

# LA SUPERCONDUCTIVIDAD BIEN ENTENDIDA EMPIEZA CON H

La superconductividad mal entendida también

**Jorge E. Hirsch**



EDITORIAL  
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

**La superconductividad bien entendida empieza con H**  
La superconductividad mal entendida también

© Jorge E. Hirsch, 2019

*Esta edición:*

© Editorial Reverté, S. A., 2019

ISBN: 978-84-291-4435-2

**Propiedad de:**

Editorial Reverté, S.A.  
Calle Loreto 13-15, local B  
08029 Barcelona  
Tel: (+34) 93 419 33 36  
reverte@reverte.com  
www.reverte.com

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede realizarse con la autorización de sus titulares, salvo las excepciones previstas por la Ley 23/2006 de Propiedad Intelectual, y en concreto por su artículo 32, sobre 'Cita e ilustración de la enseñanza'. Los permisos para fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra pueden obtenerse en Cedro (Centro Español de Derechos Reprográficos, [www.cedro.org](http://www.cedro.org)).

Impreso en España · *Printed in Spain*

Depósito Legal: B 2138-2019

Impresión: Masquelibros

# 1487

# Tabla de contenidos

Prefacio .....	VII
----------------	-----

## **PARTE I. Visión general de la superconductividad**

1. Introducción .....	3
2. La superconductividad a vuelo de pájaro: héroes y villanos .....	7
3. Materiales superconductores a vuelo de pájaro .....	19
4. BCS y Hubbard: teorías de superconductividad que no la explican .....	25
5. Huecos y electrones en sólidos: la clave de la superconductividad .....	31

## **PARTE II. Las preguntas claves que hay que responder**

6. La pregunta más simple en superconductividad, que BCS no explica ...	39
7. Efecto Meissner y teoría de London .....	47
8. Puntos esenciales de BCS, y por qué no explica el efecto Meissner .....	55
9. El efecto Meissner con más detalle .....	61
10. La clave del efecto Meissner: expulsión de carga eléctrica .....	65

## **PARTE III. La teoría convencional, y los nuevos materiales superconductores**

11. Teorías de superconductividad pre-BCS, que explican más que BCS .....	73
12. Fonones y el comienzo del oscurantismo .....	83
13. El ardid de Herbert Fröhlich y sus consecuencias .....	95
14. 1957-1980: La edad de oro de la teoría BCS .....	103
15. Huecos en los cupratos y en otros materiales .....	115

## VI Tabla de contenidos

### PARTE IV. Asimetría electrón-hueco y sus consecuencias

16. La asimetría fundamental entre huecos y electrones . . . . .	131
17. Superconductores como átomos gigantes . . . . .	147
18. Huecos, expulsión de carga y campo eléctrico interno. . . . .	155
19. Órbitas mesoscópicas y corrientes de espín . . . . .	163
20. ¿Energía cinética o energía potencial? El helio líquido da la respuesta . . .	175

### PARTE V. Respuestas a las preguntas claves y conclusiones

21. Superconductores y patinadores en rotación: la pistola humeante . . . . .	193
22. El efecto Meissner explicado (casi todo) . . . . .	207
23. El secreto de los huecos . . . . .	215
24. BCS versus Hubbard versus Huecos . . . . .	227
25. Cómo encontrar y no encontrar superconductores a altas temperaturas. .	237

Posfacio . . . . .	243
--------------------	-----

Índice de nombres . . . . .	249
-----------------------------	-----

Índice analítico . . . . .	251
----------------------------	-----

# Prefacio

La superconductividad es uno de los fenómenos más interesantes de la física. También es uno de los campos más controvertidos de la física, pero aun así, creo que muchos estarían de acuerdo con lo primero. Veamos por qué.

La superconductividad es un *punte* entre la física macroscópica que nos es familiar en nuestra experiencia diaria (leyes de la mecánica de Newton, termodinámica, electromagnetismo de Maxwell) y las leyes de la mecánica cuántica que rigen el comportamiento a nivel microscópico de átomos y moléculas, que nos es mucho menos familiar y para nada intuitivo. A los superconductores se los ha caracterizado como ‘átomos gigantes’. En el microscópico átomo de hidrógeno el electrón gira indefinidamente alrededor del núcleo sin experimentar fricción ni disipar energía. Así se comporta también la corriente eléctrica en un anillo superconductor de, por ejemplo, 1 cm de diámetro. Esta corriente se ha medido y se ha observado que persiste durante años sin decaer; se espera que exista prácticamente para siempre. Este comportamiento es muy distinto de cualquier otro movimiento a escala macroscópica, que experimenta fricción y decae con el tiempo, salvo que se le suministre energía continuamente.

Este carácter de ‘puente’ entre lo microscópico y lo macroscópico que tiene el fenómeno de la superconductividad es único y tiene importantes consecuencias, debido al llamado ‘principio de correspondencia’ de Bohr. En 1913, Niels Bohr se apoyó, para deducir las leyes que rigen el átomo de hidrógeno, en el principio de que la física *microscópica* debe evolucionar continuamente a la física *macroscópica* a medida que las dimensiones del sistema aumentan. Sin embargo, la ciencia de la superconductividad contemporánea se enfoca en la física microscópica y no tiene en cuenta el principio de correspondencia de Bohr. Esta es una de las razones

## VIII Prefacio

principales por las cuales yo estoy convencido de que la superconductividad, tal como se entiende hoy, está mal entendida.

Si los superconductores se pudieran utilizar en la vida diaria, los problemas de energía y de contaminación ambiental se reducirían notablemente, se reduciría la dependencia del petróleo y se solucionarían problemas en el Medio Oriente. ¡Es un tema importante!

En este libro, y desde hace muchos años en mis artículos científicos, propongo que el principal protagonista en un superconductor es el *hueco*, o *hole* en inglés. Los huecos son portadores de carga eléctrica positiva en lugar de negativa. El concepto de huecos en átomos, moléculas y sólidos fue introducido por Werner Heisenberg, uno de los fundadores de la mecánica cuántica, en 1931, y significa la ausencia de un electrón, que tiene carga negativa. En la teoría aceptada de la superconductividad, los huecos no juegan ningún papel especial. Contrariamente, desde hace 30 años estoy abogando que los huecos tienen un papel fundamental en la superconductividad, y que sin huecos no puede haber superconductividad. Esta es la razón principal para el título de este libro: *La superconductividad bien entendida empieza con H*, los Huecos de Heisenberg. En breve explicaré una segunda razón para el título.

¿Por qué digo en el subtítulo que la superconductividad *mal entendida* también empieza con H? El *índice H* es un índice bibliométrico que propuse en el año 2005 para medir la calidad de los investigadores científicos en base a las citas que sus artículos reciben. Está generalmente aceptado como un buen indicador: científicos altamente reconocidos tienen índices H altos, y viceversa. En la física del estado sólido, muchos de los científicos más prominentes que trabajan en superconductividad basándose en la teoría aceptada de la superconductividad tienen un índice H muy alto. En contra de mi propia propuesta del 2005, tengo que decir que en estos casos un índice H alto *no* refleja calidad científica, y no ayuda a que los científicos jóvenes cuestionen la teoría establecida, ya que asumen que si científicos de alto índice H la promueven, debe ser correcta. De ahí que *la superconductividad mal entendida* (y mal enseñada, y así propagada) *empieza con* científicos de alto índice H.

Hay una segunda razón por la cual digo que la superconductividad mal entendida empieza con H. Es en referencia a *Herbert Fröhlich*, un físico alemán que

en el año 1950 publicó un artículo en el que se basa la teoría de superconductividad universalmente aceptada hoy en día. En ese artículo Fröhlich propuso que lo que causa superconductividad es la interacción entre el electrón y las vibraciones de los átomos en el sólido. Toda la evolución posterior de la teoría, hasta el día de hoy, se basó en este principio, y si este principio está equivocado, la teoría se derrumba. Yo digo que Herbert Fröhlich no solo propuso un principio equivocado, sino que también lo hizo de una forma científicamente *deshonesta*, como explicaré en este libro. Esto determinó decisivamente la evolución de este campo de la ciencia en una dirección equivocada, llevando al mal entendimiento de la superconductividad que rige actualmente. De ahí que *la superconductividad mal entendida empieza con Herbert Fröhlich*.

Volviendo a la superconductividad *bien entendida*, aquí viene una segunda razón para el título de este libro. Para entender bien la superconductividad, hay que empezar por cuestionar el entendimiento que propone la teoría establecida de la superconductividad; teoría que la comunidad científica tiene como una verdad absoluta innegable e incuestionable, como una religión. *La superconductividad bien entendida empieza con Herejía*.

Breve historia personal: me gradué de licenciado en física en 1974 en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, me doctoré en física en la Universidad de Chicago en 1980. Desde 1983 soy docente e investigador en la Universidad de California, San Diego. Trabajé siempre en física del estado sólido y publiqué más de 200 artículos en revistas científicas. Algunos fueron muy leídos y citados, otros (entre ellos los mejores en mi opinión) no. Además trabajé un poco en bibliometría, y publiqué 4 artículos sobre ese tema, el 1,6% de mi producción científica, que tienen en total un 22% del total de citas a mis trabajos.

A pesar de que hice física prácticamente toda mi vida en inglés, escribo este libro en castellano porque es mi lengua materna y me resulta más fácil expresarme en ella. Tal vez en el futuro lo traduciré al inglés, pero hasta ese momento este libro estará limitado a lectores de habla hispana. *La superconductividad bien entendida empieza con Hispanohablantes*. Después de leer este libro, el lector entenderá cosas fundamentales de la superconductividad que el 99,99% de los científicos expertos en superconductividad no entienden. En particular, cómo funciona el efecto Meissner, la propiedad más fundamental de los superconductores.

Espero que este libro sea leído. ¿Por quién?

El lector a quien más tengo en mente mientras escribo este libro sabe algo de ciencia. Aprendió las ecuaciones de la mecánica de Newton y las leyes de Maxwell de electricidad y magnetismo, así como la primera y segunda ley de la termodinámica en la escuela secundaria o en la facultad de ingeniería, ciencias exactas o medicina. Además conoce al menos cualitativamente los principios de la mecánica cuántica, aunque sea solo por haber leído algún libro de divulgación sobre el tema. Mi objetivo es que ese lector, si es necesario, refresque su memoria de estos principios físicos y entienda todos los argumentos físicos y fórmulas matemáticas que presento en este libro. Con estos elementos puede hacer un juicio informado sobre si lo que digo es posible y probable que sea cierto, o no. Leyendo este libro, espero que pase un rato agradable y se informe de cosas que no sabía y que le pueden ser útiles en el futuro.

Creo también que a ambos lados de ese lector ideal también hay lectores potenciales que pueden beneficiarse de la lectura de este libro. Aquellos que no saben nada de física tendrán que saltarse las fórmulas matemáticas, pero aun así creo que podrán entender cualitativamente la mayoría de los argumentos que presento. De hecho, los más importantes son tan simples que se pueden entender completamente sin una base científica. Por otro lado, habrá lectores que saben mucho de física, e incluso que son expertos en superconductividad. Espero que estos lectores lean este libro con la mente abierta a la posibilidad de que muchas cosas que leyeron en otros libros posiblemente no están bien.

Además, creo que todos los lectores pueden encontrar interesante el aspecto sociológico del tema que desarrollo, relativo a cómo avanza y no avanza la ciencia y cómo la tendencia a preservar el *statu quo* puede retrasar seriamente el avance científico.

Más que nada, espero que este libro estimule a algunos lectores a contribuir al avance del entendimiento de la superconductividad en el futuro, de esa forma ayudando a que este fenómeno tan singular y fascinante llegue a ocupar lo antes posible el lugar prominente que merece en la ciencia y la tecnología, que promete desde hace mucho tiempo pero aún no ha realizado.

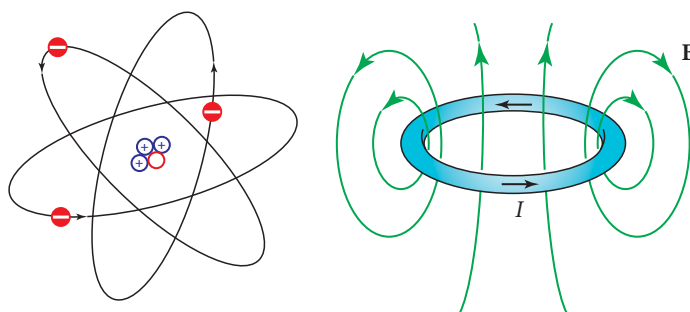


## PARTE I

# Visión general de la superconductividad

## Introducción

Como mencioné en el prefacio, los superconductores se comportan en cierto modo como átomos gigantes: los electrones se mueven continuamente sin disipar energía, como se muestra esquemáticamente en la figura 1.1.



**Figura 1.1.** Izquierda: en un átomo los electrones se mueven continuamente sin disipar energía. Derecha: en un anillo superconductor con corriente  $I$ , los electrones se mueven continuamente sin disipar energía. Las líneas representan el campo magnético  $\mathbf{B}$  generado por la corriente. En la figura de la izquierda la escala es aproximadamente 1:0,0000001, mientras que en la de la derecha es 1:1.

Los materiales superconductores tienen dos propiedades fundamentales cuando se enfrían por debajo de su temperatura 'crítica',  $T_c$ , que varía con cada material: (1) la resistencia a la corriente eléctrica se hace súbitamente exactamente cero, es decir, la corriente eléctrica fluye sin ninguna resistencia ni gasto de energía (efecto descubierto en 1911 por H. Kammerlingh Onnes); y (2) si el material se encuentra cerca de un imán, en el estado normal (a temperatura  $T > T_c$ ) no hay esencialmente ninguna fuerza entre el material y el imán (asumimos que el material no es un

metal ferromagnético como el hierro o el níquel, ya que en ese caso sí habría una fuerza). Cuando el material se enfría por debajo de la temperatura crítica, aparece súbitamente una fuerza *repulsiva* entre el material que se hizo superconductor y el imán. Esto se debe a que en el superconductor comienza a circular una corriente eléctrica que genera un campo magnético opuesto al campo del imán. Este es el efecto Meissner, que fue descubierto en 1933 por Meissner y Ochsenfeld, o sea 22 años después de descubrirse el efecto (1). Volveremos a hablar muchas veces del efecto Meissner debido a su importancia fundamental.

