

Centenario de la superconductividad

J. Rubén Morones Ibarra

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, UANL
rmorones@fcfm.uanl.mx

RESUMEN

En el año de 1911, el físico holandés Kamerling Onnes, estudiando la forma como varía la resistencia eléctrica en un anillo de mercurio, encontró que esta desaparecía a la temperatura de 4.2 K. Kamerling Onnes le llamó a este fenómeno superconductividad. Desde entonces los investigadores de este campo han tratado de explicar el fenómeno. En 1957 se logró una explicación, sin embargo, en 1986 aparecieron los superconductores cerámicos de alta temperatura crítica, para los cuales esta explicación no era satisfactoria. La búsqueda de la explicación del fenómeno continúa hasta nuestros días, así como las aplicaciones de este fenómeno.

PALABRAS CLAVE

Superconductividad, superconductores, Efecto Meißner.

ABSTRACT

In 1911, Dutch physicists Kamerling Onnes, carrying out studies on the temperature dependence of the electrical resistance in a ring of mercury, found that the resistance disappeared suddenly at 4.2 K. Kamerling Onnes called superconductivity to this phenomenon. Since that time, researchers have been trying to understand and explain the phenomenon. In 1957 scientist found an explanation, however, in 1986 a new kind of superconductors of high critical temperature, for which the theory does not work, were found. The search for the explanation of superconductivity at high temperature is still a challenge for scientist.

KEYWORDS

Superconductivity, superconductors, Meißner Effect.

INTRODUCCIÓN

Hace cien años, en los primeros meses de 1911, el físico holandés Kamerling Onnes [Groninga, Países Bajos, 21 de septiembre de 1853-Leiden, 21 de febrero de 1926], realizando experimentos de flujo de corriente eléctrica en un anillo de mercurio en estado sólido a la temperatura de 4.2 K, observó que la resistencia eléctrica desaparecía repentinamente. Kamerling Onnes llamó a este fenómeno superconductividad y al material que la presenta le llamó superconductor. Ambos términos dan perfecta cuenta de lo que se quiere describir.¹



Heike Kamerlingh Onnes
[1853-1926].

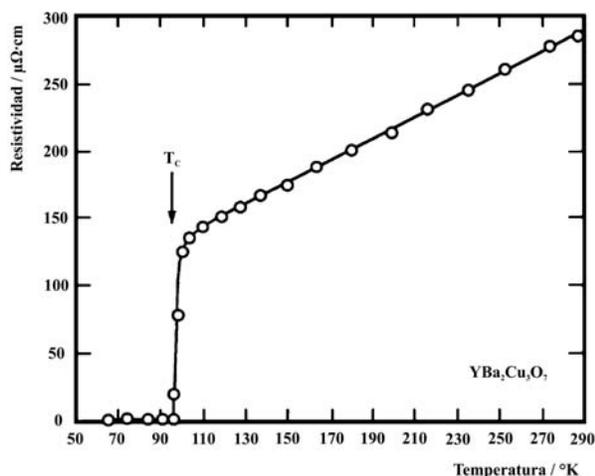


Fig. 1. Se muestra la curva de temperatura contra resistividad del compuesto $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, puede notarse la súbita desaparición de la resistividad al enfriar la muestra.

En su interpretación más simple, la superconductividad es el fenómeno que se observa en un material como consecuencia de la pérdida de la resistencia eléctrica. En este fenómeno la oposición al paso de la corriente eléctrica es nula, por lo cual no hay pérdida de energía por disipación de calor. La superconductividad, que se observó primeramente en el mercurio, fue observada posteriormente en otros metales cuando estos se enfrían por debajo de una temperatura característica llamada temperatura crítica T_c (figura 1). En realidad, el fenómeno de la superconductividad no es solamente resistencia cero, sino que involucra otros efectos como el de la expulsión del campo magnético del interior del material, de lo cual se hablará posteriormente en este escrito.

La historia de la superconductividad y otros fenómenos de las bajas temperaturas inicia con el estudio de la licuefacción de los gases. El intento por licuar los gases atrajo fuertemente la atención de los científicos al finalizar el siglo XIX. Había en esa época gran interés por conocer las propiedades de los gases en estado líquido. Esta inquietud impulsó la ciencia de la criogenia, que se ocupa del estudio de las bajas temperaturas, la cual se desarrolló notablemente con los avances en las técnicas de enfriamiento. Durante el período de 1877 a 1898, se logró la licuefacción del oxígeno y del hidrógeno, no quedando ninguno de los gases por licuar, excepto el helio. Se habían alcanzado temperaturas de 20 K, pero para la licuefacción del helio se requerían temperaturas todavía más bajas, cercanas al cero absoluto.

Cuando se logró la licuefacción del helio se consiguieron temperaturas suficientemente bajas que permitieron el descubrimiento de la superconductividad. Desde su descubrimiento, la superconductividad fue por mucho tiempo un fenómeno de las muy bajas temperaturas, muy cerca del cero absoluto, pues para lograr el estado superconductor, se requirieron temperaturas de 4 K. Dado que estas temperaturas se logran solamente con helio líquido, siendo el helio un elemento escaso aquí en la Tierra, resulta costoso obtenerlo, y todavía es más costoso licuarlo y conservarlo en estado líquido. Por otra parte es difícil evitar “fugas de frío” (que el calor entre al sistema con helio líquido) donde se pierde el estado superconductor. Este hecho restringió fuertemente el aprovechamiento tecnológico de la superconductividad.

