

De las **bajas** TEMPERATURAS a la **SUPERCONDUCTIVIDAD**

Alberto **Rubio Ponce**
Ortencia **Ponce Llamas**

La superconductividad es un fenómeno físico fascinante, un efecto completamente cuántico a nivel macroscópico, un privilegio que comparte con su hermana la superfluidez;¹ es un estado de la materia en el cual diferentes tipos de materiales como metales, semiconductores, aleaciones e incluso aislantes, se transforman en conductores ideales que permiten el flujo de electrones sin pérdida de energía. Para encontrar ese estado fue necesario llegar a temperaturas muy bajas, muy cercanas al cero absoluto. A esas temperaturas, donde el sentido común indica que los objetos tienden a inmovilizarse, se encontró que los electrones y los iones se coordinan con el fin de evitar las colisiones entre sí, moviéndose con perfecta libertad a través del material. ¿Y cómo es que llegamos hasta ahí?

En 1848 William Thomson (Lord Kelvin en 1866), a sus 24 años introdujo la escala de temperatura termodinámica. Encontró que toda sustancia pierde energía de manera constante con respecto a la temperatura, y una vez perdida toda su energía posible, la sustancia llega a $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ahí se encontraba el cero absoluto, conocido como 0 kelvin (0 K) en su honor, no hay temperatura más baja.²

Una vez establecido este valor, la incógnita surge de manera natural, ¿cómo llegar o acercarse al valor 0 K?

En su momento, el uso de refrigerantes parecía ser el camino indicado. En 1835 Charles Thilorier, conocido por haber dado la descripción del hielo seco, la forma sólida del dióxido de carbono, había logrado llegar alrededor de 163 K ($-110\text{ }^{\circ}\text{C}$), un valor de temperatura muy bajo, pero aun a esa temperatura había tres gases, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, que no se habían podido licuar, por lo cual los llamaron permanentes.

En octubre de 1868 durante un eclipse solar, Joseph Norman Lockyer, observó una línea amarilla en el espectro solar, generado por un elemento desconocido en ese momento, al cual llamó *helium* del nombre griego *Helios*, que significa Sol. En ese momento, el helio se unía a los gases que faltaban licuar. Lockyer también es conocido por ser el fundador y principal editor de la revista científica más prestigiada del mundo, *Nature*.

Tiempo después, Louis Paul Cailletet, analiza la física del efecto Joule-Thomson, proceso en el cual un sistema disminuye su temperatura cuando se le permite expandirse libremente y lo aplica sobre el oxígeno, que es sometido a una alta presión y al mismo tiempo lo enfría, enseguida le permite que se expanda rápidamente, la temperatura desciende repentinamente a 90 K, y en 1877 se observan por primera vez las gotas de oxígeno en las paredes del tubo de vidrio. El oxígeno ya no era un gas permanente. Ese mismo año el nitrógeno dejó de serlo al licuarse a 77 K, de acuerdo al comunicado enviado por Raoul-Pierre Pictet el 22 de diciembre a la Academia de Ciencias en Francia. Años más tarde, en 1898, James Dewar logró licuar el hidrógeno a una temperatura de tan solo 20 K. Ahora únicamente quedaba el helio. Dewar probablemente sea más conocido por la invención del vaso de Dewar, mejor conocido como

“termo”. Es un recipiente con buen aislamiento térmico; inicialmente era de cristal, ahora también se hacen de metal, debido a que son más duraderos. En 1904 se fundó la compañía alemana Thermos GmbH y aparecieron los primeros termos de uso comercial.

En 1908, Heike Kamerlingh Onnes inició un experimento importante en el campo de las bajas temperaturas: sometió al helio a una serie de etapas de enfriamiento utilizando hidrógeno como refrigerante y el ciclo de Hampson-Linde.³ En la última etapa del experimento, realizó una descompresión para finalmente obtener el helio líquido a 4.2 K; las mediciones realizadas revelaron que la temperatura alcanzada era de solo 1.5 K.

Finalmente, ya no quedaba ningún gas permanente. La física estaba preparada para estudiar el comportamiento de la materia a bajas temperaturas.

