

# ÚLTIMOS AVANCES DEL ESTADO SÓLIDO EN LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA

José Ronald Condori Paredes, *Life Fellow, IEEE*, Student of, *Electronic Enginrenre, UNA*, Código, 020918

**Abstract**—La superconductividad, campo de la física que estudia la conductividad de ciertas partículas como los metales, en estos últimos años, con el descubrimiento de nuevos superconductores, esta revolucionando el campo de la electrónica y por ende la electrónica de potencia. En el presente artículo se trata de dar alcance los principales logros en esta rama de la física, que han sido publicados en dos de las revistas de mas alto grado científico, donde se publican artículos de novedad científica como los referidos al descubrimiento de nuevos superconductores. Con esto se busca una respuesta y concluir si los electrones que forman los Pares de Copper se mantienen ligados por un fonón o por las fluctuaciones de espín.

**Index Terms**—IEEE, journal,  $\LaTeX$ , paper, superconductores.

## I. INTRODUCTION

**H**OY contamos con muchos Dispositivos Electronicos que 25 años atrás podrían haber parecido asunto exclusivo de cuentos de ciencia ficción. Para muchos niños las computadoras son uno de tantos aparatos domésticos, los juegos de realidad virtual no les parecen misteriosos y enviar o recibir información de cualquier tipo y de cualquier lugar del mundo sólo requiere sentarse frente a una PC. Todo esto es el resultado del explosivo desarrollo científico y tecnológico de los últimos 40 años, con particular énfasis en los últimos veinte. No hay duda que en todo esto los semiconductores han jugado un papel predominante. No hace mucho que la computadora de bolsillo, el discman, el DVD, las pantallas de plasma, las cámaras digitales y los teléfonos celulares eran aparatos exóticos que no formaban parte de nuestra vida diaria. La industria de los semiconductores es una de las que más crecimiento ha presentado en los últimos años. En 2004, las ventas alcanzaron cerca de 200,000 millones de dólares.

Jronald  
October 27, 2006

## II. LA SUPERCONDUCTIVIDAD: LA DANZA DE LAS IDEAS

**E**L 7 de Octubre de 2003, Niels Bohr hubiese cumplido 118 años. Ese mismo día, la Academia Sueca anunciaba que otorgaba el Premio Nobel de Física a Alexei Abrikosov y a Vitaly Ginzburg (rusos) por superconductividad, y a Anthony Leggett (inglés) por superfluidez. ¡La superconductividad está de moda! Niels Bohr fue un genio de la Física, Premio Nobel, intérprete por excelencia de la mecánica cuántica. Albert

Einstein nunca estuvo de acuerdo con él. Hoy los físicos seguimos buscando una interpretación aceptable para todos, pero aun así la mecánica cuántica dio lugar al estado sólido, a la electrónica y éstas nos llevaron a la Luna en 1968. La mecánica cuántica no se quedó allí. Con la relatividad general constituye uno de los pilares fundamentales de la concepción del Universo. Y qué mala pasada la que nos jugaron: ¡ambas no pueden valer de manera consistente en forma simultánea! Quizá por eso todas las mañanas, Merced Montesinos, un colega joven de gran inteligencia, sube muy serio por las escaleras que están frente a mi oficina con la idea fija de cuantizar a la pobre relatividad, como si ella tuviera la culpa de todo este desorden. Es un poco como cuando a Gödel le dio por probar que ninguna formulación axiomática de la aritmética que fuese completa podía ser consistente. Es un golpe conceptual fuerte. La mecánica cuántica dio también origen a la superconductividad, la cual tiene una bellísima historia. Se presenta en metales. Estos están hechos de átomos que se ligan unos a otros muy fuertemente. Y resulta que dentro corren electrones libres como niños en recreo. Puedes imaginar los metales como cubos que tienen en los vértices átomos y electrones en el espacio vacío, paseándose a su antojo. Los átomos vibran de diferentes y muy específicas maneras, como cuando juegas con una cuerda que tienes sujeta de un extremo y está amarrada del otro. Tú quieres hacer onditas con ella. Para que se te regrese la ondita cuando llega al extremo atado sin que se atenúe tienes que agitarla de una cierta forma. Hay varias maneras que funcionan. Cada forma de ondita de las que funcionan se llama estado vibracional. Y obviamente tiene una cierta energía diferente para cada uno. La diferencia entre dos estados vibracionales se llama "fonón", un término de mecánica cuántica, de física cuántica del estado sólido.

