

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y AGRIMENSURA – U.N.R.  
ESCUELA DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
FÍSICA III**

**MONOGRAFIA:**

# **Superconductividad**

**AUTORES:**

**Isola, Lucio**

**Mezio, Alejandro**

**ÍNDICE:**

- 1. Introducción**
- 2. Introducción histórica**
- 3. Teoría B.C.S.**
- 4. Efecto Meissner**
- 5. Efecto Josephson**
- 6. Superconductores de alta temperatura (S.A.T.)**
- 7. Aplicaciones, beneficios y limitaciones**

## Introducción general

La superconductividad es un fenómeno que básicamente comprende el estado en el cual la resistencia eléctrica de ciertos materiales disminuye de forma repentina hasta llegar a cero.

La temperatura por debajo de la cual la resistencia eléctrica de un material se aproxima a cero absoluto se denomina temperatura de transición ó crítica ( $T_c$ ). Por encima de esta temperatura, al material se lo conoce como normal, y por debajo de  $T_c$ , se dice que es superconductor.

La pérdida de resistencia eléctrica es sólo uno de los varios cambios que tienen lugar cuando se enfría un superconductor por debajo de su temperatura crítica. Se presentan también efectos magnéticos notables: la permeabilidad del material disminuye hasta cero y el flujo magnético en el material desaparece; la conductividad térmica aumenta rápidamente.

El calor específico electrónico del material en el estado superconductor, se altera sustancialmente debajo de la temperatura crítica. A medida que la temperatura se reduce empezando desde  $T > T_c$ , el calor específico salta primero hasta un valor muy alto a  $T_c$  y luego cae muy por debajo del valor para el estado normal a temperaturas muy bajas.

Además de la temperatura ( $T$ ), el estado superconductor también depende de otras variables, como son el campo magnético ( $B$ ) y la densidad de corriente ( $J$ ). En cuanto a esta última, hay que recordar que la corriente genera su propio campo.

De este modo, para que un material sea superconductor, la temperatura del material, su campo magnético y su densidad de corriente no deben superar unos valores específicos para cada caso, ya que para cada material superconductor existe una superficie crítica en el espacio de  $T$ ,  $B$ , y  $J$ .

Por otro lado, si se construye una gráfica donde se represente la resistividad en función de la temperatura, para un material normal, como el cobre, frente a un material superconductor, como el mercurio, se podrá observar como la resistividad del material superconductor cae bruscamente hasta un valor casi inapreciable, mientras que la resistividad eléctrica del cobre decrece uniformemente mientras disminuye la temperatura, y alcanza un valor mínimo a cero Kelvin (0 K).

Como se indicó anteriormente la superconductividad depende del campo magnético, dado que si se aplica un campo magnético suficientemente intenso a un superconductor a cualquier temperatura que esté por debajo de su temperatura crítica ( $T_c$ ), el superconductor retorna a su estado normal.

El campo magnético aplicado necesario para restablecer la conductividad eléctrica normal en el superconductor se denomina campo crítico ( $H_c$ ). A densidad de corriente constante, la curva de  $H_c$  frente a la temperatura,  $T$  (K), puede aproximarse mediante la expresión empírica:

$$H_c = H_0 [1 - (T/T_c)^2]$$

Donde  $H_0$  es el campo crítico a una temperatura  $T=0$  K, obtenido por interpolación. Esta curva representa el límite o la frontera entre los estados normal y de superconductividad de un material superconductor.

Los superconductores metálicos e intermetálicos se clasifican, según su comportamiento frente al campo magnético aplicado, como superconductores de tipo I y de tipo II:

**Los superconductores de tipo I**, también conocidos como superconductores blandos, presentan un valor de  $T_c$  y de  $H_c$  demasiado bajos para cualquier aplicación práctica. Estos son conductores perfectos de la electricidad por debajo de  $T_c$ , pero pierden su propiedad a un valor crítico del campo magnético por debajo de 1500 Oe (119366 Av/m). Algunos elementos metálicos como el plomo, estaño, mercurio y el aluminio pertenecen a este grupo.

Si un cilindro largo de un superconductor de tipo I como Pb o Sn se coloca en un campo magnético a temperatura ambiente, el campo magnético penetra normalmente a través del metal. Sin embargo, si la temperatura del conductor del tipo I se reduce por debajo de su  $T_c$  (7,19 K para el Pb) y si el campo magnético está por debajo de  $H_c$ , el campo magnético es expulsado de la muestra con excepción de una capa de penetración superficial muy fina de unos  $10^{-4}$  mm de espesor.

Esta propiedad de expulsión de un campo magnético en el estado de superconducción recibe el nombre de Efecto Meissner.

Así los campos magnéticos resultan rechazados del interior del superconductor debido a la formación de corrientes de superficie. La magnetización de un superconductor se opone al campo magnético externo, y la susceptibilidad magnética tiene un valor negativo máximo. Esto significa que un superconductor exhibe un diamagnetismo perfecto, lo cual es una propiedad esencial del estado superconductor.

**Los superconductores de tipo II** se comportan de forma diferente ante un campo magnético a temperaturas por debajo de la temperatura crítica. Los mismos son diamagnéticos, como lo superconductores de tipo I, hasta un valor de un campo magnético aplicado llamado campo crítico inferior  $H_{c1}$ , y de este modo el flujo magnético es rechazado del material. Por encima de  $H_{c1}$  el campo empieza a penetrar en el superconductor de tipo II y continúa así hasta que alcanza el campo crítico superior  $H_{c2}$ . En el intervalo entre  $H_{c1}$  y  $H_{c2}$  el superconductor está en estado mixto y por encima de  $H_{c2}$  vuelve a su estado normal.

En la región comprendida entre  $H_{c1}$  y  $H_{c2}$  el superconductor puede conducir corriente eléctrica dentro del núcleo

del material y de esta forma, dicha banda de valores del campo magnético puede ser usada para superconductores de alto campo y alta corriente, como por ejemplo el NiTi y Ni<sub>3</sub>Sb que son superconductores del tipo II.

Los superconductores del tipo I son poco útiles para transportar la corriente eléctrica, ya que la corriente sólo puede fluir por la capa superficial externa de una muestra conductora. La razón por la cual sucede esto es que el campo magnético solo puede penetrar la capa superficial, y la corriente sólo puede fluir por esta capa.

En los superconductores de tipo II, por debajo de  $H_{c1}$ , los campos magnéticos se comportan de igual manera.

Sin embargo, si el campo se encuentra entre  $H_{c1}$  y  $H_{c2}$  (estado mixto), la corriente puede ser transportada por el interior del conductor en filamentos. El campo atraviesa el volumen del superconductor en forma de haces de flujos cuantizados e individuales, llamados fluxoides. Una supercorriente cilíndrica en torbellino rodea cada fluxoide. Con el aumento de la fuerza del campo magnético, mas y mas fluxoides entran en el superconductor y constituyen una formación periódica. Para  $H_{c2}$  la estructura a base de vórtices de supercorriente colapsa y el material vuelve a su estado de la conducción normal.

Desde otro punto de vista, los materiales superconductores se pueden clasificar en tres grupos principales: elementos metálicos, aleaciones y compuestos.

Los elementos metálicos pertenecen al tipo I, y no ofrecen grandes posibilidades de aplicaciones prácticas.

Sin embargo las aleaciones, en especial aquellas que contiene elementos de transición como el Nb-Zr, Nb-Ti y Mo-Re, tienen una  $T_c$  de alrededor de 10 K, y un campo magnético crítico relativamente elevado. Estas aleaciones se han utilizado en la construcción de bobinas superconductoras para imanes.

Los mas prometedores son algunos compuestos intermetalicos (anteriormente anunciados) con un campo magnético muy elevado (210000 Oe ó 16711269 Av/m).

¿Qué es lo que hace que un superconductor pierda su resistencia?

Al principio parecía probable que a temperaturas muy bajas, la estructura atómica del material se dispusiera en una forma perfectamente ordenada. Entonces los electrones - así se postulaba- podían moverse por el espacio vacío entre los núcleos atómicos sin chocar con nada ni perder energía. Pero la explicación en realidad es mucho más compleja.

Un aspecto interesante es que los electrones que intervienen en la superconductividad se presentan en la forma conocida como pares de Cooper, con movimiento de rotación o "spin" en sentidos opuestos. También entran en juego sutiles efectos cuánticos.

Una de las razones de la superconductividad sería el movimiento concertado y ordenado de estos pares de electrones. En un conductor normal los electrones encuentran dificultades para viajar debido a la agitación térmica y a la distorsión de la red metálica, pero a muy bajas temperaturas, la agitación térmica desaparece y los electrones pueden adaptarse a las distorsiones de la red si viajan a través de ella de a pares. Con el descubrimiento de materiales superconductores a "altas" temperaturas aparece un factor adicional para la existencia de superconductividad en estos nuevos materiales: su estructura es la que permite que los electrones puedan seguir viajando de a pares sin encontrar obstáculo.