DESCUBRIMIENTO DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

Onnes, el hombre de las bajas temperaturas, se percató de que en ese momento es el único científico en todo el mundo que puede estudiar cualquier propiedad de la materia a esas temperaturas y debe darse prisa, pues la ciencia avanza rápido.

De entre las múltiples propiedades de los materiales, decide estudiar la resistencia eléctrica de los metales. En su momento, la resistencia era considerada muy importante; además, es relativamente sencilla de medir a cualquier temperatura.

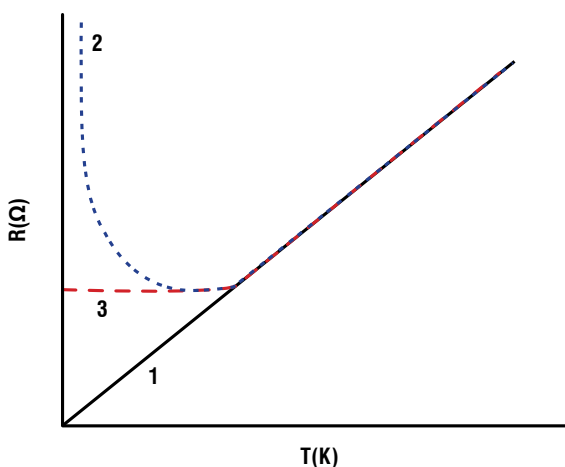


Figura 1. Posibles comportamientos de la resistencia a bajas temperaturas, de acuerdo al conocimiento científico a finales del siglo XIX.

En el ambiente científico se tenían ciertas ideas acerca de cómo se comportaría la resistencia a bajas temperaturas, las más importantes eran tres, las cuales se encuentran especificadas en la Figura 1:

1) Cuando disminuye la temperatura la resistencia desciende de manera proporcional. Esto debido a que la resistencia es consecuencia de las colisiones entre los electrones y los iones del metal. Al aumentar la temperatura los iones se mueven demasiado alrededor de su posición de equilibrio, provocando que los electrones colisionen con más frecuencia, por lo tanto, la resistencia del metal aumenta. Una forma de explicarlo de manera muy simplificada podría ser imaginar que nos movemos en una lancha veloz (electrones) entre enormes buques mercantes (iones del metal). Si el mar está pica-do (alta temperatura) hay mayor probabilidad de colisionar con los buques mercantes ya que tendrán desplazamientos considerables alrededor de sus anclas; si el mar está en calma (baja temperatura) podremos maniobrar con facilidad nuestra lancha y evitar las colisiones.

2) Al disminuir la temperatura la resistencia aumenta indefinidamente. Esto debido a que al bajar la temperatura y acercarnos al cero absoluto, tanto los iones como los electrones tienden a disminuir su movimiento; de esa manera, los electrones podrían quedar atrapados por los iones, generando así un aumento paulatino de la resistencia de manera indefinida; finalmente, un metal se tornaría aislante. La analogía correspondiente sería que al bajar la temperatura el agua del mar se congelaría, impidiendo el desplazamiento de los buques mercantes alrededor de sus anclas, pero también impediría que nos desplazemos en nuestra lancha.

3) La resistencia tendería a un valor constante mayor que cero debido a las colisiones provocadas por las imperfecciones e impurezas en las estructuras cristalinas de los metales. En el sistema simplificado sería como si hubiera basura o desechos en el mar, además de los buques mercantes. A bajas temperaturas, se podría evitar las colisiones con los buques; sin embargo, siempre habría desechos que impedirían el movimiento libre de la lancha.

Por supuesto, Onnes no estaba ausente en este tipo de discusiones y deseaba saber cuál sería el comportamiento de la resistencia con respecto a la temperatura. Analizó los resultados experimentales conocidos y encontró que lo primero que debía descartar eran las