En el año 1957 se formuló una teoría para explicar la superconductividad, la teoría BCS, que supuestamente explica los fenómenos que acabo de describir. Esta teoría, debida a los físicos Bardeen, Cooper y Schrieffer (premiados con el Nobel de física en 1972), también llamada ‘teoría convencional’ de la superconductividad, es *universalmente* aceptada como correcta para describir la mayoría de los materiales superconductores, los llamados ‘superconductores convencionales’. En esta categoría se incluyen todos los superconductores que se conocían en 1957, en particular los materiales más simples, como los elementos superconductores (por ejemplo, plomo, niobio, aluminio, estaño) y los compuestos y aleaciones de 2 o 3 elementos.

Sin embargo, en los últimos 40 años se descubrieron otros materiales superconductores, los llamados ‘superconductores no convencionales’ (los óxidos de cobre, por ejemplo) para los cuales, aunque existe acuerdo general de que la teoría BCS no los describe correctamente, no hay acuerdo sobre la teoría alternativa que los explica. En general estos materiales ‘no convencionales’ superconducen a temperaturas más altas que los convencionales, y por lo tanto son más interesantes tecnológicamente.

El ‘Santo Grial’ de la superconductividad son los materiales que superconduzcan en condiciones de temperatura y presión ambientales, lo cual ampliaría enormemente el uso de superconductores para aplicaciones prácticas con gran beneficio para la sociedad. Actualmente, el superconductor más ‘caliente’ a presión ambiental,  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$  (también llamado Hg-1223), superconduce a temperatura  $\sim 135$  K, o sea  $-138^\circ\text{C}$ , es decir, 138 grados centígrados por debajo de la temperatura de congelación del agua. ¡Falta un trecho por recorrer!

## La superconductividad a vuelo de pájaro: héroes y villanos

Como ya mencioné, el físico holandés Heike Kammerlingh Onnes descubrió la superconductividad en 1911, tres años después de haber logrado licuar helio, lo que le permitió alcanzar las temperaturas más bajas nunca alcanzadas antes. Onnes quería saber qué ocurría con la resistencia eléctrica de los metales cuando se enfriaban. Había dos hipótesis: (1) los electrones se ‘congelarían’, entonces la resistencia se haría infinita y el metal se convertiría en un aislante, o (2) al congelarse el movimiento de los iones, cuyas vibraciones causan resistencia al chocar con los electrones, la resistencia eléctrica se iría gradualmente a cero. Sorprendentemente, Onnes encontró algo que nadie esperaba: a una temperatura crítica de 4,2 K (4,2 grados por encima del cero absoluto), la resistencia del mercurio saltaba de un valor finito a cero, el material se convertía en un ‘super’conductor por debajo de esa temperatura.



**Figura 2.1.** Héroes de la superconductividad (de izquierda a derecha): H. Kammerlingh Onnes, Walther Meissner, Fritz London, Heinz London, John Bardeen.

Onnes reconoció inmediatamente la importancia fundamental de su descubrimiento, y siguió investigando intensamente el fenómeno. Poco después, descubrió que varios otros metales, así como compuestos binarios, exhibían el mismo comportamiento, cada uno a su propia temperatura crítica. En 1914, haciendo experimentos con la aplicación de campos magnéticos, estableció la existencia de un campo magnético crítico por encima del cual el estado superconductor se destruye, distinto para cada material. También demostró la existencia de una corriente crítica máxima que puede transmitir un superconductor, que depende del material. Todos ellos descubrimientos muy importantes.

Pero Onnes también cometió un error. En 1924 hizo experimentos enfriando una esfera en presencia de un campo magnético, y encontró que cuando la esfera pasaba del estado normal al estado superconductor el campo magnético no cambiaba. No le sorprendió, era lo que se esperaba de acuerdo con la teoría del electromagnetismo. Pero el resultado estaba mal, y Onnes perdió la oportunidad de descubrir otro efecto fundamental, el ahora llamado efecto Meissner.

Por supuesto, Onnes es indiscutiblemente un héroe. *La superconductividad bien entendida empieza con Heike Kammerlingh Onnes*, ciertamente. En 1913 fue más que merecidamente premiado con el premio Nobel de física, por la superconductividad y otros logros científicos.

El siguiente paso experimental de fundamental importancia fue el descubrimiento de los físicos alemanes Walther Meissner y Robert Ochsenfeld, en 1933: en presencia de un campo magnético, cuando un metal se hace superconductor, se genera *espontáneamente* una corriente eléctrica cerca de la superficie del material que crea en el interior un campo magnético exactamente opuesto al que existía, de lo que resulta un campo magnético nulo en el interior del superconductor. Esta es la causa de la fuerza repulsiva entre el superconductor y el imán que mencioné en la Introducción. Este efecto fue totalmente inesperado, ya que se esperaba que los campos magnéticos no podían ser modificados en un conductor perfecto (es decir, de resistencia nula) como es un superconductor.

¿Por qué Kammerlingh Onnes no había encontrado este efecto en su experimento en 1924? Primero, no lo estaba buscando, nadie se lo esperaba. Segundo, para ahorrar en la cantidad de helio líquido necesaria para enfriar el superconductor,

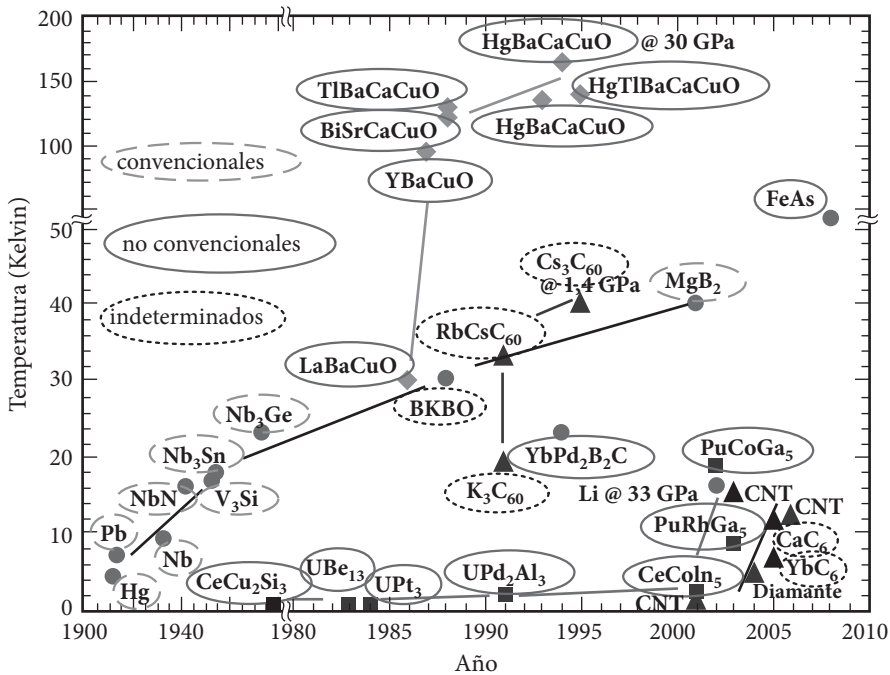
## Materiales superconductores a vuelo de pájaro

Hay superconductores ‘convencionales’, ‘no convencionales’ e ‘indeterminados’. Un compendio detallado sobre los materiales superconductores divididos en 32 clases (12 convencionales, 11 no convencionales y 9 indeterminados) se puede consultar en la referencia [1]. En la figura 3.1 se muestran algunos materiales superconductores, su temperatura crítica y el año de su descubrimiento.

Los superconductores ‘convencionales’ son aquellos materiales sobre los que hay acuerdo general en que están regidos por la teoría convencional de la superconductividad, BCS. En particular, la interacción electrón-fonón es la que produce el apareamiento de los electrones que da lugar a la superconductividad. Incluyen esencialmente todos los materiales superconductores que se conocían antes del año 1980, así como muchos otros descubiertos después de ese año. En particular, todos los *elementos* que son superconductores (p. ej., Hg, Pb, Nb) son considerados superconductores convencionales, así como sus compuestos binarios (p. ej., Nb<sub>3</sub>Ge) y aleaciones. Se creía que la temperatura crítica más alta posible para los materiales convencionales era de unos 25 K. Sin embargo, en el año 2001 se descubrió el diboruro de magnesio (MgB<sub>2</sub>), considerado convencional, cuya temperatura crítica es 39 K.

Los superconductores ‘no convencionales’ son aquellos materiales sobre los que hay acuerdo general que NO están regidos por la teoría convencional de la superconductividad, BCS. Los más importantes son los óxidos de cobre (materiales con CuO en la figura 3.1, también llamados cupratos) descubiertos en 1986, con

temperaturas críticas que llegan a los 160 K. En el 2008 se descubrió otra familia importante de superconductores no convencionales, compuestos de hierro y arsénico (FeAs) (pnictides de hierro), con temperaturas críticas de hasta 60 K. Otros ejemplos de superconductores no convencionales son los de ‘fermiones pesados’ ( $UBe_{13}$ ,  $UPt_3$ ) y compuestos orgánicos.



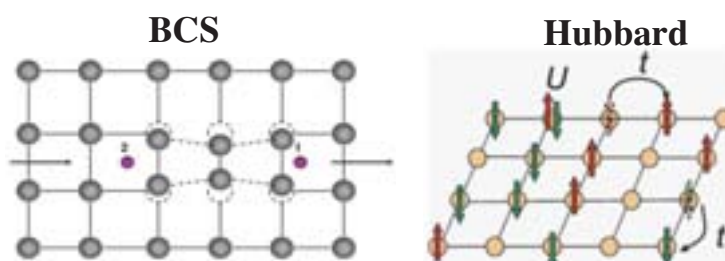
**Figura 3.1.** Algunos materiales superconductores, su temperatura crítica y el año en que fueron descubiertos.

Los superconductores ‘indeterminados’ son aquellos materiales sobre los que no hay acuerdo general en cuanto a si son convencionales o no convencionales: unos creen una cosa y otros lo contrario. Algunos ejemplos son los bismutatos (BKBO) y compuestos de carbono con la molécula  $C_{60}$  ( $Cs_3C_{60}$ ).

Si observa la figura 3.1, el lector verá que para ser clasificado como ‘no convencional’ no es indispensable que el superconductor tenga temperatura crítica alta. Muchos superconductores considerados no convencionales tienen temperatura crítica comparable o menor que la de los convencionales, pero tienen otras características que en apariencia no se explican con la teoría BCS; por ejemplo, la dependencia del calor específico con la temperatura. El consenso general es que

## BCS y Hubbard: teorías de superconductividad que no la explican

En la mente de los físicos que trabajan en superconductividad está firmemente establecido que la teoría BCS con la interacción electrón-fonón (la figura 4.1 panel izquierdo la muestra esquemáticamente) describe los materiales superconductores convencionales. Es algo que no se puede ni examinar ni cuestionar. Y tampoco es algo que se puede refutar experimentalmente. Si un material no se ajusta en algún aspecto a lo que se espera según la teoría BCS, primero se trata de ver si haciendo el cálculo más complicado, por ejemplo extendiendo el modelo para que tenga más parámetros ajustables, se puede describir el experimento. Si no se puede, simplemente se declara que el material es 'no convencional', no descrito por BCS.



**Figura 4.1.** Física microscópica de las teorías BCS y Hubbard. En BCS, los electrones se aparean por la atracción efectiva que resulta del desplazamiento de los iones. En Hubbard, los electrones se repelen fuertemente con energía  $U$  cuando están en el mismo sitio.



¿Cómo se puede avanzar científicamente con esa actitud? Es una actitud religiosa, ningún dato de la realidad puede afectar a una creencia teológica.

Es notable que en la época temprana de la superconductividad, antes de BCS, los científicos buscaban *la* explicación de la superconductividad. Es decir, una *única* explicación que se aplicara a todos los materiales superconductores. Es una actitud lógica. La superconductividad es un fenómeno tan especial, tan distinto del comportamiento típico de los materiales a escala macroscópica, que es ilógico pensar que haya tres, cinco o diez explicaciones distintas del fenómeno, con distintas simetrías, como se mostró en la figura 3.2. Es más lógico pensar que hay un único mecanismo y una única simetría, y si hay algunas características que parecen ser distintas en distintos materiales, son detalles accesorios que no son esenciales para aquello que determina que haya superconductividad en esos materiales.

Inmediatamente después de BCS, en 1957, esta siguió siendo la actitud de la comunidad científica, y cuando algún material mostraba discrepancia con las predicciones de BCS, se invocaba alguna otra física para explicar esta discrepancia. Por ejemplo, si la  $T_c$  encontrada era mucho más baja que la que se espera con BCS, o incluso cero, se decía que el material tenía 'fluctuaciones de espín' que suprimían la superconductividad BCS; o que los electrones tenían una repulsión de Coulomb mayor en esos materiales. Pero llegó un momento en el que esta actitud se hizo insostenible, en particular después del descubrimiento de los cupratos en 1986, cuando hubo que aceptar que BCS con la interacción electrón-fonón no puede explicar la superconductividad de todos los materiales superconductores. Hoy en día no hay nadie que no acepte esto.

Pero entonces, cuando se descubre un material superconductor nuevo que no se ajusta a la teoría BCS, en lugar de preguntarse si tal vez podría ser que BCS no esté bien, los científicos dicen ese material es *no convencional* y BCS no se aplica a él. Excelente excusa. En otras palabras, la teoría BCS no es falsificable si se encuentran materiales que no se ajustan a ella: la teoría no está mal, es el material el que está mal.

Algunos comentarios típicos (textuales traducidos del inglés) que recibo de árbitros de publicaciones científicas cuando escribo artículos que desarrollan una física de la superconductividad que no es parte de BCS, y por lo tanto la cuestión, son los siguientes:

## Huecos y electrones en sólidos: la clave de la superconductividad

La idea de *hueco* es sencilla. Consideremos una caja en la que caben exactamente  $N$  objetos. Si en la caja hay  $n$  objetos, con  $n$  menor que  $N$ , podemos decir que la caja tiene  $n$  objetos o que tiene  $N - n$  huecos. Supongamos que los objetos son electrones, que tienen carga eléctrica negativa, y que hay carga positiva, por ejemplo en las paredes de la caja, que la neutraliza. Podemos decir entonces que la ausencia del electrón, el hueco, tiene carga eléctrica positiva de la misma magnitud.