## Evolución histórica

La historia de la superconductividad comenzó en 1911 en Leyden, cuando el físico holandés Heike Kamerling Onnes (foto) desarrolló las primeras técnicas criogénicas para enfriar muestras de materiales hasta algunos grados por encima del cero absoluto (correspondiente a cero Kelvin, es decir, -273,15 °C).

Fue el primero que consiguió llevar el helio por debajo de su punto de licuefacción (4,2 K), abriendo así el campo de las muy bajas temperaturas. Al principio, Kamerlingh Onnes "monopolizó" completamente este campo, ya que Leyden fue, hasta 1923, el único lugar del mundo que disponía de helio líquido.

En aquellas épocas se sabía que los metales tienen una resistividad que disminuye de manera prácticamente lineal con la temperatura hasta unos 20 K, y se quería averiguar que ocurría con esta resistividad en las proximidades del cero absoluto. Kamerlingh Onnes se dió cuenta muy pronto de que era necesario disponer de metales muy puros, si quería obtener resultados libres de toda ambigüedad.

Eigió el mercurio, elemento que puede conseguirse con un alto grado de pureza y que además es conductor en estado metálico. De este modo, y enfriando el mercurio a muy baja temperatura, pudo observar un fenómeno nuevo y totalmente inesperado: a una temperatura de 4,2 K, el mercurio pasaba bruscamente a un estado en el que, repentinamente, no ofrecía resistividad alguna al paso de la corriente eléctrica. Esta transición se manifestaba por una caída muy brusca de la resistividad. Kamerlingh Onnes había descubierto la superconductividad.

Poco después se observó que la misma transición al estado de superconductor se producía en otros metales, como el plomo o el niobio, a temperaturas críticas ligeramente mas altas. En todos los casos la temperatura que se requería era sólo un poco mayor que la del cero absoluto, que en la práctica únicamente podía conseguirse sumergiendo un trozo del material en helio líquido, que hierve a 4,2 K a la presión atmosférica normal.



Onnes pensó enseguida la posibilidad de construir un electroimán de alto campo y, en 1913, construyó una bobina de plomo para ensayar la idea. Los resultados fueron desconcertantes. Si bien la bobina era superconductora en tanto que la corriente de excitación fuera pequeña, cuando el campo magnético excedía de una intensidad moderada el plomo pasaba siempre al estado resistivo. Experimentos ulteriores mostraron que todos los superconductores metálicos puros presentaban una intensidad de campo crítica que les era propia y que estaba claramente definida, siendo usualmente menor de 0,1 T; al llegar a este valor, la superconductividad se extinguía súbitamente.

Posteriormente a partir de los años 1930, la superconductividad se observó también en cuerpos compuestos, principalmente en aleaciones intermetálicas.

En 1933, W. Meissner y R. Ochsenfeld observaron un fenómeno adicional: la exclusión del flujo magnético externo cuando el superconductor es enfriado por debajo de su temperatura crítica  $T_c$ . En su honor este efecto se conoce hoy en día como efecto Meissner y es el responsable de la imagen típica que todos asociamos con la superconductividad: la de un pequeño disco de material refrigerado flotando libremente en el aire por encima de un imán (foto).



El experimento de Meissner demostró que el superconductor no cumplía con la formulación clásica de las ecuaciones de Maxwell para resistividad nula.

En 1935 los hermanos Fritz y Heinz London desarrollaron una teoría fenomenológica de la superconductividad, es decir, estudiaron cómo ocurren las cosas en un superconductor, pero no el porqué. En esta teoría, a las ecuaciones de Maxwell se agregaban dos ecuaciones complementarias para el efecto Meissner, para demostrar que el campo magnético decae en el interior del superconductor con una longitud característica conocida como longitud de penetración  $l$ . Además Fritz London sugirió que la superconductividad es una manifestación de la mecánica cuántica operando a escala microscópica.

En la década de los 50 se hacen enormes progresos en la búsqueda de materiales superconductores con temperaturas críticas mayores y campos críticos más intensos, especialmente en los grandes laboratorios americanos tales como los de la General Electric, Bell Telephone, Westinghouse, etc., dando lugar a la aparición de superconductores tipo II caracterizados por una expulsión parcial del flujo magnético conservándose la resistividad cero. Este tipo de materiales normalmente son aleaciones intermetálicas que poseen temperaturas críticas más altas y campos magnéticos críticos más intensos que los correspondientes a superconductores tipo I. Los superconductores más usados en la generación de campos magnéticos de varias Teslas son compuestos de Nb-Ti y Nb-Sn.

El primer intento de explicación de lo que ocurría en las entrañas de un superconductor se debe a Frölich en 1950, el cual se basó en unos experimentos de la época que pusieron de manifiesto que la temperatura de transición tenía mucho que ver con la masa de los iones del material. Gracias a estos trabajos, fue abriéndose paso la idea de que la superconductividad era una fase distinta de la materia.

La teoría básica del comportamiento de un superconductor respecto un campo magnético externo fue descrita por el físico ruso Alexei A. Abrikosov en los años cincuenta, en base a los trabajos de Ginzburg y Landau (los tres respectivamente en las tres fotos de arriba).



Pero hubo que esperar hasta 1957, cuando Bardeen, Cooper y Schrieffer (los tres respectivamente en las tres fotos de abajo) desarrollaron la teoría cuántica que explicaba mejor la superconductividad, conocida en su honor como teoría BCS. La misma parte de la existencia de los "Pares de Cooper", como una pareja de electrones con momento y spin opuestos unidos por una fuerza de tipo atractivo producida por la interacción con la red de iones positivos en la cual ellos se mueven. Así superconductividad aparece como consecuencia de la existencia de los pares de Cooper mediados por la interacción electrón-fonón. Asimismo la teoría BCS permite determinar la distancia promedio a la cual se encuentran los dos electrones que forman el par de Cooper, conocida como longitud de coherencia, concepto que había sido introducido por los teóricos rusos Ginzburg y Landau en 1950 en una descripción fenomenológica de la superconductividad. Los parámetros longitud de penetración y longitud de coherencia son fundamentales en la superconductividad y aparecen en forma natural en el marco de la teoría BCS.

La elevación de las temperaturas críticas ( $T_c$ ) fue prosiguiendo a lo largo de los años, con un progreso lento pero bastante regular.

En el año 1960 se demostró que el titanato de estroncio ( $\text{SrTiO}_3$ ) se hace superconductor, pero con una temperatura de transición muy baja: 0,3 K. Posteriores estudios analizados en Rùshlikon permitieron aumentar esta temperatura crítica hasta 0,8 K mediante el dopado del compuesto con niobio.

En 1962, Josephson (foto) predijo la unión que lleva su nombre (y que posteriormente fue confirmada experimentalmente), un dispositivo que permite la medida extremadamente precisa de campos magnéticos. Tuvieron que pasar 11 años antes de que Josephson recibiera el Nobel por sus trabajos.



En 1973, D.C. Johnston y sus colegas obtuvieron un resultado mas significativo con un óxido de titanio y litio ( $\text{Li-Ti-O}$ ): una temperatura crítica de 13,7 K. En 1975, A.W. Sleight y sus colaboradores observaron una transición a 13 K en un compuesto de valencia mixta: un óxido de bario y plomo dopado con bismuto ( $\text{BaPbBiO}_3$ ).

En 1973 la temperatura crítica mas elevada fue de 23,3 K, con una aleación de niobio y germanio ( $\text{Nb-Ge}$ ). Trece años mas tarde la situación era la misma y la mayoría de los físicos habían acabado por convencerse de que no podía llegarse mucho mas lejos.

En 1986, Alex Muller y George Bednorz (respectivamente en las fotos) detectaron superconductividad en una nueva cerámica, un óxido de bario/lantano/cobre ( $\text{LaBa}_2\text{CuO}_4$ ) a una temperatura  $T_c$  superior a 35 K. En 1987 Maw-Kuen Wu y Paul C. W. Chu descubrieron una cerámica de óxido de itrio, bario y cobre (conocida abreviadamente como  $\text{YBaCuO}$ ) conocida con el sobrenombre 123, que era superconductora a 93 grados Kelvin. Esto significaba que estos materiales podían refrigerarse con nitrógeno líquido. Hasta los refrigeradores de laboratorio mas pequeños podían enfriarlos por debajo de la temperatura crítica. Por todo el mundo, los científicos continuaron descubriendo centenares de cerámicas con temperaturas críticas cada vez mayores.