En un principio, la fabricación de equipos que utilicen superconductores no fue considerado. No fue sino hasta 1986, año en el que tuvo lugar un descubrimiento extraordinario, cuando se comenzó a pensar seriamente en la tecnología basada en los materiales superconductores. En ese año se descubrió una aleación cerámica que es superconductora a la temperatura de -216°C . Este hecho desató el entusiasmo de científicos y tecnólogos ya que con ello se abría el camino para grandes desarrollos tecnológicos.

CONDUCCIÓN DE ELECTRICIDAD EN LOS METALES

La explicación de la gran capacidad para conducir la electricidad de los metales se basa en la hipótesis de que los electrones en los metales tienen una gran facilidad para moverse. En la mayoría de los metales cada átomo tiene uno o dos electrones débilmente ligados. En los metales en estado sólido los átomos forman una estructura cristalina, un arreglo periódico, donde los electrones de la última capa atómica, llamados electrones de conducción, se pueden mover libremente. Estos electrones de conducción son los que transportan la corriente eléctrica en el metal. El resto de los electrones del átomo permanecen ligados formando un ión positivo que vibra en la estructura cristalina alrededor de una posición de equilibrio, como un oscilador armónico cuántico. La gran movilidad de los electrones de

conducción es lo que explica que los metales sean buenos conductores de la electricidad.

Aún cuando el concepto de resistividad es el adecuado para interpretar los fenómenos de resistencia eléctrica en el nivel microscópico, en este artículo se usará la palabra resistencia eléctrica en vez de resistividad, para no introducir complicaciones innecesarias.

En la primera teoría para explicar el origen de la resistencia eléctrica introducida por P. Drude y H. A. Lorentz entre 1902 y 1909, se supone que los electrones pierden energía mediante los choques con los iones positivos de la red cristalina. Esto se manifiesta macroscópicamente como la resistencia.

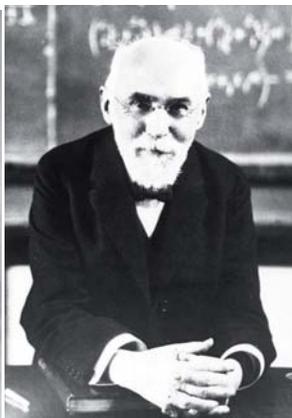
Este modelo da resultados muy satisfactorios a temperaturas ambientales y si los cálculos se realizan usando la descripción cuántica tanto para el electrón como para los metales, los resultados permanecen correctos para un intervalo muy amplio de temperaturas.²

DEPENDENCIA DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA CON LA TEMPERATURA

Desde antes del descubrimiento de la superconductividad ya se habían realizado estudios sobre la resistencia eléctrica en los metales encontrándose que ésta disminuye al disminuir la temperatura. Los investigadores se habían hecho la pregunta de qué pasaría con la resistencia eléctrica de un metal al acercarse al cero absoluto de temperatura.



Paul Karl Ludwig Drude
[1863-1906].



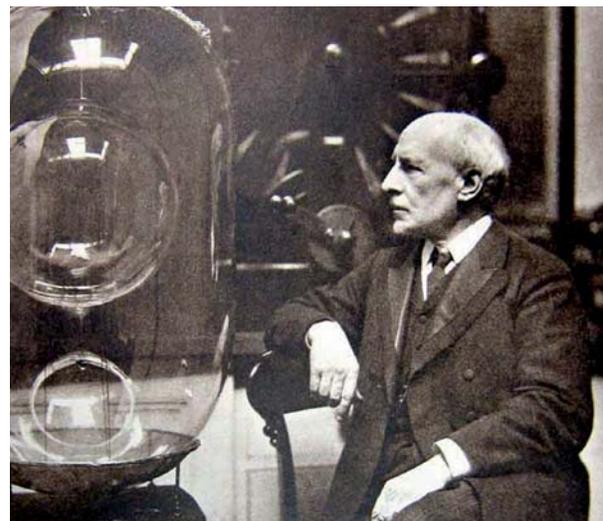
Hendrik Antoon Lorentz
[1853-1928].

Sin embargo, cuando se logra la liquefacción del hidrógeno a la temperatura de 20.4 K, en el año de 1898, se realizaron una serie de experimentos sobre la resistencia eléctrica en metales, cuyos resultados mostraban una fuerte desviación de lo que predecía la física conocida en esos días.

También, en el estudio de los calores específicos de los sólidos, la física fracasaba al tratar de explicar los resultados. Por otra parte, Dewar, experimentando a la temperatura del hidrógeno líquido con la resistencia eléctrica del platino, encontró que ésta disminuía más lentamente de lo que la teoría indicaba.

Estas observaciones y otras más mostraban que la física requería de algunas ideas nuevas. Nadie preveía por esos días que se estaba en el umbral de una revolución científica la cual traería el nacimiento de la teoría cuántica.

En el caso de una estructura cristalina perfecta, la mecánica cuántica predice que el electrón no chocará (no disipará su energía) al moverse a través del cristal. Esto indica que la resistencia eléctrica proviene de las imperfecciones de la red cristalina y/o de las impurezas. Como las imperfecciones siempre existen, y son imposibles de eliminar, sea por impurezas o por defectos de la red, se esperaba que la resistencia eléctrica siempre esté presente, aún en el cero absoluto. Sin embargo, todavía había nuevas sorpresas en el estudio de las bajas temperaturas.



