

Superconductividad

Introducción

La corriente eléctrica que alimenta nuestros dispositivos se compone de partículas individuales (electrones). Un material se llama "conductor" cuando algunos de sus electrones pueden desplazarse fácilmente entre iones, en lugar de permanecer fuertemente ligados a un solo átomo. Este movimiento no es totalmente eficiente: los electrones chocan con los átomos perdiendo parte de su energía, que se convierte en vibración (calor). La resistencia eléctrica es precisamente esta resistencia al flujo de los electrones, que causa calentamiento y pérdida de energía en nuestros circuitos eléctricos. Desplazar corriente eléctrica en un conductor normal requiere un consumo constante de energía.

La superconductividad ocurre cuando, al enfriar algunos materiales, estos choques desaparecen. Por debajo de cierta temperatura crítica (T_c), la resistencia se hace exactamente cero, y la corriente eléctrica circula sin perder energía ni generar calor. Distintos materiales tienen distinta T_c . Una vez puesta en marcha, una corriente podría circular indefinidamente en un circuito superconductor cerrado sin perder energía y, por tanto, sin necesidad de alimentación. Los superconductores tienen otra propiedad, el llamado efecto Meissner. Los superconductores expulsan los campos magnéticos de su interior, de modo que al acercar un imán a un superconductor aparece una fuerza repulsiva que los aleja entre sí (igual que al enfrentar dos imanes por sus polos iguales).

Un poco de historia

En 1911, el grupo de investigación de Heike Kamerlingh Onnes en Leiden (Países Bajos) fue el primero en observar la desaparición completa de la resistencia eléctrica en el mercurio a la temperatura de 4.2 K. La resistencia no se vuelve simplemente "muy pequeña", sino que cae a CERO, marcando el descubrimiento de la superconductividad. Este hallazgo fue posible gracias al trabajo de Onnes para licuar gases nobles y así alcanzar temperaturas extremadamente bajas. Su esfuerzo rindió frutos en 1908, cuando consiguió por primera vez licuar helio, un gas noble detectado inicialmente en 1868 por Janssen y Lockyer en el espectro del Sol. El helio, un recurso esencial pero limitado en nuestro planeta, sería extraído de un mineral terrestre (cleveíta) en 1895 y encontrado en reservas de gas natural en 1903.

En 1933, en Berlín, Walther Meissner y Robert Ochsenfeld demuestran que los superconductores se comportan como diamagnéticos perfectos, es decir, un campo magnético externo no puede penetrar en su interior (efecto Meissner-Ochsenfeld). Basándose en estos fenómenos observados experimentalmente, también en 1933 los hermanos Fritz y Heinz London ofrecen el primer modelo teórico para la superconductividad, introduciendo la idea de que todo el superconductor se encuentra en un estado cuántico bien definido. En 1950, Ginzburg y Landau integran electromagnetismo y termodinámica para describir teóricamente la transición de fase al estado superconductor al descender la temperatura.

A lo largo de los años 50, Bardeen, Cooper y Schrieffer desarrollan la primera teoría microscópica (teoría BCS) para explicar el origen de la superconductividad mediante la asociación de electrones por parejas, formando los llamados pares de Cooper. Esta teoría los lleva a ganar el premio nobel en 1973.

Explicación

Microscópicamente, la teoría BCS explica el comportamiento superconductor mediante la formación de pares de Cooper: los electrones en un material superconductor se enlazan por parejas a través de su interacción con la red de iones positivos del metal. Un electrón que pasa entre los iones positivos los atrae levemente, creando una pequeña deformación de la red. Esta deformación atrae a un segundo electrón, con spin y momento (dirección de movimiento) opuestos. Para separar una pareja de electrones debemos destruir el par de Cooper aplicando una energía fija, dependiente del material, a la que llamamos gap superconductor.

