

# Superconductores a alta temperatura

## La era de los materiales con resistencia cero

A partir de abril del presente año la prensa anunció en forma reiterada el descubrimiento de materiales superconductores a temperaturas relativamente altas, unos 90° Kelvin (eso corresponde a la escala usual aproximadamente  $-180^{\circ}\text{C}$ ). Como ilustración mencionemos que antes de ese hallazgo se había observado superconductividad hasta una temperatura de  $23.7^{\circ}\text{K}$ . La atención recayó sobre las aplicaciones: conducción de electricidad sin pérdidas, posibilidad de construir trenes flotantes que alcanzarían altas velocidades con un gasto pequeño de energía, etc.

Desde un punto de vista básico cabe hacerse una pregunta: ¿En qué consiste la superconductividad?

Sabemos que la corriente eléctrica es un movimiento dirigido de partículas cargadas. En condiciones normales los materiales que conducen electricidad deben esta facultad a la existencia de electrones con libertad de movimiento; se trata de aquéllos que se encuentran en el llamado nivel de Fermi. En efecto, como dichos electrones, al igual que los demás, poseen carga negativa; un desplazamiento colectivo en determinada dirección es la corriente. En el trayecto sufren múltiples dispersiones durante las cuales pierden energía y cambia la orientación de su movimiento. Entonces, para que la corriente no desaparezca, es necesario reponer la energía perdida y regresarlos a que se desplacen en la dirección original; eso se logra aplicando un voltaje.

En el estado superconductor, parte de los electrones que estaban en el nivel de Fermi se agrupan de dos en dos formando lo que se conoce como pares de Co-

oper. Dichas entidades poseen una carga neta; tienen libertad de movimiento y lo interesante es que no experimentan dispersiones durante su desplazamiento. Por lo tanto una corriente puede perdurar indefinidamente sin necesidad de proporcionar energía a los portadores de carga.

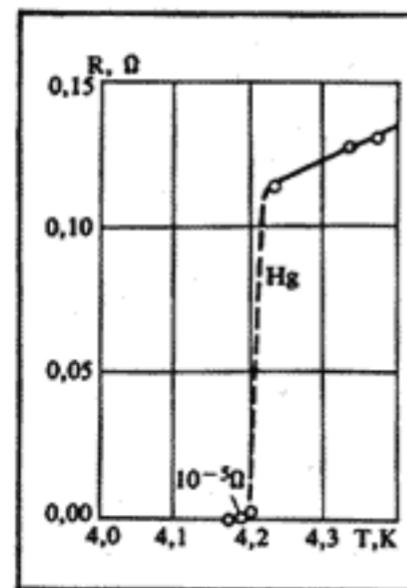
Hagamos ahora un poco de historia. En el año 1911 el físico holandés Heike Kamerlingh Onnes realizó experimentos para medir la resistencia de los metales a bajas temperaturas. La elección de la primera sustancia a analizar recayó en el mercurio. ¿Por qué esta preferencia? Todo es muy sencillo; en aquella época era el único metal que —por medio de la destilación— podía limpiarse bastante bien de las impurezas. Había que eliminar la influencia de factores secundarios a la hora de realizar los experimentos.

Los metales en estado normal exhiben una resistencia proporcional a la temperatura (si graficáramos, el resultado sería una línea recta). El mercurio mostró ese comportamiento inclusive cuando se utilizó como sustancia refrigerante al hidrógeno líquido. Lo inesperado ocurrió un poco por abajo de los  $4.3^{\circ}\text{K}$ : apareció una brusca caída en la resistencia y a los  $4.2^{\circ}\text{K}$  los aparatos no registraron en absoluto oposición al paso de corriente.

Podemos caracterizar entonces a los materiales en estado superconductor por tener una resistencia igual a cero, aunque hay otra característica que los distingue. En 1933 Meissner y Ochsenfeld determinaron —usando muestras de estaño y plomo— que en el interior de los superconductores el campo magnético es nulo, aunque en el exterior adopte valores distintos de cero. Una sustancia que presen-