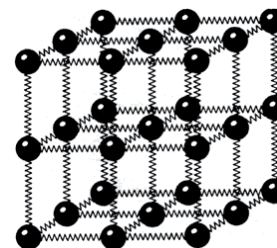


Por otra parte, a partir del descubrimiento de los fullerenos, una nueva forma cristalina del carbono, diversos grupos se interesaron en las propiedades de transporte del denominado  $\text{C}_{60}$ , llegando a encontrar que ciertas sales de  $\text{C}_{60}$  eran superconductoras; así el  $\text{C}_{60}$  dopado con potasio con una estequiometría  $\text{K}_3\text{C}_{60}$  tiene una  $T_c$  de 18 K y el dopaje con rubidio conduce a  $T_c$  del orden de 28 K. A pesar de muchos esfuerzos en la búsqueda de otros tipo de materiales son los cupratos los materiales que, a la fecha, muestran  $T_c$  por encima de los 100 K.

Desde 1986, fecha de su descubrimiento los superconductores de temperaturas relativamente “altas” plantean difíciles problemas a los teóricos. Todavía no se sabe si el mecanismo responsable del agrupamiento de los electrones por pares, que está en el origen de la superconductividad, es o no similar al de los superconductores convencionales ó clásicos.

## Teoría BCS

Para estudiar la conducción “normal” en un metal, habitualmente se supone que es infinito, que los átomos se disponen de forma perfectamente periódica formando una red cristalina y que los electrones se mueven facilmente por todo el sistema. Este modelo simple e irreal, que recibe el nombre de gas de Fermi (por el físico italiano Enrico Fermi, que concibió una imagen similar de los núcleos atómicos), paradójicamente da unos resultados excelentes a la hora de describir las propiedades básicas de cualquier metal. Sin embargo, desprecia, entre otras muchas cosas, la interacción que hay entre el gas de electrones y los iones de la red



Los iones no están fijos en sus posiciones, sino que vibran alrededor de ellas. Es válido visualizarlos como pequeñas bolitas enganchadas a sus vecinas mas próximas mediante resortes. Las fuerzas restauradoras que crean los resortes sobre un ión cuando este se mueve un poco de su posición hacen que vibre y que esta vibración se propague por todo el cristal. Ahora bien, como estamos en una escala microscópica (de menos de una millonésima de un milímetro), debemos estudiar el problema desde el punto de vista cuántico. La teoría cuántica afirma que estas ondas no pueden tener una energía cualquiera. La energía esta cuantizada en paquetes llamados fonones. Frölich estudió que pasaba cuando un electrón libre de un metal interaccionaba con un fonón. Llego a la conclusión de que la superconductividad tenía mucho que ver con dicha interacción, ya que la temperatura de transición estaba ligada con la masa de los iones de la red.

En todos los materiales superconductores se ha observado que la corriente eléctrica está conformada por pares de electrones; es decir que ya no son partículas individuales las que recorren el conductor, sino que hay un mecanismo que hace que estas partículas, que normalmente se repelen ya que poseen la misma carga, queden ligadas. Es precisamente esta energía de ligadura la que le permite a los electrones superar los obstáculos que normalmente provocarían su dispersión.

A grandes rasgos podemos describir este fenómeno de la siguiente manera: el electrón superconductor al pasar cerca de un núcleo atómico (con carga positiva) lo atrae, generando momentáneamente una región de carga positiva alrededor de él; se forma así un canal que permite que otro electrón (con carga negativa) sea atraído y se forme el



par (llamado par de Cooper), de esta manera, el núcleo del átomo actúa como mediador en esta interrelación de atracción entre dos electrones (Ver figura).

Cuando la temperatura sube por arriba de la de transición, el material adquiere suficiente energía térmica para que las vibraciones en su estructura rompan los pares, y por tanto vuelve a aparecer la resistencia.

Es un poco como cuando un automóvil circulando a gran velocidad (el electrón) "parte" el aire y crea por un momento un vacío parcial que es inmediatamente llenado por una corriente de aire. Esta corriente hace las veces de canal positivo y jala junto con ella todo lo que se encuentra situado detrás del automóvil: hojas, basura, e incluso otro automóvil lo suficientemente ligero para ser arrastrado (el segundo electrón).

De esta manera, una deformación provocada por el auto de adelante (el vacío creado en la atmósfera), actúa como vínculo entre dos objetos que de otra manera no podrían atraerse mutuamente. Esta condición sólo puede alcanzarse cuando no hay otras deformaciones lo suficientemente importantes como para destruir el vínculo (una tormenta, por ejemplo), lo cual requiere de una temperatura máxima determinada: la temperatura de transición.

Los experimentos sugieren que los superconductores clásicos tienen una banda de energías electrónicas prohibidas, denominada habitualmente "gap". En los metales ordinarios, las cargas pueden moverse libremente y se aceleran en presencia de un campo eléctrico. Por debajo de la temperatura crítica, a los pares de electrones de un superconductor les está prohibido por las leyes de la mecánica cuántica desplazarse por encima de un cierto valor de la velocidad.

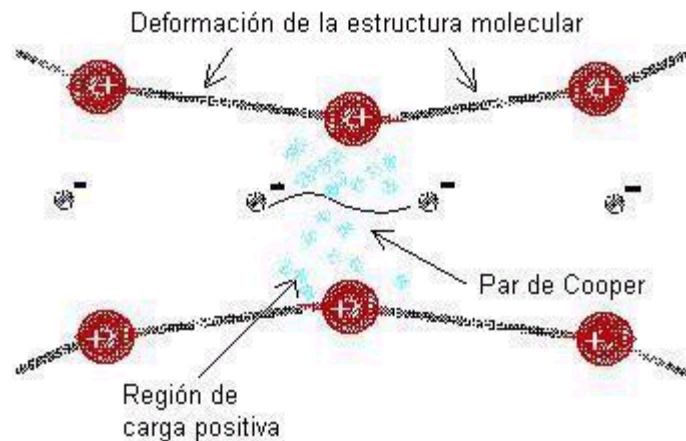
El gran triunfo de la teoría BCS fue probar que ese gap era una consecuencia directa de la formación de los pares de electrones. Es más, fue posible demostrar que todas las propiedades físicas de un superconductor se podían escribir en función del tamaño del gap. Por ejemplo, al aplicar un campo magnético a un superconductor, se necesita que aquel sea bastante grande para que los electrones ganen mucha energía y puedan saltar la zona prohibida. De esta manera, los pares se rompen y desaparece la superconductividad.

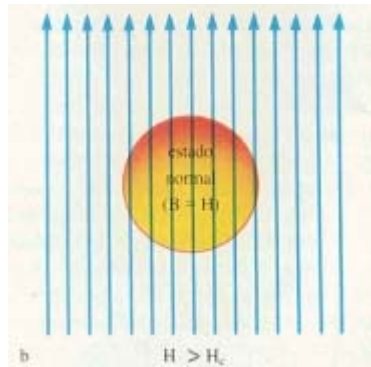
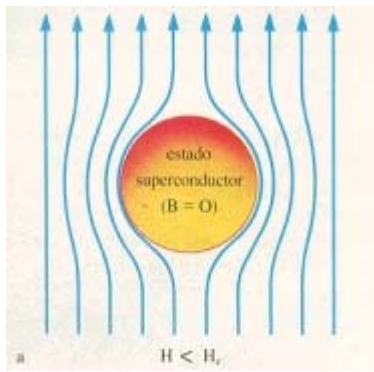
Cuando una corriente eléctrica pasa a través de un metal ordinario, los electrones en movimiento pueden ser desviados por impurezas o por los movimientos de la red cristalina. Estas colisiones son responsables de la resistencia eléctrica del metal. pero cuando se hace pasar una corriente eléctrica por un superconductor, los pares de Cooper se mueven de un modo coherente. Simplificando, todos ellos, efectúan el mismo movimiento (esta propiedad esta ligada al hecho de que, contrariamente a las moléculas ordinarias, los pares de Cooper se interpenetran ampliamente).

Un electrón no puede ser desviado individualmente y la resistencia eléctrica desaparece.

## Efecto Meissner

Hasta 1933 no se produjo ningún otro descubrimiento importante. Ese año los físicos alemanes W. Meissner y R. Ochsenfeld encontraron que los superconductores son diamagnetos casi perfectos. Cuando un material se somete a un campo magnético éste penetra en el mismo, aunque el valor en su interior es en general distinto del valor del campo aplicado. En los superconductores, a campos suficientemente pequeños, el valor del campo magnético en el interior del material es cero: los superconductores expelen el campo magnético. Este fenómeno se conoce con el nombre de efecto Meissner, en honor a uno de sus descubridores. El descubrimiento probablemente desorientó en un primer momento a los investigadores, pero sirvió para establecer dos puntos importantes. En primer lugar, quedó demostrado que un superconductor no es simplemente un metal con resistencia cero, pues la resistencia nula no implica diamagnetismo perfecto. La superconductividad debió ser concebida como un nuevo estado de la materia con propiedades muy particulares. En segundo lugar, el efecto Meissner permitió establecer que la transición del estado normal al estado superconductor es una transición termodinámica reversible (figura).

