

SUPERCONDUCTIVIDAD. HISTORIA Y FUNDAMENTOS.

Joan O'Callaghan

La superconductividad es un estado termodinámico que presentan algunos materiales. Algunas de sus sorprendentes manifestaciones experimentales (resistencia nula, levitación estable de un material superconductor sobre un imán, etc.) parecen contradecir principios básicos de la física (Fig. 1). Muchos grupos de investigación en física y

ciencia de materiales han trabajado en esta área y, desde su descubrimiento en 1911, se han otorgado varios premios Nobel de física a los protagonistas de los avances más significativos¹. El progreso en este campo ha estado plagado de anécdotas y casualidades, y es un buen ejemplo de cómo la comunidad científica encuentra y explica fenómenos inesperados y poco intuitivos.

Con el descubrimiento en 1987 de materiales que presentan el estado superconductor a temperaturas relativamente altas –y con las posibilidades comerciales que estos ofrecen–, el campo ha dejado de estar restringido a grupos de física y ciencia de materiales. En la actualidad hay un número considerable de ingenieros desarrollando dispositivos de altas prestaciones a incluir tanto en sistemas futuros como en los que funcionan hoy en día.

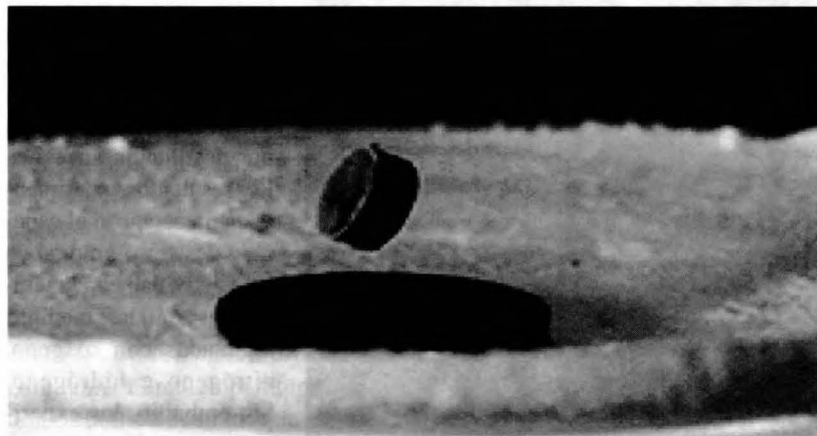


Fig. 1: Un imán levita sobre un material superconductor. Esta es una de las demostraciones más sorprendentes del fenómeno de la superconductividad. Es también posible obtener fuerzas repulsivas entre dos imanes permanentes, pero es prácticamente imposible obtener una levitación estable entre ellos (siempre tienden a orientarse de forma que las fuerzas entre ellos son atractivas, y acaban juntándose). En cambio, al acercar un imán a un superconductor, se crean corrientes (continuas) en el superconductor que provocan una fuerza de repulsión (estable) en el imán.

1. UNA VISION GENERAL A LAS APLICACIONES DE LA SUPERCONDUCTIVIDAD.

Las aplicaciones de la superconductividad se pueden clasificar en aplicaciones de baja potencia y aplicaciones de alta potencia. Entre las aplicaciones de baja potencia están los dispositivos analógicos de RF y microondas. También entre las aplicaciones de baja potencia se encuentran la magnetometría, basada en los “Superconducting Quantum Interference Devices” (SQUID’s), basados a su vez en el efecto Josephson) y los circuitos digitales. Las ventajas de la utilización de materiales superconductores en estas

JOAN O'CALLAGHAN es profesor del departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones en la especialidad de Radar en la ETSETB.

¹ Kammerlingh Onnes en 1913 por el descubrimiento del primer material superconductor; Landau en 1962 por sus teorías en materia condensada; Bardeen Cooper y Schrieffer en 1972 por la teoría cuántica de la superconductividad; Giaever y Josephson por el efecto túnel de los electrones en estado superconductor; y Müller y Bednorz en 1988 por el descubrimiento de nuevos tipos de materiales superconductores. El Nobel del 1996 se otorga por un tema afín: el de la superfluidez que, entre otras manifestaciones incluye la ausencia de pérdidas por rozamiento viscoso del helio líquido a muy bajas temperaturas.

aplicaciones son fundamentalmente su bajo consumo, el reducido nivel de ruido, y la alta velocidad. Esto, unido a que los circuitos semiconductores también mejoran sus prestaciones a baja temperatura, permite combinar ambos tipos de materiales en circuitos híbridos semiconductor-superconductor.

Las aplicaciones de alta potencia más importantes son la levitación magnética para el transporte a alta velocidad (Fig. 1), los motores de elevada potencia, el almacenamiento de potencia en grandes bobinas de inducción fabricadas con hilos superconductores –los “Superconducting Magnetic Energy Storage Systems” (SMES)–, y la fabricación de imanes extremadamente potentes, utilizados sobre todo en la obtención de imágenes médicas por resonancia magnética nuclear.

