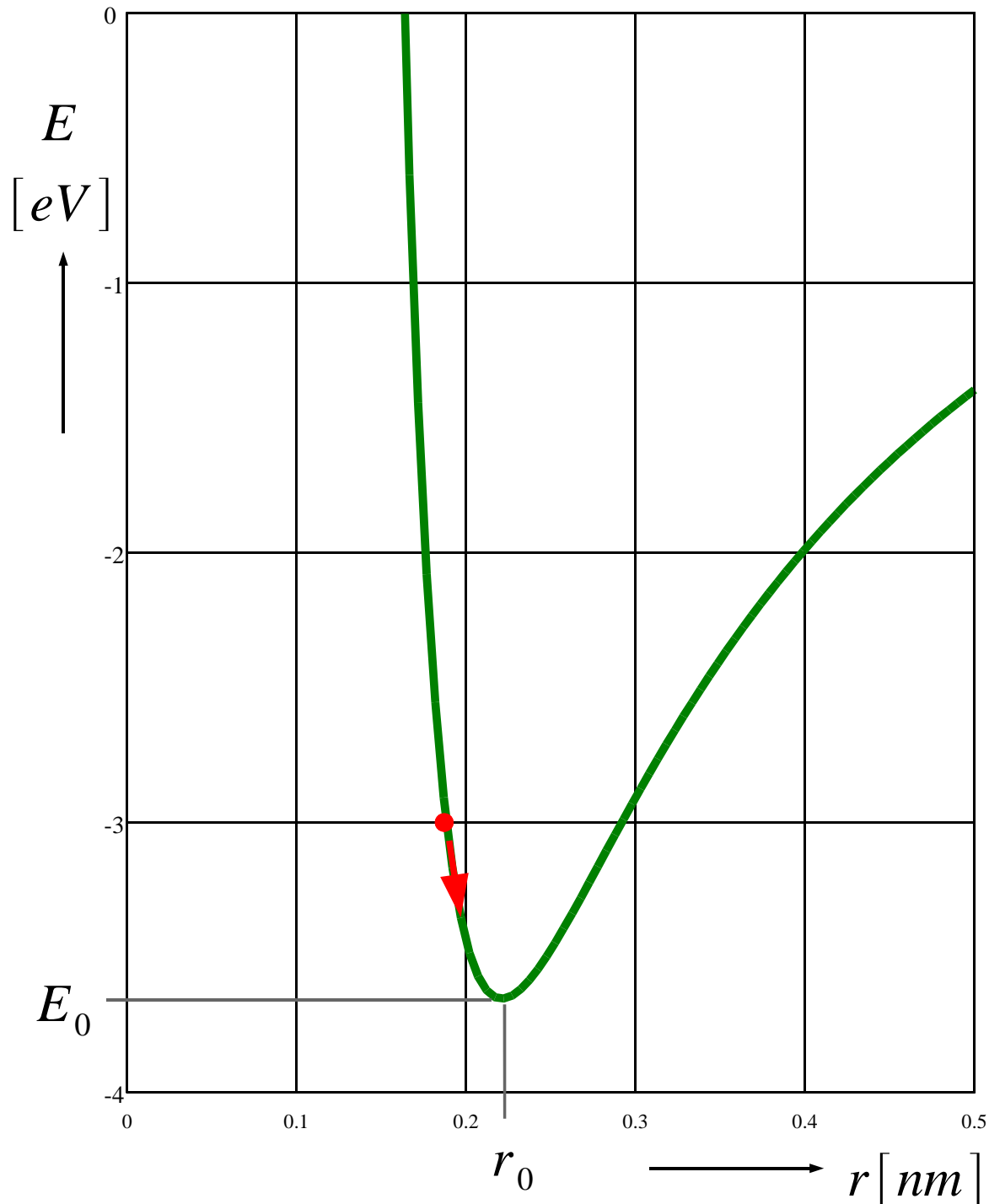
Iontová vazba

(potenciálová jáma)

E_0 minimum
potenciální
energie

(energie interakce)

r_0 odpovídající
rovnovážná
vzdálenost
(délka vazby)



lontová vazba

působení vnějších sil
(stlačení)