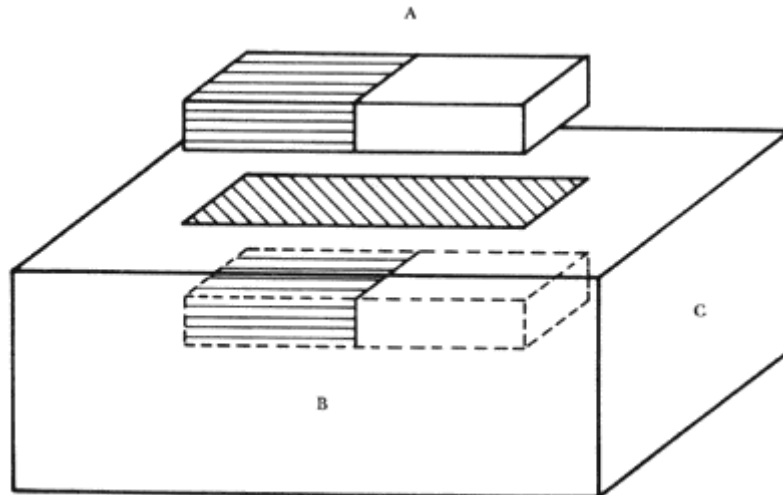




(a) En una esfera superconductora, el campo magnético es expelido del material (efecto Meissner).  
 (b) Si el campo magnético se incrementa más allá del campo crítico  $H_c$  penetra en el material y destruye la superconductividad.

El efecto Meissner consiste en lo siguiente:

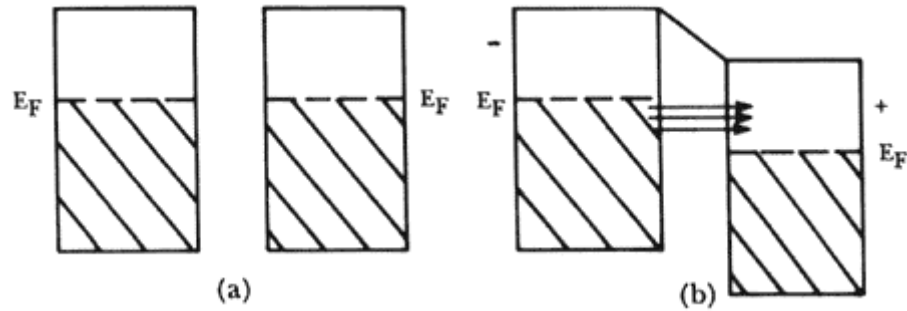
Al acercar un imán a un material superconductor se genera, magnéticamente, una imagen de él como si el superconductor fuera un espejo. De esta manera, el imán es siempre repelido por su imagen o lo que es lo mismo, por el superconductor. La fuerza de repulsión es capaz de contrarrestar el peso del imán, produciendo la levitación. Una aplicación de este efecto se da en vehículos de transporte masivo que "flotan" sin fricción con el piso y que virtualmente se desplazan volando.



En la figura anterior se presenta un esquema de cómo se produce el efecto Meissner. Al acercar un imán (A) a un superconductor (B), se produce en este una imagen magnética (C) que lo repele. La intensidad de la fuerza de repulsión determina la altura a la que puede "flotar" el imán. Conforme más poderoso sea el imán, más poderosa será su imagen y más intensa será la fuerza de repulsión, produciendo una flotación a mayor altura. Todo esto ocurre sin importar si el imán está quieto, trasladándose o girando sobre sí mismo. Siempre aparece una imagen instantánea de él en el superconductor, que lo repele y lo hace flotar. Por el efecto Meissner sabemos que el estado superconductor es un estado de la materia en el que no existe resistencia al paso de la corriente eléctrica y en el que los electrones se hallan en un estado muy especial de gran poder y correlación de unos con otros. En virtud de este estado, los campos magnéticos no pueden penetrar al superconductor. La manera en que el superconductor genera la imagen del imán es moviendo a los electrones, generando corrientes superficiales que, a su vez, generan un campo magnético que corresponde exactamente a la imagen del imán, produciéndose así la repulsión y, por lo tanto, la levitación.

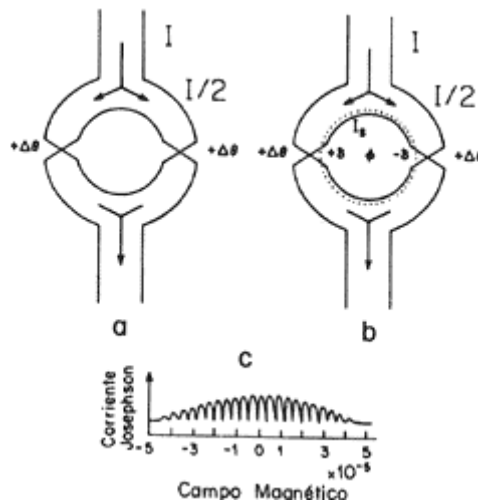
### Efecto Josephson

Es particularmente importante el "efecto túnel" electrónico, según el cual los electrones pueden atravesar barreras que la física clásica consideraba como infranqueables. Este efecto se puede describir observando los siguientes diagramas de niveles de energía de dos metales normales a través de los cuales se da el mismo.



La zona rayada representa estados electrónicos ya ocupados por los electrones en cada metal. La parte blanca muestra los estados disponibles. A temperatura cero, el paso de los electrones de un metal a otro queda completamente prohibido por el principio de exclusión de Pauli. Cuando se aplica un voltaje positivo al metal de la derecha, de manera tal que los niveles de energía de Fermi,  $E_F$ , ya no coinciden, hay estados ocupados en el metal de la izquierda al mismo nivel que estados desocupados en el metal de la derecha y el efecto túnel puede ocurrir, como se indica por las flechas. Es evidente que el número de estados que quedan disponibles para el proceso dependen del voltaje aplicado, y si la probabilidad de tunelamiento es constante, como ocurre por voltajes aplicados muy pequeños, la corriente resultante varía linealmente con el voltaje aplicado.

En 1962, a los 22 años de edad, el profesor Brian Josephson de la Universidad de Cambridge predijo y demostró que cuando dos superconductores están separados por una capa aislante muy delgada los electrones pueden atravesar el aislamiento aún cuando no haya ninguna fuerza electromotriz que los impulse. Si se aplica una tensión de excitación, se producen oscilaciones a una frecuencia que depende únicamente de la tensión y de dos constantes físicas bien conocidas, la constante de Planck y la carga de un electrón. Una consecuencia de esto es que si se mide la frecuencia puede calcularse la tensión aplicada. Esto significa que una unión Josephson, como se la conoce ahora, podría brindar una medida absoluta del Volt.



Más detalladamente este efecto resulta de la interferencia entre ondas macroscópicas de corrientes superconductoras. Si se genera una corriente a través de una unión túnel sumamente delgada, las ondas superconductoras son coherentes, pero difieren por algún desfaseamiento que depende del tamaño de la barrera túnel. Hay dos efectos principales: el efecto DC y el efecto AC. En el efecto DC, una corriente DC fluirá a través de la junta túnel aún en ausencia de voltaje aplicado o campo magnético aplicado. En el efecto Josephson AC, si existe un voltaje aplicado a través de la unión túnel se observarán oscilaciones de corriente de radio frecuencia (rf). Si se aplica un voltaje oscilante de radio frecuencia, se puede reducir una corriente DC. En la figura se presenta un diagrama del efecto Josephson: a) es una supercorriente,  $I$ , que se divide a través de dos uniones y sufre un cambio de fase  $\Delta\theta$ , debido a un potencial aplicado. En b) el flujo magnético,  $\Phi$ , induce una supercorriente adicional,  $I_s$ , que sufre un cambio de fase  $+\delta$  y  $-\delta$  en las uniones. En c) se tiene la medición de la supercorriente resultante en un SQUID de baja temperatura crítica, que muestra interferencia en el transporte de corriente.

### Superconductores de alta temperatura (SAT)

Hoy en día no se conoce con certeza el mecanismo que produce la superconductividad en las cerámicas superconductoras a “altas” temperaturas.