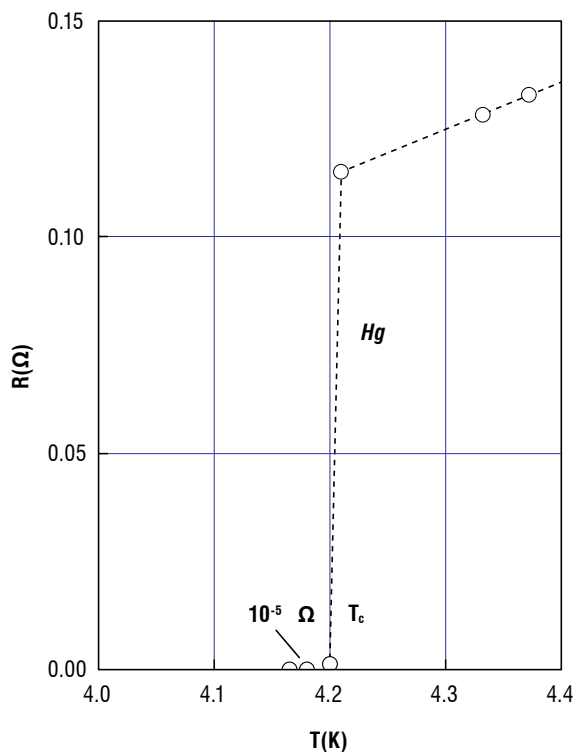


Figura 2. Comportamiento de la resistencia en el Hg con respecto a la temperatura.

impurezas para que no influyeran en sus resultados; es decir, la única forma de llegar al resultado correcto era a través del estudio de un metal lo más puro posible, de esta manera se dispuso a buscarlo. No había que buscar mucho: el mercurio (Hg), metal líquido a temperatura ambiente, es fácil de purificar.

Al inicio del experimento, la resistencia del Hg iba disminuyendo de manera paulatina y al llegar a 4.2 K era cero. Este resultado parecía indicar que su comportamiento era de acuerdo a la primera hipótesis. Al analizar en detalle los datos experimentales, encontró que la resistencia disminuía con la temperatura, pero al llegar a 4.2 K descendía repentinamente a cero (ver Figura 2). ¡Esto no era lo que se esperaba, no coincidía con ninguna de las hipótesis, este comportamiento era muy diferente al esperado! Repitió el experimento, pero esta vez con más detalle y volvió a obtener el mismo resultado, al llegar a 4.2 K había una caída abrupta de la resistencia, el metal se volvía un conductor ideal. A esa temperatura se le etiquetó como temperatura crítica (T_c). Onnes, había encontrado un nuevo estado donde los electrones se

mueven con una coordinación perfecta, sin pérdida de energía, sin resistencia al flujo de carga eléctrica, había nacido la superconductividad, era el año de 1911.

EFFECTO MEISSNER

Después de un análisis detallado, se podría pensar que si la superconductividad está definida como el flujo de los electrones sin pérdida de energía, entonces esto implicaría que los materiales se vuelven conductores perfectos. Esto no es así, un superconductor se comporta de manera muy diferente a un conductor perfecto.

Varios años después del descubrimiento de la superconductividad, en 1933, Walter Meissner y Robert Ochsenfeld, mostraron que cuando se aplica un campo magnético sobre un material superconductor, este se vuelve un diamagneto perfecto, es decir, genera un campo magnético interno que expulsa al campo externo, evitando que penetre. Las Figuras 3 y 4 ilustran el comportamiento de un conductor perfecto y de un superconductor en presencia de un campo magnético externo, respectivamente.

En la secuencia de la Figura 3(a) se muestra, primeramente, un conductor perfecto a alta temperatura en ausencia de campo magnético externo; posteriormente se enfría por debajo de una temperatura crítica en la cual la resistencia eléctrica es cero; enseguida se aplica un campo magnético; se observa que el campo magnético es expulsado del conductor; finalmente, se elimina el campo magnético externo y encontramos que el campo magnético en el interior del conductor sigue siendo nulo.

En el siguiente caso, mostrado en la secuencia de la Figura 3(b), se tiene un conductor perfecto a alta temperatura con un campo magnético externo aplicado; el campo magnético penetra la muestra; posteriormente, al igual que en el caso anterior, se enfría por debajo de una temperatura crítica; el campo magnético sigue penetrando la muestra; finalmente, se retira el campo magnético externo y se observa que, a diferencia de la secuencia mostrada en la Figura 3(a), el campo magnético queda atrapado.