=> zmenší se r

=> vzroste E

=> záporná derivace

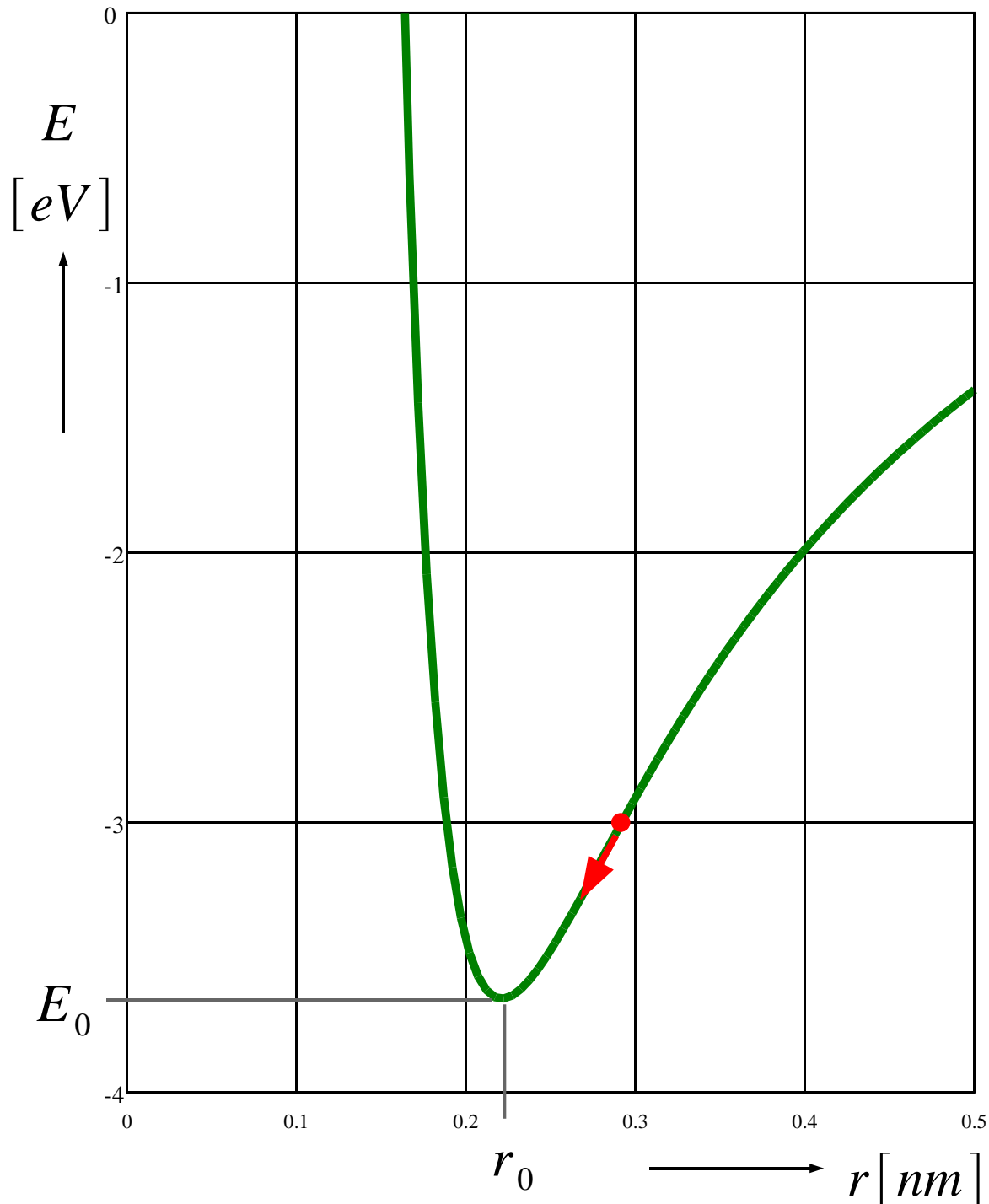
=> vznikne odpudivá

síla (reakce), snažící

se vrátit r do

rovnovážné polohy

(směrem ke dnu jámy).



Iontová vazba

působení vnějších sil
(natažení)