Werner Heisenberg introdujo el concepto de huecos en 1931 [1], en primer lugar para explicar espectros ópticos de átomos y moléculas. En los átomos hay capas que pueden contener 8 electrones. El átomo de argón (Ar), por ejemplo, tiene 8 electrones en su última capa, es decir, está llena. El átomo de cloro (Cl), situado inmediatamente a la izquierda en la tabla periódica (Fig. 3.3) tiene 7 electrones, o equivalentemente, 1 hueco.

Al igual que los átomos, los sólidos también tienen ‘capas’, que se llaman ‘bandas’. Cuando una banda está llena de electrones y no hay otras bandas de energía cercanas, los electrones no tienen lugar para moverse y el sólido es un aislante, no puede conducir electricidad. Cuando la banda está llena parcialmente, hay lugar para que los electrones se muevan a estados de energía cercana con momento finito, y el sólido conduce electricidad, es un metal. Si en la banda caben  $N$  electrones y tiene solamente  $n$  electrones, podemos decir que la corriente eléctrica es transportada por  $n$  electrones de carga negativa, o por  $(N - n)$  huecos de car-

ga positiva. Para una dirección dada de la corriente, los electrones se mueven en dirección opuesta a la de los huecos. Los huecos se mueven en la dirección de la corriente, mientras que los electrones en dirección opuesta. En la figura 5.1 se representa el movimiento de un electrón de derecha a izquierda y, equivalentemente, el movimiento de un hueco de izquierda a derecha.



**Figura 5.1.** Un hueco (el círculo de puntos) se mueve hacia la derecha, del segundo lugar al tercer lugar en la fila; mientras que, equivalentemente, un electrón se mueve hacia la izquierda, del tercer lugar al segundo lugar.

Es importante aclarar que al referirnos a una banda no debemos hablar de electrones y huecos al mismo tiempo; tenemos que decidir: o hablamos de electrones, o hablamos de huecos. ¿Cómo decidimos? Muy sencillo. Si la banda está llena menos de la mitad, hay menos electrones que huecos, entonces hablamos de electrones. Si está llena más de la mitad, hay menos huecos, y entonces hablamos de huecos y nos olvidamos de los electrones.

¿Entonces es una cuestión de lenguaje que podemos decidir por esta convención u otra? No realmente. Hay una magnitud física que podemos medir en el laboratorio, que nos dice si la banda está llena más o menos que la mitad, y en consecuencia si los portadores de carga son huecos o electrones: el coeficiente de Hall mencionado antes, que se denota  $R_H$ .

Para entender el coeficiente de Hall, debemos recordar la fórmula de la fuerza que ejercen los campos eléctricos y magnéticos sobre las cargas, la llamada fuerza de Lorentz. La fórmula es

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B} \equiv \vec{F}_E + \vec{F}_B \quad (5.1)$$

En esta fórmula,  $q$  es la carga eléctrica de una partícula,  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  son campos eléctricos y magnéticos,  $\vec{v}$  es la velocidad de la partícula y  $c$  es la velocidad de la luz, 300 000 km/s.

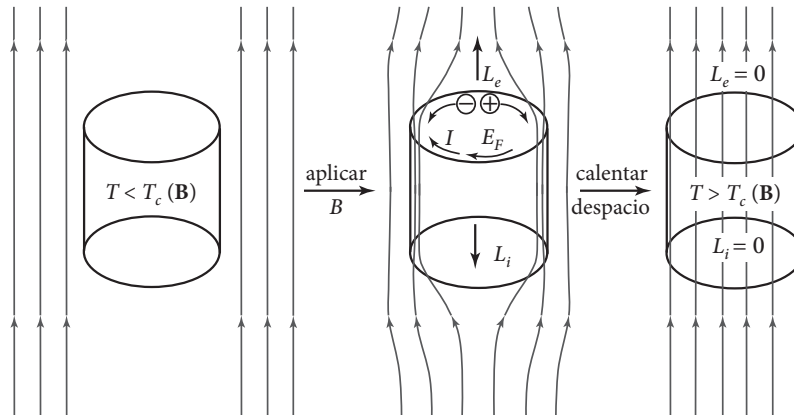
La figura 5.2 muestra lo que pasa en una 'barra de Hall' (*Hall bar*) usada por Edwin Hall, un estudiante de doctorado en Johns Hopkins University en 1879, cuando

## PARTE II

Las preguntas claves  
que hay que responder

## La pregunta más simple en superconductividad, que BCS no explica

Antes de empezar a discutir las teorías de la superconductividad, me gustaría plantear una pregunta aparentemente trivial sobre superconductividad. ¿Cómo se detiene la corriente en un superconductor?



**Figura 6.1.** Cuando se aplica un campo magnético a un superconductor (panel izquierdo) se genera una corriente superficial  $I$  que impide que el campo penetre en el interior del superconductor (panel central). Si ahora subimos la temperatura, el material deja de ser superconductor, la corriente se detiene y el campo magnético penetra en el interior del cilindro (panel derecho). Cómo ocurre este proceso es un misterio.

Veamos la figura 6.1. En el panel izquierdo hay un cilindro superconductor al que se le está por aplicar un campo magnético  $B$ . Cuando se aplica el campo  $B$ , se genera cerca de la superficie del cilindro una corriente eléctrica  $I$  que circula en

sentido horario, lo que se corresponde con electrones que giran en sentido antihorario. Esta corriente  $I$  genera un campo magnético en el interior del cilindro que apunta en dirección opuesta al campo  $B$  aplicado, es decir, hacia abajo. Sumado al campo  $B$  aplicado, anula el campo total en el interior del superconductor en el panel central de la figura 6.1. Como ya explicamos antes, los superconductores no toleran tener campos magnéticos en su interior.

Para entender el proceso por el cual se pasa del panel de la izquierda al panel central, basta conocer la ley de Faraday, formulada matemáticamente por el físico inglés James Clerk Maxwell en 1861. Dice que cuando un campo magnético  $B$  cambia en el tiempo se induce un campo eléctrico  $E_F$ , el campo de Faraday, en dirección tal que induce una corriente eléctrica que a su vez genera un campo magnético que se opone a que el campo magnético cambie. En otras palabras: en el panel de la izquierda no hay campo magnético en el interior del superconductor. Si tratamos de introducirlo, por la ley de Faraday se genera un campo eléctrico  $E_F$  (panel central) que impulsa la corriente  $I$ , que a su vez genera un campo  $-B$  que mantiene el interior del material sin campo magnético neto, como se muestra en el panel central de la figura 6.1. Es como si en la superficie del cilindro hubiese una barrera que impide que las líneas de campo  $B$  penetren en él. Si el material no fuera superconductor, la corriente eléctrica inducida por el campo de Faraday decaería en el tiempo y finalmente desaparecería, entonces el campo  $B$  aplicado penetraría en el cilindro.

En el superconductor, la corriente eléctrica persiste mientras el material está por debajo de su temperatura crítica, y el campo  $B$  no penetra. ¿Qué pasa si calentamos el superconductor a una temperatura mayor que su temperatura crítica y pasa al estado normal? La corriente dejará de circular en el metal normal, ya que no hay ninguna batería conectada para mantenerla. El campo magnético penetra en el cilindro, como se muestra en el panel derecho de la figura 6.1.

Pregunta: ¿cómo se detiene la corriente en el proceso partiendo del panel central de la figura 6.1 al panel derecho?

La respuesta intuitiva es que cuando el superconductor se hace normal, la resistividad se hace finita. La corriente se detiene y disipa su energía en forma de calor. Microscópicamente, los portadores chocan con los iones del sólido, pierden su energía cinética y su momento mecánico, y se detienen.

## Efecto Meissner y teoría de London

Para avanzar en el entendimiento de la superconductividad, la teoría BCS y la teoría alternativa de huecos, debemos entender con cierto detalle el efecto Meissner y la explicación fenomenológica propuesta por los hermanos London.

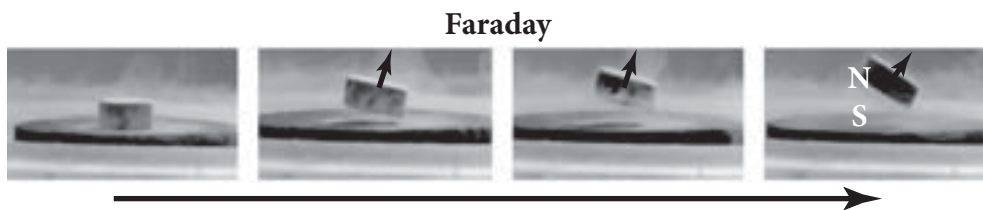
Como vimos en el capítulo anterior, la ley de Faraday dice que un cambio en el flujo magnético aplicado a un material induce un campo eléctrico (llamado “campo de Faraday”) que genera una corriente eléctrica que a su vez genera un campo magnético que se *opone* al cambio de flujo magnético original.

A esto hay que agregar que la corriente que genera el campo de Faraday depende de la conductividad del material. Si el material es un aislante (o si no hay material, sino un espacio vacío) la corriente es cero; el campo de Faraday existe pero no tiene ningún efecto. Si el material es un conductor perfecto, la corriente es máxima (es el caso discutido en el capítulo 6). En el primer caso, el campo magnético generado por esta corriente es, obviamente, cero, y en el segundo caso es tal que cancela completamente el cambio en el flujo magnético inicial, entonces el flujo magnético no cambia. En otras palabras, el flujo magnético en un conductor perfecto está ‘congelado’, sea lo que sea no puede cambiar (en el capítulo 6 era cero en el panel de la izquierda y por la ley de Faraday quedó en cero en el panel central). Esto está relacionado con el teorema de Alfvén que mencionamos y al cual volveremos más adelante.

Eso nos dice que si un metal con un campo magnético en su interior se convierte en un conductor perfecto al bajar su temperatura, el campo magnético interior debería quedar congelado. ¡Los superconductores hacen exactamente *lo contrario*!

Para un metal normal, es decir, intermedio entre un aislante y un conductor perfecto, el campo de Faraday produce una corriente y un campo magnético resultante que mitiga el cambio de flujo magnético inicial, pero no lo anula totalmente. Con el tiempo esta corriente decae por resistencia, y el campo magnético aplicado puede cambiar.

En una palabra, a la ley de Faraday no le gustan los *cambios* de campo magnético, se opone a ellos como puede. Esto es el equivalente a una persona ultraconservadora. Veamos un ejemplo.



**Figura 7.1.** Ilustración de la ley de Faraday. La flecha horizontal indica la dirección del proceso. Las flechas verticales indican una fuerza externa que aplicamos para levantar un imán que reposa inicialmente sobre un metal normal. El movimiento convierte al metal en un imán que atrae al otro imán, haciendo más difícil que lo levantemos. O sea, el metal se resiste a que levantemos el imán.

En el panel izquierdo de la figura 7.1, un imán, llamémosle ‘nuestro imán’, reposa sobre un disco de metal. Si miramos la figura de izquierda a derecha, en el siguiente panel aplicamos una fuerza a nuestro imán, indicada por la flecha vertical, para levantarlo. Podemos imaginarnos que la flecha vertical es nuestra mano, tirando hacia arriba. Eso hace que el imán se eleve. Pero al mismo tiempo en el metal aparece una corriente eléctrica, inducida por la ley de Faraday, que lo convierte en un imán de polaridad opuesta a la de nuestro imán. Entonces se genera un imán con el polo sur (S) situado en la superficie superior del metal que atrae al polo norte (N) de nuestro imán, y eso hace que sea más difícil moverlo hacia arriba. La fuerza que tenemos que aplicar a nuestro imán para levantarlo no es solo para vencer la gravedad, sino también para vencer la atracción entre los dos imanes. Si el metal fuera un conductor perfecto, esta atracción sería infinita y no nos sería posible levantar a nuestro imán, o también levantaríamos el metal, estarían como pegados.

Este proceso también funcionaría a la inversa. Si acercamos un imán a un metal, este se convierte en un imán con polaridad tal que repele al imán que estamos



## Puntos esenciales de BCS, y por qué no explica el efecto Meissner

En breves palabras: *la teoría BCS propone que la superconductividad surge cuando los electrones se aparean y se condensan en un estado cuántico con coherencia de fase macroscópica*. Veamos lo que esto significa.

Primero y principal, los electrones tienen que aparearse, es decir, formar pares. Esto requiere que haya una interacción atractiva entre dos electrones, pero la interacción de Coulomb entre dos electrones es repulsiva. ¿Cómo se vence? BCS propone [1] que la interacción de los electrones con las vibraciones de los iones en el sólido (fonones) produce una interacción *retardada* entre electrones que es atractiva. Cualitativamente, primero pasa un electrón cerca de un ion positivo, lo atrae y el ion se acerca un poco. Un segundo electrón que viene detrás tiene una interacción atractiva más fuerte con ese ion debido a que se movió, y esto corresponde a una interacción *efectiva* entre el primer y el segundo electrón que es atractiva. La interacción es *retardada* porque hay un intervalo de tiempo entre que el primero y el segundo electrón están en la vecindad del mismo ion, durante el cual el ion se mueve.

La idea de que la superconductividad se debe a la interacción entre electrones y fonones, o sea las vibraciones del sólido, fue introducida por Herbert Fröhlich en 1950. Discutiremos esa parte de la historia, que es muy importante, más adelante. No entraremos en detalle aquí con respecto a esta interacción. Matemáticamente el tratamiento no es simple, y lo más importante es que no se puede determinar exactamente cómo compite esta interacción atractiva, denotada por el símbolo  $\lambda$ ,

con la interacción de Coulomb repulsiva entre electrones, denotada por el símbolo  $\mu^*$ . En particular, lo importante es saber cuál de ellas gana. Los expertos sostienen que saben cómo calcular  $\lambda$  partiendo de primeros principios, pero en general admiten que no saben cómo calcular  $\mu^*$ , y simplemente postulan que en los materiales que son superconductores  $\mu^*$  es suficientemente pequeña de forma tal que  $\lambda - \mu^*$  es positiva. Entonces, con esta condición deducen que el sistema entra en estado superconductor a bajas temperaturas. Pero en general no hay forma de predecir en qué materiales  $\lambda - \mu^*$  es positivo y en cuáles es negativo. En consecuencia, no pueden predecir, si no saben la respuesta de antemano, qué materiales pueden volverse superconductores y cuáles no.