1) *LA DANZA DE LOS NATURE*: Nature y Science son dos revistas de alto nivel científico. En ellas se publican artículos que permiten al lector enterarse de cómo se va modulando el pensamiento científico en torno a un tema determinado. Ha sido muy interesante que en los últimos años, en la revista Nature, ha aparecido una serie de artículos que resulta casi respuesta de unos científicos a las propuestas de los otros y que quiero consignar aquí como la "danza de los Nature", ya que muestra hasta qué punto hay ideas encontradas que se han defendido con arduo trabajo y realizando experimentos de alto costo, trabajo, aplicación y astucia. La cantidad detallada de conocimiento adquirido acerca de los nuevos superconductores es enorme. Y, sin embargo, no ha sido suficiente para aclarar el mecanismo

de los mismos, como acabo de mencionar. Es un diálogo apasionante al describir las ideas presentadas en esos escritos de una manera que pretende ser muy clara y precisa pero sin usar tecnicismos. El diálogo, puesto muy esquemáticamente, se refiere a cuál es el mecanismo, es decir, a si los electrones que forman los Pares de Copper se mantienen ligados por un fonón o por las fluctuaciones de espín.

A continuación describiré la serie de trabajos que tipifica estas tendencias.

2) *EL DIÁLOGO*: La pregunta base de este diálogo es, el mecanismo es fonónico o por fluctuaciones de espín? La idea base es que si son fluctuaciones de espín, su huella deberá estar en una función que se llama susceptibilidad magnética. Esta función se mide haciendo experimentos de dispersión de neutrones polarizados. Esto es, se lanza un haz de neutrones polarizados (todos con su espín orientado en una misma dirección) contra una muestra de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , para ser concretos, y lo que se mide es cuantos neutrones salen con el espín cambiado así como la cantidad de energía y de momento que perdieron. Puede mostrarse que los neutrones interactúan sólo con algunos de los electrones que se encuentran dentro de este metal. Interactúan con los del plano de  $\text{CuO}_2$ . El plano de  $\text{CuO}_2$  es reconocido como el escenario principal de la superconductividad en estos materiales en el sentido de que los Pares de Cooper (los causantes de la superconductividad) se forman, primordialmente, sobre ese plano. Es posible que Pares de Cooper que se forman en las cadenas de  $\text{CuO}$  tengan una importancia no despreciable.

3) *CARBOTTE: ¿SON FLUCTUACIONES DE ESPÍN!*: En efecto, este es el tema de la primera publicación en la revista Nature a la que quiero referirme. El trabajo fue realizado por J.P. Carbotte con algunos de sus colaboradores. Carbotte es uno de los más conocidos investigadores en superconductividad del mundo. Su argumento es: el hecho de que la "huella" de las fluctuaciones de espín esté en la resonancia de la susceptibilidad magnética, debe interpretarse como que la resonancia representa el espectro de las fluctuaciones de espín. Ahora bien, en la teoría convencional de la superconductividad, el espectro de fonones, se usa para formar una función fundamental que se conoce como función de Eliashberg. Una vez conocida esta función se pueden calcular todas las propiedades termodinámicas del superconductor, que es lo que uno desea conocer. Carbotte realizó algo muy importante. Resulta que es posible diseñar un proceso matemático que funciona para los superconductores convencionales (en los cuales los Pares de Cooper están ligados por fonones). Lo que este proceso hace es suministrar información muy precisa sobre la función de Eliashberg con base en un análisis de la conductividad óptica. Carbotte aplicó el proceso a la conductividad óptica que acababa de calcular usando la función de Eliashberg que él mismo propuso y ¿qué obtuvo? ¡Nuevamente su propia función de Eliashberg! Este hecho, sin lugar a dudas da mucha fuerza a las opiniones que favorecen las fluctuaciones de espín como la clave del mecanismo de los nuevos superconductores. No es extraño que haya generado un enorme entusiasmo. Pero faltaba algo...

