

Avance y Perspectiva

Revista de divulgación del CINVESTAV

El largo camino de la Superconductividad a temperatura ambiente

Karina Galache · Friday, February 11th, 2022

Categorías: Ciencias Exactas, Zona Abierta

En 1911 el físico Holandés H. Kamerlingh Onnes observó que la resistividad eléctrica de una muestra de mercurio (Hg) cambiaba abruptamente conforme se enfriaba. En la Fig.1a se muestra la gráfica original [1]. Se observa que alrededor de 4.22 K la resistencia decrece súbitamente hacia un valor que es prácticamente cero ($<10^{-11}$ Ohms-cm). Se consideró que a partir de 4.22 K el Hg sufría una transición a un estado tal en el que su resistencia eléctrica desaparecía. Esta nueva condición se le llamó estado superconductor (ESc), y desde entonces se habla del fenómeno de la superconductividad (SC), donde algunos materiales conducen electricidad sin resistencia.



Fig.1 Resistencia vs Temperatura. a) Curva original para el mercurio, b) Curva de una muestra de $TlBa_2Ca_2Cu_3O_9$.

Desde su descubrimiento, el fenómeno ha sido observado en varios materiales que van desde elementos metálicos simples, compuestos intermetálicos, óxidos metálicos y hasta compuestos orgánicos [2-3]. Cada material o compuesto transita al estado superconductor a una temperatura particular, llamada temperatura crítica (T_c), cuyo valor es una característica particular para cada material superconductor. En la Figura 1b, se muestra la transición observada a través de la resistencia para un compuesto basado en Talio-Bario-Calcio-Cobre-Oxígeno [4], y en la Tabla-I se enumeran algunos compuestos superconductores y sus respectivos valores de T_c .



TABLA 1. Algunos ejemplos de materiales que presentan superconductividad. Datos tomados de la Ref-2.

La superconductividad es un estado en el que, además de la pérdida de la resistencia eléctrica, se presentan otros fenómenos físicos, por ejemplo la levitación magnética, que consiste en que cuando un material ha pasado al estado superconductor y se pone en presencia de un imán, el material levita, ver Fig.2. A este fenómeno se le conoce como efecto Meissner, en honor al científico alemán Walther Meissner quien observó el fenómeno por primera vez. Cuando un

superconductor se enfría por debajo de su T_c no permite la entrada de campos magnéticos a su volumen. Debido a esta oposición a la entrada de campos magnéticos, cuando se pone en presencia de un imán, el material simplemente flota sobre él o viceversa. Otro fenómeno que puede observarse en el ESc es el de la penetración cuantizada de flujo magnético en anillos hechos de material superconductor. Este fenómeno es empleado actualmente para la detección de campos magnéticos ultra débiles a través de sensores hechos de materiales superconductores (MSC), conocidos como “SQUIDS” [1, 2].



Fig.2. Levitación de un superconductor en presencia de imanes.

Debido a estas y otras propiedades, las posibles aplicaciones de los materiales superconductores son extraordinarias y plantean una posible revolución industrial. Actualmente existen dispositivos eléctricos y electrónicos basados en materiales superconductores, aunque por el momento las aplicaciones son en ámbitos muy puntuales. Los ejemplos más destacables son la detección de señales magnéticas débiles en imagenología magnética en hospitales especializados, ver Fig.3, y los electroimanes hechos con base a cables superconductores para producir campos magnéticos intensos. No obstante, debido a las bajas temperaturas requeridas para alcanzar el estado superconductor la revolución masiva no se ha extendido. Debido a esto, durante casi cien años se han hecho esfuerzos por encontrar materiales que conduzcan al Estado Superconductor a temperaturas cercanas a 300 K (temperatura ambiente), lo cual haría viable construir tecnología sustentada en las propiedades de los superconductores, tales como cables para las líneas de transmisión de corriente eléctrica, dispositivos para la manipulación de la electrónica, y hasta sistemas de transporte basados en la levitación.



Fig.3. Detección de señales magnéticas cerebrales mediante dispositivos superconductores SQUIDS. Imágenes del internet.