¿Por qué es necesario que los electrones se apareen? Porque los electrones son fermiones, con espín fraccional  $1/2$ , que obedecen el llamado principio de exclusión de Pauli, el cual prohíbe que formen un estado colectivo como es la superconductividad. Cuando se aparean, el espín del par se hace entero, y las entidades de espín entero se llaman bosones. Desde 1924 se sabe que los bosones se pueden condensar en un estado coherente macroscópico, como es el estado superconductor. Este proceso de condensación se conoce con el nombre 'condensación de Bose'. Es el mismo proceso, se cree, que hace que el helio líquido se convierta en un superfluido a bajas temperaturas. Consideraremos el helio líquido en el capítulo 20.

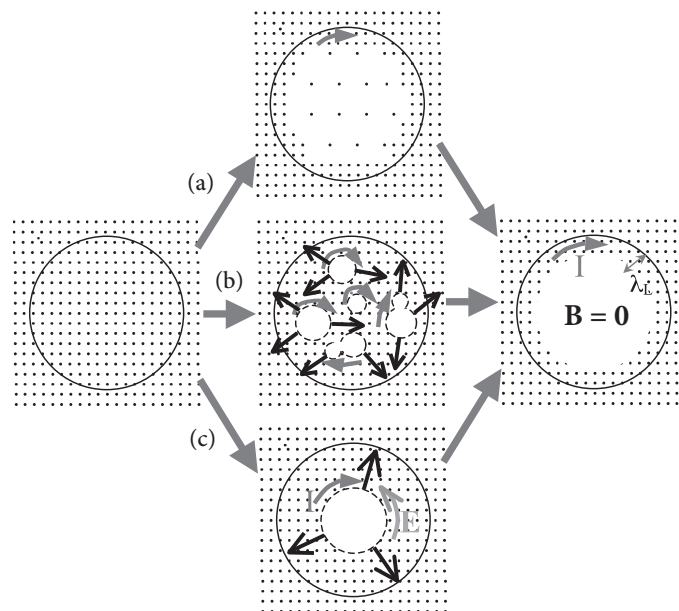
Bardeen, Cooper y Schrieffer (BCS) mostraron en 1957 [1] cómo se puede formar, usando pares de fermiones, un estado cuántico macroscópico que tiene características que parecen describir un superconductor. La función de onda de BCS es de la forma

$$|\Psi\rangle = \prod_k (u_k + v_k c_{k\uparrow}^\dagger c_{-k\downarrow}^\dagger) |0\rangle \quad (8.1)$$

El índice  $k$  indica el momento de cada electrón, el operador  $c_{k\uparrow}^\dagger$  crea un electrón de espín hacia arriba y momento  $k$ , el operador  $c_{-k\downarrow}^\dagger$  crea un electrón de espín hacia abajo y momento  $-k$ . La combinación  $c_{k\uparrow}^\dagger c_{-k\downarrow}^\dagger$  crea lo que se llama un par de Cooper, debido a que Cooper, uno de los autores de BCS, propuso estos pares un año antes, en 1956. El formalismo de BCS nos dice cómo calcular las amplitudes  $v_k$ ,  $u_k$  dadas ciertas características de los estados electrónicos del sólido, las interacciones  $\lambda$  y  $\mu^*$ , etc.

## El efecto Meissner con más detalle

Consideremos más detalladamente el proceso de expulsión de un campo magnético aplicado  $B$  del interior de un metal que se enfría y pasa al estado superconductor. La figura 9.1 muestra tres rutas concebibles.

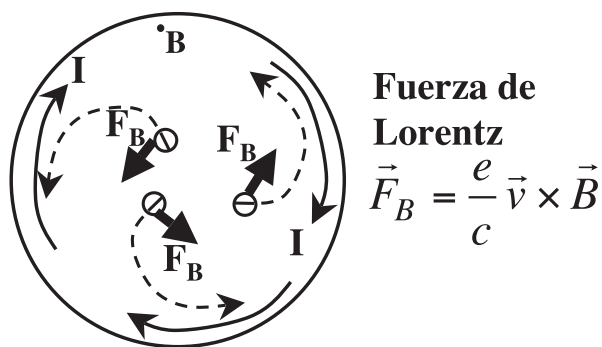


**Figura 9.1.** Cilindro visto desde arriba. Inicialmente (panel izquierdo) el cilindro está en el estado normal y existe un campo magnético en el interior en dirección perpendicular al papel, denotado por los puntitos. La densidad de los puntitos denota la intensidad del campo magnético. La figura muestra tres rutas concebibles para expulsar el campo magnético y llegar al panel derecho, donde no hay campo magnético en el interior y la corriente circula cerca de la superficie. Las flechas negras indican la expansión de los dominios superconductores. Los detalles se discuten en el texto.

## La clave del efecto Meissner: expulsión de carga eléctrica

Tratemos de entender la física del efecto Meissner cualitativamente. Como vimos en la figura 7.3, los electrones que están cerca de la superficie del cilindro adquieren una velocidad en sentido antihorario cuando el sistema pasa del estado normal al estado superconductor en presencia de un campo magnético. La teoría BCS no explica la dinámica del proceso, que parece violar las leyes de la física clásica. ¿Podemos imaginarnos algún proceso que explique esto de una manera sencilla?

La respuesta es sí, como muestra la figura 10.1.



**Figura 10.1.** La figura muestra un cilindro de metal normal visto desde arriba, que inicialmente tiene un campo magnético uniforme  $B$  en todo el interior que apunta hacia afuera del papel. Si los electrones son expulsados del interior en sentido radial hacia afuera, la fuerza de Lorentz los desvía en sentido azimutal antihorario para dar la trayectoria indicada con línea discontinua, lo cual genera una corriente  $I$  en sentido horario cerca de la superficie.

## PARTE III

# La teoría convencional, y los nuevos materiales superconductores

## Teorías de superconductividad pre-BCS, que explican más que BCS

Es interesante viajar atrás en el tiempo y estudiar teorías de superconductividad que se formularon antes de BCS. No llegaron muy lejos, pero tenían ideas físicas muy interesantes. En cambio, a partir de BCS los físicos dejaron de hacer física y se dedicaron a hacer matemática, y así perdieron contacto con la realidad. Desarrollando la teoría de superconductividad por huecos, descubrí que varias cosas que iba entendiendo habían sido entendidas antes, pero fueron olvidadas cuando se desarrolló la teoría BCS.

No es infrecuente en la historia de la ciencia que ideas tempranas correctas son descartadas usando argumentos que más tarde se descubre que no eran válidos. Un ejemplo bien conocido es el modelo heliocéntrico del sistema solar propuesto por Aristarco de Samos en el año 200 a. C., que fue descartado en favor del modelo geocéntrico de Ptolomeo, modelo que fue aceptado durante los siguientes 15 siglos, hasta que fue reemplazado nuevamente por el modelo heliocéntrico en la astronomía copernicana. Originalmente, el modelo de Aristarco no se consideró válido porque se pensaba que la Tierra debería generar 'viento' en la dirección contraria a la de su movimiento, que no se observaba, y tampoco se observaba paralaje anual de estrellas distantes. Ambos argumentos eran incorrectos: el primero porque la atmósfera se mueve con la Tierra y el segundo porque las estrellas distantes resultaron estar mucho más lejos de lo que se pensaba.

Otro ejemplo menos conocido es el modelo planetario de los átomos, propuesto originariamente por Jean Perrin y Hantaro Nagaoka en los años 1901 a 1904, luego

descartado en favor del ‘modelo del budín de pasas’ de J. J. Thomson, físico muy prominente premiado con el Nobel en 1906 por su descubrimiento del electrón. El modelo de Perrin y Nagaoka no fue aceptado porque los electrones en órbita alrededor de un núcleo tienen aceleración y, según la teoría electromagnética de Maxwell, deberían radiar y perder energía, cosa que no ocurre. El modelo de Thomson resolvía ese ‘problema’. Pero, unos años después, el modelo de Thomson fue a su vez descartado y reemplazado por el modelo planetario del átomo de Ernest Rutherford y Niels Bohr. Simplemente Bohr postuló, correctamente, que las ecuaciones de Maxwell no se aplicaban igualmente al dominio atómico como al dominio macroscópico.

En lo que sigue, discutimos varios aspectos de estas teorías pre-BCS de superconductividad que no fueron incorporados en la teoría BCS, y que reaparecen de alguna forma en la teoría de superconductividad por huecos.

## 1. La interacción de Coulomb como responsable de la superconductividad

En prácticamente todas las teorías pre-BCS se asumía que la interacción de Coulomb entre electrones jugaba un papel fundamental. Esto era muy razonable por lo siguiente: la teoría de Bloch, desarrollada en 1928 para explicar las propiedades de metales normales, prioriza la interacción electrón-ion e ignora la interacción electrón-electrón. No hay una justificación teórica para esto, ya que ambas interacciones tienen magnitud energética  $e^2/r$ , con  $r$  una distancia típica que es del mismo orden para interacciones electrón-ion y electrón-electrón. La justificación para la hipótesis de Bloch era simplemente que da lugar a predicciones *para el metal normal* que explican el comportamiento observado. Por lo tanto es muy natural concluir que las grandes diferencias entre el comportamiento de los superconductores y los metales normales se originan en el “elefante en la habitación”, la interacción de Coulomb grande entre electrones ignorada por Bloch. Bloch mismo lo hipotetizó muy claramente en sus trabajos originales, así como muchos otros teóricos en esta edad temprana. Por el contrario, la teoría BCS continúa ignorando la interacción electrón-electrón y enfatiza aún más la interacción electrón-ion, proponiendo que la pequeña energía resultante de la interacción de los electrones con las desviaciones del ion de su posición de equilibrio, o sea las vibraciones de los iones, es la causa de la superconductividad.

## Fonones y el comienzo del oscurantismo

Antes de 1950 nadie esperaba que las vibraciones de los iones en un sólido (llamadas fonones) tuvieran nada que ver con la superconductividad. En 1950, la coincidencia de dos experimentos y una teoría hizo que eso cambiara. Desde entonces, prácticamente nadie duda que la superconductividad en la mayoría de los materiales, los llamados superconductores convencionales, se origina en la interacción electrón-fonón.

En mayo de 1950 se publicaron dos artículos en la revista *Physical Review*, con autores distintos pero títulos muy parecidos: “Efecto isotópico en la superconductividad del mercurio”, por Emanuel Maxwell [1], y “Superconductividad de isótopos del mercurio”, por Reynolds, Serin, Wright y Nesbit [2]. Estos artículos informaban que se habían encontrado variaciones en la temperatura crítica de distintos isótopos del mercurio, con pesos atómicos que variaban entre  $^{199}\text{Hg}$  y  $^{203}\text{Hg}$ . La temperatura crítica variaba en aproximadamente 0,9% (de 4,126 K a 4,161 K), y la temperatura más alta correspondía a la masa más baja, cuando la masa variaba entre 199 y 203, o sea en un 2%.

Esta variación de la  $T_c$  es muy pequeña pero no se esperaba, y por tanto generó mucho interés en la comunidad científica. ¿Por qué? En primer lugar, los distintos isótopos de un elemento tienen la misma configuración electrónica, por lo que se esperaba que el comportamiento de los electrones en el superconductor no debería verse afectado por la masa del ion. Especialmente sorprendente fue el hecho de que la temperatura crítica aumentaba cuando la masa del ion disminuía, es decir, el material conducía mejor. Se pensaba que los átomos más livianos vibrarían



más y entonces, si las vibraciones aumentaran lo suficiente para modificar la resistencia eléctrica, que es causada por el choque de los electrones con los átomos en vibración, la resistencia debería aumentar, no disminuir cuando la masa del ion disminuía.

El físico teórico John Bardeen se enteró de estos experimentos por una llamada telefónica de Serin el 15 de mayo de 1950. Inmediatamente Bardeen pensó que esto podría estar relacionado con un artículo que él había escrito 9 años antes [3] donde había propuesto que distorsiones estáticas de la red de iones darían lugar a ‘celdas’ que contenían alrededor de  $10^6$  átomos, y que esto reduciría la ‘masa efectiva’ de los electrones y daría lugar a la superconductividad. Bardeen rápidamente adaptó esos argumentos a una distorsión dinámica, y argumentó que esto podría dar lugar a una variación de la temperatura crítica proporcional a la frecuencia de vibración de los iones, y así explicaría lo que habían medido los experimentos de Maxwell y Reynolds et al. La frecuencia de vibración de los iones es inversamente proporcional a  $M^{1/2}$ , con  $M$  la masa del ion, por lo tanto esto predice  $(\Delta T_c/T_c)/(\Delta M/M) = 1/2$ , cercano a lo medido (0,9/2). Apenas una semana después, el 22 de mayo, Bardeen envió un artículo a publicar [4], de menos de una página con apenas 6 ecuaciones, proponiendo esto como la explicación del ‘efecto isotópico’ observado, y proponiendo así una “teoría de superconductividad que depende de la interacción de los electrones de valencia con las vibraciones de punto nulo de la red de iones en el cristal”.

¿Por qué se apuró tanto Bardeen? Porque en ciencia la prioridad es importante: el primero que propone la explicación de un fenómeno se lleva los laureles, si la explicación es correcta. Pero lamentablemente para Bardeen, esta explicación generada con tanta prisa, y que parece ‘traída de los pelos’, nadie la considera correcta. A pesar de ello, desde ese momento Bardeen estuvo convencido de que la interacción de los electrones con las vibraciones de los iones (interacción electrón-fonón) era la clave para entender la superconductividad, y trabajó intensamente en los años siguientes basándose en esa idea. ¿Por qué?