En la Figura 4(a) mostramos un superconductor a alta temperatura en ausencia de campo magnético externo;

Conductor Perfecto

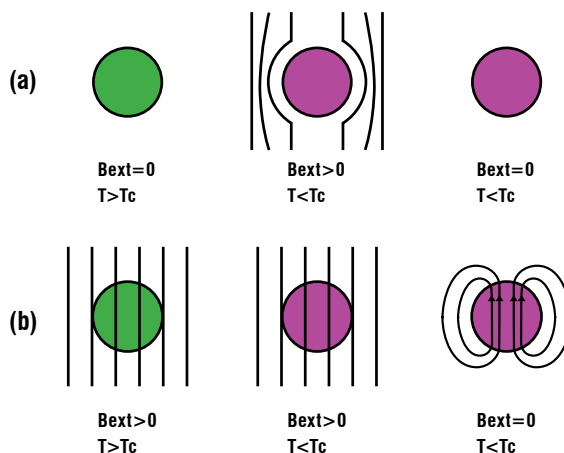


Figura 3. Comportamiento de un conductor perfecto con respecto a la temperatura en presencia de un campo magnético externo.

posteriormente, se enfría por debajo de una temperatura crítica donde la resistencia eléctrica es cero; enseguida se aplica un campo magnético; se observa que el campo magnético es expulsado del superconductor; finalmente, se elimina el campo magnético externo y el campo magnético en el interior del superconductor sigue siendo nulo. Esta secuencia es muy parecida a la de la Figura 3(a).

En el caso ilustrado en la Figura 4(b), se tiene un superconductor a alta temperatura con un campo magnético externo aplicado; el campo magnético penetra la

Superconductor

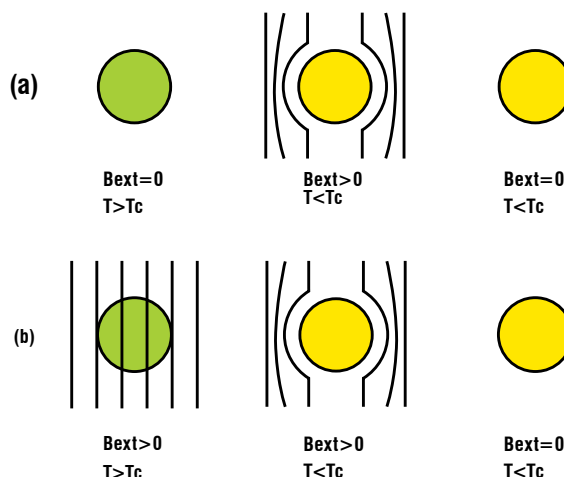


Figura 4. Comportamiento de un superconductor con respecto a la temperatura en presencia de un campo magnético externo.

muestra; posteriormente se enfría hasta el punto en el cual la resistencia eléctrica es cero; el campo magnético es expulsado; finalmente, se elimina el campo magnético externo y se observa que a diferencia del conductor perfecto el campo magnético no queda atrapado.

Después de 1933 quedó establecido que el estado superconductor era un estado estable y, por lo tanto, se podían aplicar las leyes de la termodinámica. La resistencia nula y el efecto Meissner definen el estado superconductor y hacen la diferencia con el conductor perfecto.

Pasaron dos años y, en 1935, quedó establecida la primera teoría fenomenológica, desarrollada por los hermanos Freitz y Heinz London. En esta se muestran las características que debe tener un campo magnético para que se presente el efecto Meissner, que son:

1. El campo magnético debe ser nulo en el interior del superconductor.
2. Las corrientes eléctricas deben estar limitadas a la superficie del superconductor, con un espesor establecido por la longitud de penetración, presentada en la siguiente igualdad:

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m_e}{\mu_0 n_s e^2}}$$

En esta relación λ_L es la longitud de penetración, donde m_e corresponde a la masa del electrón; μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío; n_s es el número de electrones por unidad de volumen, y e tiene el valor de la carga del electrón. En 1953 Lars Onsager tomó un anillo superconductor y midió el flujo magnético que pasa por él, y encontró que el flujo era la mitad del valor esperado. Ahora sabemos que las ecuaciones de London son erróneas, el flujo de carga se debe a parejas de electrones, por lo tanto, debemos hacer unos cambios: $m_e \rightarrow 2m_e$, $-e \rightarrow -2e$ y finalmente $n_s \rightarrow n_s/2$. Como podemos ver, la forma de la longitud de penetración queda inalterada. Este resultado no pasó inadvertido.