=> zmenší se r

=> vzroste E

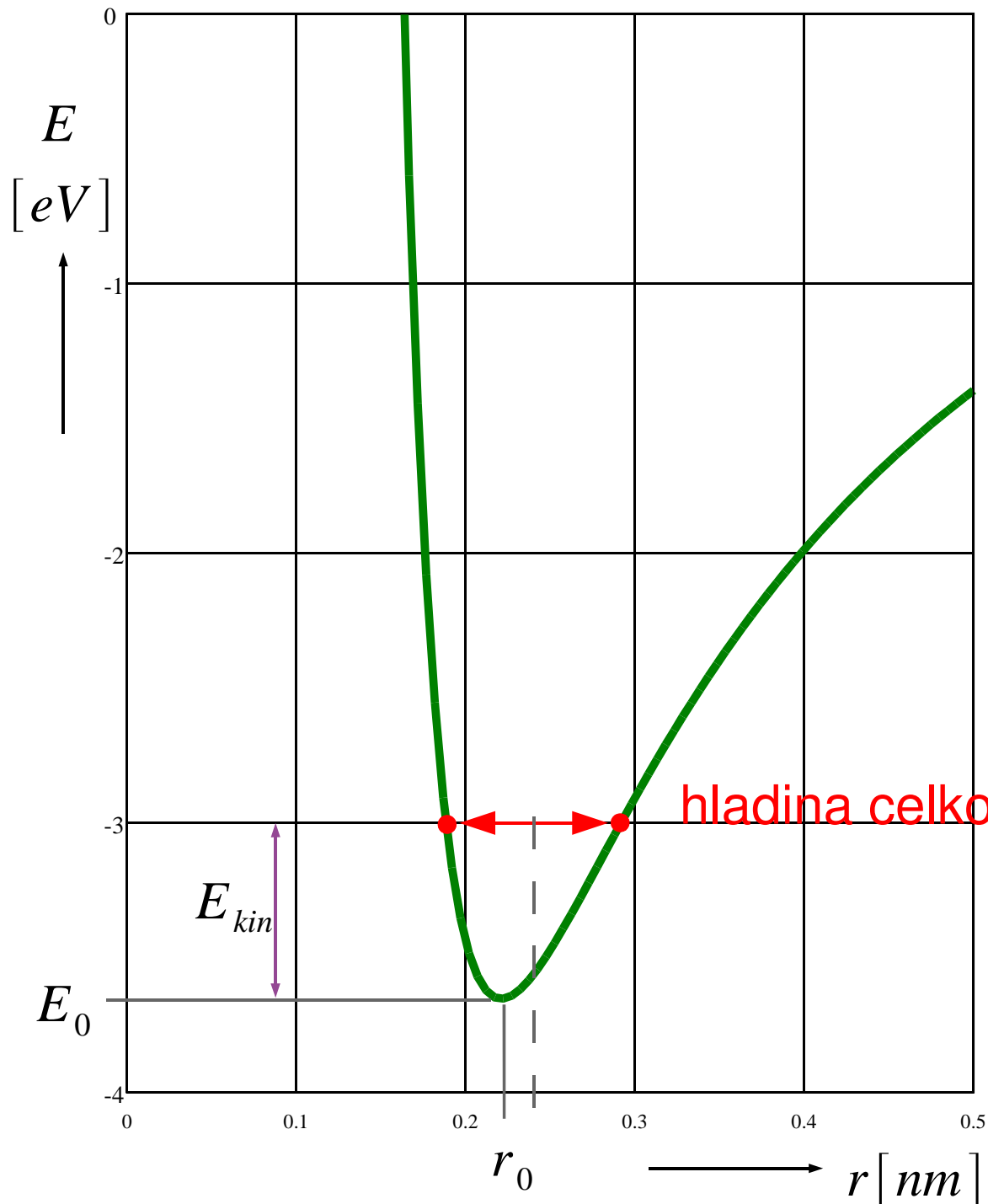
=> kladná derivace

=> vznikne přitažlivá
síla (reakce), snažící

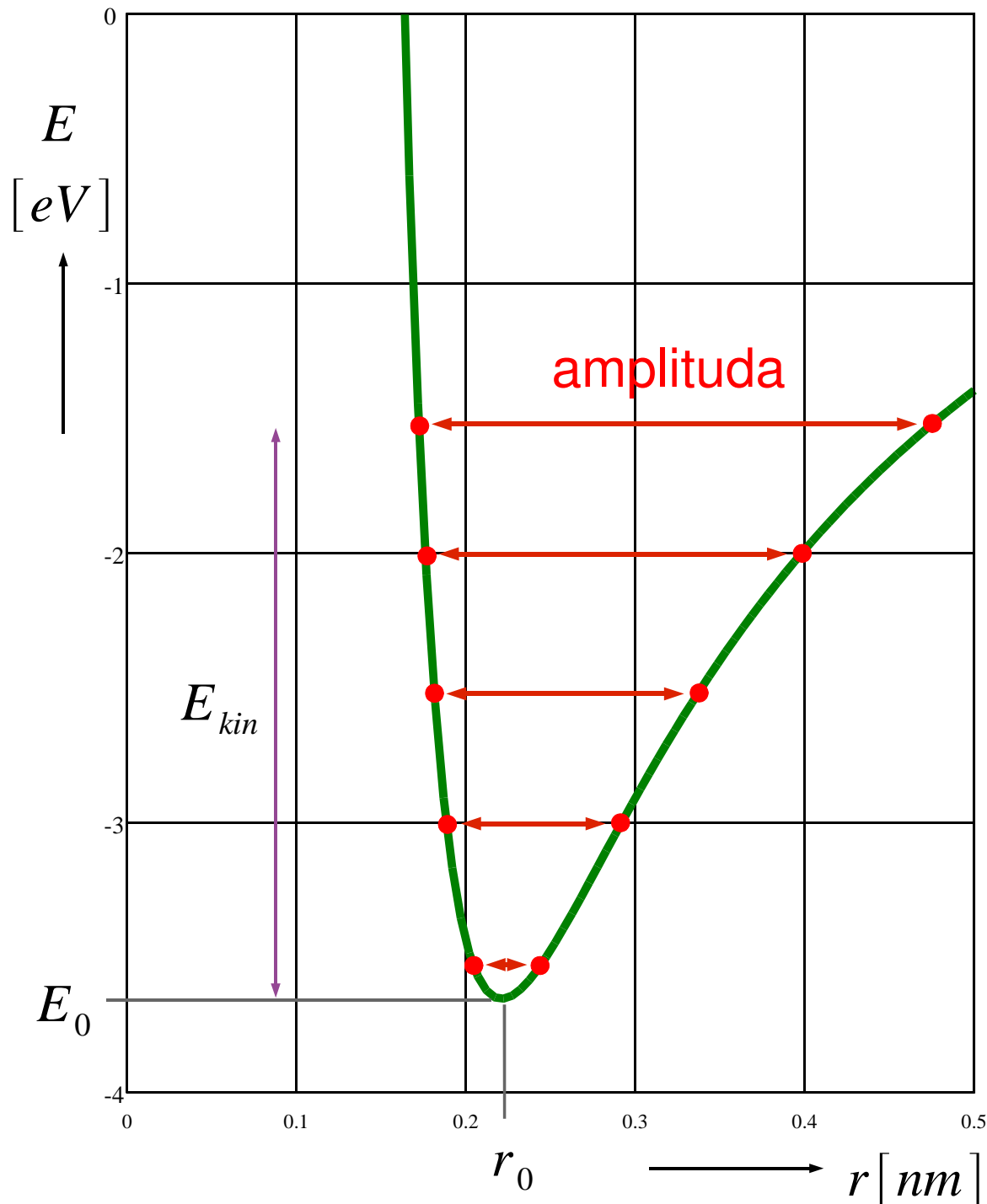
se vrátit r do

rovnovážné polohy

(podobně jak pružina)



Např. náraz dodá
kinetickou energii
=> vychýlení částice
=> kmitání (tepelný pohyb)
malý rozkmit ... harmonický
(lineární) oscilátor
větší rozkmit ...
... anharmonické kmity
(nelineární)
=> vychýlení rovnov. polohy
=> teplotní roztažnost



Postupným zvyšováním energie kmitů roste jejich rozkmit (amplituda) i střední poloha. Nakonec může dojít až k roztržení vazby (např. tání).

Ve skutečnosti se energie nemění spojitě, ale po kvantech - oscilátor kmitá na různých hladinách.

Kmitočet v oblasti IR. Využití: např. Ramanova spektroskopie.

Podobný průběh (potenciálová jáma)
mají i ostatní vazby.

Liší se zejména velikostí vazebné energie.

Srovnání energií:

- ionizační energie 4 – 25 eV
- kovalentní vazby 4 – 8 eV
- iontové vazby 3 – 4 eV
- vodíkové můstky cca 0,3 eV
- van der Waalsovy 0,01 – 0,1 eV
- stř. energie tepelného pohybu = kT :

Boltz. konst. $k = 1,38 \cdot 10^{-23} [J/K] = 86 [\mu eV/K]$

37 °C = 310 K ... 0,027 eV

90 °C = 362 K ... 0,031 eV

(=> denaturace bílkovin)

Elektrodynamika

Pohybem nábojů vzniká:

- elektrický proud
- magnetické pole (příští přednáška)
- elektromagnetické pole (optika, RTG, ...)

el. proud:
$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} [A; C, s]$$

změna náboje:
$$\Delta Q = \int di(t) dt \quad 1 C = 1 As$$

Jak látky vedou elektrický proud:

- dobře: **vodiče**
- hůře (kladou průchodu proudu odpor): **odporové materiály**
- různě, podle okolností: **polovodiče**
- nevedou: **izolanty**

Jaké látky vedou/nevedou el. proud:

- vodiče: kovy (Ag, Au, Pt, Cu, Al, Zn, ...)
- odporové materiály: C, slitiny kovů, ...
- polovodiče: Ge, Si, ...
- izolanty: sklo, guma, umělé hmoty, parafín, tuk, ...
- ale pozor, nelze na to vždy spoléhat!

Při vedení proudu se nabité částice mohou pohybovat:

- v pevných látkách – jakých ??:
 - ??
 - ??
- v kapalinách – jakých ??:
 - ??
 - ??
 - ??
- v plynech:
 - kde ještě ??

Co je to za nabité částice, které se mohou pohybovat:

- v pevných látkách:
 - kovy: ??
 - polovodiče: ??
- v kapalinách:
 - elektrolyty: ??
 - voda, alkohol: ??
 - organická rozpouštědla: ??
- v plynech: ??
- ve vakuu: ??

Co je to za nabité částice, které se mohou pohybovat:

- v pevných látkách:
 - kovy: **elektrony**
 - polovodiče: ??
- v kapalinách:
 - elektrolyty: ??
 - voda, alkohol: ??
 - organická rozpouštědla: ??
- v plynech: ??
- ve vakuu: ??