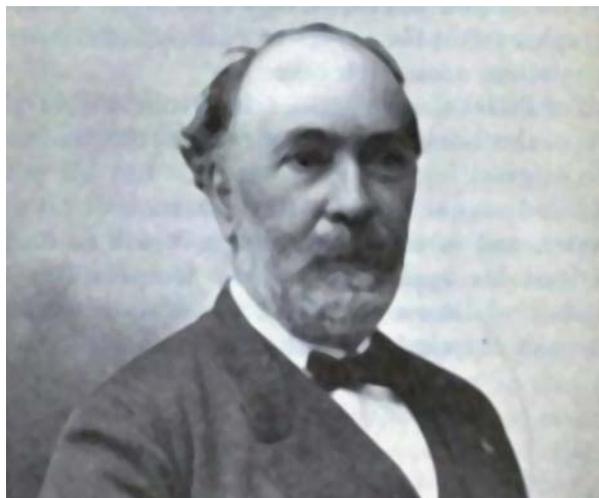
Sir James Dewar [1842-1923].

EL CAMINO HACIA LAS BAJAS TEMPERATURAS

El descubrimiento de la superconductividad está íntimamente relacionado con el estudio de las bajas temperaturas. Podemos decir, en un sentido figurado, que la historia de la superconductividad empezó en el invierno de 1877 en la Academia de Ciencias de París. El 24 de diciembre de ese año, en la reunión semanal de la Academia, se anunció una conferencia dictada por el ingeniero Louis Cailletet. Se había comentado con anticipación que en esa conferencia se haría el anuncio de algo importante. Efectivamente, el ingeniero Cailletet informó a la Academia que había logrado licuar el oxígeno y daba cuenta de un nuevo método de refrigeración descubierto por él.³

En su intento por licuar los gases los científicos del siglo XIX pensaban que estos se podían licuar someténdolos a una presión lo suficientemente elevada sin necesidad de bajar la temperatura. Experimentalmente llegaron a la conclusión de que había unos gases, entre los que se encontraban los componentes del aire, como el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno que no podían licuarse aún a las presiones más elevadas que podían lograr. Un cambio drástico se dio en la estrategia para licuar gases cuando se encontró experimentalmente que cada gas tiene una temperatura crítica, por encima de la cual no es posible licuarlo a ninguna presión.

En su conferencia de diciembre de 1877, Cailletet expuso su descubrimiento de que es posible bajar la temperatura al comprimir un gas y permitir luego



Louis Paul Cailletet [1832-1913].

su expansión. Fue este desarrollo del proceso de enfriamiento por expansión, el que permitió a Cailletet licuar el oxígeno en el año de 1877 a la temperatura de 90.2 K.

El helio es la sustancia con menor punto de ebullición, lo que significa que es la sustancia más difícil de licuar. Por este motivo es utilizado ampliamente como refrigerante en estudios de los fenómenos de las bajas temperaturas. En el camino hacia las bajas temperaturas la licuefacción del helio era la meta ya que éste era el último de los gases permanentes, nombre que se le dio debido a la gran dificultad que presentaba para licuarlo. Finalmente, en el año de 1908, Kamerlingh Onnes logra licuar el helio a la temperatura de 4.2 K (figura 2). Este fue el antecedente necesario para el descubrimiento de la superconductividad.



Fig. 2. Dibujo realizado por Heike Kamerlingh Onnes del equipo que utilizó en su laboratorio de la Universidad de Leiden en los Países Bajos, para licuar el helio en 1908.

EL DESCUBRIMIENTO DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

Una vez licuado el helio los investigadores se encaminaban hacia las temperaturas más bajas del universo, poniéndose en el camino hacia el cero absoluto. Kamerlingh Onnes, que era el líder de las bajas temperaturas, se propuso solidificar el helio. En su intento se dio cuenta que el helio permanecía líquido aún a la temperatura de 1 K. Se había llegado al límite de la tecnología disponible en esa época para bajar la temperatura sin lograr la transición de fase de líquido a sólido para el helio.

Dada la dificultad que encontró en sus pretensiones de solidificar el helio, Kamerlingh Onnes desvió un poco su línea de investigación para estudiar la resistencia eléctrica a las temperaturas tan bajas que había logrado con el helio líquido. Se interesó en estos fenómenos debido a que existían dos teorías opuestas sobre la resistencia de un material al descender la temperatura. Una de estas teorías provenía directamente de los resultados experimentales, los cuales indicaban que al extrapolar los resultados a temperaturas muy bajas, la resistencia desaparecería. La otra teoría establecía que al llegar la temperatura cerca del cero absoluto los electrones perderían movilidad y se “pegarían” a los átomos dando como resultado una resistencia muy grande.

Como resultado de estas investigaciones Kamerlingh Onnes descubrió el fenómeno de la superconductividad. Realizando estudios sobre la corriente eléctrica que fluye por un anillo de mercurio encontró que a la temperatura de 4.18 Kelvin la resistencia eléctrica en el anillo desaparece súbitamente. Observó que la corriente en el anillo de mercurio se mantenía circulando durante semanas, sin ninguna pérdida de intensidad por generación de calor.

En el experimento que condujo al descubrimiento de la superconductividad se construyó un anillo con mercurio sólido (el mercurio se solidifica a una temperatura de -39 grados Celsius), y se enfrió aún más con helio líquido. Mediante el método de inducción electromagnética se inducía una corriente eléctrica en el anillo. Haciendo variar la

temperatura, se encontró que al llegar a los 4.18 K el mercurio perdió totalmente la resistencia eléctrica, convirtiéndose la muestra en un conductor perfecto. El fenómeno que se observó fue totalmente inesperado debido a que la resistencia eléctrica no desapareció gradualmente, sino de una manera abrupta.