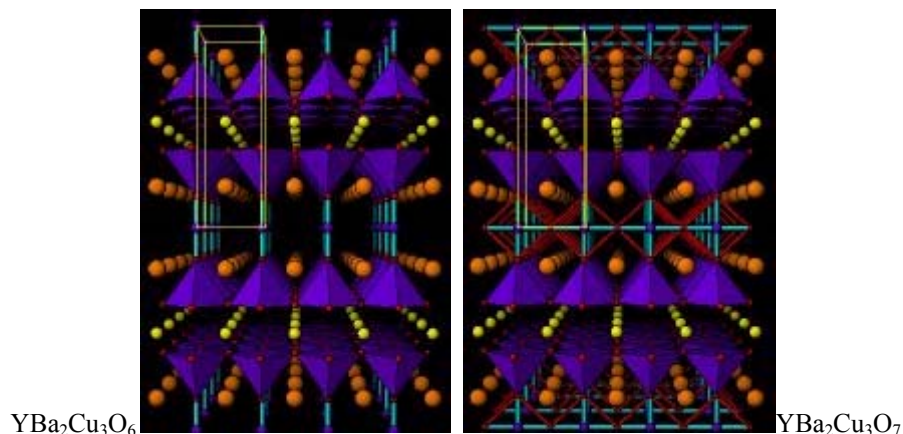


Parece ser que, a diferencia de los superconductores clásicos, la forma concreta en que se disponen los átomos del cristal representa un papel muy importante en la aparición del fenómeno. La mayoría de estas cerámicas son conductoras por encima de su punto de transición, debido a las peculiaridades del enlace entre los átomos de cobre y oxígeno que forman el núcleo (cuprato) de su composición. Estos átomos se disponen en forma de capas alternas dentro del material, permitiendo que un cierto número de electrones puedan desplazarse entre los mismos sin resistencia alguna. Todavía no está muy claro el porqué son superconductores estos materiales aunque la opinión más generalizada es que este fenómeno está muy relacionado con el magnetismo. En la cerámica descubierta por Bednorz y Muller se ha observado que, por encima de la temperatura crítica, exhibe un forma particular de magnetismo. Pero, por debajo de la temperatura de transición, se modifica la estructura cristalina (u ordenamiento de los átomos), destruyendo el magnetismo y el material se vuelve superconductor

En general la estructura de los superconductores de alta Tc es como un SANDWICH GIGANTE. Hay capas de átomos de cobre y oxígeno (estas serían el jamón, la parte esencial para conseguir superconductividad) que se alternan con capas de otros metales (digamos las capas de pan). Y esta sucesión abarca un número enorme de capas.

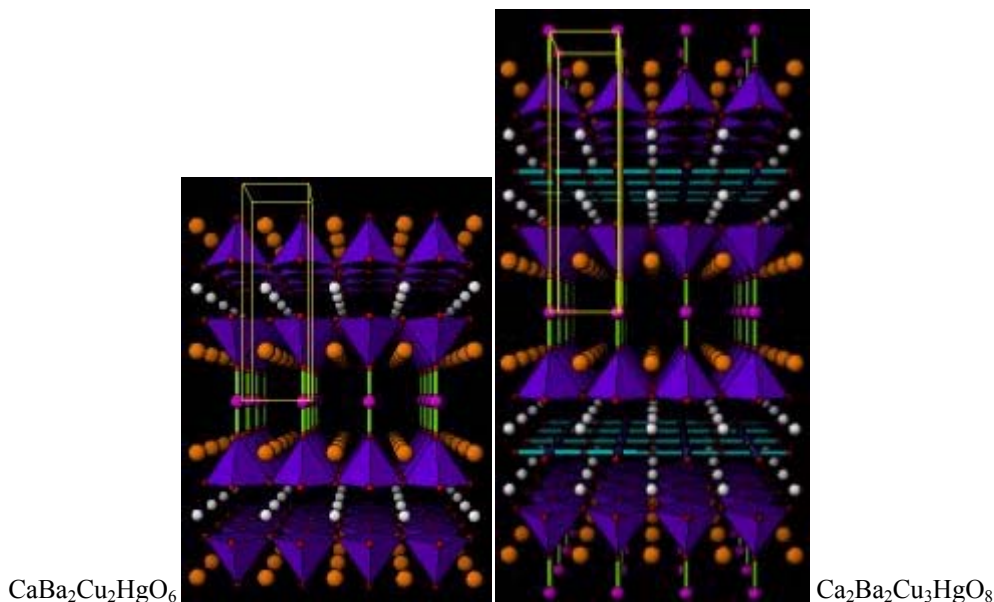
Debemos hacer constar que también se han sintetizado óxidos de estructuras cúbicas sin cobre o compuestos a base de carbono, cuya estructura tridimensional y composición química no se asemejan a las de los óxidos a base de cobre, es decir, hay varias clases de superconductores de alta temperatura crítica.

A continuación presentamos la estructura del superconductor 123 (leído uno,dos,tres), que fue descubierta en 1987 por Maw-Kuen Wu y Paul C. W. Chu, el cual tiene una Tc de 93 °K, temperatura que sobrepasa la temperatura de ebullición del nitrógeno líquido. Hay de hecho dos estructuras: la de la izquierda corresponde al óxido con un menor contenido de oxígeno (de fórmula  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ ) y que NO es un superconductor. A la derecha tenemos la misma estructura con tan solo algo más de oxígeno añadido (doping) y que corresponde a la fórmula del óxido superconductor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ . Esa pequeña diferencia de composición da lugar a un cambio radical de propiedades. En este caso el "jamón" son los planos de Cu-O que forman la base de las pirámides azules y las capas de "pan" la forman también átomos de cobre pero de un tipo distinto (pequeñas esferas azules con enlaces de color azul claro). Si los átomos fueran del tamaño con que se representan aquí, un pequeño cristal de unas micras se extendería en las tres direcciones del espacio a lo largo de unos 100 metros. Podemos imaginar el cristalito como un cubo con 35000 millones de pirámides, más o menos, millón arriba, millón abajo.



Dibujos en perspectiva de las estructuras de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$  (aislante) y  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (superconductor). Las pequeñas esferas amarillas son iones  $\text{Y}^{3+}$ , las esferas naranjas más grandes son iones  $\text{Ba}^{2+}$ . Las esferas azules pequeñas átomos de cobre y las esferas rojas pequeñas, iones de oxígeno  $\text{O}^{2-}$ . La celda unidad se muestra en amarillo. Las pirámides azules representan los iones de cobre activos rodeados de cinco iones óxido  $\text{O}^{2-}$ . Las barritas azules representan enlaces entre iones cobre (en la capa de "pan") e iones  $\text{O}^{2-}$ .

Después del YBaCuO se han descubierto nuevos óxidos de cobre superconductores, más complejos y con temperaturas críticas más altas. En orden de aparición, y en orden creciente de ruptura de récords de Tc podemos mencionar una familia completa de óxidos de cobre con bismuto (Bi), otra a base de cobre y talio (Tl) y finalmente la serie de óxidos de cobre y mercurio (Hg). Actualmente (Dic. 1998) el record de Tc lo tiene el óxido  $\text{Ca}_2\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{HgO}_8$  ( $T_c=130\text{K}$ ,  $-143^\circ\text{C}$ ). Su estructura se muestra más abajo. Incluimos también la estructura del óxido  $\text{CaBa}_2\text{Cu}_2\text{HgO}_6$  a efectos de comparación. Este último presenta una similitud evidente con el  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$  (sólo difieren en la forma en que el oxígeno se coordina en las capas de mercurio o de cobre).



Dibujos en perspectiva de las estructuras de  $\text{CaBa}_2\text{Cu}_2\text{HgO}_6$  and  $\text{Ca}_2\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{HgO}_8$  ( $T_c = 130\text{K}$ ). Las pequeñas esferas blancas son iones  $\text{Ca}^{2+}$ , las esferas naranjas más grandes son iones  $\text{Ba}^{2+}$ . Las esferas azules átomos de cobre, las esferas violeta pequeñas representan átomos de Mercurio y las esferas rojas iones óxido  $\text{O}^{2-}$ . La celda unidad se muestra en amarillo. Las pirámides azules representan los iones de cobre activos rodeados de cinco iones óxido  $\text{O}^{2-}$ . Las barras verdes son enlaces entre iones Hg e iones óxido.

El récord de 130 K se consiguió en 1993 y desde entonces las cosas parecen haberse estancado. ¿Quiere eso decir que la investigación en superconductores de alta  $T_c$  se ha terminado?. ¡EN ABSOLUTO!. Hay muchos otros aspectos de los superconductores de alta  $T_c$  que necesitan mejoras y desarrollo urgentes. Por ejemplo, cómo conseguir corrientes críticas más altas, o el desarrollo y fabricación de dispositivos prácticos son dos de estos otros aspectos.

Y en cuanto a la búsqueda de nuevos materiales no debemos descartar la posibilidad de descubrir alguno con valores de  $T_c$  todavía más altos o con otras propiedades mejoradas. Así por ejemplo, la historia reciente de los superconductores de alta  $T_c$  está impregnada de metales pesados muy peligrosos y contaminantes (Bi, Tl, Hg... son todos muy tóxicos). Sería estupendo por tanto buscar nuevos óxidos que cambiaran ese gusto por el "heavy metal" y dieran lugar a materiales y dispositivos más benignos con nuestro medio ambiente.

### Aplicaciones, beneficios y limitaciones

La principal dificultad actual por vencer, antes de pasar a la fase de las aplicaciones prácticas de los superconductores, es producir hilos o bandas relativamente flexibles de estos materiales (generalmente frágiles) sin alterar sus propiedades superconductoras.