Co je to za nabité částice, které se mohou pohybovat:

- v pevných látkách:
 - kovy: elektrony
 - polovodiče: **elektrony, díry**
- v kapalinách:
 - elektrolyty: ??
 - voda, alkohol: ??
 - organická rozpouštědla: ??
- v plynech: ??
- ve vakuu: ??

Co je to za nabité částice, které se mohou pohybovat:

- v pevných látkách:
 - kovy: elektrony
 - polovodiče: elektrony, díry
- v kapalinách:
 - elektrolyty (roztoky kyselin, zásad, solí): **ionty**: jaké??
 - voda, alkohol: ??
 - organická rozpouštědla: ??
- v plynech: ??
- ve vakuu: ??

Co je to za nabité částice, které se mohou pohybovat:

- v pevných látkách:
 - kovy: elektrony
 - polovodiče: elektrony, díry
- v kapalinách:
 - elyty: ionty: + **kationty** (ke katodě -), - **anionty** (k anodě +)
 - voda, alkohol: ??
 - organická rozpouštědla: ??
- v plynech: ??
- ve vakuu: ??

Co je to za nabité částice, které se mohou pohybovat:

- v pevných látkách:
 - kovy: elektrony
 - polovodiče: elektrony, díry
- v kapalinách:
 - elyty: ionty: + kationty (ke katodě -), - anionty (k anodě +)
 - dest. voda, alkohol: **špatně vedou** (málo disociovaných částic)
 - organická rozpouštědla: ??
- v plynech: ??
- ve vakuu: ??

Co je to za nabité částice, které se mohou pohybovat:

- v pevných látkách:
 - kovy: elektrony
 - polovodiče: elektrony, díry
- v kapalinách:
 - elyty: ionty: + kationty (ke katodě -), - anionty (k anodě +)
 - dest. voda, alkohol: špatně vedou (málo disociovaných částic)
 - organická rozpouštědla: **žádné (prakticky nevedou)**
- v plynech: ??
- ve vakuu: ??

Co je to za nabité částice, které se mohou pohybovat:

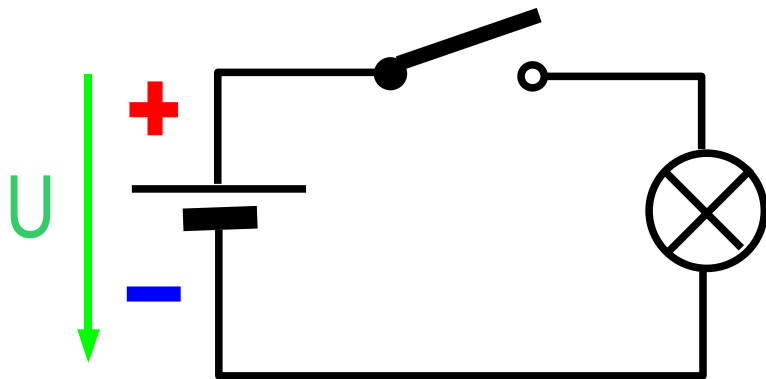
- v pevných látkách:
 - kovy: elektrony
 - polovodiče: elektrony, díry
- v kapalinách:
 - elyty: ionty: + kationty (ke katodě -), - anionty (k anodě +)
 - dest. voda, alkohol: špatně vedou (málo disociovaných částic)
 - organická rozpouštědla: žádné (prakticky nevedou)
- v plynech: **ionizované částice plynu (ionty)**
- ve vakuu: ??

Co je to za nabité částice, které se mohou pohybovat:

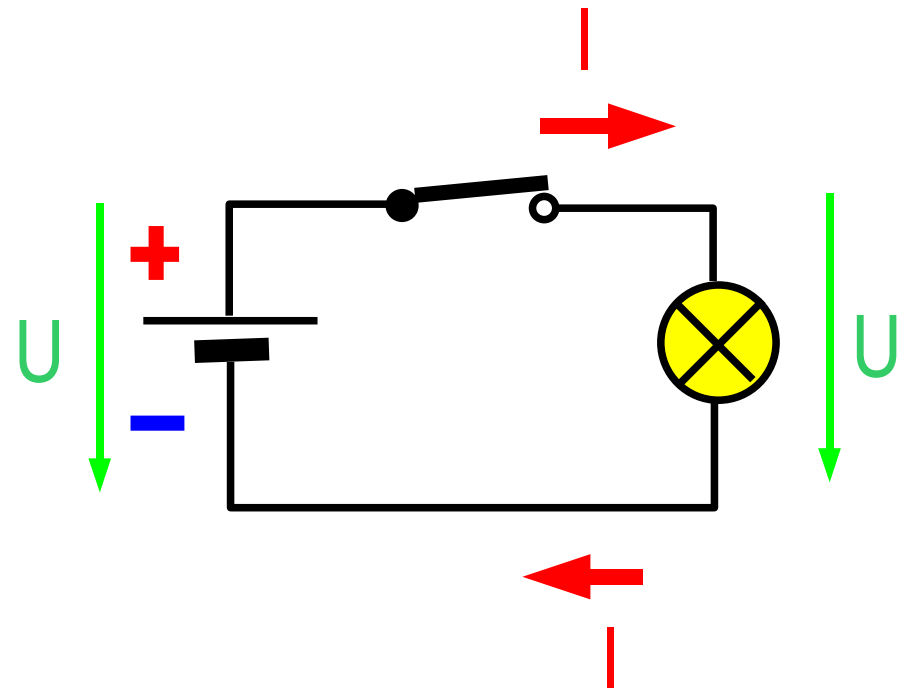
- v pevných látkách:
 - kovy: elektrony
 - polovodiče: elektrony, díry
- v kapalinách:
 - elyty: ionty: + kationty (ke katodě -), - anionty (k anodě +)
 - dest. voda, alkohol: špatně vedou (málo disociovaných částic)
 - organická rozpouštědla: žádné (prakticky nevedou)
- v plynech: ionizované částice plynu (ionty)
- ve vakuu: **elektrony, protony, ionty, alfa-částice**

Obvod elektrického proudu:

Aby mohl protékat elektrický proud, musí být uzavřený obvod:



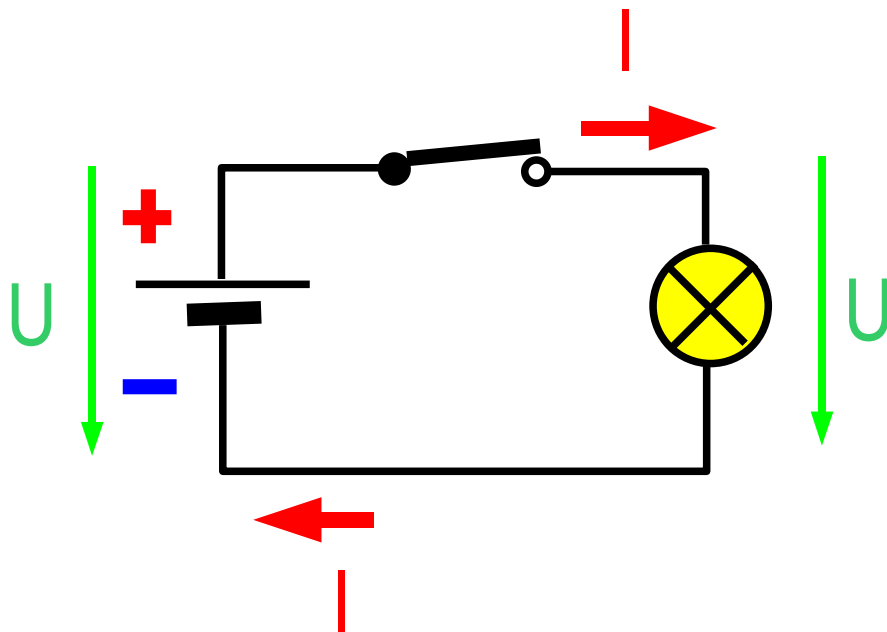
$U =$ elektrické napětí



$I =$ elektrický proud

Elektrický výkon a příkon:

Pokud zanedbáme ztráty ve vedení, pak podle zákona o zachování energie bude výkon zdroje a příkon spotřebiče stejný.



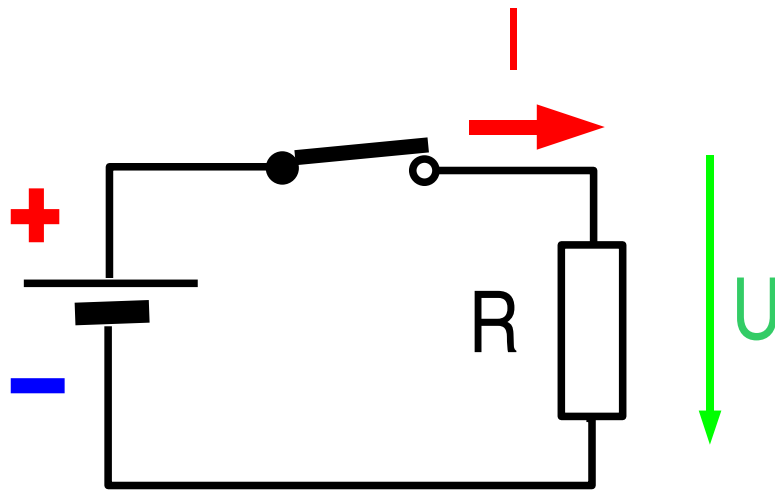
$$P = U \cdot I$$

výkon = napětí · proud

příkon přeměněný na teplo = Jouleovo teplo

Ohmův zákon:

Napětí na odporu je úměrné procházejícímu proudu.
Konstantou úměrnosti je velikost tohoto odporu.



$$U = R \cdot I \quad [V = A \cdot \Omega]$$

$$U = \frac{I}{R} \quad [U = \frac{A}{\Omega}]$$

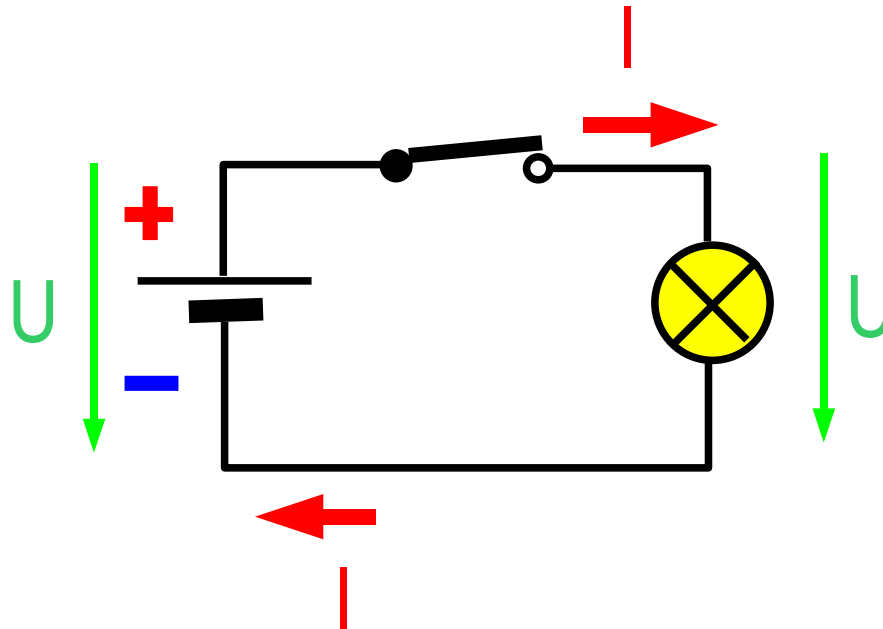
$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega = \frac{V}{A}]$$

Jednotkou elektrického odporu je 1 Ohm.