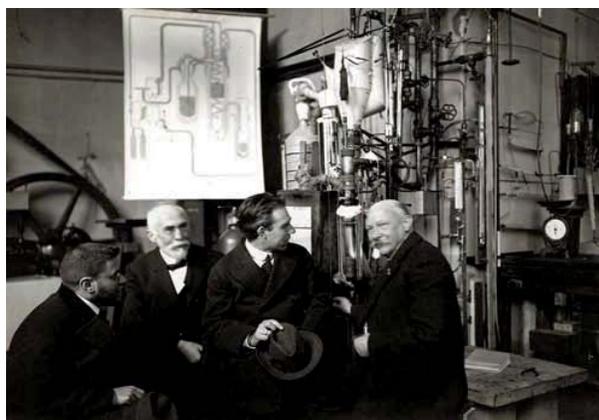
Aun cuando no había ninguna fuente de fuerza electromotriz, la corriente eléctrica en el anillo continuó durante varios días sin sufrir ningún cambio en su intensidad. Esta es una de las características de la superconductividad. De no ser por este fenómeno la corriente eléctrica en el anillo de mercurio se hubiera mantenido solo unas cuantas décimas de segundo. En principio, si se mantienen las mismas condiciones, al producirse una corriente eléctrica en el anillo esta permanecerá para siempre. Se han realizado experimentos de este tipo con diversos materiales que se presentan en estado superconductor, observándose que la corriente persiste por años sin necesidad de una fuente de energía externa que la alimente.

Kamerlingh Onnes recibió el premio Nobel de física en el año de 1913. Extrañamente, el Comité que le otorgó el Premio Nóbel, no hizo mención alguna al descubrimiento de la superconductividad. En su anuncio del Premio, el Comité declaró que se le otorgaba el Premio Nóbel de Física “Por sus investigaciones de las propiedades de la materia a bajas temperaturas que condujeron, entre otras cosas, a la producción del helio líquido”.⁴ Esto ocurrió a pesar de que en esos días se le otorgó gran importancia al fenómeno de la superconductividad, el cual estuvo íntimamente ligado a la producción del helio líquido.

EFECTO MEIBNER

En el año de 1933 el físico alemán Frits Walter Meißner descubre que una sustancia en estado superconductor, además de tener resistencia eléctrica nula, presenta la característica de que se convierte en un material diamagnético ideal, es decir, presenta diamagnetismo perfecto. Este fenómeno consiste en que el material expulsa al campo magnético de su interior. A este fenómeno se le conoce como efecto Meißner.⁵

En el fenómeno de la superconductividad aparece también, además de resistencia eléctrica



Paul Ehrenfest, Hendrik Lorentz, Niels Bohr y Heike Kamerlingh Onnes en el laboratorio de Criogenia de la Universidad de Leiden, en 1919.



Fritz Walter Meißner [1882-1974].

cero, el efecto Meißner. Sin embargo, si se somete a la muestra superconductora a un intenso campo magnético externo, puede desaparecer el estado superconductor aún cuando la muestra se mantenga a una temperatura por debajo de la T_C .

El valor máximo del campo magnético que puede aplicarse a la muestra sin destruir el estado superconductor, se conoce como Campo Crítico (CC). Esto implica que en una muestra de material superconductor no puede penetrar un campo magnético cuando este tiene un valor por debajo del CC.

Un conductor perfecto es un conductor de resistencia cero, pero esto no implica que sea un superconductor. Para esto se requiere que expulse de su interior al campo magnético, es decir que se presente también el efecto Meißner.

Cuando se aplican las ecuaciones del electromagnetismo a un conductor perfecto se obtiene que el campo magnético en el interior del conductor debe ser constante. Para explicar la diferencia entre un conductor perfecto y un superconductor hagamos el siguiente experimento mental. Tomemos una muestra de un material que exhibe el fenómeno de conductor perfecto por debajo de una temperatura crítica T_C . Si inicialmente la muestra está por encima de la T_C y le aplicamos un campo magnético externo constante, este campo penetra en el interior del material, permaneciendo constante. Si ahora bajamos la temperatura por debajo de T_C , observaremos que el campo magnético se mantiene constante en el interior del ahora conductor perfecto.

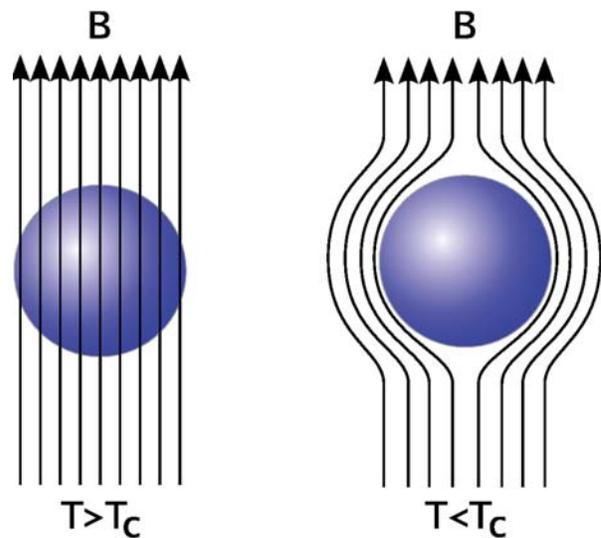


Fig. 3. Expulsión de campo magnético.

