

Recibido: 06.07.2021 • Aceptado: 04.11.2021

Palabras clave: Bajas temperaturas, diamagnetismo perfecto, fenómeno cuántico, superconductividad, resistencia eléctrica cero.

Superconductividad, un fenómeno a muy bajas temperaturas

RUTH ALEXIA HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
rhernandez@plataforma-utslp.net
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE SAN LUIS POTOSÍ
CÉSAR GABRIEL GALVÁN PEÑA
cesar.galvan@uaslp.mx
FACULTAD DE CIENCIAS, UASLP

¿Habías pensado alguna vez en hacer uso de la electricidad sin tener pérdidas debido a la resistencia? ¿O hacer levitar objetos usando sus propiedades magnéticas? Aunque no lo creas, estos dos escenarios son posibles desde hace poco más de 100 años, y hay personas que dedican su vida a estudiar estos procesos. El fenómeno responsable de tales hazañas es la superconductividad, un fenómeno cuántico en el que ciertos materiales presentan resistencia eléctrica nula y no permiten la entrada del campo magnético por debajo de una temperatura crítica.

Sus aplicaciones son tan extensas como prometedoras. En los cables superconductores no se pierde energía debido al calor causado por la resistencia al paso de la corriente eléctrica y generan campos magnéticos más fuertes, por lo que pueden crearse imanes mucho más potentes, ligeros y eficientes que los que se hacen con tierras raras, las cuales son cada vez más escasas y contaminantes. Esto resulta en mejores componentes para la medicina en las resonancias magnéticas, generadores más eficientes para las energías verdes o incluso en transportes mucho más rápidos, menos ruidosos y contaminantes en general.

Descubrimiento de la superconductividad

El fenómeno de la superconductividad puso de cabeza a la comunidad científica cuando, en 1911, Heike Kamerlingh Onnes se percató de que la resistencia eléctrica del mercurio se anulaba de forma abrupta cuando se enfriaba por debajo de una temperatura de $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$, esto fue posible gracias a la licuefacción del helio (Wilks, 1967). Desde entonces, a este estado del material se le conoce como estado superconductor y la temperatura a la que ocurre se llama temperatura crítica (TC). En 1933, Walter Meissner descubrió que no sólo se trataba de una conductividad eléctrica

perfecta, sino que también el material presentaba una capacidad asombrosa de expulsar las líneas de campo magnético externo cuando se encontraba en este estado, lo que resultaba en un material diamagnético perfecto.

Este fenómeno se presenta a temperaturas muy bajas, algo impresionante pero difícilmente alcanzado por cualquiera, por ello este descubrimiento se volvió algo reservado sólo para la comunidad científica. Recordemos que la intención siempre es que los descubrimientos y avances en la ciencia benefician a largo plazo a la comunidad, por lo que un grupo de científicos se dedicó a buscar respuestas y a profundizar en estos nuevos materiales; así fue como los físicos Vitaly Ginzburg y Lev Landau (Ginzburg, 1960) por un lado, y John Bardeen, Leon Cooper y John Schrieffer (Bardeen, 1957) por otro, lograron grandes avances en la comprensión del estado superconductor y fue hasta 1957 que publicaron la teoría BCS (por las iniciales de quienes la idearon), en ella estos últimos tres físicos estadounidenses describieron las propiedades de este fenómeno desde un punto de vista microscópico, haciendo uso de la física cuántica y del estado sólido para comprender a fondo cuál era el origen de la superconductividad.

¿Se atraen entre sí los electrones?

Cooper propuso en 1956 que el mecanismo responsable de la superconductividad era la formación de pares (llamados pares Cooper en su honor), donde dos electrones formaban una pareja al verse atraídos entre sí, lo cual contradice todo lo que hemos aprendido, ¿qué no se supone que las cargas iguales se repelen entre ellas?

Para explicar esto de una forma más comprensible, vamos a describir lo que pasa en un material en condiciones normales. Recordemos que la corriente eléctrica es el movimiento de los electrones a través de un material conductor y la resistencia es la propiedad que presenta dicho material para que los electrones no se muevan libremente. Imaginemos a los electrones como personas tratando de moverse en un concierto muy lleno, la emoción del concierto y la música (que funciona como fuente de motivación) hace que las personas busquen moverse de manera frenética tratando de encontrar un lugar o acercarse lo más posible y rápido a su artista favorito. Sin duda, habrá algunos que choquen con butacas, o cualquier otra cosa que se encuentre en su camino (otro fanático más), esta es la resistencia que opone el medio para que ellos puedan moverse sin problemas. En condiciones normales de temperatura y presión, encontramos a los materiales que se les conoce como conductores, donde los electrones se mueven de una manera menos caótica y permiten que la corriente fluya (en presencia de un factor externo, generalmente un voltaje) de manera menos torpe, es decir, con una resistencia baja del material, esto es lo que define a un buen conductor, pero igual hay uno que otro electrón distraído que choca (quizás con otro electrón), es por eso que la resistencia no se elimina, por muy bueno que sea el conductor.