TEORÍA BCS

A pesar de los esfuerzos, los avances y desarrollos eran lentos. Para poder dar una explicación microscópica era necesario que la mecánica cuántica madurara. No fue

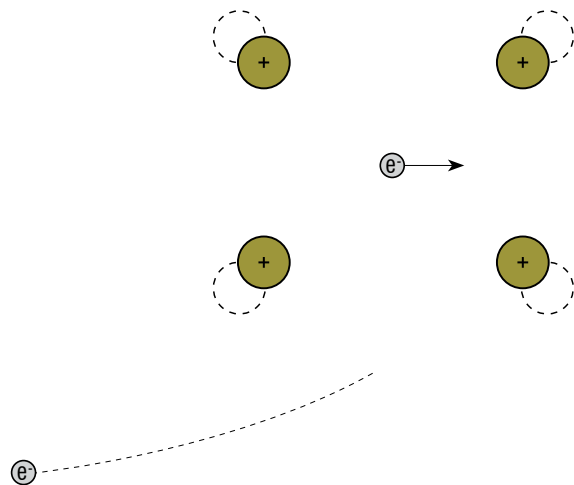


Figura 5. Interacción entre electrones a través de la red.

sino hasta 1957, cuando John Bardeen,⁴ Leon Neil Cooper y John Robert Schrieffer dieron la primera explicación del fenómeno. La idea principal es que los electrones se coordinan de manera especial formando parejas, llamadas pares de Cooper, mismos que interactúan a través de las vibraciones de la red cristalina; a esta interacción se le conoce como interacción electrón-fonón. Esta teoría es conocida como BCS en su honor, por la cual fueron merecedores del Premio Nobel de Física en 1972.

No es muy directo entender cómo dos electrones se pueden atraer entre sí. Una imagen un poco simplificada la podríamos plantear cuando un electrón interactúa con la red (iones positivos mucho más pesados que el electrón, $m_{Cu}/m_e \sim 100,000$) deformándola localmente, generando una región con carga positiva (ver Figura 5); otro electrón siente la deformación y modifica su trayectoria ajustándola, de tal forma que su energía sea mínima. De esta manera, dos electrones pueden sentirse atraídos mediante la deformación, formando un par ligado. Por debajo de la temperatura crítica se crean muchos de estos pares y el metal sufre una transición de fase.

Una de las predicciones más importantes de la teoría BCS fue la banda de energía prohibida que se genera debido a la formación de pares de electrones. En un superconductor, el movimiento de los pares de electrones tiene restricciones por la mecánica cuántica y

solo puede tomar ciertos valores. Si aplicamos un campo magnético muy intenso, los electrones pueden obtener la suficiente energía para saltar la zona prohibida, los pares de electrones se rompen y la superconductividad desaparece.

A pesar de que la teoría BCS está basada en la interacción electrón-fonón, dentro de las ecuaciones no se introduce dicha interacción de manera explícita, a excepción de la frecuencia fonónica que aparece de manera proporcional en la relación de la T_c . Este tipo de frecuencia bien podría corresponder a cualquier otro tipo de mecanismo. Por otro lado, aunque en algunos aspectos logra explicar la superconductividad convencional, en general difiere de los resultados experimentales, con desviaciones en algunos casos muy grandes.

Una mejor descripción de la superconductividad convencional la podemos encontrar en el trabajo publicado por Gerasim M. Éliashberg *Interactions between electrons and lattice vibrations in a superconductors*, publicado en 1960, donde de manera explícita se introduce la interacción electrón-fonón por medio de la función.