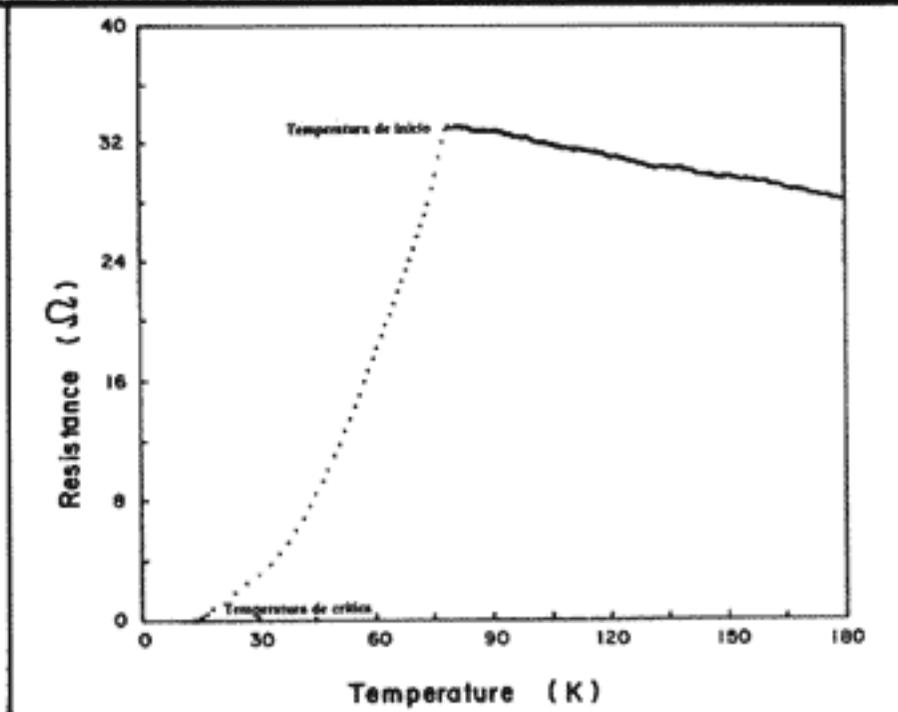
ta esta propiedad se llama diamagnética perfecta. El descubrimiento de este fenómeno modificó las concepciones que sobre el tema se tenían en esa época. Se entendió entonces que un superconductor es algo más que un conductor perfecto, por cuanto estos últimos no pueden ser diamagnéticos perfectos a temperaturas distintas del cero absoluto.

Transcurrieron 46 años entre el descubrimiento de este fenómeno y el advenimiento de la primera teoría que lo explicara. Mientras tanto hubo que sortear muchas dificultades. Y es que el estado superconductor es el resultado de la interacción de muchos cuerpos; ahora los electrones interactúan entre sí, ahora lo hacen con la red cristalina, etc. Todo debe ser tomado en cuenta. Las partículas que forman parte de la sustancia se



Tomado de: Cerca del cero absoluto, 1983

He aquí los resultados que obtuvo Kamerlingh Onnes en 1911. La resistencia de la muestra de mercurio desaparece aproximadamente a los 4.2 grados Kelvin.



La primera cerámica superconductora que se obtuvo en el Instituto de Investigación en Materiales de la UNAM exhibió el comportamiento mostrado en la gráfica. La temperatura crítica ( $T_c$ ) era de 15 grados Kelvin.

comportan como una sola, situación que introduce un problema poco usual: describir a un cuerpo macroscópico recurriendo a conceptos y herramientas utilizados en el estudio del micromundo.

En 1957 Bardeen, Cooper y Schrieffer proponen un mecanismo para la explicación de superconductividad. Cuando el material llega a una temperatura en que la resistencia es cero, una fracción de los electrones que se encontraban en el nivel de Fermi han pasado a un estado de menor energía. Ello es resultado de que tales electrones se agrupan en pares, es decir, se comportan como si estuvieran enlazados. Algo similar ocurre por ejemplo con un átomo de hidrógeno; su energía es menor a la que tendrían un electrón y un protón (ésas son las partículas que forman un hidrógeno) si no estuvieran ligados.

La dificultad para entender esto surge porque dos cuerpos con carga del mismo signo se repelen. ¿Cómo explicar entonces la formación del par electrónico? Debe haber una fuerza que anule la repulsión y sea incluso capaz de producir atracción entre dos electrones. Recordemos algo que ya dijimos con anterioridad: no podemos despreciar las interacciones con la red cristalina.