Para entender esto, conozcamos a Herbert Fröhlich, un físico alemán radicado en Inglaterra, donde era profesor en la universidad de Liverpool. Fröhlich estaba pasando en ese momento un semestre sabático en la universidad de Purdue, en Estados Unidos, y nunca antes había trabajado en superconductividad. En ese mismo mayo de 1950, Fröhlich envió a *Physical Review* para publicar un artículo

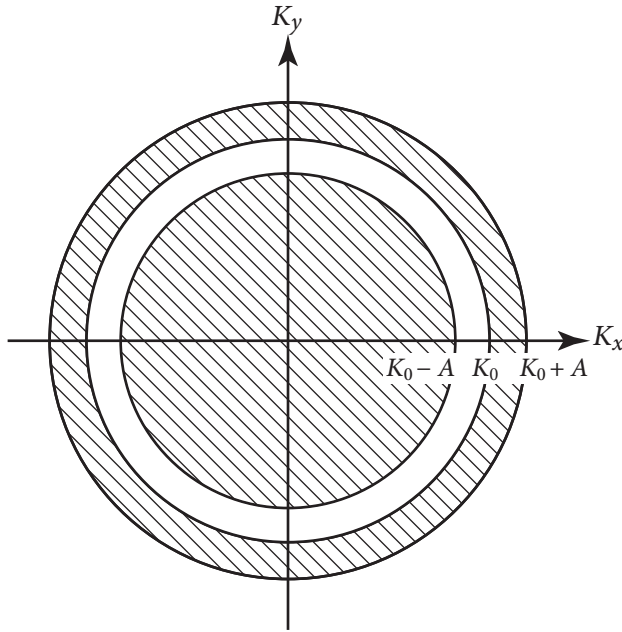
## El ardid de Herbert Fröhlich y sus consecuencias

El 16 de mayo de 1950, la revista *Physical Review* recibió el artículo de Herbert Fröhlich titulado “*Teoría del estado superconductor. I. El estado fundamental en el cero absoluto de temperatura*” citado en el capítulo anterior (ref. 5). En ese artículo, Fröhlich propuso que la interacción entre los electrones y las vibraciones de los átomos en un sólido pueden producir una *redistribución* de estados electrónicos en el espacio de momentos. La distribución en el estado normal es simplemente una esfera en el espacio de momentos, donde todos los estados con momentos menor que un momento máximo (el radio de la esfera) están ocupados por electrones, y los de momento mayor están todos vacíos. La nueva distribución propuesta por Fröhlich se muestra en la figura 13.1, las partes rayadas indican estados ocupados. Aquí, los estados están ocupados hasta un momento máximo  $K_0 - A$ , después hay una brecha entre  $K_0 - A$  y  $K_0$  donde los estados están vacíos, y después hay un anillo de estados ocupados hasta  $K_0 + A$ . En cambio, en el estado normal, los estados hasta  $K_0$  estarían ocupados y los estados con momento mayor que  $K_0$  no.

Fröhlich presenta cálculos que según él indican que si la interacción entre los electrones y las vibraciones del sólido son suficientemente fuertes, esta distribución tiene menor energía que el estado normal, y que la diferencia de energía entre este estado y el estado normal es de la forma

$$\Delta E = \frac{C}{M} \quad (13.1)$$

donde  $C$  es una constante y  $M$  es la masa del ion. Además, presenta argumentos complicados que según él indican que las modificaciones de este estado dan lugar a una corriente eléctrica que no es afectada por resistencia como en un metal normal, y que esto corresponde al estado superconductor, que los electrones van a adoptar a bajas temperaturas.



**Figura 13.1.** Distribución de estados electrónicos en el espacio de momentos en el estado superconductor propuesta por Fröhlich en 1950.

Como motivación para este trabajo, Fröhlich menciona un artículo que había escrito el año anterior sobre cómo un electrón interactúa con las vibraciones iónicas en un cristal iónico [1], y dice que este nuevo trabajo es la extensión natural del mismo formalismo al caso de un metal. El artículo no menciona los experimentos del efecto isotópico en superconductores de Maxwell y Reynolds et al. citados en el capítulo anterior.

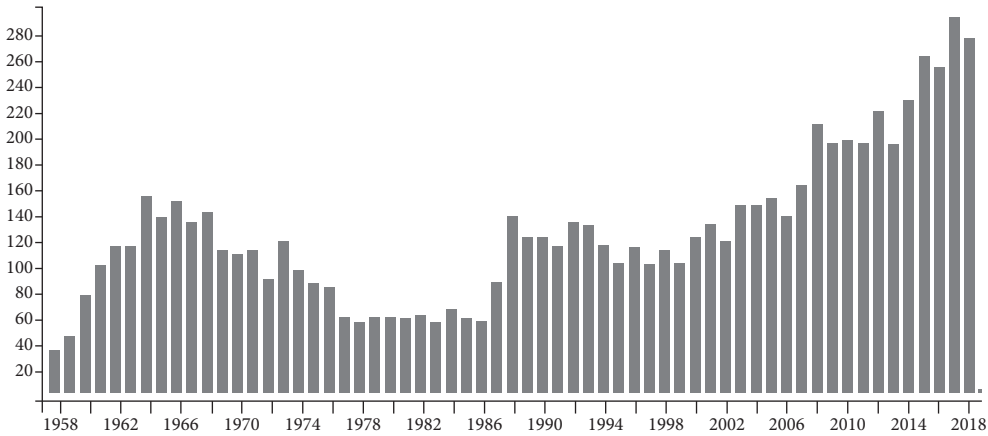
Como también relatamos en el capítulo anterior, tres días después de mandar este artículo a publicar, Fröhlich envía una nota de media página a la revista inglesa *Proc. Phys. Soc.* en la que dice que se acaba de enterar de la medición de efecto isotópico en mercurio, y que su fórmula (Eq. (13.1) arriba) predice exactamente lo que se mide,  $T_c \propto M^{-1/2}$  debido a que  $\Delta E \propto T_c^2$ .

## 1957-1980: La edad de oro de la teoría BCS

Al mismo tiempo que la teoría BCS era publicada a finales de 1957, el periódico estadounidense *New York Times* publicó una historia sobre ella, titulada ‘La teoría de los metales en frío evolucionó’, que comienza diciendo: “Una nueva teoría matemática parece dar por primera vez una explicación del fenómeno de la superconductividad descubierto hace medio siglo”, y agrega: “Los detalles completos del concepto serán publicados en la nueva edición de *Physical Review*, revista de la Sociedad Americana de Física. La edición con fecha Diciembre 1 está ahora en el correo”.

Es muy inusual que un periódico, especialmente del calibre del *New York Times*, escriba sobre una teoría científica al mismo tiempo que se publica en una revista científica. Seguramente esto se debió a la fama que tenía John Bardeen, que había recibido el premio Nobel de física en 1956 (junto con Brattain y Shockley) por la invención del transistor. Ciertamente esto debe haber contribuido a la difusión y aceptación rápida de la teoría.

La teoría BCS atrajo atención de los científicos muy rápidamente. En 1958, en el primer año después de haber sido publicada, aparecieron 36 artículos que citaban el artículo de BCS. En los primeros 5 años, hasta 1962, 498 artículos publicados citan a BCS. La figura 14.1 muestra el número anual de artículos publicados que citan el artículo de BCS desde 1958 hasta 2018, un total de 7866.



**Figura 14.1.** Número anual de artículos que citan el artículo de BCS de 1957.

El artículo de BCS (ref. 1 en capítulo 10) tiene toda una sección, la número V, de 6 páginas, dedicada al efecto Meissner. Pero como discutimos en el capítulo 8, ignora la pregunta más importante: ¿cómo hace el metal normal para expulsar el campo magnético en el proceso de hacerse superconductor?

Nadie criticó ese aspecto de BCS en ese momento ni después. Lo que sí se criticó inicialmente fue que la teoría BCS, en particular la descripción del efecto Meissner, no satisface lo que se llama “invariancia de gauge”, una propiedad matemática que las teorías físicas válidas deben respetar. Esto se planteó y discutió en varios artículos en los años siguientes, pero rápidamente se llegó a la conclusión que extendiendo el tratamiento de BCS era posible satisfacer esta restricción sin alterar sus conclusiones.

En el artículo de BCS y en los años que siguieron se utilizó esta teoría para calcular propiedades de superconductores, y se comprobó que reproducía muchos resultados medidos experimentalmente, como por ejemplo propiedades termodinámicas, ópticas, acústicas, eléctricas, magnéticas, etc. Se desarrollaron nuevas técnicas experimentales, como el tunelaje, que permitieron medir la densidad de estados electrónicos en superconductores y comprobar que coincidían con lo que predecía BCS. Claro que en todos estos cálculos era necesario introducir parámetros en la teoría, que no se calculaban de primeros principios, sino que se ajustaban a experimentos.

## Huecos en los cupratos y en otros materiales

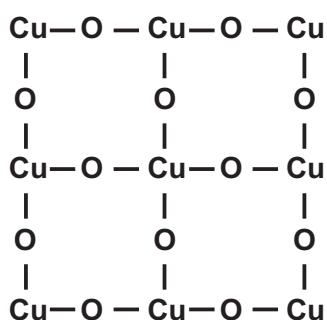
En el año 2006, conmemorando la teoría BCS, la Sociedad Americana de Física escribe [1]: *“La teoría BCS explicó la superconductividad a bajas temperaturas casi 50 años después que fuera descubierta”*. Caracteriza a BCS como *“una de las más exitosas teorías de la física del estado sólido”* y agrega: *“La teoría BCS ha tenido también una importante influencia en teorías de partículas elementales y proporcionó el punto de partida para muchos intentos de explicar los nuevos superconductores a altas temperaturas”*.

Quiero enfatizar la última frase: *“proporcionó el punto de partida para muchos intentos de explicar los nuevos superconductores a altas temperaturas”*. Exactamente ese es el problema. Durante los más de 30 años que han transcurrido desde el descubrimiento de los cupratos superconductores en 1986, los físicos han intentado explicar la superconductividad a altas temperaturas ‘partiendo’ de la teoría BCS, o al menos asumiendo implícitamente que la teoría BCS es correcta para los superconductores a bajas temperaturas [2]. Eso, digo yo, es lo que llevó al cenagal en el que nos encontramos hoy. Para entender los superconductores “no convencionales”, es necesario cuestionar el entendimiento de los superconductores “convencionales”.

La era de la superconductividad a altas temperaturas comenzó en septiembre de 1986, cuando Bednorz y Müller publicaron un artículo cautelosamente titulado *“Posible superconductividad a altas temperaturas en el sistema Ba-La-Cu-O”*, en el que informaban que en ese material la superconductividad parecía comenzar alrededor de 35 K, una temperatura mucho más alta que la máxima  $T_c$  de 23 K que

se conocía. En pocos meses, Chu demostró que en el sistema YBaCuO superconductividad ocurría alrededor de 90 K. Esto fue una revolución, particularmente porque ahora la  $T_c$  superaba los 77 K, la temperatura a la cual se licua el nitrógeno a presión ambiente, lo que hace que los experimentos sean mucho más fáciles y menos costosos. El artículo de Bednorz y Müller tiene 9832 citas, el de Chu 5189.

Todos los cupratos tienen en común planos que contienen cobre y oxígeno en la configuración que se muestra en la figura 15.1. Entre los planos, hay una variedad de otros átomos, dependiendo del material.



**Figura 15.1.** Planos de cobre y oxígeno que dan lugar a superconductividad a altas temperaturas, por razones que aún la comunidad científica no entiende.

La historia de esos meses y años iniciales de la era de la superconductividad a altas temperaturas (*high  $T_c$* ), es muy interesante, pero aquí no entraremos en muchos detalles. Lo importante es señalar que desde el primer momento, y ciertamente hasta el día de hoy, no hubo dudas de que estos materiales no podían ser explicados por la teoría BCS: de ninguna manera la interacción electrón-fonón puede dar lugar a superconductividad a temperaturas tan altas. La comunidad científica se volcó en la búsqueda del mecanismo que explicara la superconductividad en la clase de materiales descubierta por Bednorz y Müller, los llamados ‘cupratos’.

La atención de la mayoría de los físicos, desde el principio hasta el día de hoy, se centró en las propiedades magnéticas de los cupratos. Esto fue en gran parte motivado por un artículo publicado por P. W. Anderson a principios de 1987 titulado “El enlace de valencia resonante en  $\text{La}_2\text{CuO}_4$ ”, donde propuso que en el estado normal el material no era un metal normal, sino un ‘líquido de espín’, que ya contiene electrones apareados debido a interacciones magnéticas, pero aún no tiene la coherencia de fase que caracteriza a un superconductor. Para caracterizar

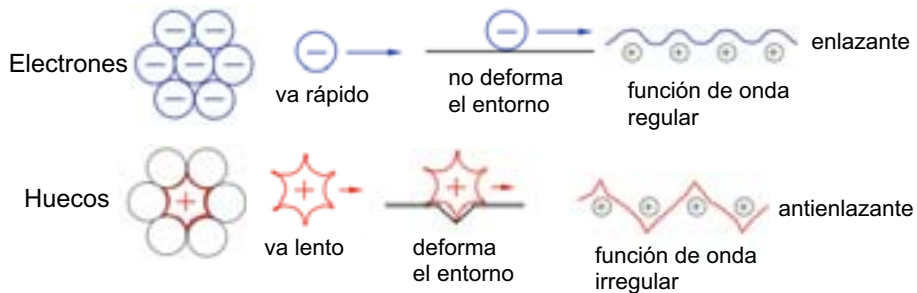
## PARTE IV

# Asimetría electrón-hueco y sus consecuencias



## La asimetría fundamental entre huecos y electrones

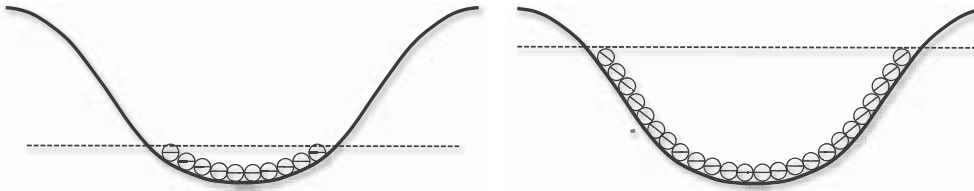
En la figura 16.1, que tengo hace muchos años en mi sitio web, doy una idea intuitiva de algunas diferencias entre electrones y huecos. Veremos de dónde vienen estas diferencias, y qué tienen que ver con la superconductividad. También trataremos de entender por qué en la comunidad científica se considera erróneamente que electrones y huecos son más o menos lo mismo.



**Figura 16.1.** El hueco es la ausencia del electrón. Como se ve en estas figuras, los huecos son muy distintos de los electrones.

En un sólido, los estados electrónicos se organizan en bandas. La figura 16.2 muestra una banda muy simple.