Un buen ejemplo a menudo utilizado para mostrar la versatilidad y el margen de aplicación de los superconductores, es que con estos materiales se puede fabricar desde un imán de 10 T (200,000 veces el campo magnético terrestre), hasta un magnetómetro capaz de medir un flujo magnético de 10^{-15} T m² (es decir, un millón de veces inferior al que produciría el campo magnético terrestre en una espira de 1 cm² de sección). En conclusión, estos materiales no sólo permiten hacer las mismas cosas que los materiales tradicionales de una manera más eficaz, sino que abren nuevos campos y posibilidades tanto a la industria como a la ciencia.

2. HISTORIA Y FUNDAMENTOS

2.1 Descubrimiento del estado superconductor. Resistencia cero.

El fenómeno de la superconductividad no fue descubierto hasta principios del siglo XX, momento en el que la tecnología criogénica se desarrolló suficientemente permitiendo llegar a temperaturas de unos pocos grados Kelvin. Heike Kammerlingh Onnes, de la Universidad de Leiden, en Holanda

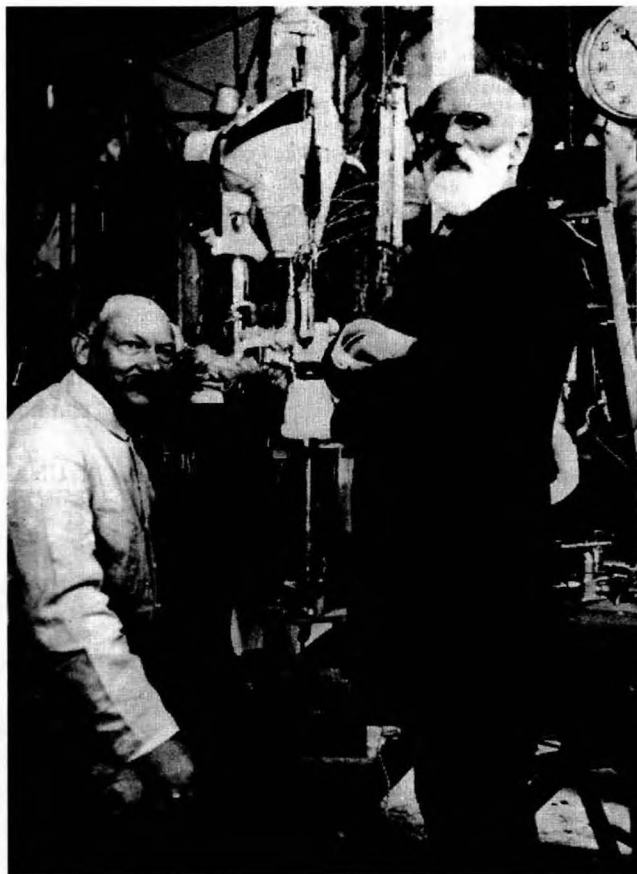


Fig. 2: Kammerlingh Onnes (sentado, a la izquierda junto a Van der Waals). Premio Nobel en 1913 por el descubrimiento de la superconductividad. Fue el precursor de un nuevo estilo de hacer ciencia, reconociendo por primera vez la gran importancia de las infraestructuras y la plantilla técnica. El personal de su laboratorio en la universidad de Leiden (Holanda) estaban en la vanguardia de muchos de los grandes experimentos científicos de la época. Su lema *Door meten tot weten* (“hacia el conocimiento mediante la medida”) refleja la importancia que dio al trabajo experimental combinado con un riguroso programa científico y una base teórica sólida.

(Fig. 2) fue el primero en descubrir la técnica de licuación de este gas y la mantuvo en secreto durante años, lo

que le dio una ventaja que había de resultar decisiva.

La posibilidad de obtener helio líquido, no sólo era interesante para la observación del helio en sí, sino porque permitía hacer experimentos en un entorno estable de unos 4°K de temperatura. Aprovechando este hecho, Kammerlingh Onnes y su equipo se dedicaron a estudiar la resistividad de varios metales en función de la temperatura.

Se realizaron medidas de resistividad con platino y oro a las temperaturas de ebullición del oxígeno (90°K), nitrógeno (77°K) hidrógeno (20°K) y helio (4,2°K). En estos metales se observó un descenso gradual de la resistividad con la temperatura. A temperaturas suficientemente bajas las impurezas en las muestras utilizadas tenían un efecto dominante en la resistividad. Para evitarlo, se empezaron a realizar medidas con mercurio, del que se podían obtener muestras muy puras por destilación sucesiva. Los resultados experimentales presentaron el esperado descenso gradual de la resistividad con la temperatura en las medidas realizadas con oxígeno, nitrógeno e hidrógeno. Sin embargo, los experimentos realizados con helio “fracasaban” sistemáticamente: las resistencias medidas eran nulas (por debajo de la sensibilidad de los instrumentos disponibles), lo cual se atribuía a cortocircuitos en el cableado utilizado en los experimentos. Estos experimentos los realizaba Gilles Holst –un asistente de Onnes– en 1911, ayudado por un estudiante que hacía las veces de maestro de laboratorio. Fue Holst quien, de forma casual (y como