En un cuerpo sólido cada átomo permanece en una pequeña región del espacio. Cuando perturbamos a la red cristalina los átomos comienzan a vibrar. A estas vibraciones se les conoce como fonones.

La presencia de un fonón produce modificaciones locales en la estructura de la sustancia; una de las consecuencias es un cambio en la energía de los electrones. Si

la energía disminuye más allá de cierto valor, el fonón podrá provocar que entre dos electrones haya una atracción.

Todos saben que dos cuerpos no pueden ocupar simultáneamente el mismo sitio. A nivel microscópico hay algo similar; se trata del principio de exclusión de Pauli, pero cabe decir que no todas las partículas lo obedecen. Este es el caso de los pares de Cooper. Por lo tanto pueden coexistir dos o más en el mismo estado, pero también algo adicional: estos pares electrónicos (dotados de carga) podrán atravesar una sustancia superconductora sin experimentar dispersiones.

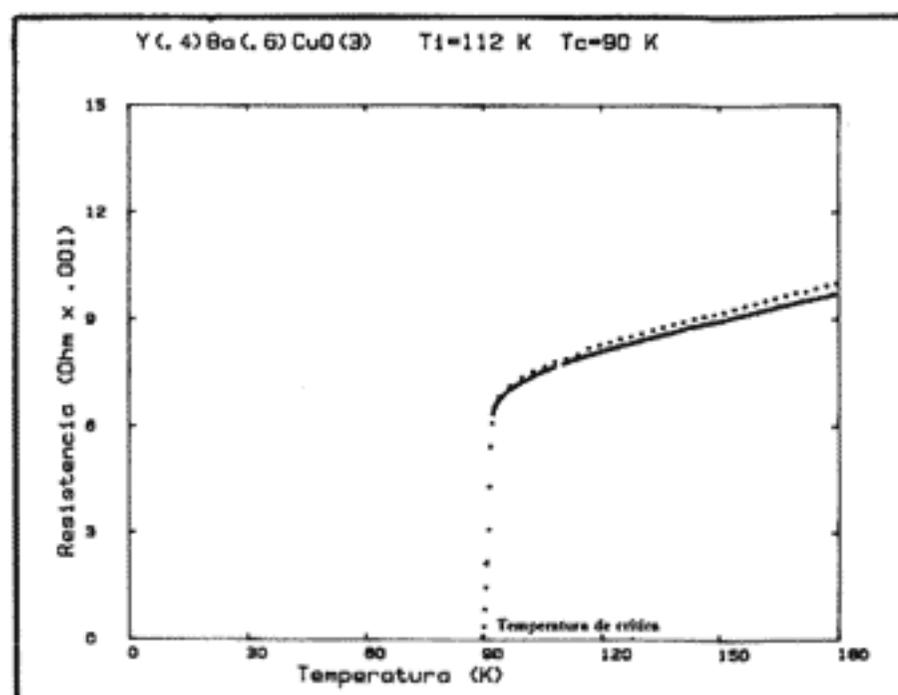
Hasta 1986 todos los superconducto-

res que habían sido descubiertos eran, o bien elementos de características metálicas, o bien aleaciones de ellos. En el curso del año una revista científica alemana publicó una carta en que —como cuestión tentativa— se hacía referencia a la posibilidad de encontrar superconductividad en materiales que no habían sido considerados anteriormente: las cerámicas, y a una temperatura cercana a los 30°K. Poco después, haciendo mediciones de campo magnético, corroboraron sus planteamientos. Este fue el inicio de intensas investigaciones en varios países del mundo —incluido México— acerca de la superconductividad en materiales no metálicos.