Hagamos el mismo experimento pero ahora con una muestra que exhibe el fenómeno de superconductividad por debajo de la temperatura T_C . Lo que observamos es que al alcanzar la temperatura T_C , el campo magnético es expulsado del material, es decir, desaparece el campo magnético del interior de la muestra. Este fenómeno en el que se expulsa el campo magnético del superconductor es el efecto Meißner. El efecto Meißner no tiene que estar presente en un conductor perfecto.

En síntesis: La principal diferencia entre un conductor perfecto y un superconductor es que en el superconductor aparece, además de resistencia cero, el efecto Meißner, mientras que en el conductor perfecto solo se observa la resistencia cero.

Un superconductor es entonces un conductor perfecto donde además se presenta el efecto Meißner. Por otra parte, los resultados mencionados para los conductores perfectos son predichos por la teoría, pero no han sido confirmados experimentalmente ya que los únicos conductores perfectos que se han encontrado son los superconductores.

EXPLICACIÓN DEL FENÓMENO DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

La explicación del fenómeno de la superconductividad presentó por mucho tiempo grandes dificultades. Como es natural, inicialmente se buscó entender el fenómeno interpretándolo en

base a las teorías conocidas, sin embargo todos los intentos fueron infructuosos pues para la explicación microscópica del fenómeno hay que apoyarse en la teoría cuántica, una teoría que todavía no existía. La teoría cuántica, que es la que describe los fenómenos del mundo de los átomos y los electrones, se consolidó al finalizar la década de 1920, pero aún así el fenómeno de la superconductividad resultó tan complejo que tuvo que esperar hasta el año de 1957 para ser satisfactoriamente explicado.

En el caso de los metales, ya se había observado que la resistencia eléctrica disminuye al bajar la temperatura. La explicación era que las vibraciones de la red disminuyen, lo que provoca la correspondiente disminución de los choques entre electrones y la estructura cristalina de la red. Sin embargo, la resistencia cero en el estado superconductor requiere más elementos para ser explicada.

Como ya se mencionó, un conductor perfecto no es un superconductor. El fenómeno de la superconductividad va acompañado del efecto Meißner, el cual da lugar al fenómeno de la levitación magnética. Estos dos efectos tenían que ser explicados por la teoría que se formulase.

La explicación por largo tiempo buscada del fenómeno de la superconductividad en los metales fue dada en el año de 1957 por el físico John Bardeen, en compañía de Leon Cooper y Robert Schrieffer. Por este desarrollo teórico que explica el fenómeno de la superconductividad, los tres científicos recibieron el Premio Nobel de física en 1972. En honor a ellos la teoría de la superconductividad se conoce como Teoría BCS, por las iniciales de sus apellidos.⁶

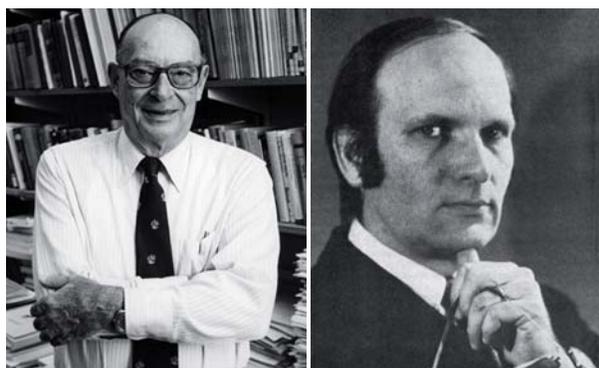
De paso diremos que John Bardeen ya había obtenido el Premio Nobel de Física en el año de

1956, junto con William Schokley y Walter Brattain, por la invención del transistor, convirtiéndose así en la primera persona en ganar dos veces el Premio Nobel de física.

La idea central de la explicación teórica del fenómeno se puede expresar en forma simplificada de la siguiente manera. Sabemos que en un circuito superconductor una corriente eléctrica permanece sin pérdida de intensidad durante varios años sin necesidad de una fuente externa de energía. En el caso de los superconductores metálicos, la teoría BCS explica el fenómeno mediante el concepto de Pares de Cooper. Esta idea establece que en el estado superconductor, los electrones se aparean, es decir, forman parejas, las cuales se mueven en el metal sin chocar con la estructura cristalina. Puesto que la resistencia eléctrica se debe a los choques de los transportadores de carga con la red cristalina, al no haber choques esto trae como consecuencia que la resistencia eléctrica desaparezca.

El fundamento de las ideas que explican la superconductividad, descansa en el concepto de Pares de Cooper. De acuerdo con esto los electrones en su movimiento en la red cristalina del metal, distorsionan la estructura de la red produciendo una atracción entre pares de electrones. De una manera semejante a como sucede en la formación de un átomo de hidrógeno, donde un protón y un electrón se atraen debido a la fuerza eléctrica, uniéndose para formar el estado ligado que es el átomo de hidrógeno, los pares de Cooper son estructuras de dos electrones ligados débilmente como consecuencia de la interacción de estos con la red cristalina.

Aún cuando los electrones tienden a repelerse como consecuencia de que sus cargas son del



John Bardeen [1908-1991]. Robert Schrieffer [1931-].



Leon N. Cooper [1930-].

mismo signo, su interacción mutua a través de la interacción intermedia con la red cristalina, produce una débil atracción que es suficiente para dar lugar a la existencia de un estado ligado de los dos electrones. Los resultados cuantitativos de esta teoría describen satisfactoriamente lo que ocurre en los superconductores conocidos en esa época.