¿se puede realizar la "Tarea de Eliashberg" completa?

4) *LANZARA: NO. NO SON FLUCTUACIONES DE ESPÍN, ¿SON FONONES!*: El siguiente artículo de esta serie apareció en Nature en el año 2001. Grupos de investigadores de las universidades de Stanford y Berkeley, en los Estados Unidos, y de la Universidad de Tokio, Japón, encontraron que los electrones, al pasar al estado superconductor, se acoplan a (interactúan con) un misterioso bosón, de energía igual a 80 meV. Buscando, encontraron que ese bosón sólo puede ser un fonón. Los Pares de Cooper, concluyeron, están ligados por fonones y no por fluctuaciones de espín. ¿Cómo hicieron eso? Se puede hacer un experimento por una técnica que se llama "Espectroscopía de fotoemisión resuelta en ángulo" (Angle-resolved photoemission spectroscopy, ARPES, en inglés). Este experimento permite medir la energía y el momento de los electrones. Y fue midiendo la energía como se dieron cuenta que, en el estado superconductor, los electrones se acoplan a un "bosón" (un fonón u otro bosón) cuya energía era 80 meV. Con este dato buscaron y eliminaron todas las posibilidades hasta que concluyeron que tenía que ser un fonón. Este experimento fue realizado con varios superconductores de alta  $T_c$  (SATEC) con resultados totalmente análogos. ¿Cómo saben que se acopla? ¿Qué es lo que miden? Ahí está la clave. Miden la energía del electrón. Cuando el electrón no se acopla (no da a la red o toma de la red la energía equivalente a un fonón) su masa tiene un cierto valor, digamos  $m$ . Pero al momento de acoplarse, en ese caso su masa cambia de:  $m$  a  $m^*$ .

Una vez que los investigadores pudieron establecer esto, el siguiente paso fue buscar cuál de todos los posibles bosones se acoplaba. Después de una búsqueda detallada concluyeron que sólo podía ser un fonón. El mecanismo es, entonces, ¡por fonones! Este experimento ciertamente es impresionante y aporta un dato imposible de rehuir.

¿Pero en qué queda entonces lo que demostró Carbotte? Aquí alguien tiene que haber cometido una inconsistencia o un error. Pero...¿cuál es? En efecto, esto parece una historia detectivesca. La pregunta siguiente sería, ¿puede existir un mecanismo combinado? ¿pueden ser las dos cosas? ¿Puede el mecanismo ser una combinación concurrente de los dos? Lo único que se puede decir es que la probabilidad es muy pequeña. La coincidencia tendría que ser enorme. Dos mecanismos diferentes, el uno con la posibilidad de destruir al otro, que aparezcan y "se ayuden" exactamente a la misma temperatura crítica para dar lugar a la superconductividad, es una hipótesis no muy favorecida. La actitud general es: uno u otro (hasta octubre 2004).

Hay que recordar que nadie ha probado si Carbotte tiene o no razón. Habría que averiguar algo más en esa dirección. ¿Puede demostrarse que el resultado de Carbotte no es correcto de manera concluyente, siendo que hay dificultades técnicas para completar la Tarea de Eliashberg? Carbotte no contestó directamente a esta intrigante pregunta pero realizó un planteamiento que hizo tambalear las conclusiones del experimento de Lanzara. Veamos.

5) *CARBOTTE: EL EXPERIMENTO TIENE OTRA INTERPRETACIÓN ALTERNATIVA:* En abril de 2003, apareció otro trabajo de Carbotte. No se publicó en la revista Nature pero es la continuación del diálogo que estoy refiriendo. En esencia, en un trabajo detallado y cuidadoso se concluye:

- En efecto, el experimento de Lanzara, et al. puede explicarse con base en los fotones.
- Esta no es, sin embargo, la única interpretación posible. El bosón que se acopla puede tener su origen también en las fluctuaciones de espín.
- Cuando uno calcula con base en el mecanismo electrón-fonón la conductividad óptica, el comportamiento que se obtiene para frecuencias altas no es el que se obtiene experimentalmente.
- Por el contrario, cuando uno supone que el bosón observado tiene su origen en las fluctuaciones de espín, el comportamiento que se obtiene para la conductividad óptica tiene la misma tendencia que el resultado experimental.

