

# El despertar de la superconductividad

LUIS BRU\*

## INTRODUCCIÓN

**L**A posibilidad de que la corriente eléctrica pueda mantenerse por tiempo casi indefinido a través de un material, sin la presencia de una fuente de energía, de un generador, ha sido hasta hace poco una cuestión que apenas salía del ámbito de algunos laboratorios de física equipados de forma conveniente. Es el fenómeno llamado de la **superconductividad**, que fue descubierto por el físico holandés Kamerlingh Onnes, en 1911.

Para conseguir que un material, sólo un metal hasta época muy reciente, se hiciera superconductor, se precisaba mantenerlo a una temperatura que rozaba la mínima que existe en el universo, la del **cero absoluto**, próxima como se sabe a los 273 grados bajo cero de nuestra escala centígrada. Las temperaturas referidas al cero absoluto se designan con la letra K en honor del físico Lord Kelvin.

Mediante un proceso en cascada de licuación de algunos gases se pueden conseguir temperaturas más bajas cada vez. La técnica la introdujo Caillet en 1877. Linde licuó el aire en 1896 que le sirvió a Dewar para conseguir hacer lo propio con el hidrógeno y, más adelante, a Kamerlingh Onnes para obtener helio en estado líquido a la temperatura de 4.2 K. Kessone consiguió solidificarlo poco después. En 1933, De Haas, desimanando bruscamente una muestra diamagnética, llega a 0.1 K.

Hoy en día se dispone de instalaciones más sencillas cada vez para licuar el helio, pero no dejan de ser costosas. Por otro lado, almacenarlo precisa de recipientes especiales, amén de que su manejo no está exento de peligro. Se comprende entonces que la física de bajas temperaturas, nombre que recibe el estudio de los fenómenos físicos que, como el de la superconductividad, tienen lugar a esas temperaturas muy bajas, quedaba reducida al entorno de laboratorios muy especializados. Entre nosotros existen pocas instalaciones que permiten llevar a cabo algunas investigaciones que precisan de esas temperaturas.

Pero como tantas veces hemos dicho, "**tanto en el amor como en la ciencia, la sorpresa está a la vuelta de la esquina**", y en un período de tiempo muy breve se ha conseguido que

\* Catedrático de la Universidad Complutense. Académico Numerario de la Real Academia de Medicina.

algunos materiales se hagan superconductores a temperaturas que se alejan cada vez más de la del helio líquido. El acceso a la superconductividad está ahí, es una realidad. Si, como vislumbran los más optimistas, se consiguen sustancias que se hagan superconductoras a la temperatura ambiente, nos encontraríamos ante un hecho tan trascendental como supuso el descubrimiento por Faraday del electromagnetismo.

De los tres efectos que acompañan a la corriente eléctrica, el más importante es, sin duda alguna, el de crear un campo magnético a su alrededor. Si esta propiedad se perdiera porque cambiaran "de repente" las leyes que rigen en la naturaleza, habría que modificar de forma total y absoluta nuestro modo de vivir. Aunque parezca una afirmación excesiva, toda nuestra civilización actual descansa sobre unos pocos pilares, siendo el electromagnetismo el que más carga soporta. Pero no se preocupe el lector, esto no sucederá jamás. Piénsese dónde podrían llegar las conquistas del electromagnetismo utilizando corrientes eléctricas sin apenas consumir energía.

Habida cuenta del **variopinto espectro de los lectores de esta Revista, CUENTA Y RAZÓN**, creemos conveniente **introducir, poco a poco, el despertar del fenómeno de la superconductividad**, que en el momento actual fascina a todos los científicos y en particular aún más a los físicos. Quiero pedir perdón de antemano a aquellos lectores conocedores de la cuestión por utilizar, en ocasiones, un tono trivial, y, también, a aquellos otros que ignoran el entresijo del fenómeno si algunas veces empleamos un lenguaje especializado para, sin abandonar la ortodoxia de cuanto se dice, tratar de hacer la lectura lo más asequible posible.