La Física detrás del fenómeno de la superconductividad

La primera teoría fundamental para explicar el fenómeno de la superconductividad llegó cincuenta años después de descubrirse el primer material superconductor. Está contenida en lo que actualmente se conoce como teoría BCS, formulada por los físicos John Bardeen, Leon Cooper and John Schrieffer [1, 2], e involucra conceptos de mecánica cuántica, estado sólido, electrodinámica y física estadística. El primer ingrediente fundamental de la teoría BCS es la postulación de que, en el momento de la transición, dentro del material se forman entes conocidos como pares de Cooper, que son pares de electrones con espines opuestos que en lugar de repelerse (como lo indicaría la electrodinámica clásica) se atraen. El que tengan espines opuestos ocasiona que se comporten como una única partícula de espín cero, mientras que los electrones normales tienen espín $\pm 1/2$. De acuerdo con las leyes de la Mecánica Cuántica, que un conjunto de partículas tenga espín entero implica que éstas poseen la habilidad para organizarse en un solo estado (estado bosónico). Esto es lo que ocurre en la transición SC; “todos” los electrones dentro de un material superconductor pasan a un estado organizado de mínima energía en el que no se produce resistencia. Por el contrario, en los conductores normales cada electrón sufre dispersión continua por los choques con los iones que forman la estructura cristalina del material, lo que da lugar a que cada uno esté en un

estado particular, y como conjunto todos los electrones están en un estado desorganizado, dando lugar a la resistencia eléctrica. El segundo ingrediente de la teoría BCS es la formulación del mecanismo que haría posible la formación de los pares de Cooper. Éste resulta ser la interacción de los electrones con las vibraciones de la red cristalina. En un dibujo dicha atracción entre pares de electrones se puede esquematizar como se muestra en la Figura-4. El movimiento de la red (formada por iones positivos) puede, por un instante, formar una nube de carga positiva alrededor de un electrón, que es capaz de ser sentida por un segundo electrón que de forma automática se movería hacia ese conglomerado de carga positiva.

El resultado final puede interpretarse como una atracción entre dos electrones mediada por el movimiento de la red (fonones). Este fenómeno nunca se observaría entre dos electrones en el vacío; sin embargo, la presencia de un medio, tal como la red cristalina y sus vibraciones, lo hace posible. Cuando se estudian las excitaciones de este nuevo sistema de pares de Cooper así formado, se concluye que para sacar de ese estado o disociar a los pares se les debe transmitir una energía por arriba de cierto valor mínimo Δ , conocido como brecha superconductora ($\Delta \sim$ decenas de electrón-volts), esto los llevaría a estados donde se comportarían como electrones normales. Por el contrario, todo ente que les transmita energías menores a Δ no logrará disociar a los pares. En particular, a bajas temperaturas las vibraciones de la red cristalina, responsables de la resistencia eléctrica clásica, no son capaces de disociar a los pares porque tienen energías menores a Δ ; el condensado de pares es estable y el material queda en el ESc.



Fig.4. Esquema de formación de pares de Cooper dentro de una red cristalina.

La búsqueda de nuevos materiales superconductores

Durante casi todo el siglo XX, los MSC debían enfriarse por debajo de 25 grados Kelvin (-250 grados Celsius, °C) para observar el fenómeno de la superconductividad. Sin embargo, un gran salto ocurrió en la década de los años 80 de ese siglo cuando se descubrió una familia de superconductores que contienen cobre (Cu) y oxígeno (O) como parte fundamental de su estructura y composición química (adicional a otros elementos que varían dependiendo del compuesto particular). Estos materiales pasan al ESc alrededor de 100 K (-173°C). Debido a la presencia de cobre y oxígeno en su composición; a esta familia se le suele llamar cupratos superconductores; un par de ejemplos de ese tipo de compuestos se describen en la Tabla-I. La búsqueda de nuevos MSC ha seguido su curso, se han descubierto varios superconductores; aunque la mayoría tienen una baja temperatura de transición. Durante 2008, se descubrió una nueva familia cuya composición química contiene fundamentalmente hierro (Fe) y Arsénico (As), así como otros elementos que varían dependiendo de cada compuesto particular. A este grupo se le conoce como superconductores basados en hierro. En la tabla-I se observa que la T_c de esta familia está alrededor de 50 K dependiendo del compuesto particular [5]. La importancia de este conjunto no está en el valor de T_c , sino en el hecho de que el fenómeno se presenta en compuestos en los que no se esperaba. En particular, durante muchos años se pensó que nunca se observaría superconductividad en combinaciones que tuvieran Fe en su composición química, debido a que en principio el momento magnético del Fe rompe a los pares de Cooper. Esto plantea retos para la física teórica que debe explicar por qué el fenómeno se presenta en escenarios inesperados. Actualmente existe

consenso en que los cupratos, no obedecen la teoría BCS. Debido a ello a estos grupos se les ha denominado superconductores no convencionales.