La naturaleza cerámica de los nuevos superconductores de alta temperatura presenta problemas en su aplicación. Los materiales propiamente dichos son bastante fáciles de hacer. El más popular actualmente, el de itrio-bario y óxido de cobre ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ), se ha producido en laboratorios de escuelas, pero es frágil y difícil de manufacturar en forma de cable. Es precisamente lo contrario de lo que se necesita, que es un material dúctil, fácil de conformar, que pueda estirarse en forma de alambres, estamparse en hojas y láminas, etcétera. Afortunadamente, algunas de las aplicaciones del tipo de la informática necesitan la deposición de capas muy delgadas sobre sustratos aislantes. Hay varios métodos normales para este fin, entre otros la simple deposición de vapores en el vacío y la deposición a partir de un gas ionizado.

Si el material en forma de polvos puede hacerse superconductor, deberá ser posible también formar "alambre" metiendo primero los polvos en un tubo de metal y reduciendo seguidamente el diámetro del tubo mediante una técnica de trefilado para comprimir los polvos en el interior. Muy bien puede ser que el éxito en la aplicación de los nuevos materiales dependa más del desarrollo de técnicas de fabricación idóneas que de un conocimiento profundo de cómo se comportan ellos al nivel de las estructuras cristalinas.

Como se dijo anteriormente, en los superconductores de alta temperatura, al aplicarles un campo de unos 10 Tesla, la resistencia del material podía hacerse hasta cien veces superior a la del cobre en razón de que los vórtices en las cerámicas superconductoras no permanecen fijos. Una de las vías de solución que más éxito ha tenido ha sido la de fijar los vórtices mediante impurezas estratégicamente colocadas (dopaje): de esta forma consigue equipararse su comportamiento al de un superconductor clásico, al impedir el desplazamiento de los vórtices y el que este movimiento extraiga energía de la corriente suministrada.

Otro gran obstáculo que apareció es que las cerámicas superconductoras sólo conseguían transmitir una cantidad limitada de electricidad sin ofrecer resistencia, debido a la estructura en capas del material: si las capas no se alinean perfectamente, los electrones chocan contra la frontera de la región desalineada y se frenan. Este problema se ve empeorado en presencia de un campo magnético. Una estrategia exitosa en este campo ha consistido en alinear las capas de cuprato cuidadosamente, a fin de reducir al mínimo las discontinuidades. Para ello se depositan capas micrométricas de material sobre substratos bien alineados, utilizando las mismas técnicas que se emplean para la fabricación de circuitos integrados.

La combinación de estas dos tecnologías ha conseguido resultados espectaculares: actualmente se manejan densidades de corriente sobre un YBaCuO del orden de  $10^{10}$  A/m<sup>2</sup>, que descienden a  $4 \cdot 10^9$  A/m<sup>2</sup> en un campo de 9 T... mientras que al principio el YBaCuO solo permitía el paso de  $10^5$  A/m<sup>2</sup> y perdía toda conductividad en un campo de 0,01 T. Estos valores de conductividad ya son comparables a los de los superconductores tradicionales.

Al principio se consideraba que una aplicación ideal del descubrimiento de la superconductividad, era la de hacer motores y generadores eléctricos de rendimiento elevado, pues gran parte de las pérdidas energéticas en las máquinas electromagnéticas se deben al calor generado por el paso de la corriente a causa de la resistencia de los bobinados. De poderse eliminar la resistencia haciendo los bobinados con hilos de material superconductor se evitarían esas pérdidas. Pero estas esperanzas se vinieron abajo con el descubrimiento de que la superconductividad desaparecía al poner el hilo superconductor dentro de un fuerte campo magnético. Como los motores y generadores necesitan campos de gran intensidad para funcionar, el perfeccionamiento esperado parecía ser inalcanzable.

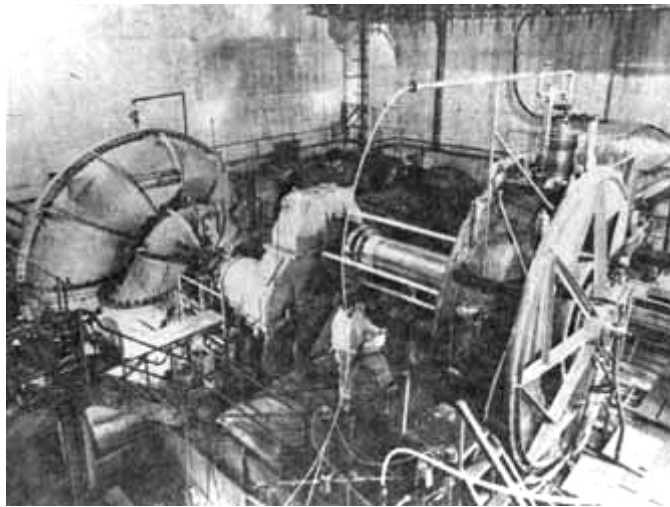


Figura. El motor eléctrico Fawley. Un motor hecho con alambres superconductores. Se fabricó en la década de los setenta en Fawley, Inglaterra. Actualmente se utiliza como generador de energía.

Pero con la aparición posterior de los superconductores que continúan siendo superconductores en presencia de campos magnéticos muy elevados, se vuelve a considerar tal idea como más viable en el futuro.

El empleo de hilos superconductores podría evitar el 15% de pérdida de energía, debida a la resistencia de los hilos eléctricos corrientes.

En otro orden de cosas, recordemos que todas las máquinas eléctricas actuales se excitan mediante electroimanes que emplean bobinados de cobre. En estos aparatos, se aprovecha la alta permeabilidad magnética del hierro o de las aleaciones de hierro con que se fabrican sus circuitos magnéticos. Cada átomo de hierro, o de otro material ferromagnético, posee un momento magnético que puede ser inducido a alinearse con un campo magnético impuesto externamente. La proporción de momentos atómicos alineados depende de la tensión del campo aplicado, y por tanto, de la corriente de excitación de la bobina.

Este proceso tiene un límite obvio; una vez que los momentos atómicos son paralelos, los incrementos posteriores que puedan registrarse en la corriente de excitación no inciden ya en la magnetización. Se dice entonces que el núcleo está saturado. En el caso del hierro, la saturación se alcanza para una intensidad de campo de unos 2 T. Los electroimanes, las máquinas eléctricas y los restantes componentes del sistema de potencia están actualmente limitados en su rendimiento por la barrera de la saturación.

Las cantidades de energía disipadas en los arrollamientos de un electroimán de cobre no se necesitan para mantener el campo magnético. Al contrario, no se precisa de energía alguna para mantener un campo magnético permanente una vez establecido éste. La energía se pierde en el calor producido en la resistencia del cobre debido a la circulación de la corriente de excitación.

Así un electroimán de construcción normal posee la cualidad poco envidiable de tener un rendimiento nulo, pues toda la energía de la corriente excitadora se disipa en la resistencia del hilo de la bobina. Si se redujera a cero esta resistencia mediante el uso de hilo superconductor podrían conectarse juntos los extremos del bobinado, y la corriente excitadora podría circular eternamente sin ayuda externa.

Entonces podrían utilizarse grandes bobinas superconductoras (electroimanes) como fuente de almacenamiento de energía. Estas bobinas superconductoras podrían acumular importantes cantidades de energía en su campo magnético. La corriente circularía indefinidamente en ellas, sin pérdidas, siendo posible extraerla por simple apertura del anillo de corrientes. Este sistema se ha propuesto, por ejemplo, para el almacenamiento de energía en vehículos eléctricos.

En todas aquellas aplicaciones en que sean necesarios campos de una intensidad enorme, los superconductores clásicos no tienen rival.

La forma más evidente de crear un campo magnético es mediante una bobina que al ser atravesada por una corriente eléctrica crea un campo directamente proporcional a la intensidad de la misma. Con conductores normales, el campo máximo que se puede generar no es muy grande, ya que al incrementar la corriente los cables comienzan a calentarse peligrosamente debido a la resistencia eléctrica. Con los superconductores no pasa esto: su resistencia es cero y pueden producir campos magnéticos altísimos. La aplicación típica en este caso son los aceleradores de partículas como el Tevatron del Fermilab en EE.UU. con una capacidad de un tera electrón-Volt.

La idea es tan atractiva, que en ciertos casos vale la pena invertir en instalar refrigeración por helio líquido para mantener fría la bobina superconductora. La energía que se ahorra al hacer desaparecer la resistencia de la bobina compensa con creces el costo de la refrigeración. Entre ellas se cuentan los bobinados de campo para los equipos de resonancia magnética nuclear empleados en medicina para la exploración del cuerpo, los espectrómetros de microondas utilizados en química y los grandes aceleradores de partículas.

Ni siquiera disponiendo de los materiales adecuados, la fabricación de un electroimán superconductor resulta una tarea simple. Si alguna pequeña región del arrollamiento extingue su superconductividad por superar la densidad de corriente eléctrica, esa zona se comportaría como una conexión de alta resistencia y se vería sometido a un fuerte calentamiento resistivo. El calor desarrollado extinguiría naturalmente las zonas próximas al superconductor, con lo que aumentarían las zonas normales. De no controlarse ese proceso autoalimentado, las consecuencias podrían llevar a destruir el aislamiento y dañar permanentemente la estructura.