La corriente eléctrica que recorre un conductor consiste en un flujo de cargas eléctricas negativas, de **electrones**, que se desplazan en el sentido del polo negativo al positivo de un generador de energía eléctrica o que cambian periódicamente la dirección de su movimiento, que es ahora de "vaivén" si el generador es de corriente alterna, caso que no vamos a considerar.

De los tres efectos que acompañan a la corriente eléctrica continua, sólo vamos a fijar la atención en dos, el calorífico (efecto Joule) y el más importante, al que ya nos hemos referido, el de cambiar las propiedades del medio que la rodea, creando un campo magnético a su alrededor, que es tanto más elevado cuanto mayor es la intensidad de la corriente eléctrica, que se mide por el número de electrones que atraviesa la sección del conductor en un segundo. Su unidad, el amperio, equivale a un flujo de  $10^{18}$  electrones por segundo.

En la vieja teoría atómica de Bohr, los electrones de la capa más externa de los átomos metálicos, los llamados **electrones de valencia**, se mueven con libertad a través de la red cristalina del metal, formando una especie de gas de

*UN POCO DE  
HISTORIA*

## ***EL FENÓMENO DE LA SUPER CONDUCTIVIDAD***

electrones. Fue el físico alemán P. Drude el que en 1906, utilizando un símil hidráulico, estableció la primera teoría de la conducción eléctrica como consecuencia del movimiento que adquieren los electrones. Ahora bien, el movimiento de estas cargas dista mucho de ser sencillo. En efecto, está presente, de un lado, la repulsión que se ejercen entre sí y de otro, la fuerte atracción que experimentan por parte de los núcleos atómicos, portadores de una carga eléctrica positiva y alrededor de 2.000 veces más pesados que aquéllos, dotados, a su vez, de una oscilación alrededor de una cierta posición de equilibrio, que aumenta con la temperatura. Ambas circunstancias hacen que el movimiento de los electrones sea desordenado por los choques incessantes contra los átomos que forman la red cristalina. El resultado de tal desorden es que el movimiento de los electrones es lento, el material ofrece una cierta resistencia a su avance, caracterizada por una constante típica, llamada **resistividad**, que motiva que el conductor se caliente, lo que supone que la energía que suministra el generador sufra una disipación, que conlleva pérdidas que en los transformadores y en las líneas de conducción supera el diez por ciento.

La resistividad es función de la temperatura del conductor. No es la misma la del filamento de una bombilla apagada que cuando luce con su máximo brillo. La intensidad de la corriente aumenta al descender la temperatura del conductor y, por ende, el campo magnético que crea será mayor. Se ve entonces la posibilidad de conseguir campos magnéticos intensos y de lograr electroimanes de gran potencia.

El estado superconductor lo alcanzan muchos metales. En el mercurio aparece cuando se enfría por debajo de los 4.15 K, y otros metales, como el estaño, aluminio, cinc y cadmio, algunas aleaciones y compuestos intermetálicos, se hacen superconductores a una temperatura característica, llamada **temperatura de transición**, siempre muy próxima al cero absoluto.

La explicación de la superconductividad fue dada en 1957, casi medio siglo después de su descubrimiento por Kamerlingh Onnes, por tres físicos americanos, W. Barden, L. Cooper y J. Schrieffer, que compartieron el premio Nobel de Física de 1972. Es la **teoría BCS**, iniciales de los apellidos de los autores. Ha sido considerada como una de las contribuciones más importantes a la Física Teórica desde la llegada de la Mecánica Cuántica. Incidentalmente, y adelantándonos un poco a lo que diremos después, diremos que F. London consideraba que un superconductor es una "estructura cuántica a escala macroscópica" y que Josephson, descubridor del fenómeno que lleva su nombre, utilizó la teoría BCS para predecir fenómenos microscópicos y construir sus célebres "uniones".