Los electrones son partículas con spin $\frac{1}{2}$ (fermiones), pero cada pareja de electrones se comporta, conjuntamente, como una partícula con spin 0 ($= +\frac{1}{2} - \frac{1}{2}$), es decir, un bosón. Según la mecánica cuántica,

dos fermiones no pueden encontrarse en el mismo estado cuántico, no pueden ser descritos por la misma función de onda. En cambio, los bosones no tienen esta restricción, y a bajas temperaturas se acumularán todos en el mismo estado de mínima energía. De este modo, los pares de Cooper de todo el material pueden sincronizar su fase y ocupar un solo estado cuántico colectivo, formando así el condensado superconductor. Del mismo modo que los fotones en un láser, los pares de Cooper en el condensado superconductor tienen coherencia de fase.

Este estado cuántico colectivo se encuentra detrás de la resistencia cero. En estado superconductor, la única forma de frenar el movimiento de los electrones es rompiendo los pares de Cooper, extrayéndolos del condensado superconductor. Si la red de iones se encuentra a temperatura inferior a T_c , los electrones fluyen sin molestias. Cuando la temperatura del material supera T_c , la energía térmica es suficiente para romper los pares de Cooper y desaparece la superconductividad.

El efecto Meissner también se explica gracias a este comportamiento cuántico colectivo, como reflejan las ecuaciones de London y el formalismo de Ginzburg-Landau. También predicen la forma en que un campo magnético extremadamente alto puede terminar atravesando el material, destruyendo el comportamiento superconductor.

Algunos superconductores, que llamamos de Tipo I, pierden súbitamente el estado superconductor bajo un campo magnético elevado; en cambio, los superconductores de Tipo II pasan por un estado intermedio en el que el campo magnético atraviesa el material mediante “canales” delgados no superconductores (vórtices), mientras el resto del volumen mantiene su comportamiento superconductor. Así es como se produce la levitación magnética: el campo magnético queda “congelado” en el interior del superconductor, y las fuerzas que aparecen por el efecto Meissner impiden que el superconductor se desplace hacia zonas con mayor o menor intensidad de campo.

¿Y esto para qué sirve?

- Resonancia magnética (MRI). Los grandes imanes de un escáner MRI están hechos con cables superconductores; así producen campos intensos sin recalentarse. aceleradores de partículas, como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, donde se detectó el bosón de Higgs.
- Qubits y otros circuitos altamente eficientes. Los elementos básicos de la computación cuántica son a menudo circuitos superconductores, que se comportan como objetos cuánticos bien definidos (son bien descritos por las leyes de la mecánica cuántica) gracias a la coherencia de fase del condensado superconductor.
- Sensores SQUID de campo magnético. Nuestros sensores de campo magnético más sensibles, usados para detectar señales electromagnéticas cerebrales y del corazón, se basan en la sensibilidad al campo magnético del efecto Josephson.
- Trenes de levitación magnética. Japón y China ya han implementado trenes basados en repulsión entre electroimanes superconductores. Son capaces de circular a velocidades > 600 km/h (los AVE, como referencia, circulan a unos 300km/h). Sin embargo, la necesidad de refrigeración constante los hace difíciles de implementar. Si bien no utilizan la levitación basada en el efecto Meissner (esto requeriría superconductores de mayor volumen) son una realización similar de la idea.

La gran limitación de los superconductores actuales está en la necesidad de operar a bajas temperaturas. Incluso los llamados superconductores de alta temperatura, como el YBaCuO, requieren enfriar cerca de los 77 K (nitrógeno líquido). Enfriar requiere habitualmente el uso de líquidos criogénicos (nitrógeno y helio) caros y de acceso limitado. Cada año se descubren compuestos con una temperatura crítica un poco más alta. El sueño es encontrar uno que funcione a temperatura ambiente. Con ello se abriría un mundo de nuevas posibilidades: redes de distribución eléctrica altamente eficientes, sistemas de almacenamiento de energía sin pérdidas, implementación extendida de levitación magnética en transporte... ¿Dónde está el límite?