Para evitar esto, en algunos casos los hilos empleados para los bobinados son mixtos: las partes de aleación superconductoras van pegadas a conductores de cobre. Si, como puede ocurrir, una pequeña parte del superconductor sufre sobrecarga y vuelve al estado de conductividad normal, el cobre obra entonces como derivación temporal de baja resistencia hasta que se enfría. En el Reino Unido, IMI produjo recientemente aleaciones aptas para estos usos.

Existen también interesantes perspectivas de aplicaciones en el campo de los circuitos integrados, donde la velocidad de ejecución está limitada no por los diferentes elementos del circuito, sino más bien por las conexiones, muy resistivas. El empleo de materiales superconductores permitirá paliar este inconveniente y construir microprocesadores más rápidos, naturalmente a condición de que el circuito pudiera funcionar a la temperatura de superconducción.

Se espera que con la llegada de los superconductores de "alta temperatura" se vuelvan más viables muchas de las aplicaciones posibles de baja potencia que se han llevado a cabo con dispositivos refrigerados con helio líquido. Los nuevos superconductores trabajan a temperaturas por encima del punto de ebullición del nitrógeno líquido (77 K ó -196 °C). El nitrógeno líquido es relativamente barato y seguro. Un litro de helio líquido cuesta alrededor de cuatro dólares, su almacenamiento es caro y su manipulación engorrosa. En cambio, el nitrógeno líquido es más barato que la cerveza y fácil de manejar.

Una aplicación que se vislumbra es la de la computadora criogénica. La tecnología ha sido establecida ya, notablemente por IBM. Este tipo de computadora se vale del hecho de que la superconductividad puede ser destruida por un campo magnético. Esto, que en las aplicaciones de potencia es un inconveniente, en informática resulta ser una bendición, pues permite modificar la resistencia de un circuito desde cero hasta un valor pequeño pero finito, que es lo que constituye la base de un circuito de compuertas lógicas. Si pueden hacerse puertas de esta clase, entonces será posible también hacer circuitos de computación. La ausencia de resistencia en el estado superconductor contribuye a la operación rápida, y la rapidez es un requisito primordial para mejorar las computadoras convencionales, en las cuales se realizan operaciones en forma secuencial y la duración de una secuencia determina la velocidad de trabajo de dichas computadoras.

Por otro lado, en la técnica de comunicaciones la resistencia trae consigo otro inconveniente: el ruido. Toda resistencia en un amplificador genera ruido, lo cual impone un límite más bajo a la amplitud de señal que puede ser detectada. Por debajo de ese límite el ruido de resistencia ahoga la señal. Para las comunicaciones por satélite y espaciales sería muy interesante reducir el ruido de los amplificadores incorporando superconductores en las primeras etapas de los receptores. Ya se están usando algunos dispositivos refrigerados con helio líquido; los amplificadores refrigerados con nitrógeno líquido podrán reducir seguramente el costo y ampliar el campo de aplicación.

En el campo de la radio podrían usarse superconductores para reducir el tamaño de las antenas, que generalmente se hacen de dimensiones que guardan relación con la longitud de onda. La omnipresente antena dipolo de semionda es un ejemplo. Los intentos de reducir el tamaño a una fracción muy pequeña de una longitud de onda resultan invalidados por una fuerte reducción de la antena para radiar señales. Esta capacidad se describe técnicamente diciendo que una antena tiene una determinada resistencia de radiación. Una resistencia absorbe energía, y la resistencia de radiación de una antena es en realidad una cantidad ficticia que expresa la capacidad de la antena para lanzar energía al espacio que la rodea. Las antenas que son mucho más cortas que una longitud de

onda tienen muy poca resistencia. Una antena corta vertical de alambre, por ejemplo, se comporta como una resistencia de una pequeñísima fracción de un Ohm en serie con una reactancia capacitiva muy elevada. En teoría debería ser posible desintonizar la reactancia para que la energía fluyera libremente a la resistencia (es decir, se propagara a lo largo de ella por radiación). En la práctica, las pérdidas de la bobina de inductancia que se necesita para desintonizar la capacitancia de la antena son tan grandes que se pierde prácticamente toda la energía en la bobina.

Si la bobina pudiera hacerse de material superconductor sería posible evitar este desperdicio. Entonces una antena corta sería, en teoría, igual de eficiente como antena emisora que una larga. Y como una buena antena de emisión también lo es de recepción, una antena receptora corta de material superconductor sería también igual de eficiente. Una forma de antena que parece ser muy prometedora para la fabricación con material superconductor es de cuadro, que es en efecto una bobina de electroimán y en su forma normal es ineficiente.

El campo de los transportes por sustentación magnética también se ve afectado por las aplicaciones de los superconductores de alto campo crítico. En Japón ya han sido construidos trenes en los que la sustentación se realiza por medio de electroimanes superconductores, de forma de que no hay contacto entre el vehículo y el riel cuando el tren está en marcha. La ausencia de fuerzas de rozamiento permite obtener velocidades del orden de 400 km/h. Cabe prever que, con el escaso costo del enfriamiento del nitrógeno líquido comparado con el helio líquido, el interés de estos medios de transportes se verá rápidamente incrementado.

Un uso menos futurista de la levitación magnética es el de un cojinete superconductor. Una consecuencia de las propiedades magnéticas de los materiales superconductores (o más bien de sus propiedades antimagnéticas) es que si se acerca a ellos un imán experimentan una fuerza de repulsión. Dado un superconductor que tenga una forma física adecuada, esta repulsión puede mantener al imán flotando en el aire. Así pues, si el imán es un eje, se puede hacer girar prácticamente sin fricción.

En una escala pequeña, un cojinete de baja fricción de este tipo podría ser muy útil en los giroscopios para instrumentos de navegación, en los que la resistencia de rozamiento es causa de errores. En una escala más grande, una combinación de bobinas superconductoras y ejes flotantes sería útil en motores y generadores eléctricos.

También pueden utilizarse en aparatos de formación de imágenes por resonancia magnética, más conocidos como RMN. Con esta técnica se coloca una sustancia en un campo magnético intenso que modifica el spin de los núcleos de determinados iones. Después, se somete a la muestra a una onda de radio que reorienta los núcleos. Al desaparecer la excitación se libera un pulso de energía que proporciona información sobre la estructura molecular de la sustancia, y que puede transformarse en una imagen mediante técnicas informáticas. El RMN es una herramienta casi indispensable para la formación de imágenes del cerebro, y con el advenimiento de los superconductores de alta temperatura podrá convertirse en una máquina mucho más pequeña y barata: los superconductores clásicos enfriados por helio requieren voluminosos y delicados equipos de refrigeración. En cambio, el nitrógeno líquido es sencillísimo de producir y utilizar.

También se avisan usos en investigación espacial. En el espacio, protegidos de la luz solar, es fácil conseguir temperaturas dentro del rango funcional de los superconductores de alta temperatura. En este aspecto la NASA ha financiado diferentes estudios sobre sensores y elementos de actuación electromecánicos con vistas a su utilización en naves espaciales.

Como se ve, la ingeniería médica, la física de las partículas, la fusión termonuclear, ya usuarias de electroimanes superconductores, serán otros campos de aplicación de los nuevos superconductores. También se esperan nuevos usos en microelectrónica, electricidad y comunicaciones.

### *ALGUNAS APLICACIONES EN LA ELECTRÓNICA*

La primera sugerencia para utilizar la transición del estado normal al estado superconductor en la electrónica fue hecha en 1956. El dispositivo que se propuso recibió el nombre de criotrón. A continuación haremos una pequeña descripción de este dispositivo.

Consiste en un par de alambres superconductores, uno enrollado alrededor de otro. Usualmente un alambre de niobio se coloca alrededor de un alambre de tantalio, aislados eléctricamente entre sí.

El campo magnético crítico del niobio es bastante mayor que el del tantalio. Ambos alambres se encuentran inicialmente en un estado superconductor. Supongamos ahora que una corriente,  $I$ , pasa por el alambre de tantalio que, al ser superconductor, no ofrece resistencia al paso de la corriente. Si hacemos pasar una corriente  $I_C$ , a través del alambre  $Nb$ , se genera un campo magnético dentro del cual el alambre de tantalio ( $Ta$ ) queda inmerso. Si la corriente es suficientemente intensa se puede generar un campo magnético que lleve al tantalio a su estado normal. Si esto ocurre, aparece una resistencia eléctrica en el tantalio al paso de la corriente, reduciéndose así el valor de esa corriente. Sin embargo, el alambre de  $Nb$  puede permanecer en el estado superconductor ya que el campo magnético crítico del  $Nb$  es mayor que el del  $Ta$  para la misma temperatura. Por tanto, el valor de la corriente en el alambre del tantalio puede controlarse con una corriente menor.

El alambre de tantalio recibe el nombre de alambre de paso o paso. El alambre de niobio recibe el nombre de alambre de control, o control.