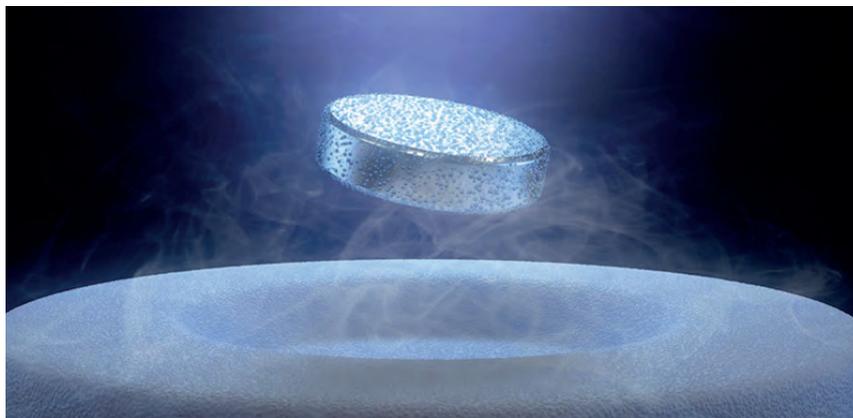


Imagen 1.
Imán levitando sobre un material superconductor.
Fuente: Istock

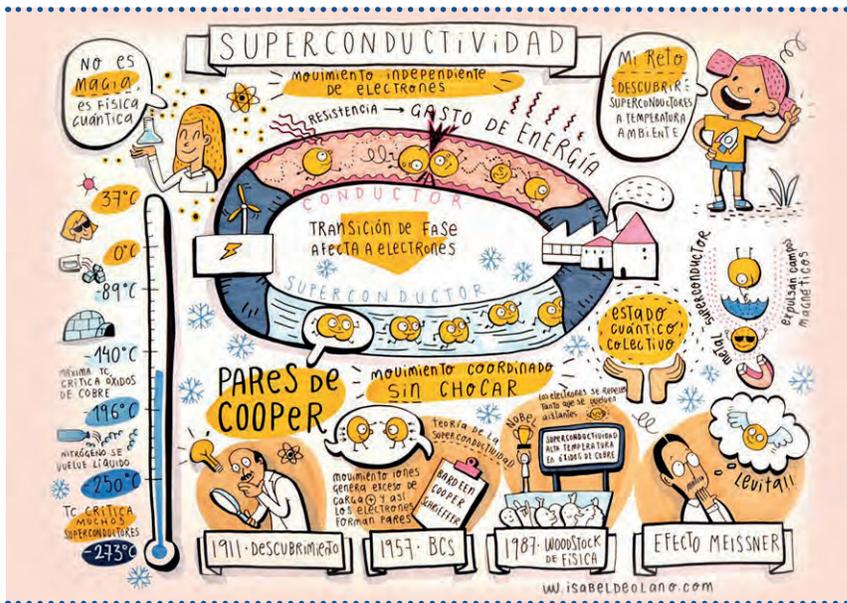


Imagen 2.
Ilustración de Isabel de Olano (isabeldeolano.com)

En el estado superconductor existe una magia, volvamos al ejemplo del concierto, cuando las personas buscan moverse sin tomar en cuenta el entorno o a las demás personas, es en donde tenemos caos y les resultará cada vez más difícil acercarse, sin duda, habrá uno que otro que lo logre, pero la mayoría de las personas tendrán conflictos para lograrlo. Ahora, supongamos que dos personas que se encuentran en el concierto se conocen, no son amigos ni mucho menos, es más, pudiera ser que no simpatizan en lo absoluto, pero comparten algo en común, el gusto por el artista que se presenta. Si ambas personas trabajan juntas para moverse en lugar de luchar entre sí para obtener el mejor lugar, tendrán por lo menos un obstáculo menos, que son ellos mismos. Lo mismo ocurre con los pares de Cooper, efectivamente, al ser ambos electrones, no es posible que se sientan atraídos entre sí, pero sí por otra partícula en el material, lo que hace que aparenten una atracción mutua, cuando la realidad es que ambos están atraídos por el mismo lugar, que es la posición de un ión. Un ión es un átomo que cede un electrón y, por lo tanto, queda con carga positiva,

de esta forma logra que energéticamente el material o conductor sea más estable. El ión es muchísimo más pesado que el electrón, por lo que, al pasar el electrón entre una red de iones (por simple atracción), ellos buscan acercarse, pero regresar a su lugar les resulta mucho más complicado y lento, lo que hace que cuando el electrón ya pasó, quede un exceso de carga positiva, resultando en la atracción de un nuevo electrón, y aunque pareciera que ambos electrones se atraían, en realidad fue la interacción de esta red la que hizo que coincidieran. Esto se conoce como un fenómeno colectivo llamado interacción electrón-fonón, es decir, la atracción entre electrones debida a la interacción de éstos con la red de iones.