El mismo año en que se presentó la teoría BCS, Alekséi Alekséyevich Abrikósov⁵ publicó su trabajo *The magnetic properties of superconducting alloys*, donde mostraba los fundamentos teóricos de los efectos de un campo magnético sobre los superconductores. En esta propuesta se distinguen dos tipos de superconductores. En presencia de un campo magnético externo débil los dos superconductores se comportan de la misma manera, presentan un estado diamagnético perfecto, expulsando completamente el campo; esto sucede para valores menores a un primer campo magnético crítico (H_{c1}). A medida que la intensidad del campo externo aumenta, los superconductores de tipo I pierden su capacidad para expulsar el campo y pasan al estado normal. En los superconductores de tipo II se presenta un efecto puramente cuántico, aparece un cuanto de flujo magnético que penetra parcialmente a través de canales microscópicos llamados vórtices de Abrikósov o fluxones, cada uno está rodeado por supercorrientes de forma cilíndrica, formando estructuras regulares, usualmente de tipo triangular. Si el campo magnético externo continúa creciendo, también aumenta

la cantidad de vórtices, hasta que finalmente están tan estrechos que el estado superconductor colapsa; esto sucede para cantidades mayores a un segundo campo magnético crítico H_{c2} . Cuando el superconductor de tipo II se encuentra entre H_{c1} y H_{c2} se le conoce como estado mixto.

Otro resultado importante surgió en 1962, cuando se predijo que la corriente eléctrica fluye entre dos materiales superconductores separados por un aislante; este logro se le atribuye a Brian David Josephson y al arreglo del dispositivo se le conoce como junturas Josephson en su honor. Poco tiempo después confirmaron experimentalmente este resultado y en 1973 fue galardonado con el Premio Nobel de Física. Estas junturas son utilizadas en unos dispositivos electrónicos llamados SQUID, acrónimo inglés para *Superconducting Quantum Interference Devices* (dispositivos superconductores de interferencia cuántica). Estos dispositivos son capaces de medir campos magnéticos muy débiles del orden de 5 aT ($1 \text{ aT} = 1 \times 10^{-18} \text{ T} = 1 \times 10^{-14} \text{ G}$).⁶ En comparación, el campo magnético de un imán que colocamos en un refrigerador casero es del orden de 100 G. El campo magnético terrestre es de aproximadamente 0.5 G, es decir, 10,000,000,000,000 veces más intenso que el valor mínimo que pueden detectar los SQUID's. Detectar este tipo de campos magnéticos tan pequeños en presencia del campo magnético terrestre, es mucho más complicado que poder registrar un pequeño susurro durante un concierto de *Heavy Metal*.

Un avance significativo se llevó a cabo en 1973 con el descubrimiento del compuesto Nb_3Ge , un superconductor con una $T_c = 22.3 \text{ K}$, y durante muchos años no se pudo superar este valor. La comunidad científica suponía que la superconductividad pertenecía a las bajas temperaturas.

SUPERCONDUCTORES DE ALTA T_c

Durante trece años no hubo avances significativos, solo pequeños desarrollos y algunas aplicaciones especializadas. En abril de 1986, Karl Alexander Müller y Johannes Georg Bednorz publicaron el trabajo *Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O*. ¡Habían encontrado un óxido con una $T_c = 30 \text{ K}$! Un logro significativo si nos ponemos a pensar que nadie había

logrado superar los 22.3 K en trece años, y adicionalmente la T_c había aumentado de 4.2 K en 1911 a 22.3 K en 1973. Un año después, en 1987, fueron galardonados con el Premio Nobel de Física, uno de los premios otorgados más rápidos en la historia.

Llegó 1987, Maw-Kuen Wu *et al.*, cambiaron lantano ($^{57}\text{La}^{+3} [\text{Xe}]5d^16s^2$) por itrio ($^{89}\text{Y}^{+3} [\text{Kr}]4d^15s^2$), dos elementos con la misma cantidad de electrones de valencia, su publicación se titula *Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure*. El $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ es un óxido superconductor con una $T_c = 93$ K. Esto tenía importantes consecuencias, ya que estos materiales podían refrigerarse con nitrógeno líquido que es muy barato (su costo seguramente es inferior a su equivalente en cerveza); ahora cualquier laboratorio podía trabajar por debajo de la temperatura de transición. A estos superconductores se les etiquetó como de alta T_c y de tipo II. Hubo un *boom* por todo el mundo, algunos científicos abandonaron sus áreas de investigación y se pusieron a trabajar en superconductividad; se encontraron decenas de superconductores e inició una nueva era en la ciencia de los materiales.