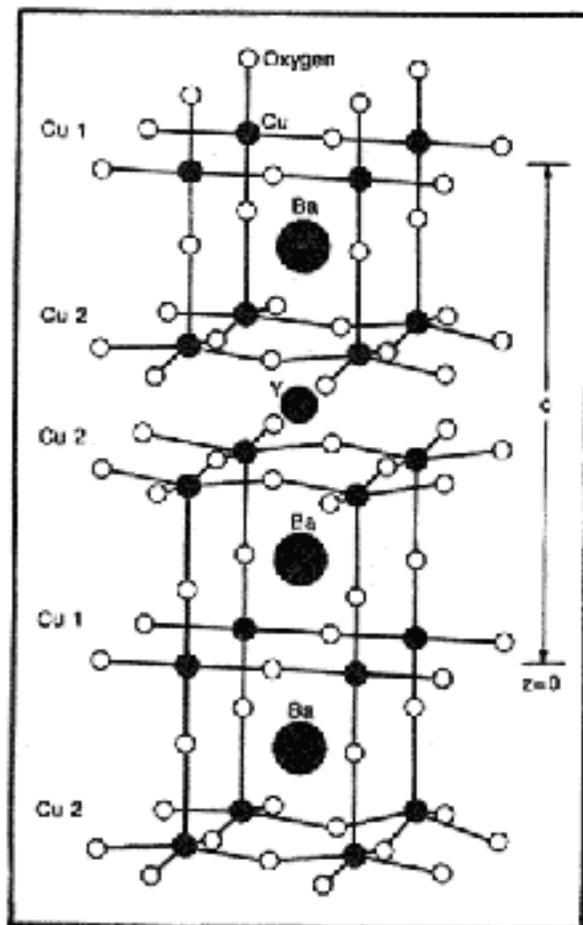
Al inicio de 1987, con cambios en la composición química de las muestras, se lograron sintetizar superconductores con temperaturas críticas de aproximadamente 90°K. Un notable avance en un corto periodo de tiempo.

El grupo de bajas temperaturas del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM (IIMUNAM) —según relata el Dr. Roberto Escudero— inició el estudio de superconductividad en cerámicas conociendo sólo informaciones vagas acerca de las características de los preparados que se hacían en otras partes del mundo. Sin embargo en el lapso de un mes lograron sintetizar el primer material superconductor; se trataba de un compuesto que combinaba los siguientes elementos: Ytrio, Bario, Aluminio, Cobre y Oxígeno. La temperatura de inicio era de 76°K y la temperatura crítica estaba cercana a los 15°K.

La posibilidad de sintetizar en México



Los últimos materiales superconductores obtenidos en México tienen un comportamiento que se ilustra en la gráfica. Hay algo curioso: en una zona hay dos líneas, la línea punteada corresponde a mediciones de resistencia durante una etapa de descenso de la temperatura. La otra se obtuvo en un periodo posterior, esta vez durante el ascenso de la temperatura.



Estructura típica de la red cristalina en las cerámicas superconductoras.

un superconductor que funcionara a una temperatura relativamente alta, estaba ya bastante cercana. Expliquemos un poco: En algunos materiales el descenso de la resistencia se torna brusco hasta temperaturas ligeramente superiores a la crítica. En otros preparadas la caída de la resistencia hacia el valor cero se produce en un intervalo amplio de temperatura, inclusive decenas de grados. Semejante comportamiento está relacionado con impurezas en el material, las cuales retardan el surgimiento del efecto superconductor. Entonces, modificando las proporciones de los elementos que entran en la composición química de la muestra, así como el proceso en el que son sintetizados, sería posible aumentar la temperatura crítica. Así sucedió efectivamente. Las cerámicas exhiben ahora temperaturas críticas cercanas a los 90° Kelvin y la resistencia disminuye marcadamente incluso en los 130° Kelvin.

La composición química de las cerámicas es la siguiente:



el valor de  $p$  es ligeramente inferior a 7.

Es posible sustituir Yttrio por casi todos los elementos que aparecen en la parte inferior de la tabla periódica, es decir, las tierras raras; el resultado sigue siendo satisfactorio.

Por otra parte, al sustituir un poco de Oxígeno por Flúor, las temperaturas críticas suben ligeramente. En el momento en que se escriben estas líneas un investigador de la Universidad de Karlsruhe (RFA) ha sintetizado un material que es

superconductor hasta los 120°K, aunque el fenómeno es inestable. Adicionalmente ciertos grupos de investigación de Japón y E.E.UU. han reportado temperaturas críticas inestables a 240°K y también a una temperatura superior a la ambiente: 67°K. La composición química de sus muestras es otra vez  $Y_1 Ba_2 Cu_2 O_p$ , pero incluyen algo adicional. Ese algo adicional no se sabe qué es, lo guardan en secreto.