La temperatura crítica en la superconductividad

Queda clara la importancia de la investigación y los retos que representa este tema, en especial las bajas temperaturas a las que se presenta el fenómeno. Mientras la temperatura a la que trabajaban los superconductores siguiera siendo tan baja, éstos no estaban al alcance de las

aplicaciones deseadas, ya que era más costoso enfriarlos que el beneficio obtenido. Las teorías de esa época predecían que la máxima temperatura crítica que podría tener un superconductor era de $-248\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo cual anulaba toda esperanza. Pero en 1986, los también físicos Johannes Georg Bednorz y Karl Alexander Müller descubrieron un compuesto cerámico cuya temperatura crítica para pasar al estado superconductor era de tan solo $-237\text{ }^{\circ}\text{C}$, así fue como se volvió a poner en la mira este fenómeno y se abrió una ventana a nuevas posibilidades, tal vez sí había esperanza de subir la temperatura para que su aplicación fuera costeable y rentable. Unos meses después, Paul Chu (1987) consiguió elevar la temperatura crítica de otro superconductor, a $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$, y así nació una nueva era de la superconductividad en los llamados superconductores de alta temperatura crítica, ya que por primera vez en 75 años se tenía una temperatura crítica por encima de la temperatura de ebullición del nitrógeno (imagen 3).

Estos nuevos superconductores se conocen como cupratos, contienen planos de cobre y oxígeno en su estructura atómica y pertenecen a una gama de superconductores no convencionales, es decir, aquellos en los que la teoría BCS ya no es suficiente para explicar su comportamiento. El problema persistente en este fenómeno es que se requiere que la T_c sea más alta de lo que se ha logrado. A pesar de que a los cupratos se les conoce como los superconductores de alta temperatura crítica, aún no es lo suficientemente alta para que sea costeable. En la actualidad el objetivo es encontrar materiales superconductores cuya T_c sea más cercana a la temperatura ambiente, además de que los beneficios y nobles características de los superconductores superen su costo de producción y mantenimiento.



Superconductividad en el tiempo



1911. Heike Kamerlingh Onnes en 1911 se percató de que la resistencia eléctrica del mercurio se anulaba de forma abrupta cuando se enfriaba por debajo de una temperatura de $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$, esto fue posible gracias a la licuefacción del helio.

1956. Leon Cooper propuso en 1956 que el mecanismo responsable de la superconductividad era la formación de pares, lo cual contradice teorías anteriores.



1933. Walter Meissner descubrió que no sólo se trataba de una conductividad eléctrica perfecta, sino que también el material presentaba una capacidad asombrosa de expulsar las líneas de campo magnético externo cuando se encontraba en este estado.

1986. Los físicos Johannes Georg Bednorz y Karl Alexander Müller descubrieron un compuesto cerámico cuya temperatura crítica para pasar al estado superconductor era de tan solo $-237\text{ }^{\circ}\text{C}$.



1957. John Bardeen, Leon Cooper y John Shrieffer (Bardeen,) lograron grandes avances en la comprensión del estado superconductor y fue hasta 1957 que publicaron la teoría BCS.

1987. Paul Chu consiguió elevar la temperatura crítica de otro superconductor a $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$, fue así que nació una nueva era de la superconductividad en los llamados superconductores de alta temperatura crítica.



Aún hay mucho por investigar, no sólo se trata de descubrir más materiales superconductores, si no también de cumplir las características necesarias para que los proyectos de aplicación de dichos materiales sean viables en la cotidianidad.