Las propiedades magnéticas de los superconductores son tan sorprendentes como sus propiedades eléctricas. Las

propiedades magnéticas no pueden basarse en la hipótesis de que el estado superconductor está caracterizado por una resistividad eléctrica nula. Cuando un superconductor se dispone en un campo magnético y se enfría por debajo de su temperatura de transición, el flujo magnético originalmente presente es expulsado de él. Un superconductor masivo se comporta en presencia de un campo magnético exterior como si el campo en el interior fuera nulo. Es el importante **efecto Meissner**.

Se sabe que el estado superconductor es un estado ordenado de los electrones de conducción. El orden se encuentra en la formulación de **pares de electrones** que están débilmente asociados. Son los famosos **pares de Cooper**. Los electrones están ordenados a temperaturas por debajo de la de transición y desordenados por encima de ella. Los pares están tan ligados que, la energía que pierde uno de ellos al chocar con un núcleo atómico, la recupera el segundo. Se ha dicho que es como si estuvieran unidos por una especie de resorte invisible.

Un campo magnético de cierta intensidad destruye la superconductividad. El umbral o valor crítico del campo magnético aplicado para que esto suceda, es función de la temperatura. A la temperatura crítica, el campo crítico es cero. En los superconductores de tipo I, llamados también blandos, la imanación crece proporcionalmente con el campo magnético aplicado. Por encima del campo crítico, la muestra se comporta como un conductor normal y la imanación es muy pequeña. Su utilidad en la técnica no es muy importante. Los superconductores de tipo II, llamados también duros, tienen propiedades eléctricas superconductoras hasta un cierto campo, que designaremos por  $H_2$ . Entre el campo crítico inferior y este campo  $H_2$ , se dice que el efecto Meissner es incompleto. Entre ambos campos el material se encuentra en un estado especial, llamado **vórtice**, y posee propiedades eléctricas superconductoras. Por encima de  $H_2$  el material se comporta como un material normal. En una aleación de niobio, aluminio y germanio se ha conseguido un campo  $H_2$  elevado en el punto de ebullición del helio. Con los solenoides comerciales construidos con un superconductor duro se logran campos estacionarios de gran intensidad.

En la teoría se contemplan dos parámetros característicos llamados **profundidad de penetración y longitud de coherencia**, sobre cuyo significado físico no podemos entrar. Pero sí podemos decir, que una diferencia importante en la constitución física de los superconductores de tipo I y II se encuentra en el valor del camino libre medio de los electrones de conducción (recorrido entre dos choques sucesivos) en el estado normal a temperaturas bajas. Si la longitud de coherencia es mayor que la profundidad de penetración, el superconductor es de tipo I, como ocurre con la mayor parte de los metales. Pero si el camino libre medio es corto, la longitud de coherencia pequeña y la profundidad de penetra-

***EL DESPERTAR  
DE LA SUPER  
CONDUCTIVIDAD***

ción grande, entonces el superconductor es del grupo II. Algunas veces se puede cambiar un metal del tipo I al II sin más que añadirle una pequeña cantidad de un elemento que se alee con él. Por ejemplo, una adición de un dos por ciento en peso de indio cambia el plomo del tipo I al II, aunque la temperatura de transición apenas varía.

Para terminar esta parte, que quizás haya resultado árida para algunos lectores, hay que hacer una mención al **efecto túnel**. Si consideramos dos metales separados por un aislador, éste actúa como una barrera que se opone al paso de los electrones de conducción de un metal al otro. Si la barrera es muy delgada, algunos electrones "saltan" esta barrera. Es el efecto túnel conocido desde hace muchos años. Cuando ambos metales son conductores normales, la corriente fluye a través de la "unión", siguiendo la ley de Ohm; es decir, la intensidad de la corriente es proporcional al voltaje aplicado, pero si uno de los metales se hace superconductor, las cosas suceden de manera diferente. El comportamiento de los pares de electrones de un superconductor a otro a través de un aislador conduce al **efecto Josephson**, que se manifiesta de la siguiente manera: a) una corriente eléctrica alterna fluye a través de la unión en ausencia de cualquier campo eléctrico o magnético; b) al aplicar una tensión constante a través de la unión aparecen oscilaciones de radiofrecuencia.