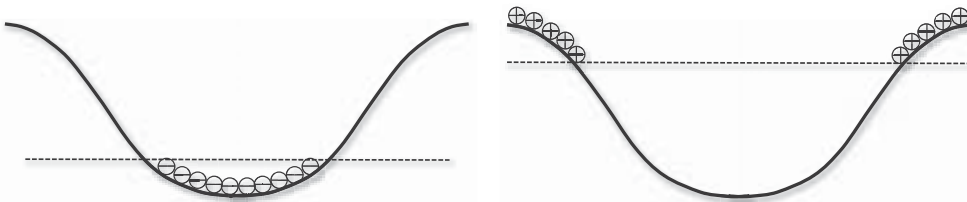
El eje vertical en esa figura es la energía del electrón, el eje horizontal es lo que se llama el impulso de cristal, que representa la inversa de la longitud de onda del electrón. Hay que recordar que en mecánica cuántica las partículas son también



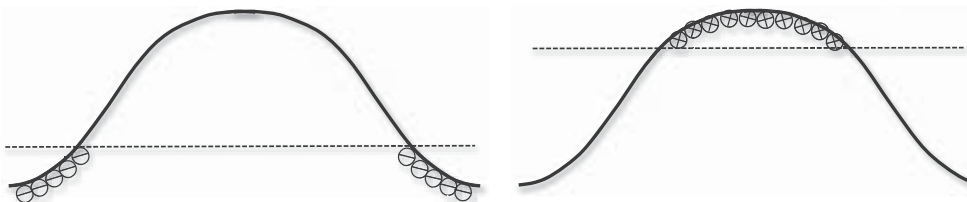
**Figura 16.2.** Banda de estados electrónicos. Energía como función del impulso de cristal, proporcional a la inversa de la longitud de onda del electrón. La línea discontinua indica la energía más alta de estados ocupados, llamada energía de Fermi o nivel de Fermi.

ondas, y las ondas tienen una longitud de onda. La línea discontinua indica la energía máxima de estados ocupados, llamado el nivel de Fermi.

El panel de la izquierda muestra una banda que está casi vacía; en este caso llamamos a los portadores de carga electrones. El panel de la derecha muestra una banda que está casi llena; en este caso llamamos a los portadores de carga huecos. Si medimos el efecto Hall, el resultado será negativo para un metal con la banda de conducción casi vacía como en el panel de la izquierda, y positivo para un metal con la banda de conducción casi llena como en el panel de la derecha. Equivalentemente, podemos pensar que los portadores de carga en la banda de la derecha son huecos, de carga positiva, como muestra la figura 16.3.



**Figura 16.3.** Esta figura es igual que la figura 16.2, pero en el panel derecho mostramos los electrones que faltan en la banda, es decir, los huecos.

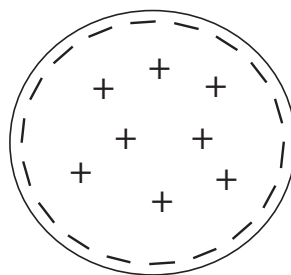


**Figura 16.4.** Las bandas también pueden estar orientadas de forma tal que el máximo de energía esté en el centro.

## Superconductores como átomos gigantes

La idea de que los superconductores son de alguna forma átomos gigantes fue enunciada por muchos investigadores tempranos de la superconductividad, como vimos en el capítulo 11. Pero se referían solamente a las propiedades magnéticas, no a la distribución de carga.

En el año 2001, doce años después de haber comenzado el desarrollo de la teoría de superconductividad por huecos, llegué a la conclusión de que cuando un metal entra en el estado superconductor expulsa electrones desde el interior hacia la superficie. La figura 17.1 es de mi artículo del 2001 [1]. Parece de verdad un "átomo gigante".



**Figura 17.1.** Imagen esquemática de un cuerpo superconductor esférico. La carga negativa se expulsa desde el interior hacia la superficie.

La primera pregunta natural es la siguiente: ¿cómo es posible que en un material que conduce electricidad exista una configuración de carga como la que muestra la figura 17.1? Un metal normal ciertamente no puede tener esa configuración, porque da lugar a un campo eléctrico en el interior. Pero un metal no puede tener

un campo eléctrico en su interior (si no está conduciendo corriente eléctrica). Si lo tuviera, las cargas móviles en el metal se moverían impulsadas por la fuerza eléctrica a posiciones que anulan el campo eléctrico, que es el estado de menor energía.

Por esta razón, nunca antes se había considerado la posibilidad de que los superconductores tengan campos eléctricos en el interior. Pero el argumento que acabo de mencionar para metales no se aplica a los superconductores. La razón es que el superconductor está en un estado cuántico macroscópico. Podemos pensar que el conjunto de los electrones en el superconductor, el llamado 'superfluido', está descrito por una función de onda macroscópica,  $\Psi(\vec{r})$ , totalmente análoga a la función de onda  $\varphi(\vec{r})$  que describe a un solo electrón en el átomo de hidrógeno. La distribución de carga electrónica en el átomo de hidrógeno ciertamente no es homogénea. ¿Por qué? Porque minimiza la suma de energía cinética y energía potencial. La energía potencial quiere acercar el electrón al núcleo todo lo posible, pero eso aumenta la energía cinética, y esta, a su vez, quiere alejar al electrón del núcleo todo lo posible, pero eso aumenta la energía potencial. El resultado es el radio de Bohr  $a_0$ , que es un compromiso entre ambas energías.

Asimismo, en el superconductor no hay ninguna razón *a priori* por la cual la distribución de carga negativa tiene que ser macroscópicamente homogénea, como lo es en un metal normal. Eso minimiza la energía potencial solamente, que es todo lo que importa a nivel macroscópico para el metal normal debido a que este no está en un estado cuántico macroscópico. Pero el superconductor sí lo está.

La física cuántica nos dice que cuando la función de onda se expande la energía cinética cuántica disminuye. Una expresión para la energía cinética cuántica es

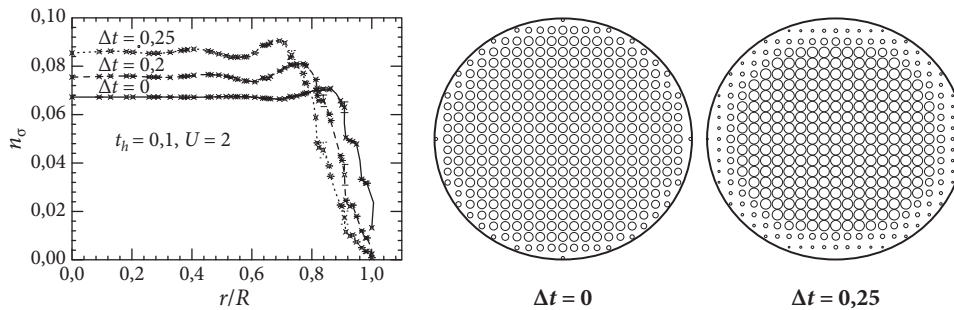
$$E_{cin} = \frac{\hbar^2}{2mr^2} \quad (17.1)$$

donde  $\hbar$  es la constante de Planck,  $m$  la masa de la partícula y  $r$  la extensión radial de la función de onda. La función de onda se quiere expandir (aumentar  $r$ ) para reducir la energía cinética cuántica. Podemos llamar a esto 'presión cuántica'. De acuerdo con la ecuación (17.1), la presión cuántica es mayor cuanto más liviana es la partícula.

## Huecos, expulsión de carga y campo eléctrico interno

Como vimos en el capítulo 16 (figura 16.13), la teoría de huecos predice que la energía cinética de los portadores de carga disminuye cuando hay más huecos en la vecindad de un hueco dado. Esto se aplica también globalmente en la banda: la energía cinética por electrón para todos los electrones en la banda disminuye cuando hay más huecos en la banda, o equivalentemente cuando hay menos electrones en la banda, mucho más que lo que predicen los modelos tradicionales de ‘banda rígida’ donde el salto (*hopping*) no depende de la densidad, o sea,  $\Delta t = 0$ . Esto hace que el sistema quiera expulsar electrones. Si es un sistema aislado, lo más que puede hacer es expulsar electrones hacia la superficie, donde se apilan. Cálculos numéricos con el modelo explicado en el capítulo 16 muestran este efecto [1], como se ve en la figura 18.1.

Como vimos en el capítulo 16, la interacción  $\Delta t$  aumenta a medida que el átomo se hace más negativo, es decir, la carga nuclear efectiva  $Z$  disminuye. Eso corresponde a que los iones tengan más carga negativa neta, y tiene sentido que en ese caso la tendencia a expulsar carga negativa aumente. Ahora bien, en el metal normal no puede haber expulsión de carga a nivel macroscópico porque, como dijimos antes, no puede haber un campo eléctrico en el interior de un metal. Entonces la interacción de Coulomb contrarresta esta tendencia a expulsar electrones, y no ocurre. En cambio, cuando el metal se hace superconductor, la expulsión de carga sí puede tener lugar.



**Figura 18.1.** Fracción de huecos por sitio en un cilindro como función de la distancia al centro del cilindro dividido por el radio del cilindro,  $r/R$ . Hay más huecos, es decir, menos electrones, en el interior que cerca de la superficie. La inhomogeneidad aumenta cuando la interacción  $\Delta t$  aumenta. En las figuras de la derecha, el diámetro de los círculos es proporcional a la densidad de huecos.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que a temperatura finita en el estado superconductor hay coexistencia de electrones normales, que no están apareados, y de electrones en forma de pares de Cooper en el superfluido, es decir, los electrones que conducen electricidad sin resistencia. La proporción de electrones normales tiende a uno cuando la temperatura se acerca a la  $T_c$  y la densidad del superfluido se hace cero, y tiende a cero cuando la temperatura se va a 0 y todos los electrones se unen al superfluido. A temperatura finita los electrones normales (el llamado *fluido normal*) apantallan los campos eléctricos internos igual que en el metal normal, entonces no hay campo eléctrico macroscópico en el interior. Es solamente a temperatura cero que la configuración total de carga es como se muestra en la figura 17.1. A temperatura finita esa es la configuración de la carga del superfluido, pero está compensada por una configuración opuesta del fluido normal.

Cuando el metal pasa del estado normal al estado superconductor y se forma el superfluido, hay una expulsión de superfluido de adentro hacia afuera, y hay una ‘impulsión’ de fluido normal de afuera hacia adentro para contrarrestar parcialmente el coste en energía potencial eléctrica. Estos dos procesos son esenciales para entender los dos misterios del efecto Meissner mencionados en el capítulo 7: cómo se genera la supercorriente, y cómo el cuerpo adquiere momento mecánico azimutal en la dirección contraria. Esto último ocurre porque cuando el fluido normal fluye hacia adentro transmite su momento a los iones. Esto lo entendí cualitativamente ya en el año 2008 [2], como muestra la figura 18.2, pero me llevó varios años más entenderlo en detalle, como veremos más adelante.

## Órbitas mesoscópicas y corrientes de espín

En los materiales superconductores los electrones residen en órbitas mesoscópicas de radio  $2\lambda_L$ . Entendí esto por primera vez en el año 2007 [1], el cincuentenario de la teoría BCS. Parece increíble que ni BCS, ni nadie que trabaja con la teoría convencional, lo sepa. Poco después me di cuenta de que John Slater lo sabía ya en 1937, como vimos en el capítulo 11.

Ya vimos un argumento para esto en el capítulo 11, las ecuaciones (11.4) y (11.5). Un argumento todavía más simple es considerar el momento angular de la corriente de Meissner en un cilindro de radio  $R$  y altura  $h$ . El momento angular de un electrón en una órbita de radio  $r$  es  $m_e v_s r$ , donde  $m_e$  es la masa y  $v_s$  es la velocidad. El momento angular de todos los electrones en la supercorriente es

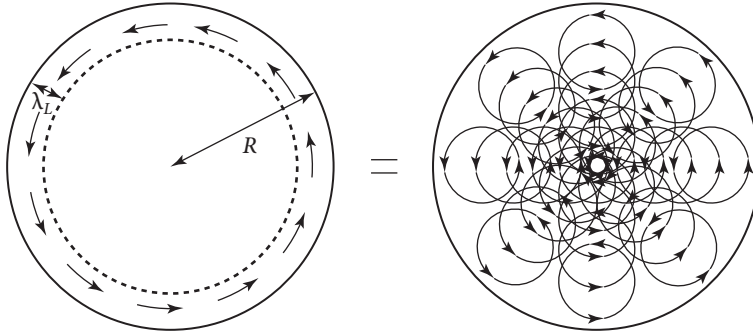
$$L_e = n_s [2\pi R \lambda_L h] (m_e v_s R). \quad (19.1)$$

donde  $n_s$  es la densidad de electrones, el número de electrones por unidad de volumen. El término entre corchetes es el volumen donde circula la supercorriente: un anillo de espesor  $\lambda_L$  adyacente a la superficie del cilindro. Para un radio  $R$ , el volumen es el perímetro  $= 2\pi R$  multiplicado por espesor  $\lambda_L$  y por la altura  $h$  del cilindro. El término entre paréntesis es el momento angular de cada electrón en ese anillo, que está esencialmente a una distancia  $R$  del origen (asumimos  $\lambda_L \ll R$ ), es decir, esos electrones circulan alrededor del cilindro en una órbita de radio  $R$ .

Podemos reescribir la ecuación (19.1) así:

$$L_e = n_s [2\pi R \lambda_L h] (m_e v_s R) = n_s [\pi R^2 h] (m_e v_s (2\lambda_L)). \quad (19.2)$$

En la expresión de la derecha, el término entre corchetes es el volumen del cilindro y el término entre paréntesis es el momento angular de un electrón en una órbita de radio  $(2\lambda_L)$ . El lector puede verificar fácilmente la igualdad matemática de las dos expresiones en la ecuación (19.2). La expresión de la derecha nos dice que en todo el volumen los electrones circulan en órbitas de radio  $2\lambda_L$ . En el interior las velocidades se compensan, cerca de la superficie no se compensan, lo que explica la igualdad matemática. La figura 19.1 lo muestra esquemáticamente.



**Figura 19.1.** Equivalencia entre el momento angular de una corriente que circula en una capa de espesor  $\lambda_L$  adyacente a la superficie (izquierda), y todos los electrones que circulan en órbitas de radio  $2\lambda_L$ .