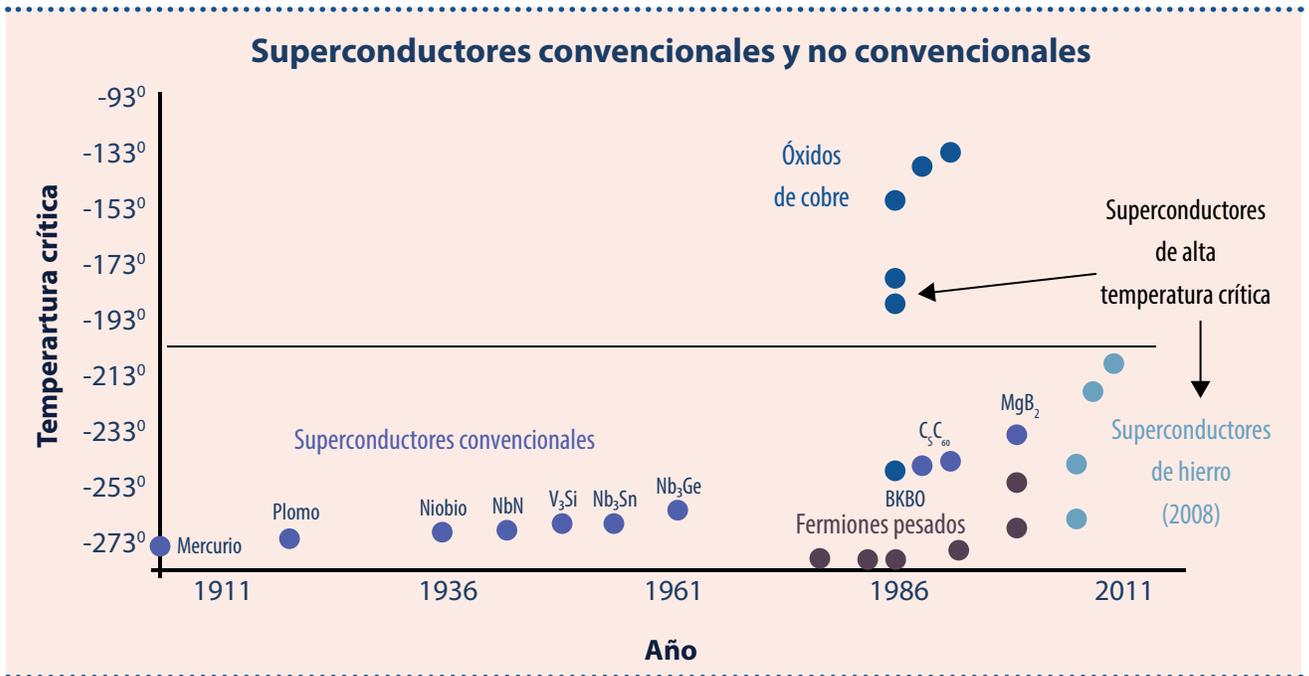


Imagen 3. Elevación de la temperatura crítica en el tiempo

Existen varias clasificaciones para los materiales superconductores, pero los que más nos interesan por el momento son los de alta T_c; sin embargo, estos son tan bellos como enigmáticos. Hasta ahora no se ha logrado descubrir qué es lo que realmente causa que estos materiales tengan una alta temperatura crítica, pero existen diversas teorías que pudieran explicarlo. Puede decirse que, hasta el momento, existen tres razones principales que ayudan a que los cupratos se comporten como lo hacen: la brecha superconductora anisotrópica, los pares de huecos y la baja dimensionalidad. Pero tranquilo, que estos conceptos no te hagan desertar de tu lectura, los explicamos a continuación de una manera amigable:

a) Brecha superconductora anisotrópica Empecemos por explicar qué es esto. Como ya hemos dicho, el fenómeno de la superconductividad se debe a la formación de pares de electrones que se atraen entre sí. La mínima energía que se necesita para romper ese par se conoce

como brecha superconductora, es decir, que entre más grande sea la brecha, mejor es la superconductividad y, por lo tanto, mayor la temperatura crítica. Se ha demostrado que la brecha en los superconductores de alta T_c depende fuertemente de la dirección en la que se mueven los electrones, por lo que se conoce como brecha anisotrópica. Esto es muy diferente de lo que pasa en los superconductores de baja T_c donde la brecha es isotrópica, es decir, no depende de la dirección de movimiento electrónico.

b) Pares de huecos

Tomemos nuevamente el ejemplo del concierto. Supongamos que una de las butacas se encuentra vacía y alguien que está sentado en la butaca de la derecha se cambia a la butaca vacía, es decir, la persona se movió de derecha a izquierda. Pero también podríamos pensar que el hueco fue el que se movió de izquierda a derecha. De esta manera podemos definir un hueco como la ausencia de un electrón, y dado que los electrones tienen carga

negativa podemos decir que los huecos tienen carga positiva. Se cree que la temperatura crítica es más alta en superconductores donde los pares de Cooper se forman por pares de huecos en lugar de pares de electrones (Hirsch, 1989).

c) Baja dimensionalidad

¡Una vez más el concierto! Imaginemos que debemos encontrarnos con alguien allí. Será más fácil si ese alguien nos indica en qué sección del auditorio se encuentra. En el caso de los superconductores de alta temperatura crítica, los candidatos a formar pares de Cooper se encuentran en los planos de cobre y oxígeno del material, es decir, no tienen que buscar pareja en todo el material, sólo en una sección. Esto aumenta la probabilidad de formar pares de Cooper y, por lo tanto, aumenta la temperatura crítica del superconductor.