Aunque la búsqueda de nuevos materiales superconductores ha sido azarosa, y algunos de los hallazgos relevantes se han encontrado en compuestos inesperados como los descritos, otros han seguido algunos lineamientos generales establecidos por la teoría convencional BCS o sus extensiones. En particular, un grupo alemán del Instituto Max-Planck en Mainz, siguiendo los lineamientos básicos de BCS, ha buscado superconductividad en compuestos cristalinos con fonones de alta frecuencias y una alta densidad de estados electrónicos. Desde el siglo pasado se había previsto que esas cualidades se podrían encontrar en compuestos que tuvieran hidrógeno en su estructura [6]. Así, este grupo ha buscado superconductividad en hidruros. En 2015 reportaron su primer hallazgo en compuestos de hidruros de azufre (H_2S). Inicialmente no observaron superconductividad; sin embargo, cuando al compuesto lo sometieron a una presión de 90 GPa (Giga Pascales) observaron que el material pasaba al ESc a los 60 K. Lo espectacular fue que aumentando la presión a 150 GPa, la T_c sube a 190 K. Basados en estos resultados, otros grupos han seguido rutas similares intentando trabajar con diferentes hidruros.

En octubre de 2020, una colaboración de varias universidades estadounidenses reportó la síntesis de un compuesto que mezcla hidruro de azufre con ciertas proporciones de carbón para producir algo que se ha denominado carbonácido de hidruro de azufre, en el que se ha observado transición superconductora a 287 K (15°C) [7]. Este es el resultado que la comunidad de la Física del Estado Sólido estuvo buscando por más de un siglo. No obstante, a pesar de lo trascendente del resultado, aún no es del todo alentador ya que, sí bien ahora no es necesario enfriar esos materiales para pasar al estado superconductor, existiría la necesidad de aplicar presiones de 267 GPa para que la transición al estado superconductor ocurra. Más aún, a finales de 2021 surgieron algunas dudas sobre la reproducibilidad de la transición superconductora en los hidruros, lo que ha provocado que diversos grupos se involucren en verificar la reproducibilidad de esos resultados [8]. Por tanto, para que la SC marque la nueva revolución industrial y llegue a la vida cotidiana, aún quedan retos por resolver y/o resultados por reproducir, y esta línea de investigación aún sigue siendo un tema de investigación en ciencia básica.

Referencias

- [1] Kresin, V. Z, Wolf S. A. (1992). *Fundamentals of Superconductivity*; NewYork USA: Plenum Press.
- [2] Poole C. P. Jr. (2000). *Handbook of Superconductivity*. San Diego, NY, London, Tokyo: ACADEMIC PRESS.
- [3] Mendoza-López D. (2021), *En búsqueda de nuevos materiales superconductores*; Revista Materiales Avanzados 35, 23-26.
- [4] Conde-Gallardo A., Contreras-Puente G., Jergel M., Falcony-Guajardo C., Hanic F., Chavira E., Guzman J. (1996), *Influence of the processing conditions of Tl-2212 superconducting films deposited from an aerosol upon their T_c and oxygen Raman modes*, Materials Chemistry And Physics 44, 284-287.
- [5] Corrales-Mendoza I., Labias-Romero J., Castillo N., Conde-Gallardo A. (2019), *Growth of $SmFeAsO_{1-x}F_x$ and $NdFe_{1-x}Co_xAsO$ thin films by metal-organic chemical vapor deposition and post diffusion processes*. Superconductor Science and Technology 32, 055005 pp1-5.
- [6] Drozdov A. P., Erements M. I., Troyan I. A. (2015), *Conventional superconductivity at 190 K at high pressures*. IEEE/CSC & ESAS EUROPEAN SUPERCONDUCTIVITY NEWS FORUM, January 1-3.

[7] Snider E., Dasenbrock-Gammon N., McBride R., Debessai M., Vindana H., Vencatasamy K., Lawler K. V., Salamat A., Dias R. P. (2020), *Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride*, Nature 586, 372-377.

[8] Service R. F. (2021), Superconductor finding draws pointed critique, Science 374 520-521.

This entry was posted on Friday, February 11th, 2022 at 4:58 pm and is filed under [Ciencias Exactas](#), [Zona Abierta](#)

You can follow any responses to this entry through the [Comments \(RSS\)](#) feed. Both comments and pings are currently closed.