NUEVAS SORPRESAS DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

Los estudiosos de la superconductividad habían logrado algunos avances modestos en cuanto a la búsqueda de nuevos materiales superconductores. En el año de 1954 el material superconductor de temperatura más alta era una aleación a 18 K. En 1973 se logró la superconductividad en un material a 23.2 K.

Después de muchos años de trabajo en todo el mundo buscando avances en los estudios sobre la superconductividad, en enero de 1986 tuvo lugar un acontecimiento notable. En un laboratorio de Zurich en Suiza, los físicos Karl A. Muller y George Bednorz lograron un salto cuantitativo al producir un óxido cerámico superconductor a 35 K. Se dice que estos dos científicos iniciaron la carrera por la búsqueda de los superconductores de alta temperatura.

Muy poco tiempo después, otro descubrimiento sorprendente tuvo lugar en los laboratorios de física de la universidad de Huntsville, Alabama. El físico Maw-Kuen Wu y su equipo, obtienen una muestra superconductora a 90 K. Trece grados por arriba de la temperatura del nitrógeno líquido.⁷ Esto significa



Karl Alex Muller [1927-] y Johannes George Bednorz [1950-].

el inicio de una era de la tecnología basada en la superconductividad, pues el nitrógeno líquido, que se aprovecharía para mantener la temperatura del estado superconductor, es un producto comercial relativamente barato.

Recién descubierto el fenómeno de la superconductividad de alta temperatura en materiales cerámicos en 1986, los científicos le dieron vuelo a la imaginación y concibieron un mundo nuevo, fascinante, basado en la tecnología de la superconductividad. Imaginaron que el impacto de esta tecnología transformaría la vida cotidiana en todo el mundo. Los ingenieros y científicos rebosaban de alegría pensando en un mundo espectacular de desarrollos tecnológicos nuevos. Sin embargo, no hay que olvidar que lo que puede ser posible desde el punto de vista de la ciencia puede no serlo desde la óptica de la tecnología o de la economía.

EL CONGRESO DE LA APS DE MARZO DE 1987

En enero de 1987 se descubren los materiales con propiedades superconductoras a temperaturas por encima de las del nitrógeno líquido. De pronto la imaginación de los científicos e ingenieros se echó a volar y se pensó en las aplicaciones de este fenómeno a líneas de transmisión de electricidad con cero pérdidas de energía, de trenes levitando magnéticamente y muchas maravillas más. Los medios de comunicación anunciaban al mundo las nuevas tecnologías y la palabra superconductividad se volvió muy familiar en el mundo de las personas que escuchan las noticias por televisión.

La gente común empezó a oír el término superconductividad, algo completamente desconocido para ellos pero que empezaba a sonar fuerte asociándolo con un mundo fantástico. Esta fue la causa del entusiasmo que despertó en el público el Congreso Nacional de Física de la American Physical Society (APS), celebrado en Nueva York, EUA, en marzo de 1987.

El interés que generó la superconductividad de alta temperatura hizo que se desbordaran los ánimos entre los físicos que asistieron al Congreso de la APS en N. Y. en 1987. Fue ese un momento tan emocionante en la historia de la física del siglo XX, que ha sido llamado el Festival de Woodstock

de la Física, en franca alusión al famoso festival de Rock de 1969.

En una de las salas donde se presentaría una conferencia sobre superconductividad, cuatro mil personas esperaban para entrar a la conferencia. Unos a otros se empujaban para entrar al salón que tenía una capacidad para 1,200 personas. Al día siguiente el *New York Times* bautizó al congreso como el Woodstock de la física .

El físico George Johann Bednorz, uno de los descubridores de los materiales superconductores de alta temperatura crítica, fue una de las estrellas del famoso Congreso anual de la APS en 1987. Ese mismo año G. Johann Bednorz ganaría el premio Nóbel de física compartiéndolo con Karl Alex Muller, otro de los descubridores de estos superconductores.

LA SUPERCONDUCTIVIDAD

La teoría BCS que exitosamente explicó la superconductividad en los metales, resultó inapropiada para explicar la superconductividad de alta temperatura. La idea simple de superconductividad presentada en la introducción de este artículo, muestra solo un aspecto cualitativo del fenómeno, sin embargo el fenómeno involucra situaciones muy complejas. Hasta el momento no se cuenta con una teoría que explique la superconductividad en las aleaciones cerámicas. Esto representa una oportunidad para las nuevas generaciones de físicos, e ingenieros interesados en este tema, de contribuir al conocimiento científico aportando ideas para la explicación del fenómeno de la superconductividad de alta temperatura.

SUPERCONDUCTORES TIPO I Y TIPO II

La clasificación actual de los materiales superconductores los divide en dos tipos, identificados como superconductores tipo I y tipo II. Esta clasificación está basada en el comportamiento de los materiales superconductores cuando se colocan en campos magnéticos. Los superconductores tipo I son aquellos que al colocarlos en un campo magnético externo, sufren una transición abrupta del estado Meißner al estado normal. En este tipo de superconductores existe un valor crítico del campo

magnético externo (CC) por encima del cual el campo penetra totalmente en el material haciendo desaparecer repentinamente el estado superconductor.⁸

Los superconductores tipo II, en cambio, sufren una transición del estado Meißner a otro de penetración parcial del campo magnético cuando este tiene un valor CC1, manteniendo sin embargo la resistencia cero. De aquí en adelante, el campo magnético continúa penetrando hasta que se alcanza el estado normal a un valor CC2 del campo magnético externo, desapareciendo la superconductividad. En este tipo de materiales el estado superconductor desaparece hasta que se alcanza el segundo valor crítico CC2.