Por lo tanto, lo más probable es que las fluctuaciones de espín expliquen el mecanismo de los superconductores de alta  $T_c$ , a pesar de todo. El trabajo de Carbotte reabre el problema original así como la pregunta, ¿es la resonancia en la susceptibilidad magnética, en el estado superconductor el espectro de las fluctuaciones de espín que es causa de la superconductividad? ¡qué confusión! ¿cómo avanzar? ¿qué debe hacerse ahora para dar el siguiente paso?

6) *TIMUSK: LA RESONANCIA ES UN EFECTO, NO LA CAUSA:* Tom Timusk es un investigador experimental retirado de la Universidad de Mc Master en la ciudad de Hamilton, Ontario, Canadá, al igual que Jules Pierre Carbotte (teórico). Pero ambos siguen muy activos en su investigación. El gobierno ha entendido que tiene dos excelentes investigadores en ellos y les ha aprobado presupuestos cuantiosos para que puedan continuar su trabajo. En parte por este nivel de compromiso del gobierno, la contribución canadiense al problema, en estos últimos años, ha sido tan sobresaliente.

¿Qué hay que probar?, se preguntó Timusk y comenzó una serie de experimentos de infrarrojo con miras a ver si era posible o no la superconductividad sin la resonancia en la susceptibilidad magnética (desaparecida la causa, desaparecido el efecto, pensó). Con experimentos de infrarrojo se mide la conductividad óptica, donde aparece, a la misma energía, que en la susceptibilidad magnética una resonancia. Timusk, entonces, se dispuso a medir la conductividad óptica de una serie de muestras de Bi-2212 con diferente grado de impurificación. Esto es, produciéndolas con más o menos oxígeno, o lo que es lo mismo variando el valor de  $T_M$

¿Cuál es la idea? Aquí falta un dato. Este dato es que cuando la muestra se crece con diferente contenido de oxígeno, la temperatura crítica empieza a bajar y la resonancia comienza a disminuir, es decir, el evento de que hablabamos antes se produce cada vez menos.

¿Y qué quería hacer Timusk? Pues ver si la resonancia desaparece al mismo tiempo que la superconductividad. Si ése es el espectro de las fluctuaciones de espín (como muchos parecen creer) y si las fluctuaciones de espín producen

la superconductividad, entonces, al desaparecer ésta (la resonancia) tiene que desaparecer la superconductividad.

¿Y cómo armó el experimento, entonces? Produjo muchas muestras de Bi-2212 con diferente grado de contenido de oxígeno. Les midió la conductividad óptica haciendo experimentos de infrarrojo, en lo cual es especialista a nivel mundial. Observó que la resonancia disminuía. Llevó las cosas hasta hacer desaparecer totalmente la resonancia. Y ahí, hizo este trascendental descubrimiento: había producido una muestra con una temperatura crítica muy alta  $T_c = 55K$ , ¡con un grado de impurezas tal que la resonancia había desaparecido!

Este resultado es uno de los más importantes de los últimos años y cierra la búsqueda por el lado del uso de la susceptibilidad magnética como el espectro de las fluctuaciones de espín que produce la superconductividad. Demuestra que la superconductividad es la causa de que se produzca la resonancia tanto en la conductividad óptica como en la susceptibilidad magnética y no al revés. Pero, estrictamente, no demuestra nada más. Simplemente, no se puede armar la función de Eliashberg como la armó Carbotte. Debe haber algo más profundo. Y entonces, ¿en qué quedamos? ¿qué pasó, son fluctuaciones de espín o son fonones? Este resultado podría cerrar un poco la gama de preguntas que uno puede hacerse. La respuesta final, obviamente, aún no está clara. Se pudo demostrar que la resonancia no explica la superconductividad. Entonces surge la pregunta inversa: ¿cómo explica la superconductividad la existencia de la resonancia? La respuesta a esa pregunta puede ser, en efecto, ilustrativa. Pero la polémica sobre este experimento no ha cesado.