Kirchhoffovy zákony:

I. Kirchhoffův (uzly): $\sum_i U_i = 0$

II. Kirchhoffův (smyčky): $\sum_i I_i = 0$

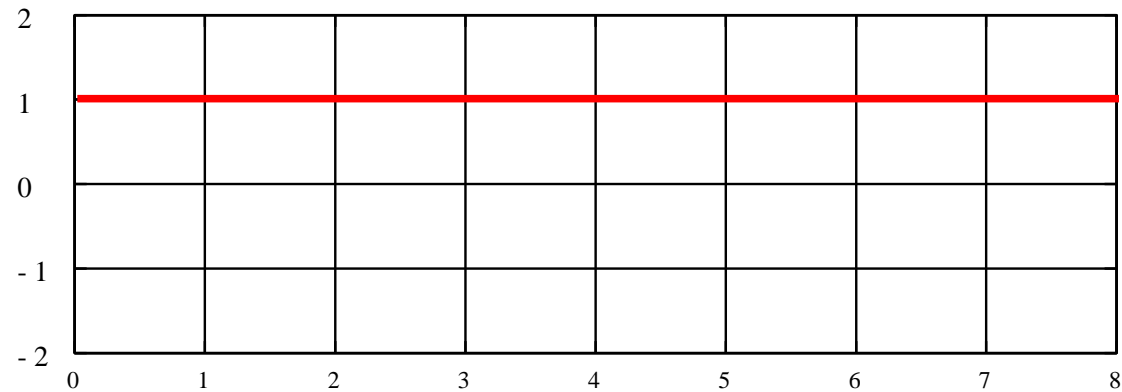


Elektrický proud:

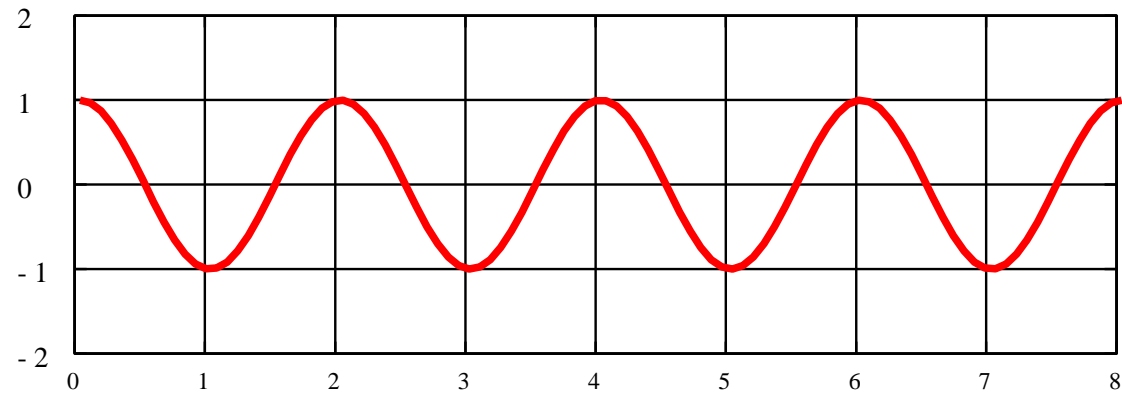
- stejnosměrný
- střídavý
- pulsní
- quasiperiodický
- nepravidelný průběh

Superposice stejnosměrného a střídavého proudu:

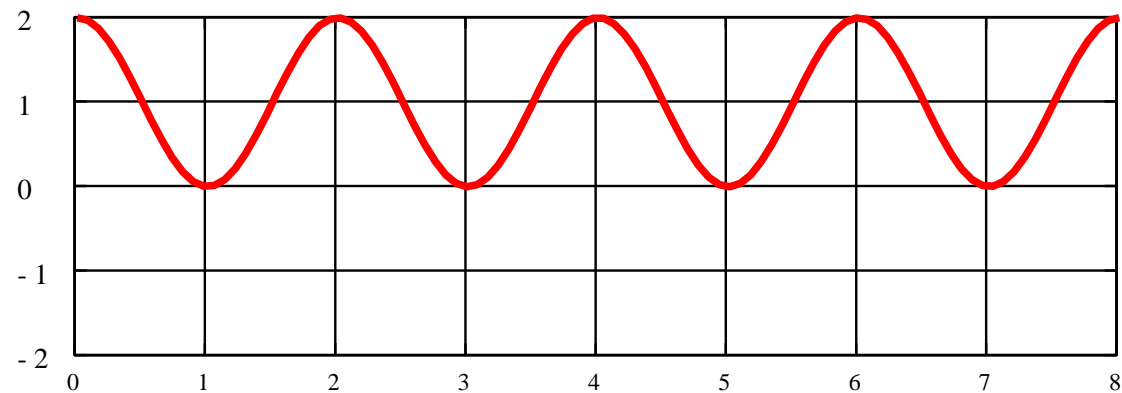
stejnsměrný proud:



střídavý proud:



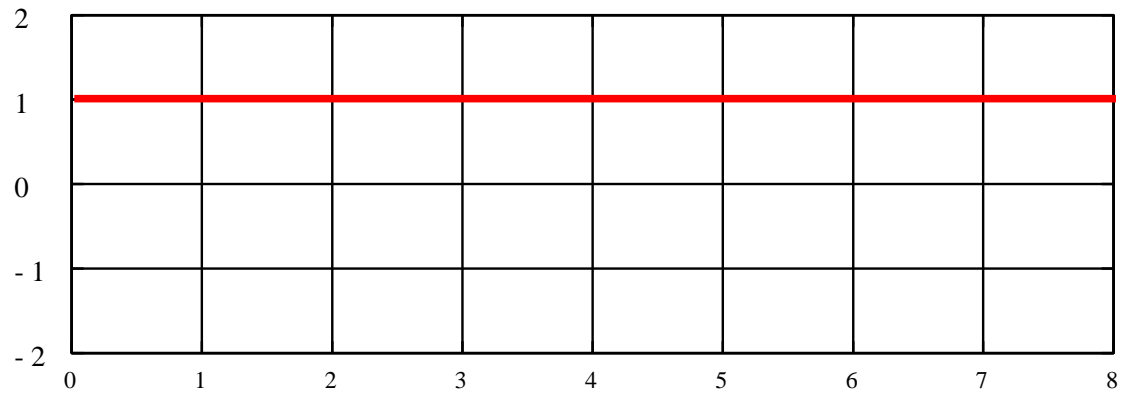
superponované složky
ss a st proudu:



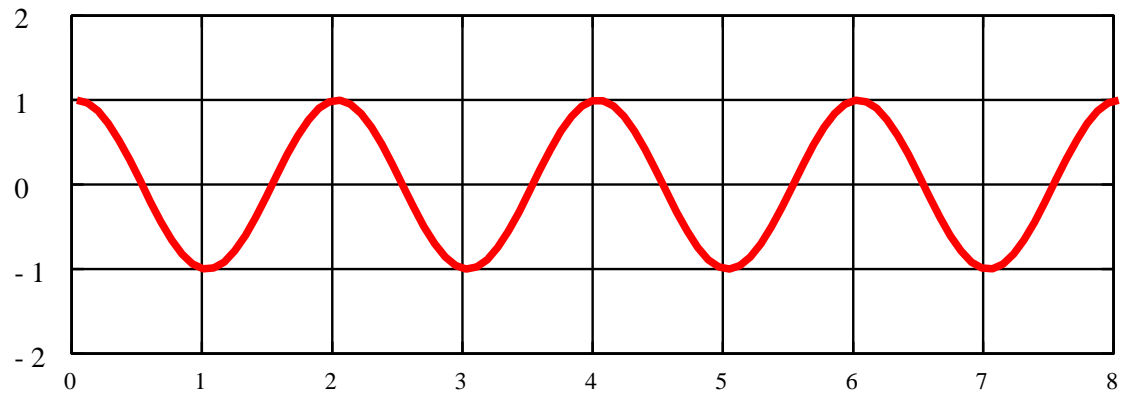
→ t

Stejnoseměrný a střídavý proud:

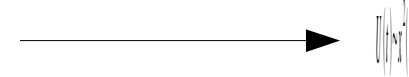
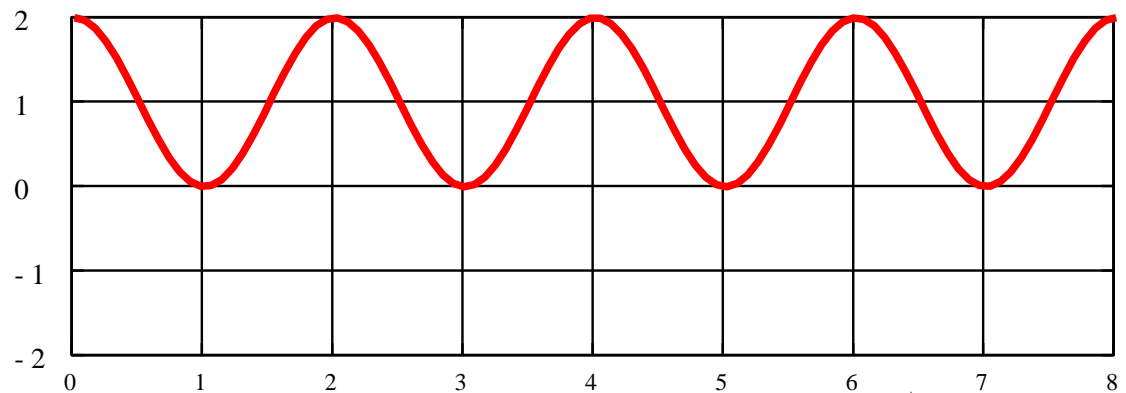
stejnoseměrný proud:



střídavý proud:

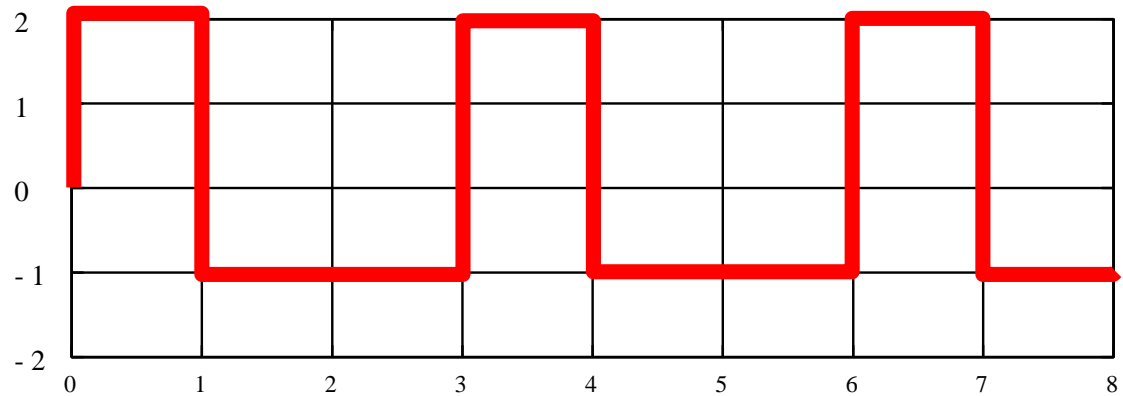


??:

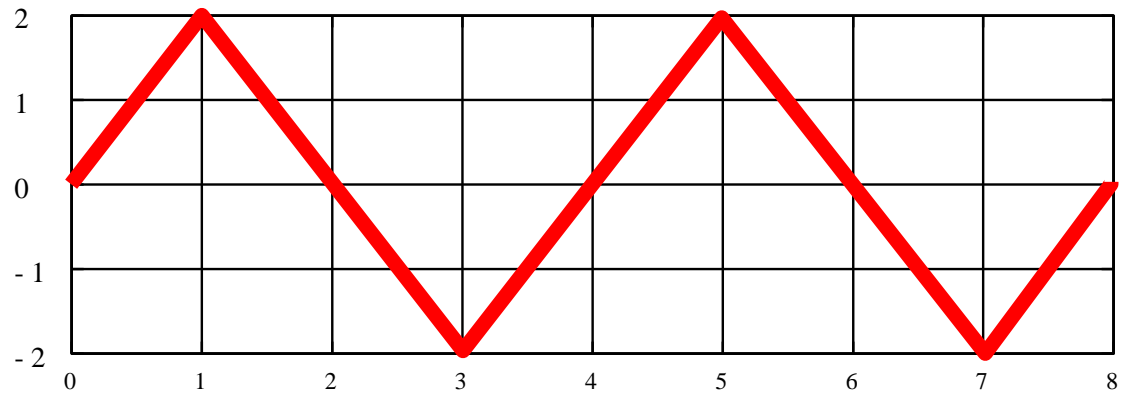


Pulsní proudy:

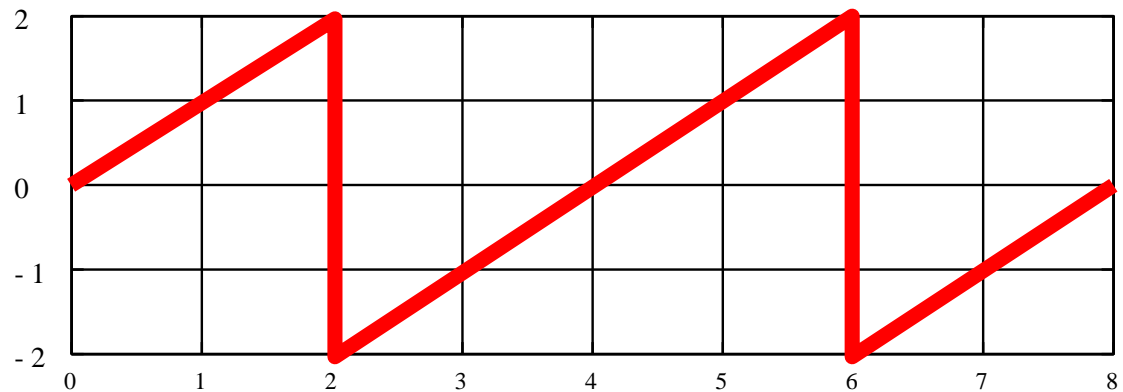
obdélníkový:



trojúhelníkový:



pilovitý:



... a spousta dalších.