Como vimos en el capítulo 11, la susceptibilidad diamagnética de un sólido está dada por la fórmula de Larmor

$$\chi = -\frac{n_s e^2}{4m_e c^2} \langle r^2 \rangle \quad (19.3)$$

con  $r$  el radio de las órbitas electrónicas. Para un superconductor, con  $r = 2\lambda_L$ , obtuvimos (ecuación (11.5))  $\chi = -1/(4\pi)$ , es decir, diamagnetismo perfecto. Para un metal normal, la susceptibilidad diamagnética está dada por la fórmula de Landau

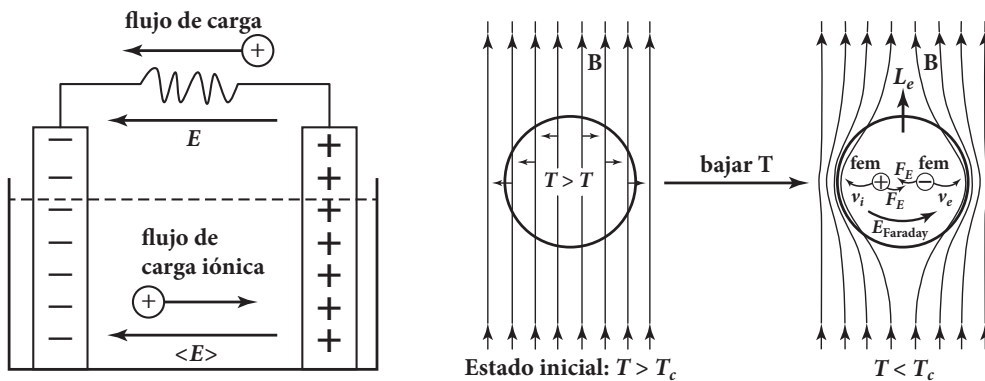
$$\chi_{\text{Landau}} = -\frac{1}{3} \mu_B^2 g(\epsilon_F) \quad (19.4)$$

donde  $\mu_B = e\hbar/2m_e c$  es el magnetón de Bohr y  $g(\epsilon_F)$  es la densidad de estados electrónicos en el nivel de Fermi, dada por  $g(\epsilon_F) = 3n_s/2\epsilon_F$ ,  $\epsilon_F = \hbar^2 k_F^2/2m_e$ , donde



## ¿Energía cinética o energía potencial? El helio líquido da la respuesta

En un artículo que escribí en el año 2010 dije que [1] entender cómo funciona el efecto Meissner es parecido a entender cómo funciona una pila voltaica. La figura 20.1 explica por qué.



**Figura 20.1.** Analogía entre pilas voltaicas y superconductores. En una pila voltaica (panel izquierdo) hay un flujo de iones positivos en el interior en dirección al electrodo positivo, aparentemente en contra de la fuerza eléctrica repulsiva. En un superconductor que expulsa campo magnético (panel derecho) los electrones y los iones se mueven en dirección opuesta a la fuerza eléctrica  $F_E$  ejercida sobre ellos por el campo de Faraday.

En el panel de la izquierda hay una pila eléctrica. El electrodo de la derecha es positivo y el de la izquierda es negativo. Si conectamos un cable entre ellos, la carga positiva va de derecha a izquierda; pero en realidad lo que pasa es que los electrones negativos van de izquierda a derecha. Sin embargo, no se produce acu-

mulación de carga en los electrodos. Eso es porque adentro de la pila hay un flujo de iones positivos de izquierda a derecha que compensa el flujo de carga en el cable.

Ahora bien, dentro de la pila hay un campo eléctrico que en promedio tiene la misma dirección que fuera de la pila, es decir, de derecha a izquierda, llamado  $\langle E \rangle$  en la figura. Esto se debe a que las integrales del campo eléctrico a lo largo de los caminos que conectan los dos electrodos por dentro y por fuera de la pila debe dar lo mismo, porque es un campo llamado ‘conservativo’. Entonces los iones que fluyen dentro de la pila se mueven en la dirección contraria a la que los impulsa este campo eléctrico. ¿Cómo puede ser?

Es exactamente la misma situación en el efecto Meissner de un superconductor, como ya hemos visto y se ilustra en el panel derecho de la figura 20.1. A medida que se expulsa el campo magnético se genera un campo eléctrico de Faraday que impulsa a los electrones y los iones a moverse en dirección opuesta a la que se mueven.

La pregunta entonces es la misma en los dos casos. ¿Cómo hacen las cargas eléctricas para moverse en la dirección opuesta a la dirección que las impulsa el campo eléctrico? Tiene que haber otra fuerza, llamémosla ‘fuerza electromotriz’ o ‘fem’ (*electromotive force* o ‘emf’, en inglés). En ese artículo [1] propuse que la fem es la misma para las pilas voltaicas y el superconductor.

Afortunadamente, para las pilas voltaicas se sabe de dónde viene la fem, a pesar de que no está muy bien explicado en los libros. Lo mostramos en la figura 20.2.

El panel izquierdo muestra el campo eléctrico en el interior de la pila. Es altamente inhomogéneo. En la mayor parte del espacio entre los electrodos apunta hacia la derecha ( $E_2$ ), y ahí impulsa a los iones a moverse de izquierda a derecha. Pero a ambos lados hay pequeñas regiones donde es mucho mayor y apunta de derecha a izquierda, en las regiones llamadas ‘doble capas’, de espesor microscópico  $d_1$  y  $d_3$ .

¿De dónde surgen estas ‘dobles capas’, con campo eléctrico interno  $E_1$  y  $E_3$ ? De la separación de cargas eléctricas en esas regiones, como se muestra en el panel derecho de la figura 20.2. Los libros de química explican esta separación de carga

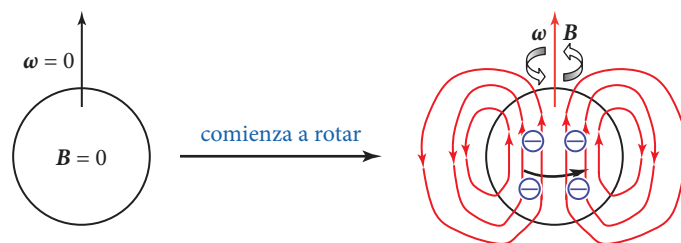
## PARTE V

# Respuestas a las preguntas claves y conclusiones

## Superconductores y patinadores en rotación: la pistola humeante

Aun antes del descubrimiento del efecto Meissner, tres físicos alemanes, Becker, Heller y Sauter, formularon [1] una pregunta que da claves importantísimas sobre la naturaleza de la superconductividad, aunque nadie lo sabe. *¿Qué pasa si ponemos un superconductor en rotación?*

Becker et al. no hicieron un experimento. Hicieron un cálculo teórico que les dijo que si ponen en rotación una esfera superconductora, se va a crear un campo magnético en su interior paralelo a la velocidad angular de rotación, como se muestra en la figura 21.1.

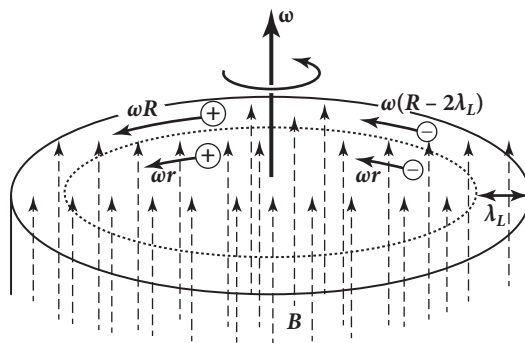


**Figura 21.1.** Una esfera superconductora inicialmente en reposo se pone en rotación. En su interior se genera un campo magnético (líneas de campo rojas) que es uniforme y paralelo a la velocidad angular de rotación,  $\vec{\omega}$ .

Aunque Becker et al. hicieron el cálculo solamente para una esfera, el resultado se aplica a cuerpos de cualquier otra forma.

La primera clave importante que da este resultado, suponiendo que se observe experimentalmente, es que los superconductores ‘saben’ cuál es el signo de la carga eléctrica de los portadores de carga. Eso es lo que determina que el campo magnético sea paralelo, y no antiparalelo, a la velocidad de rotación. Todos los superconductores muestran esa orientación. En cambio, se puede decir que los metales normales no ‘saben’ cuál es el signo de las cargas móviles, ya que algunos muestran coeficiente de Hall negativo y otros positivo, y esto indica que los portadores móviles son negativos o positivos dependiendo del metal.

¿Por qué se genera este campo magnético? La figura 21.2 muestra con más detalle lo que pasa. De aquí en adelante nos enfocamos en cilindros en lugar de esferas ya que la física y la matemática son más fáciles.



**Figura 21.2.** Parte superior de un cilindro superconductor en rotación. Los electrones cerca de la superficie se quedan un poco atrás con respecto a los iones, dando lugar a una corriente eléctrica superficial que genera un campo magnético uniforme en el interior del cilindro.

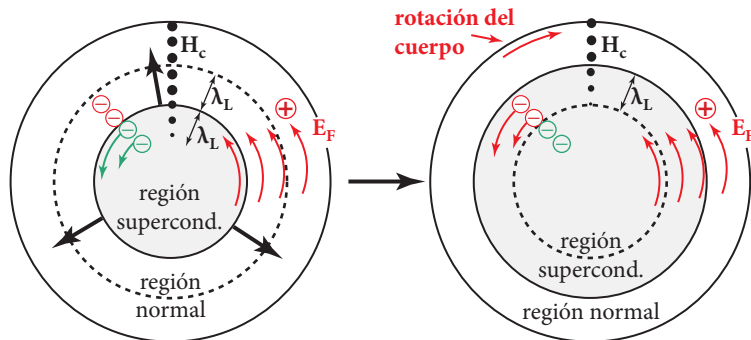
Como muestra la figura 21.2, cerca de la superficie lateral los electrones rotan un poco más despacio que los iones, por lo que existe una corriente eléctrica superficial que genera un campo magnético uniforme  $\vec{B}$  en el interior del cilindro paralelo al vector velocidad angular de rotación,  $\vec{\omega}$ .

¿Por qué ocurre esto? Cualitativamente lo explicaron así: en el superconductor, los electrones se mueven libremente, están desacoplados de los iones. Cuando el sólido empieza a rotar (supongamos en sentido antihorario, como muestra la figura), los iones se mueven y los electrones inicialmente no. Esto genera una corriente muy grande en sentido antihorario (los iones son positivos) que a su vez genera un campo magnético que aumenta con el tiempo. A su vez, este campo genera, por la ley de Faraday, un campo eléctrico en sentido horario que empuja a los elec-

## El efecto Meissner explicado (casi todo)

Volvamos ahora al efecto Meissner para entenderlo en detalle, incluyendo la conservación del momento. Consideremos el panel inferior de la figura 9.1. Queremos explicar cómo se expande la región superconductor desde el centro a la superficie de un cilindro que se vuelve superconductor en presencia de un campo magnético, y cómo en el proceso se expulsa el campo magnético.

La figura 22.1 muestra lo que hay que explicar:



**Figura 22.1.** Efecto Meissner: la frontera superconductor-metal normal se mueve hacia afuera, y en el proceso se expulsa el campo magnético. La frontera que se muestra en el panel izquierdo se ha movido hacia afuera una distancia  $\lambda_L$  en el panel derecho. El tamaño de los puntos negros indica la intensidad del campo magnético.  $E_F$  es el campo eléctrico de Faraday. El cuerpo adquiere rotación para compensar el impulso de la corriente, esto es, para conservar el momento angular.

La figura muestra cómo avanza la frontera entre la fase superconductora y la fase normal expulsando un campo magnético aplicado,  $H_c$ , que es el campo magnético 'crítico' para la temperatura que existe en la frontera entre la fase superconductora y la fase normal. Del panel izquierdo al panel derecho la frontera se movió hacia afuera una distancia  $\lambda_L$ . Veamos qué pasó.

1. Los electrones verdes en el panel izquierdo forman parte de la supercorriente cerca de la superficie de la fase superconductora, que anula el campo magnético en el interior. En el panel derecho, esos electrones están ya lejos de la superficie, y por tanto no transportan supercorriente (hay que recordar que en los superconductores la supercorriente se transporta solamente en una capa de espesor  $\lambda_L$  adyacente a la superficie o a la frontera entre la fase superconductora y la fase normal). ¿Cómo se frenaron estos electrones?
2. Los electrones rojos en el panel izquierdo están en la fase normal, entonces no transportan corriente. En el panel derecho están en la fase superconductora, en la capa de espesor  $\lambda_L$  adyacente a la superficie, y entonces transportan supercorriente con la velocidad  $v_s$  dada por la ecuación (6.13), con  $B = H_c$ . ¿Cómo adquirieron estos electrones esta velocidad?
3. El momento angular electrónico en el panel derecho es mayor que en el izquierdo, porque hay más electrones transportando supercorriente y porque están más lejos del origen (pronto veremos cuantitativamente en qué cuantía es mayor). Por lo tanto, el cuerpo tiene que haber adquirido momento en sentido horario (indicado por la 'rotación del cuerpo' en la figura). ¿Cómo adquirió el cuerpo ese momento?

Tengamos además en cuenta que este proceso es termodinámicamente *reversible*. Lo cual quiere decir que la explicación que encontremos para este proceso tiene que funcionar de igual modo para el proceso en la dirección contraria, es decir, de derecha a izquierda, invirtiendo las flechas que correspondan.

El campo eléctrico de Faraday  $E_F$  aparece debido al cambio de flujo magnético, y es en sentido antihorario porque trata de crear una corriente en sentido antihorario para evitar que el flujo magnético cambie, es decir, que el campo sea expulsado. Entonces:

1.  $E_F$  empuja a los electrones verdes en sentido horario (por la carga negativa del electrón), por lo que tiende a frenarlos y, de hecho, es el responsable de

## El secreto de los huecos

Después de haber trabajado en lo que llamo la “teoría de superconductividad por huecos” durante 28 años, finalmente, cuando estaba llegando a un entendimiento del efecto Meissner, en la recta final por así decirlo, me olvidé de los huecos cuando escribí el mencionado artículo mencionado del año 2015, ref. 2 del capítulo anterior.

Diez años antes, en un artículo [1] había dado una larga lista de 18 propiedades que son distintas para electrones y huecos, reproducida en la figura 23.1.