En esta nueva etapa, las teorías fueron insuficientes para explicar el fenómeno de la superconductividad de alta T_c . En un torbellino de ideas se dieron muchos puntos de vista, no siempre basados en conocimientos y argumentos sólidos. Una de las conclusiones más importantes fue que la interacción electrón-fonón no era el mecanismo responsable de la superconductividad de alta T_c . Sin embargo, resultados experimentales recientes han vuelto a poner este tipo de interacción en el centro de las investigaciones.

Es importante mencionar que la T_c en los superconductores convencionales es muy baja, cercana al cero absoluto, donde el movimiento de las partículas se reduce drásticamente. Si la temperatura del material superconductor aumenta, entonces, las vibraciones de los iones de la red también. Este aumento progresivo genera la ruptura de los pares de electrones y, por lo tanto, la supresión de la superconductividad.

Un consenso general, es que la superconductividad de alta T_c es debida a un condensado de pares de Cooper, como en el caso convencional, solo que el sistema es más complejo; lo que no está establecido es el tipo de mecanismo de interacción entre los pares de electrones.

Partiendo de este hecho, encontramos varias teorías que proponen interacciones más fuertes que el fonón a altas temperaturas, como son el excitón, el plasmón, el polarón, etcétera. Aunque también podría ser una combinación de algunos de ellos. Si bien esta idea no está descartada, no tiene mucho eco en el ambiente científico. Los mecanismos que en los últimos años han sido muy estudiados y hasta el momento prevalece su importancia son las fluctuaciones de espín y los fonones.

Un punto importante que podría dar luz a la solución, es la simetría del parámetro de orden. Recientemente, se está trabajando en los mecanismos que generan estados de onda *s*. Estas teorías en general, están basadas en la interacción a través de fonones. Otros grupos son partidarios de estados de onda *d*. En este caso las principales teorías están basadas en fluctuaciones de espín. El establecer el tipo de simetría no asegura conocer en detalle el mecanismo, pero sí permitiría eliminar algunos mecanismos propuestos.

Una de las formas de buscar la huella del mecanismo de interacción entre los pares de Cooper, es a través del siguiente arreglo: del lado izquierdo ponemos un superconductor de alta T_c , en medio un aislante y en el extremo derecho un metal (superconductor|aislante|metal). Una vez que tenemos el arreglo, disminuimos la temperatura por debajo de T_c , de tal manera que el metal permanezca en el estado normal, generamos una diferencia de potencial para obligar a los pares de Cooper que pasen al metal, una vez en el estado metálico los pares de electrones no pueden estar unidos, por lo tanto, liberarán la energía que los mantenía ligados; en esa energía se busca la información acerca del mecanismo.

Otro punto importante es que estos superconductores no se comportan como lo predice el modelo de Abrikósov. Es común que los vórtices en estas estructuras no se organicen en estructuras triangulares, más bien parece un líquido de vórtices. Un estado en el que los vórtices se mueven por todo el material.

Han surgido muchas teorías e ideas, pero ninguna ha logrado el consenso de la comunidad científica, este sigue siendo un tema abierto aún hoy en día. Algunos investigadores piensan que existen fenómenos nuevos que no hemos descubierto y otros piensan que

la respuesta está en las teorías iniciales. Los avances más recientes se pueden consultar en el portal de internet <http://superconductors.org>. Actualmente, los óxidos siguen siendo los de más alta T_c ; en este momento se han publicado observaciones en el compuesto $Tl_7Sn_2Ba_2SiCu_{10}O_{20+}$ con una $T_c = 326$ K, en el portal de Internet antes mencionado. El problema de estos materiales es que se degradan en poco tiempo, son frágiles, caros de fabricar y no es fácil convertirlos en cables u otras formas útiles.

Durante más de un siglo se ha publicado una cantidad tremenda de artículos de investigación sobre superconductividad, podríamos asegurar que más de 100 mil, donde se han descubierto muchas características comunes. Sin embargo, la complejidad de estos nuevos superconductores es evidente, por ejemplo, el Pb tiene una estructura cristalina muy simple, es cúbica centrada en las caras con una $T_c = 7$ K, mientras que en el $Tl_7Sn_2Ba_2SiCu_{10}O_{20+}$ su estructura es compleja con una $T_c = 326$ K.