Las muestras de cerámica superconductoras se preparan moliendo y mezclando Oxido de Yttrio, Carbonato de Bario y Oxido de Cobre; las sustancias se pesan adecuadamente con el fin de tener las proporciones correctas. Posteriormente se hace una pastilla de la mezcla y durante varias horas se somete a temperaturas cercanas a los 1 000°K; en este último paso se quema el Carbonato de Bario. Las moléculas se disocian; el Bario queda en el preparado y el carbono se combina con Oxígeno, dando origen a  $CO_2$ , que va a la atmósfera. Finalmente la muestra se deja enfriar lentamente hasta que alcanza la temperatura ambiente. Mencionemos aquí que la cerámica podría prepararse de otra manera.

Hay un hecho curioso respecto a estos materiales; resulta que entre más cuidado se tenga en la preparación de la mezcla, disminuyen las posibilidades de obtener resultados positivos. Dicho de otra manera, las estructuras deben tener defectos, quizá deficiencia de cierto elemento en alguna parte, en otro sitio una abundancia de un elemento distinto, etc. Eso refleja que en una estructura cristalina perfecta tal vez no habría superconductividad.

La superconductividad a temperaturas hasta los 90°K ha sido descubierta experimentalmente, pero aún no se tiene una explicación microscópica. Se vuelve a repetir la historia. El grupo de bajas temperaturas del IMUNAM intenta construir una teoría fenomenológica. En ésta juegan un papel primordial las interacciones entre los cobres y los oxígenos. Ambos elementos se agrupan en la red cristalina formando planos (los cobres están en las esquinas y los oxígenos en los lados). En un caso ideal —una red perfecta— los electrones estarían perfectamente localizados y entonces no podría haber conducción de corriente. Cuando aparecen distorsiones algunos electrones van a quedar localizados, pero no todos. Estos últimos serían los precursores del estado superconductor.

Algunos experimentos recientes parecen indicar que la teoría de Bardeen, Cooper y Schrieffer (BCS) no se aplica en este caso. Recordemos que en el mecanismo de formación de los pares de electrones interviene un fonón. La frecuencia de vibración de los elementos de la red cristalina depende de su masa (un caso ma-

croscópico similar es el de un cuerpo unido a un resorte). Si nosotros cambiáramos, por ejemplo, oxígeno normal por alguno de sus isótopos, lo único que se modificaría sería la masa; eso da lugar a modificaciones en las frecuencias de vibración y esto conduce a una variación en la densidad de los fonones. Cambian entonces los parámetros que caracterizan a la superconductividad, entre ellas la temperatura crítica. Los experimentos realizados en las cerámicas muestran que esto no sucede. Que la teoría BCS no funcione no excluye la formación de los pares de Cooper.

Al inicio de estas líneas mencionamos que en los superconductores algunos electrones disminuyen su energía. Se forma una brecha de energía (banda prohibida) entre el nivel donde se hallan los portadores de carga responsables de la conducción normal y el nivel donde se localizan los pares de Cooper. Recientes investigaciones sobre la diferencia de energía entre ambos estados arrojan resultados totalmente distintos. Eso es una dificultad, cuya superación permitirá avanzar en la comprensión del fenómeno.

Las líneas de investigación se concentran ahora en la búsqueda de materiales con temperaturas críticas más altas; el éxito de esta tarea permitiría ampliar las posibilidades tecnológicas de los superconductores. Anderson —Premio Nobel de física hace varios años— ha propuesto una teoría de estados resonantes. Afirma que si el mecanismo es de acuerdo a lo que está proponiendo, las temperaturas de funcionamiento podrían llegar hasta los 600°K.

En nuestro país podrían construirse algunos aparatos con las cerámicas superconductoras. No nos referimos a grandes almacenadores de energía o computadoras de ultra-velocidad; eso está fuera de nuestro alcance, podrían diseñarse cosas pequeñas, como por ejemplo, dispositivos que servirían en el campo de la medicina.

Posiblemente tengamos nuevas sorpresas en un futuro próximo...

#### LECTURAS RECOMENDADAS

1. Edelman, V. *Cerca del cero absoluto*. Colección física al alcance de todos. Editorial Mir. Moscú. 1986.
2. Rose-Innes A. C. y E. H. Rhoderick. *Introduction to superconductivity*. International series in solid state physics, vol. 6. Pergamon Press. Oxford. 1978.
3. Tinkham, M. *Introduction to superconductivity*. Mc-Graw Hill. 1975.

*Agradecemos al Dr. Roberto Escudero Derat la ayuda que nos proporcionó en la elaboración de este reportaje.*