Por lo general el calibre del alambre de paso se toma lo más grande posible para así tener en él la mayor cantidad de corriente.



Al principio se utilizaron criotrones como interruptores rápidos para su posible uso en computadoras. Incluso, existen criotrones de películas delgadas. En general, hubo bastante esfuerzo dedicado al desarrollo de circuitos superconductores de criotrones. Sin embargo, a mediados de los años sesenta, estos dispositivos habían perdido ya terreno respecto a los dispositivos de transistores que funcionan a la temperatura ambiente.

La razón más importante, quizá, es que el criotrón no fue tan eficiente comparado con las versiones mejoradas del transistor. Sin embargo, con los nuevos materiales superconductores cerámicos los criotrones podrían ser de nuevo competitivos, ya que en ellos las temperaturas de refrigeración son mucho más grandes. Por otro lado, el criotrón se ha utilizado y se utiliza para controlar corrientes en circuitos de imanes superconductores.

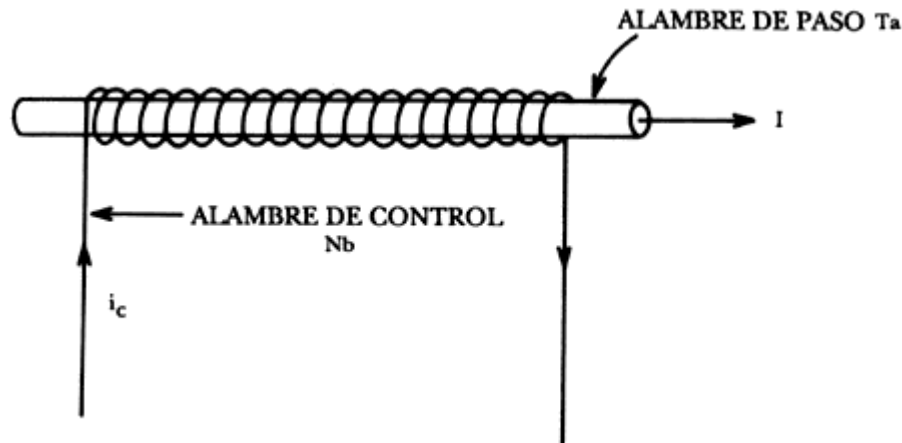


Figura. Esquema que muestra al criotrón o relevador superconductor.

También ocurrió que el descubrimiento del llamado efecto Josephson y el desarrollo alcanzado en el campo de los circuitos integrados trajeron como consecuencia una perspectiva espléndida de aplicaciones de la superconductividad en la electrónica.

El efecto Josephson consiste en el paso de corrientes superconductoras (pares de Cooper) a través de una unión que, normalmente y desde un punto de vista clásico, no debería dejar pasar ningún electrón. Es un fenómeno típicamente cuántico, explicable por la mecánica cuántica.

La corriente Josephson está presente aun en ausencia de un voltaje aplicado a la unión (que recibe el nombre de unión túnel). Esta corriente de voltaje cero depende fuertemente de un campo magnético aplicado. Estas características permiten disponer de un interesante interruptor para circuitos lógicos. Este efecto también se observa, desde luego, en los nuevos materiales superconductores cerámicos.

Es evidente que si tenemos pequeñas espiras de material superconductor por las que circula una corriente, se contará con información almacenada, pues la corriente permanecerá circulando en la espira sin pérdida y, como sabemos, toda corriente que circula genera un momento magnético. Si la corriente circulara en sentido contrario, el momento magnético generado sería opuesto al inicial. Estos dos sentidos de circulación pueden constituir dos estados de una célula de memoria.

Para las computadoras, el uso de dispositivos de efecto Josephson lleva a tiempos de transferencia de corriente extremadamente breves. Los tiempos de respuesta de un interruptor de efecto Josephson son de **5 a 10 picosegundos** (un picosegundo es igual a  $10^{-12}$  segundos).

La dificultad de la aplicación del efecto Josephson radica en la elaboración de la unión en donde se da este efecto. Dicha unión ha de construirse con capas de óxido de unos **30 angstroms** y, además, las características han de ser estables ante ciclajes térmicos y almacenamiento. Sin embargo, su utilización parece muy ventajosa y polifacética.

El SQUID (dispositivo superconductor de interferencia cuántica, por sus siglas en inglés) es uno de los dispositivos superconductores más utilizados. Este es en esencia un detector extremadamente sensible a los cambios de intensidad del campo magnético. Sus usos abarcan desde aplicaciones militares hasta médicas: detección súper precisa de las señales eléctricas del cerebro y el corazón, comprobación no destructiva de tuberías y puentes (la fatiga del metal produce una firma magnética peculiar), paleomagnetismo, sensores geológicos para prospecciones petrolíferas, equipos militares de detección de submarinos observando los cambios que éstos producen en el campo magnético de la Tierra cercano a ellos, observación de la circulación de la sangre (pues la sangre es magnética) cuando se le pone cerca de un vaso sanguíneo, etcétera.

Existen dos tipos de este dispositivo: el SQUID de corriente directa (**cd**) y el SQUID de radio frecuencia (**rf**).

El SQUID de corriente directa está formado por dos uniones de tipo Josephson conectadas en paralelo en un circuito de superconductores. Cuando aplicamos una pequeña corriente, **I**, ésta fluye a través de las uniones como una supercorriente sin ocasionar una caída de potencial, esto es, sin requerir un voltaje aplicado a través de la barrera. Sin embargo, cuando esta corriente excede cierto valor crítico, **I<sub>c</sub>**, se genera un voltaje **V** en la unión y la corriente, **I<sub>c</sub>**, es una función oscilatoria del flujo magnético  $\phi$  que atraviesa el circuito. El periodo de esta función es de un fluxoide, que es un quantum de flujo magnético,  $\phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15}$  Weber. La naturaleza oscilatoria de

la corriente se debe a la interferencia de las dos ondas que describen los pares de Cooper en las uniones, de manera análoga a la interferencia de dos ondas electromagnéticas coherentes (o sea dos ondas de luz). Por esto, al SQUID se le llama algunas veces interferómetro.

El SQUID puede utilizarse como un magnetómetro extremadamente sensible, ya que es posible detectar un cambio de flujo,  $\delta\phi$ , mucho más pequeño que un fluxoide, utilizando un circuito de *flujo magnético bloqueado* que genera una corriente en la espira acoplada. al SQUID de manera que se genera un flujo  $-\delta\phi$  para mantener el flujo magnético total del SQUID en un valor constante. El voltaje de resultante de salida es proporcional a  $\delta\phi$  y éste es proporcional al campo magnético.

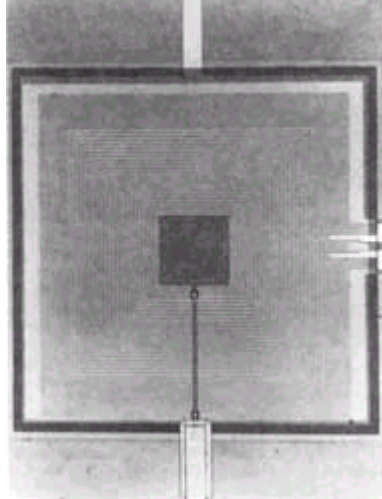


Figura. SQUID cd. Está formado por películas delgadas. Las dos uniones Josephson que lleva están abajo del cuadro oscuro, que es de Nb, en la región del borde inferior. La espiral cuadrada de 20 vueltas también es de Nb y está eléctricamente aislada del cuadro, pero muy acoplada a él magnéticamente. El cuadro es de 1 mm por lado aproximadamente.

El SQUID de radio frecuencia, es un diseño anterior al del SQUID cd. Consta de una unión Josephson incorporada a un circuito superconductor. El circuito está acoplado a la bobina de un circuito enfriado LC (bobina-condensador) que está excitado a su frecuencia de resonancia, típicamente de **30 MHz**. La amplitud del voltaje oscilante de radio frecuencia a través del resonante es periódico en el flujo magnético, con periodo de un fluxoide.



Figura. SQUID rf. Está hecho en un configuración toroidal a partir de una barra sólida de Nb. La unión Josephson está en una plaqueta en la parte media.

Después de desmodular la señal de radiofrecuencia, la salida se utiliza para bloquear el flujo del SQUID, de la misma manera que en el SQUID cd. Este tipo de SQUID es mucho menos sensible que el SQUID cd, pero ha permanecido en el mercado hasta muy recientemente.

Aunque, por ahora, es demasiado pronto para que estos dispositivos tengan una gran repercusión en aplicaciones prácticas, dentro de la próxima década se espera un gran auge, tanto en la variedad de estos dispositivos superconductores como en la variedad de sus aplicaciones. Una de las más novedosa es en biomagnetismo, donde se utilizan para detectar especialmente las fuentes de los pequeñísimos campos magnéticos generados por el cerebro.