Estos tres conceptos deben estudiarse de manera más profunda para así obtener un resultado e idea clara de cómo trabajan y



RUTH ALEXIA HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

Es licenciada en física por la Facultad de Ciencias de la UASLP. En la actualidad se encarga de la divulgación de los avances del proyecto "Propiedades electrónicas y estructurales de sistemas de dos, una y cero dimensiones".

que esto nos permita desarrollar nuevos proyectos donde se logre elevar la temperatura crítica. Debemos tener claro que el fundamento de la experimentación es la investigación, por eso nuestro grupo de trabajo, conformado por una parte del cuerpo académico de materia condensada de la UASLP en colaboración con el Instituto de Física y el Instituto de Investigaciones de Materiales, ambos pertenecientes a la UNAM, cuyo trabajo se centra en la investigación de la superconductividad anisotrópica en campos magnéticos, se dedica a analizar y a tratar de comprender estos fenómenos (Galván, 2016 y 2019), donde no sólo nos dedicamos a proponer números, también elaboramos modelos y simulaciones que nos permitan abrir el campo para continuar investigando y descubriendo maneras para conseguir nuestro objetivo, una temperatura crítica más cercana al ambiente o simplemente más costeable de enfriar. Recordemos que al entender realmente cómo es que funciona algo, es

como podemos manipularlo para obtener resultados diferentes.

Regresando a las preguntas al inicio de este escrito, podemos confirmar que esas no son ideas que sólo existen en la mente de científicos fantasiosos, es suficiente con voltear a ver a Japón, que cuenta con el tren Maglev (Northeast maglev, 2019), cuyo funcionamiento se basa en el uso de la superconductividad, y que transportarse de esta manera ya no sólo es una experiencia sacada de la ciencia ficción, es una realidad bastante efectiva e interesante, que permite recorrer un trayecto de hasta 30 kilómetros en apenas siete minutos para el nuevo prototipo que se está desarrollando y se espera que entre en funcionamiento en un futuro muy cercano (foto 1). No olvidemos que aún hay mucho por investigar, no sólo se trata de descubrir más materiales superconductores, si no también de cumplir las características

necesarias para que los proyectos de aplicación de dichos materiales sean viables en la realidad, es decir, lograr una temperatura crítica más alta, para que la relación existente entre el costo de mantenimiento y los beneficios obtenidos sea la adecuada.

Como pudimos aprender en este artículo, la superconductividad es un fenómeno que podría tener muchísimas aplicaciones en la vida diaria simplemente por su ahorro energético, al ser un tipo de energía "limpia" y muy noble en cuanto a sus beneficios, pero no podemos olvidar que su estudio desde el punto de vista microscópico es de vital importancia para poder avanzar en su comprensión. Recordemos que aún es una investigación de frontera y no está del todo comprendida, lo que ha dificultado encontrar superconductores a temperatura ambiente y sigue siendo la meta a alcanzar. **UP**



Foto 1.
Tren Maglev por majaX1 bajo la licencia CC BY-NC-SA 2.0

Referencias bibliográficas:

- Bardeen J., Cooper L.N. y Schieffer J. R. (1957), Microscopic theory of superconductivity, *Physical Review*. 106, pp. 162-164.
- Galván C. G., Pérez L. A. y Wang C. (2019), Bogoliubov-de Gennes approach to magnetic field effects on Hubbard d-wave superconductors, *Physica B: Physics of Condensed Matter*. 553, pp. 36-39.
- Galván C. G., Cabrera-Trujillo J. M., Pérez L. A. y Wang C. (2016), Bogoliubov-de Gennes study of nanoscale Hubbard superconductors, *Physica Status Solidi B*. 253, pp. 1638-1642.
- Ginzburg V. L. y Landau L. D. (1950) Theory of superconductivity, *Journal for Experimental and Theoretical Physics*. 20, pp. 1064-1082.
- Northeast Maglev (16 de julio, 2019). Innovación de transportación, historia Maglev en el mundo. Recuperado de: <https://northeastmaglev.com/2019/07/16/innovacion-de-transportacion-historia-maglev-en-el-mundo/?lang=es>