SUCESOS HISTÓRICOS DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

En el desarrollo histórico de la superconductividad encontramos que este fenómeno se descubre en el mercurio, posteriormente en el estaño y después en el plomo. Todos ellos a temperaturas de entre 4 y 7 K. Otros elementos químicos fueron agregados posteriormente. Para 1930 el elemento químico (metal) de más alta T_c era el Nb con $T_c = 9.2$ K y después de 20 años se encuentran materiales formados por aleaciones que son superconductores. Posteriormente en los años setenta se descubren los superconductores orgánicos y algunos años después, en 1986 se descubren los cupratos superconductores de alta temperatura. En la actualidad, a cien años del descubrimiento del fenómeno, encontramos superconductores de T_c igual a 160 K.

Durante los años de 1950-1960 Bernard T. Mathias formó más de 3,000 aleaciones diferentes buscando una que fuera superconductora a una T_c elevada, sin tener éxito.⁹

La superconductividad se ha encontrado también en materiales orgánicos, en polímeros y en fulerenos, pero todavía no se conoce la explicación del fenómeno de la superconductividad de alta T_c . Las observaciones de los materiales estudiados y los resultados experimentales obtenidos, parecen indicar que la superconductividad es incompatible con el magnetismo ya que no se han encontrado hasta ahora superconductores formados por compuestos magnéticos.

APLICACIONES DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD

La lista de aplicaciones de la superconductividad es inmensa, pero dado que el fenómeno de la superconductividad solo se observaba a temperaturas cercanas a las del helio líquido, la posibilidad de uso práctico se reducía por incosteabilidad económica. La obtención y mantenimiento del helio en estado líquido es un proceso muy caro y esto limitaba la explotación práctica del fenómeno de la superconductividad.

Cuando se descubrió la superconductividad se pensó que la construcción de imanes superconductores que produjeran intensos campos magnéticos sería una realidad muy cercana. Pero esto no fue fácil y se tuvo que esperar hasta el año de 1950 para lograr la fabricación de los primeros imanes superconductores. Hoy en día es frecuente encontrar imanes superconductores en los grandes y medianos laboratorios de física. El ya popular aparato de Resonancia Magnética Nuclear usado para diagnóstico en medicina utiliza un imán superconductor.

Aún en el caso de usar materiales superconductores que tengan que emplear helio líquido como refrigerante, cuyo costo es elevado, muchas veces esto resulta más barato que el uso de materiales conductores convencionales debido a la gran cantidad de energía que se requiere emplear en electroimanes convencionales.

Comparado con las temperaturas más frías de la Tierra que oscilan entre los -60 y -70 grados Celsius, la temperatura de estado superconductor del mercurio, que es de -269 Celsius, convierte a la superconductividad en algo impráctico o con muy pocas posibilidades comerciales. Sin embargo, con los materiales superconductores de alta temperatura, el fenómeno es alcanzable a la temperatura del nitrógeno líquido.

Como ya se mencionó, los ingenieros y científicos imaginaron grandes aplicaciones tecnológicas de la superconductividad: Imanes superconductores muy potentes, cables de transmisión de resistencia cero y trenes flotando sobre las vías por levitación magnética. Sin embargo, todo este entusiasmo se vino abajo debido a los altos costos de esta tecnología. A pesar de esto, se está en espera de una nueva revolución tecnológica que se piensa que puede tener un impacto comparable a la tecnología del transistor.

Los superconductores son ampliamente usados en una gran variedad de instrumentos científicos de investigación y en la medicina. En la actualidad, la principal aplicación de la superconductividad es en la fabricación de los grandes electroimanes empleados en los laboratorios de física de altas energías, en los experimentos de fusión termonuclear y en los equipos de RMN (Resonancia Magnética Nuclear). Los enemigos de la superconductividad son el aumento de temperatura y la aparición de campos magnéticos por encima de los valores críticos, que destruyan las propiedades superconductoras. Estos dos factores hacen costosa esta tecnología.

Con el descubrimiento de materiales que muestran superconductividad a temperaturas por encima de la del nitrógeno líquido este fenómeno adquiere un potencial de aplicaciones enorme. Por ser el nitrógeno líquido relativamente barato, esto lo convierte en un excelente refrigerante con aplicaciones en los procesos donde se utilicen materiales que son superconductores a temperaturas superiores a las del nitrógeno líquido.

Los imanes superconductores tienen la característica de producir intensos campos magnéticos a muy bajo costo, aún cuando se requiera enfriarlos a muy baja temperatura. Si se lograra encontrar un material superconductor a temperatura ambiental podría utilizarse en líneas de transmisión de electricidad sin las pérdidas que ahora se tienen, las cuales provienen de la disipación de energía por medio del calor que se genera por efecto Joule.



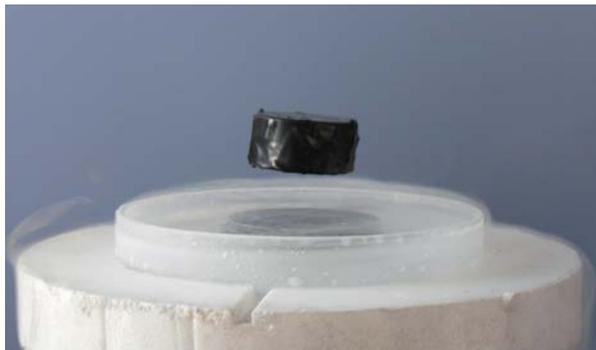
Gracias a la superconductividad los imanes de los equipos por resonancia magnética permiten generar grandes campos, los que permiten obtener mejores imágenes.