### III. CONCLUSION

Para terminar, relataré lo último que he podido averiguar (octubre 2004). Este trabajo fue realizado durante varios años. Hay que recordar dos cosas: una es que el hecho de que si bien la resonancia en las funciones mencionadas no ha resultado una base sólida para construir la función de Eliashberg que describe la superconductividad por fluctuaciones de espín, esto no cierra el problema. La susceptibilidad magnética tiene, además de la resonancia (que se presenta como un pico), un fondo sin mayores detalles. Varios investigadores se han preguntado si la clave no estará allí. Nadie lo sabe, obviamente. Entonces, debemos cuidarnos de concluir, precipitadamente, que las fluctuaciones de espín no son el mecanismo. Eso aún no está probado.

Lo segundo que hay que recordar es que Carbotte encontró que el comportamiento de la conductividad óptica, en el lado de las frecuencias grandes (mucha energía transferida en la interacción) no reproducía lo que indica el experimento cuando se hace el cálculo partiendo como base de que el mecanismo es fonónico. Esto debe ser contestado cumplidamente. Las teorías armadas hasta ahora estudian sólo el plano de Cu O2 en forma separada del resto del cristal. La primera cosa en buscar es si esta simplificación no podría tener algún efecto que se manifestara en estos problemas. Entonces lo primero

en hacer fue calcular la estructura electrónica de bandas por un método sofisticado (de primeros principios) y extraer de allí la información de cómo se comportan los electrones en el plano de CuO<sub>2</sub>. Esto requiere referirse a un material concreto. El estudio del YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>. Para averiguar si esto podría tener alguna importancia me planteé la pregunta, "¿puede la superconductividad explicar la resonancia?", de la forma siguiente. ¿Puedo, utilizando la estructura real electrónica de bandas y una forma sencilla de describir la superconductividad, reproducir la resonancia?

Tomar en cuenta, en su forma más sencilla, los efectos que la transición superconductor tiene sobre la estructura electrónica de bandas (en qué energías existen los electrones). Caracterizar la superconductividad con un solo parámetro. Y así, calcular las funciones mencionadas con fórmulas conocidas sacadas de los libros de texto o de artículos publicados en la literatura. Y así obtener los siguientes resultados:

- La resonancia en la susceptibilidad magnética se reproduce tal y como sale en el experimento no sólo en el estado normal sino también en el estado superconductor.
- Con base en la misma estructura electrónica de bandas y el parámetro que describe la superconductividad, reproduzco el resultado experimental para la conductividad óptica tanto en el estado normal como en el estado superconductor.
- El resultado para la conductividad óptica sí se comporta, para altas frecuencias, tal y como se predice en el experimento.
- No se supone explícitamente ningún mecanismo

Este resultado da base teórica al experimento de Timusk ya que confirma que la superconductividad sí es la causa de la resonancia. También muestra que si se toma en cuenta la estructura electrónica real, desaparecen ciertos problemas como el hecho de que no se reproduzca el comportamiento de la conductividad óptica a alta frecuencia. Pero a la pregunta, ¿son fonones o no? No puedo aún dar respuesta clara y contundente. Sin embargo, debo confesar que todo lo que he leído y todo lo que he trabajado me inclina a creerlo. Creo que son fonones en contra de la mayoría de mis colegas en el mundo en este momento. Y lo confieso, el estar en contra de tanta gente célebre le pone más emoción a mi trabajo. Pero creer no prueba nada

¿Son fonones?, ¿Son fluctuaciones de espín? Nadie lo puede asegurar todavía.

#### AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a su familia, docentes y demás personas que colaboraron con la redacción de este artículo

#### REFERENCES

- [1] José Ronald Condori Paredes, *Electrónica de Potencia*, EPIElectrónica Universidad Nacional Del Altiplano PUNO, 2006.

José Ronald Condori Paredes

PLACE  
PHOTO  
HERE