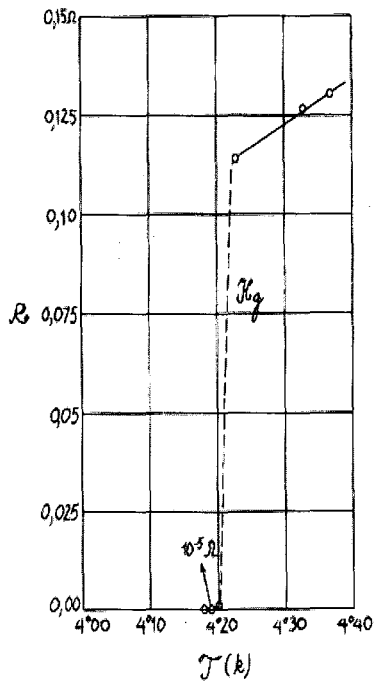


Fig. 3: Diagrama resistencia-temperatura medido por Holst en 1911. La ordenada es la resistencia en ohms y la abscisa la temperatura en Kelvins.

se explica más adelante), encontró la manera de convencer a Onnes de que el efecto medido se debía al material y no a fallos en el montaje experimental: se había descubierto el primer material que presenta un estado superconductor. Este estado en el que la resistencia es nula no se presenta en todos los materiales y, en los que lo hace, aparece a temperaturas inferiores a una *temperatura crítica*, asimilable a una temperatura de fusión o ebullición, en las que también se produce un cambio de estado termodinámico.

La casualidad tuvo mucho que ver con este descubrimiento. Por una parte, el equipo de Onnes tuvo la suerte de escoger un material (mercurio) que, a diferencia del oro y platino, presenta un estado superconductor. Por otra, el material escogido tiene una temperatura crítica de 4,15°K (a la cual la resistencia baja súbitamente a cero), ligeramente inferior a la temperatura de ebullición del helio a presión atmosférica (4,22°K). Si Holst hubiera realizado las medidas a presión at-

mosférica, hubiera medido la resistencia del mercurio en estado normal. Por fortuna, las medidas se realizaban a una presión ligeramente inferior que la atmosférica, para evitar fugas de helio en el sistema criogénico utilizado para refrigerar las muestras. De esta forma el aire penetraba por los puntos en que el sistema no era perfectamente estanco, entraba en contacto con el helio y se congelaba, acabando de sellar las juntas del sistema. Al reducir la presión en el recipiente donde estaba el helio líquido tam-

bién reducía su punto de ebullición por debajo de la temperatura crítica del mercurio. El maestro de laboratorio que asistía a Holst era el encargado de controlar la presión observando el nivel de aceite en un manómetro y ajustando el paso de una válvula que conectaba a una bomba de vacío. Era un trabajo monótono y aburrido, y en una larga sesión de medidas el maestro de laboratorio se durmió, dejando que la presión en el sistema (y con ella, la temperatura de ebullición del helio) aumentara. Al hacerlo, la muestra de mercurio pasó de su estado superconductor a un estado normal, con una resistividad predecible por las medidas realizadas a temperaturas superiores. Holst se percató del hecho y anotó los valores de resistencia en función de la temperatura que se indican en la (Fig. 3) El experimento resultó ser repetible y, por él se otorgó el premio Nobel de física a Onnes en 1913.

2.2. Teoría de dos fluidos.

La resistencia no era el único parámetro que se medía en los materiales superconductores que fueron descubriendo a partir de 1911. Tam-

bién se realizaban medidas calorimétricas de este tipo de materiales. La combinación de medidas eléctricas y calorimétricas sugería la presencia de dos tipos de electrones en los materiales superconductores: unos que podían moverse sin colisionar con la red (responsables de la resistencia nula) y otros que se com-

portaban como los electrones de los metales normales.

En 1934 Gorter y Casimir sugirieron que el comportamiento de los electrones podía ser similar al que puedan tener las moléculas de vapor de agua (u otro líquido) en un sistema cerrado: si la temperatura es suficientemente alta, todas las moléculas están en estado gaseoso; al reducir la

temperatura por debajo de un valor crítico, algunas de ellas se condensan a un estado líquido. La proporción entre moléculas en estado líquido y moléculas en estado gaseoso aumenta al disminuir la temperatura, pero

Las pérdidas en un superconductor son, a frecuencias bajas, mucho menores que las de un metal normal, pero aumentan más rápidamente con la frecuencia

Este estado en el que la resistencia es nula no se presenta en todos los materiales y, en los que lo hace, aparece a temperaturas de fusión inferiores a una temperatura crítica,...

siempre hay una coexistencia de ambas. Según Gorter y Casimir, este mismo efecto debía producirse en el gas de electrones de un material cuando éste se enfría por debajo de la temperatura crítica a la que se produce la transición al estado superconductor: algunos de estos electrones se condensan a un estado