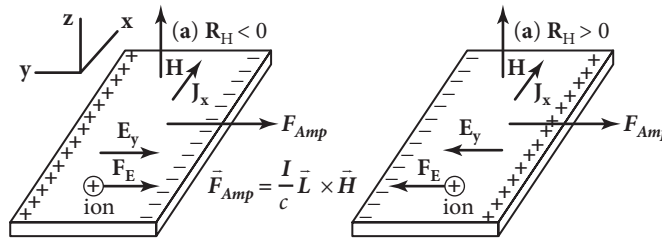
Bonding electron at the Fermi energy	Antibonding electron at the Fermi energy
Undressed	Dressed
Low kinetic energy	High kinetic energy
Long wavelength	Short wavelength
Small effective mass	Large effective mass
Uniform charge density	Nonuniform charge density
Moves in direction of force	Moves opposite to force
Conducts electricity	Anticonducts electricity
Contributes to Drude weight	Anticontributes to Drude weight
Detached from lattice	Transfers momentum to lattice
Large quasiparticle weight	Small quasiparticle weight
Coherent conduction	Incoherent conduction
Large Drude weight	Small Drude weight
Negative Hall coefficient	Positive Hall coefficient
Good metals	Bad metals
Stable lattices	Unstable lattices
Ions attract each other	Ions repel each other
Carriers repel each other	Carriers attract each other
Normal metals	Superconductors

**Figura 23.1.** Diferencias relevantes entre electrones (columna izquierda) y huecos (columna derecha) para entender la superconductividad [1].



Justo en la mitad de la lista puse la más importante, la número 9. Lo hice sin saber bien el porqué, es decir, sin entender qué tiene que ver con la superconductividad. No me di cuenta de por qué es tan importante hasta 11 años después [2-4]. Por suerte, o por desgracia, nadie más se dio cuenta. Veamos.

Volvamos a la figura 5.2 del capítulo 5: el efecto Hall. Afirmo que da lugar al siguiente ‘misterio’, ilustrado en la figura 23.2.



**Figura 23.2.** Barra de Hall de un metal con coeficiente de Hall negativo (izquierda) en la que los portadores de carga son electrones, y barra de Hall de un metal con coeficiente de Hall positivo (derecha) en la que los portadores de carga son huecos. Aquí  $L$  es la longitud de las barras e  $I$  la corriente. La fuerza de Ampère  $F_{Amp}$  es la misma en los dos casos. ¿Cómo puede ser?

La fuerza magnética de Ampère actúa sobre los conductores de corriente eléctrica cuando hay un campo magnético aplicado, de acuerdo con la fórmula que muestra la figura, que reproduzco aquí:

$$\vec{F}_{Amp} = \frac{I}{c} \vec{L} \times \vec{H}. \tag{23.1}$$

donde  $L$  es la longitud del conductor e  $I$  es la corriente que circula, que es proporcional a  $J_x$  en la figura. La fuerza de Ampère, incluida su dirección, es independiente del coeficiente de Hall.

En el panel izquierdo de la figura, la fuerza de Ampère se entiende fácilmente. Como se recordará del capítulo 5, los electrones son desviados hacia el borde derecho de la barra y se crea un campo eléctrico  $E_y$  que va de izquierda a derecha. Este campo  $E_y$  ejerce una fuerza sobre los iones positivos hacia la derecha,  $F_E$ . Esta fuerza que actúa sobre todos los iones es precisamente la fuerza de Ampère. No hay problema.

## BCS versus Hubbard versus Huecos

En este libro hemos hablado de tres enfoques distintos para entender la superconductividad en la naturaleza: (1) la teoría BCS, (2) las teorías basadas en el modelo de Hubbard y (3) la teoría de huecos. ¿Cuál es la correcta? ¿Cuál está mal?

Primera posibilidad: ciertamente es posible que las tres sean incorrectas, y que ninguna de ellas describa ningún material.

Segunda posibilidad: que BCS describa algunos materiales y, si es así, también es posible que el modelo de Hubbard describa otros materiales. Pero en este caso no es posible que la teoría de huecos se aplique a ningún material.

Tercera posibilidad: que el modelo de Hubbard describa algunos materiales y ni BCS ni la teoría de huecos lo hagan.

Cuarta posibilidad: que la teoría de huecos se aplique a todos los materiales. En ese caso la teoría BCS no se aplica, y el modelo de Hubbard tampoco.

Lo que no es posible es que la teoría de huecos describa algunos materiales y no otros. Si describe a algunos describe a todos. Si no, no describe a ninguno.

Esto significa que la teoría de huecos es falsable, encontrando un solo material que claramente no pueda ser explicado por esta teoría. Por el contrario, ni la teoría BCS ni el enfoque de Hubbard son falsables. Si se encuentran materiales a los cuales no se aplican, siempre se puede decir que estos son otra clase de materiales 'no convencionales'.

Cuando discuto con colegas y argumento que solo la teoría de huecos puede describir la superconductividad, me dicen: ¿cómo es que no estás de acuerdo en que, por ejemplo, el modelo de Hubbard atractivo describe un estado superconductor, y que por lo tanto podría describir algunos materiales superconductores, aunque sean materiales que no se hayan descubierto todavía?

El modelo de Hubbard atractivo es simplemente un modelo de electrones en el que se supone que existe una interacción atractiva en lugar de repulsiva cuando dos electrones ocupan el mismo orbital. El  $U$  en la figura 4.1 es negativo en lugar de positivo. Es una suposición totalmente no física, contraria a lo que ocurre en la naturaleza. Pero supongamos que no es así, que el modelo es válido para describir algún material. Entonces, matemáticamente se puede demostrar fácilmente que los electrones se aparean y el estado fundamental de este modelo tiene una función de onda de la forma dada en la teoría BCS, ecuación (8.1). Un sistema así tiene coherencia de fase, una brecha energética entre el estado fundamental y las excitaciones, una densidad de estados de la forma que se mide en experimentos de tunelaje como la figura 14.2, etc. Ciertamente describe un superconductor, ¿no?

Yo digo que no. Digo que un sistema descrito por el modelo de Hubbard atractivo no puede exhibir el efecto Meissner, simplemente porque no expulsa carga. No tiene forma de expulsar un campo magnético, y ciertamente no tiene forma de hacerlo conservando el momento. Entonces, si enfriamos un metal descrito por el modelo de Hubbard atractivo en presencia de un campo magnético, el campo quedaría dentro del metal y el sistema nunca llegaría al estado superconductor, se quedaría en el estado metaestable normal para siempre. Eso no describe un superconductor real en la naturaleza, todos los superconductores expulsan campos magnéticos.

Por otro lado, en los últimos 30 años ha habido una gran variedad de teorías de superconductividad basadas en el modelo de Hubbard repulsivo para describir la superconductividad de los cupratos y otros sistemas que supuestamente tienen los llamados ‘electrones fuertemente correlacionados’ y se clasifican como ‘superconductores no convencionales’. Como mencionamos antes, esto adquirió un gran ímpetu con un artículo muy influyente de Phil Anderson en 1987 [1], titulado “El estado de enlace de valencia resonante en  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  y superconductividad”, donde propuso que en los cupratos hay un ‘líquido de espín’ descrito por el modelo de Hubbard, y que existen “pares magnéticos singletes” preformados en el esta-

## Cómo encontrar y no encontrar superconductores a altas temperaturas

Si la superconductividad estuviera bien entendida y ese entendimiento fuera generalmente compartido, sería mucho más fácil encontrar nuevos materiales que superconduzcan a temperaturas más altas, idealmente a temperatura ambiente, ya que la búsqueda de nuevos materiales superconductores estaría guiada por ese entendimiento. Esto ampliaría enormemente las aplicaciones prácticas de los superconductores en las aplicaciones tecnológicas y en la vida diaria. Imagínense cuan atrasada estaría la industria electrónica hoy en día si los semiconductores solo funcionaran a la temperatura del nitrógeno líquido, 77 K. ¿Cómo mantendríamos fríos nuestros teléfonos celulares?

Desde hace mucho tiempo los físicos trataron de desarrollar criterios que guíen la búsqueda de nuevos superconductores a temperaturas más altas. Particularmente después de BCS. Ninguno funcionó. Todos los descubrimientos de nuevos superconductores fueron o por accidente o siguiendo criterios empíricos como los de Matthias, sin una base teórica.

Matthias dijo en su artículo de 1971 titulado “La búsqueda de superconductores a altas temperaturas” [1]: *“Las teorías en los últimos 21 años deberían haber mostrado un camino (si es que existe) para incrementar la temperatura crítica. Pero hasta el día de hoy no ha habido ni la más mínima evidencia para esta expectativa. No conozco ningún otro campo en la física moderna en el cual tanto se haya predicho sin producir un único éxito experimental.”*

Lo mismo sigue siendo cierto hoy, 48 años después. Durante estos 48 años la temperatura crítica máxima se multiplicó por 7, *sin ninguna ayuda de las teorías*.

Con mecanismos ‘no convencionales’ basados en el modelo de Hubbard, no se han intentado hacer muchas predicciones de materiales nuevos. Las pocas que se han hecho, como, por ejemplo, que los compuestos de óxido de iridio serían superconductores a alta temperatura, ciertamente no se han verificado.

Con el mecanismo convencional de BCS, una predicción que ha recibido mucha atención, debida originalmente a Ashcroft, mencionado en los capítulos 2 y 12, es que los compuestos ricos en hidrógeno deberían ser superconductores a altas temperaturas. Recientemente se han publicado artículos que dicen que ciertos compuestos de hidrógeno a muy alta presión muestran superconductividad cerca de temperatura ambiente. Estos resultados experimentales no se han confirmado, yo creo que no son correctos. Sigue habiendo multitud de artículos teóricos que predicen la superconductividad en distintos compuestos basándose en la teoría BCS. A veces es difícil entenderlos y no se sabe si se está hablando de experimentos o de cálculos numéricos cuando dicen que un compuesto ‘muestra’ superconductividad. En la mente de muchos teóricos de hoy en día, si un cálculo numérico dice que algún compuesto es superconductor, el compuesto es superconductor. No hace falta verificarlo experimentalmente. Y si se hace el experimento y no verifica el cálculo, el material está cometiendo un error. Eso no es ciencia, digo yo.

La teoría de huecos proporciona criterios bien definidos de cómo encontrar superconductores a altas temperaturas, a saber:

1. Los portadores de carga deben ser huecos. Si no hay huecos no hay superconductividad.
2. Conducción a través de aniones, esto es, iones negativos del lado derecho de la tabla periódica. Cuanto más negativos mejor.
3. Mucha carga negativa en la región donde los huecos conducen y dan lugar a superconductividad.
4. La masa de los iones no importa.
5. Las estructuras con planos son convenientes porque permiten acumular mucha carga negativa en los planos, carga que se compensa con carga positiva fuera de los planos.

# Posfacio

En este libro expuse una nueva forma de entender el fenómeno de la superconductividad, que difiere en muchos aspectos fundamentales de lo que está generalmente aceptado como válido y establecido por la comunidad científica. El enfoque de este libro se basa en lo siguiente:

- todos los superconductores se rigen por los mismos principios
- la asimetría electrón-hueco es la clave de la superconductividad
- sin huecos no se puede explicar el efecto Meissner
- sin huecos no puede haber superconductividad
- la teoría BCS no tiene los elementos físicos necesarios para explicar el efecto Meissner

En cambio, de acuerdo con lo que está generalmente aceptado actualmente, se entiende que:

- los llamados 'superconductores convencionales' están perfectamente bien entendidos por BCS-electrón-fonón
- una amplia gama de superconductores llamados 'no convencionales' aún no se entienden bien pero la mayoría de los científicos cree que los explica el modelo de Hubbard
- la teoría BCS explica el efecto Meissner desde hace 60 años
- los huecos no son esenciales para los superconductores, ni para los convencionales ni para los no convencionales

El segundo tema de este libro es, suponiendo que lo que digo arriba sea válido, que la bibliometría falla totalmente en informar cuáles son las contribuciones de más

# Índice de nombres

- Akimitsu, Jun, 123  
Alfven, Hannes, 15, 17  
Allen, Philip B., 86, 109  
Anderson, Philip Warren, 11, 12, 17, 116  
Aristarco de Samos, 73, 93  
Ashcroft, Neil, 11, 12, 17, 90, 238
- Bardeen, John, 4, 10, 17, 56, 84, 97, 103, 108, 166  
Becker, Richard, 17, 193, 196  
Bednorz, Georg, 14, 17, 115  
Bloch, Felix, 34, 74  
Bohr, Niels, prefacio, 74  
Born, Max, 9, 23, 80
- Carbotte, Jules, 109  
Cheng, Kaijia, 9, 23, 80  
Chapnik, I. M., 23, 80  
Chu, Ching-wu (Paul), 14, 17, 116,  
Cohen, Marvin L., 11, 13, 17, 111, 125  
Cooper, Leon, 4, 10, 27  
Crusellas, M. A., 120
- Dynes, Robert C., 109
- Einstein, Albert, 9  
Eliashberg, Gerasim M., 98, 106, 108
- Frenkel, Yakov, 9, 75  
Fröhlich, Herbert, VIII, 10, 17, 55, 84, 95-101,  
244
- Giaever, Ivar, 105  
Ginsburg, Vitaly L., 78  
Gorkov, Lev, 151  
Greene, Richard L., 120, 122  
Greven, Martin, 121
- Hall, Edwin, 32,  
Heisenberg, Werner, 9, 17, 31, 34, 35, 75  
Heller, G., 193  
Hosono, Hideo, 126  
Hubbard, John, 28
- Josephson, Brian, 58, 151  
Justi, Eduard, 239
- Kammerlingh Onnes, Heike, 3, 7, 8, 16, 17, 184  
Kang, W. N., 125  
Keesom, Willem Hendrik, 41  
Kikoin, Isaak K., 17, 23, 80  
Koch, Karl Michael, 9, 79  
Kortus Jens, 124  
Kronig, Ralph, 9
- Landau, Lev Davidovich, 75  
Lasarew, B. G., 17, 23, 80  
London, Fritz, 9, 44, 52, 78, 80, 185, 196, 199  
London, Heinz, 9, 52, 78, 81
- Marsiglio, Frank, 23, 121, 142  
Matthias, Bernd, 13, 17, 87, 110, 135, 143, 237  
Maxwell, Emanuel, 10, 83, 86, 96, 99  
Maxwell, James Clerk, 40