Un logro de esta naturaleza produciría cambios en muchos campos de la tecnología. Los trenes que aprovechen la levitación magnética son un ejemplo. Por otro lado, uno de los sueños de los ingenieros ha sido el de lograr disminuir la resistencia eléctrica de los cables que se usan para transmisión del flujo eléctrico a grandes distancias. Ese sueño se remonta a la época en que se observó que la resistencia eléctrica de los metales como el cobre, disminuye al bajar la temperatura. Al descubrirse que se requieren temperaturas muy bajas para que se tenga una baja resistencia que haga atractivo el fenómeno, los ingenieros abandonaron la idea por resultar prácticamente incosteable comercialmente. Sin embargo, este sueño ha revivido con el descubrimiento de los materiales superconductores de alta temperatura.

Los elementos de la tabla periódica en estado puro han proporcionado valiosa información en el estudio de la superconductividad, sin embargo, en aplicaciones a gran escala de este fenómeno como la fabricación de cables o alambres para imanes no han tenido ninguna contribución.

Actualmente el mercado de superconductores lo forman principalmente los laboratorios que fabrican imanes y equipos de resonancia magnética nuclear y alambres que consisten de filamentos superconductores muy delgados, cables y alambres de alta tecnología

Posiblemente cuando se logre entender este fenómeno, se puedan diseñar y construir dispositivos y aparatos con tecnología basada en estos materiales superconductores. Habrá que esperar ese momento para poder ver la explotación comercial de esta tecnología.



Levitación magnética debido al efecto Meißner.

COMENTARIOS FINALES

El descubrimiento de la superconductividad no se dio como una consecuencia de la buena suerte o de la casualidad. Este es un caso típico de descubrimiento científico que se da cuando las condiciones tecnológicas y científicas han llegado a un punto en el cual todo favorece para que ocurra el descubrimiento. La licuefacción del helio permitía ya el estudio del fenómeno de la conducción de corrientes eléctricas en materiales enfriados a esa temperatura. Fue así como se llegó al descubrimiento de la superconductividad.

La superconductividad, dicho sea de paso, fue solo uno entre muchos descubrimientos que se realizaron en el campo de las muy bajas temperaturas. Entre estos descubrimientos encontramos el espectacular fenómeno de la superfluidez, el condensado de Bose-Einstein, así como los extraños valores de las capacidades caloríficas de los metales. Siendo la temperatura una variable fundamental que entra en la estructura de la materia a través de una ecuación de estado, se esperaba que muchos nuevos descubrimientos tuvieran lugar en el campo de la criogenia de las muy bajas temperaturas.

La investigación sobre la materia condensada tendrá mucho que aportar al conocimiento científico en el terreno de las muy bajas temperaturas. Los jóvenes científicos, experimentales y teóricos tienen una gran oportunidad de aportar mucho a la comprensión de los fenómenos en este campo. En el año de 1924 Kamerlingh Onnes tenía 71 años cuando observó un fenómeno extraordinario del helio a la temperatura de 2.2 K. Midió su calor específico encontrando un valor muy elevado, por lo que creyó que habían cometido algún error en las mediciones. Por temor al ridículo no se atrevió a publicar este resultado. Su prestigio de científico le impedía dar a conocer resultados que nadie creería. Sin embargo sus experimentos estaban correctos y perdió otra vez la oportunidad de ser el primero en dar a conocer al mundo el fenómeno de la superfluidez. Los físicos que han rebasado cierta edad se vuelven ortodoxos y son temerosos de romper los cánones establecidos, más si son científicos de prestigio. Por esta razón, en la historia de la ciencia, las grandes aportaciones han sido hechas por jóvenes. Estos sí son atrevidos y audaces, pues no tienen aún un prestigio que tengan que cuidar.

En la actualidad los físicos teóricos realizan una intensa investigación tratando de encontrar, en la complejidad de la estructura de la materia, una explicación al fenómeno de la superconductividad de alta temperatura crítica. Esta línea de investigación se inscribe entre los grandes desafíos de la física contemporánea.

REFERENCIAS

1. Stephen Blundell, Superconductivity, a very Short Introduction, Oxford University Press, 2009.
2. James F. Annett, Superconductivity, Superfluids and Condensates, Oxford University Press, 2003.
3. K. Mendelssohn, La búsqueda del cero absoluto, Ediciones Guadarrama, 1965.
4. David Halliday, Robert Resnick and Kenneth S. Krane, Physics, Four Edition, John Wiley and Sons, 1992.
5. Kristian Fosheim and Asle Sudbo, Superconductivity, Physics and Applications, John Wiley and Sons, 2004.
6. Michael, Tinkham, Introduction to superconductivity, Second Edition, Dover Publications, 2004.
7. Sven Ortolí y Jean Klein, Historia y Leyendas de la Superconductividad, Gedisa, 1990.
8. Shigeji Fujita, Kei Ito, Salvador Godoy, Quantum Theory of Conducting Matter, Springer Science, 2009.
9. Gianfranco Vidali, Superconductivity: The next revolution?, Cambridge University Press, 1993.

Anúnciese en:

Ingenierías



INFORMES:
Tel: (52) (81) 83294020 Ext. 5854
Fax: (52) (81) 83320904
E-mail: revistaingenierias@gmail.mx
Internet: <http://ingenierias.uanl.mx>