Si tomamos en cuenta que la temperatura ambiente está alrededor de los 300 K, entonces las aplicaciones tecnológicas son mejores si la T_c está alrededor de este valor, la gama de aplicaciones es muy amplia, por ejemplo: generadores eléctricos con cables superconductores, con eficiencias por arriba del 99% y la mitad de su tamaño con respecto a los correspondientes con alambres de cobre, procesadores mucho más rápidos basados en junturas Josephson con un consumo muy pequeño de energía, campos magnéticos intensos, trenes de levitación magnética, transmisión más eficiente de la energía eléctrica, dispositivos superconductores de interferencia cuántica, SQUID, mencionados anteriormente, equipos de resonancia magnética más pequeños y baratos, almacenamiento de energía a través de una bobina cerrada, generación de energía a través de botellas magnéticas para la fusión nuclear, selección magnética, con el fin de separar sustancias magnéticas o impurezas en aguas residuales, etcétera.

Sin duda alguna, la superconductividad es uno de los descubrimientos más impactantes e importantes del hombre del siglo XX y para algunos es también la derrota a su intelecto.

NOTAS

- ¹ La superfluidez es un movimiento coordinado de átomos sin ninguna viscosidad que fluye más rápido en un popote que en un oleoducto.
- ² En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de temperatura es el kelvin (K), conocida también como la escala de temperatura absoluta cuyo valor mínimo es 0 K. Se representa solo con la letra K, nunca con °K. Existen otras escalas de temperatura como: Celsius (°C), Fahrenheit (°F), Rankine (°R), Réaumur (°Ré), Rømer (°Rø), Newton (°N), Delisle (°De).
- ³ El ciclo Hampson-Linde sirve para licuar gases y se basa en el efecto Joule-Thomson. Los componentes del ciclo son: compresión, extracción de calor, descompresión y cámara de licuación. En 1878 von Linde fundó la empresa *Lindes Eismaschinen AG*, actualmente tiene el nombre de *Linde AG*, es una empresa especializada en gases industriales.
- ⁴ John Bardeen hasta ahora es el único físico que ha recibido el Premio Nobel de Física en dos ocasiones; en 1956 lo recibió por sus investigaciones sobre los semiconductores y el descubrimiento del efecto del transistor.
- ⁵ Alekséi Alekséyevich Abrikósov, físico ruso, nació el 25 de junio de 1928. Fue galardonado con el Premio Nobel de Física en 2003 por sus contribuciones a la teoría de los superconductores y superfluidos.
- ⁶ La unidad del campo magnético en el sistema cegesimal (CGS) es el Gauss (G) nombrada en honor al matemático alemán Carl Friedrich Gauss. La unidad correspondiente en el Sistema Internacional es el Tesla (T), nombrada así en honor al físico Croata Nikola Tesla. $1T = 10,000$ G.

LECTURAS RECOMENDADAS

- Ortoli S and Klein J (1989). *Historia y leyendas de la superconductividad*. Editorial Gedisa, 1. ed. 224 pp.
- Magaña Solís LF (1997). *Los superconductores*. Fondo de Cultura Económica.
- Roberto Escudero. *Materiales avanzados* (2004), *Superconductividad, ¿qué es y en dónde buscar?* 2:6-8.
- R. Baquero (2006). *El fascinante mundo del estado sólido: la superconductividad*, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC).
- Navarro Chávez O y Baquero Parra R (2007). *Ideas fundamentales de la superconductividad*, IIM-UNAM-CINVESTAV.
- Bishop DJ, Gammel PL y Huse DA (1993). Resistencia de los superconductores de alta temperatura crítica, *Investigación y Ciencia* 199:18-25.
- Kirtley JR y Tsuei CC (1996). Superconductividad a altas temperaturas, *Investigación y Ciencia* 241:48-53.
- De Bruyn Ouboter R (1997). Onnes y el descubrimiento de la superconductividad, *Investigación y Ciencia* 248:74-80.

Alberto Rubio Ponce
Departamento de Ciencias Básicas
Universidad Autónoma Metropolitana
arp@azc.uam.mx

Ortencia Ponce Llamas
Escuela Secundaria "Alfonso Reyes"