→ t

Využití elektřiny v medicíně:

- diagnostika:
 - RTG lampy, NMR atd. atd.
 - biosignály (EKG, EEG atd. atd.)

- terapie:
 - pohon všeho možného
 - elektroterapie

Účinky el. proudu na organismus:

- stejnosměrný:

- střídavý:

Účinky el. proudu na organismus:

- stejnosměrný:
 - vedení: elektrolyticky, zejména mezibuněčnými prostory
 - účinky: přesun iontů, změna dráždivosti
 - využití: galvanoterapie, iontoforéza

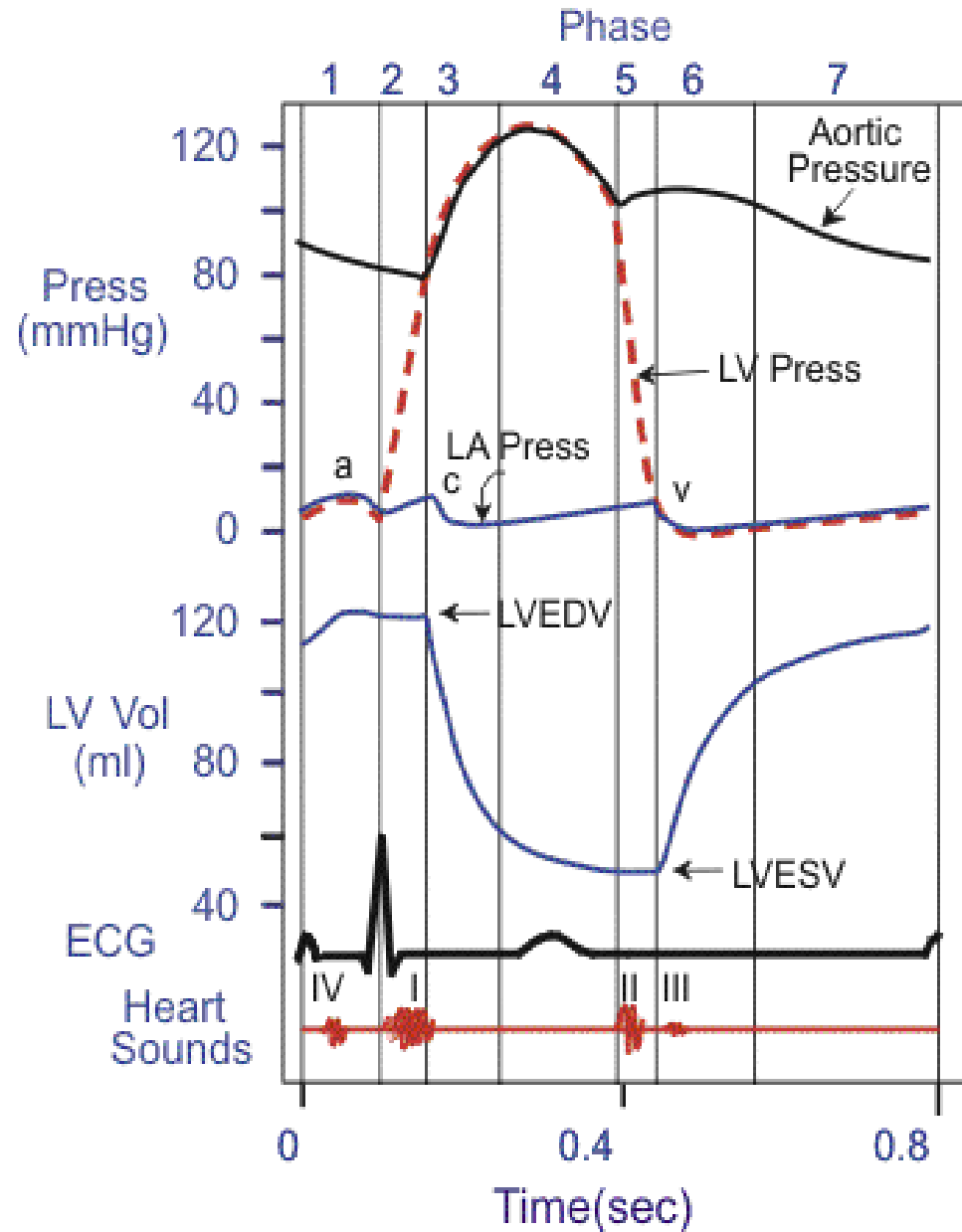
Účinky el. proudu na organismus:

- stejnosměrný:
 - vedení: elektrolyticky, zejména mezibuněčnými prostory
 - účinky: přesun iontů, změna dráždivosti
 - využití: galvanoterapie, iontoforéza
- střídavý:
 - nízkofrekvenční:
 - vedení: elektrolyticky + kapacitně
 - účinky: dráždivé, hyperemizační
 - využití: většinou impulsní elektroterapie
 - vysokofrekvenční:

Účinky el. proudu na organismus:

- stejnosměrný:
 - vedení: elektrolyticky, zejména mezibuněčnými prostory
 - účinky: přesun iontů, změna dráždivosti
 - využití: galvanoterapie, iontoforéza
- střídavý:
 - nízkofrekvenční:
 - vedení: elektrolyticky + kapacitně
 - účinky: dráždivé, hyperemizační
 - využití: většinou impulsní elektroterapie
 - vysokofrekvenční:
 - šíření: elektromagnetické vlnění
 - účinky: tepelné
 - využití: diatermie

Biosignály



Abbreviations:

LV Press, left ventricular pressure

a, a-wave; c, c-wave; v, v-wave

ECG, electrocardiogram

LVEDV, left ventricular end-diastolic volume

LVESV, left ventricular end-systolic volume