De todo lo expuesto se deduce el interés por encontrar conductores cuya temperatura de transición sea lo **menos** baja posible, es decir, cuanto más alta mejor. Bajo el punto de vista teórico, parece poco probable que una aleación metálica clásica pueda ostentar una temperatura de transición por encima de los 248 grados bajo cero, por lo que la búsqueda se ha llevado a cabo en el sentido de utilizar conductores sintéticos orgánicos o bien las **cerámicas**, compuestos de metales y un elemento no metálico, en particular el oxígeno. Las tierras raras, elementos químicos, que en número de 17 existen en la naturaleza y que recibieron este nombre no por su escasez, sino porque se encontraron en minerales "raros", han salido a la luz.

Para nosotros, los españoles, estos elementos tienen importancia porque D. Blas Cabrera, maestro indudable de todos los físicos españoles, estudió por vez primera sus propiedades magnéticas.

Al final del pasado año, G. Bedner y K. A. Mueller, de los laboratorios IBM de Zurich, pusieron a punto un material que se hacía conductor a los 35 K, constituido por bario, lantano, cobre y oxígeno. En febrero de este año de 1987, combinando elementos químicos como lo podían haber hecho en su tiempo los alquimistas, consiguieron superconductividad a la temperatura del nitrógeno líquido, fácil de obtener, nada peligroso y mucho más barato que el helio. Pero sólo un mes más tarde, en Detroit, se descubre un material que alcanza el estado superconductor a los 33 grados

centígrados bajo cero, temperatura superior a la que "disfrutan" muchos habitantes del norte de Europa. Varios grupos que trabajan en las universidades australianas han producido superconductores a 95 K. El interés que existe en aquel país por el problema queda avalado por el hecho de las elevadas cantidades que, en concepto de subvención oficial, han recibido para que continúen sus investigaciones.

La carrera sigue imparable, las revistas especializadas no dan a basto como para publicar tantas y tantas comunicaciones como las que reciben cada semana. Según rumores, del pasado mes de junio, investigadores japoneses aseguran haber conseguido un material superconductor a la temperatura ambiente. El éxito alcanzado con las cerámicas, muy estudiadas en otros aspectos por sus propiedades aislantes, ha motivado que se estén investigando con auténtica pasión.

Las revistas dedicadas a dar información de acontecimientos científicos, y en este caso particular de la superconductividad también la prensa diaria, se han ocupado de esta cuestión y unas veces, las más, con toda seriedad y otras, las menos, con la licencia propia del periodismo, encaminada a la espectacularidad. Por ello nos vamos a detener poco en este aspecto destacando lo que hemos considerado de más interés para nuestros lectores.

Si se sumerge un anillo de plomo en helio líquido en las proximidades de un potente imán, ocurre que si se aleja el anillo se induce una corriente eléctrica en el mismo, que persistirá durante mucho tiempo, lo que permitirá, a su vez, que aparezca una corriente inducida en un solenoide situado en sus proximidades y que podrá ser utilizada para menesteres apropiados sin ningún aporte de energía.

Un imán situado por encima de un disco superconductor, inducirá corrientes en su superficie. En virtud de las leyes del electromagnetismo, el campo magnético que originan se opone al que crea el imán; es decir, aparece una fuerza repulsiva disco-imán que hará que éste flote indefinidamente, compensando la de gravedad.

Se está consiguiendo disminuir de forma muy apreciable el rozamiento, creando artificialmente una lámina de aire sobre la que "descansa" un artefacto móvil. Es por eso por lo que los "colchones de aire" permiten que ciertas embarcaciones avancen con mayor velocidad. El cruce del canal de la Mancha, por ejemplo, se ha reducido en un tiempo considerable. En los ferrocarriles resultaba muy difícil conseguir esta "flotación" sobre las vías. Pero la superconductividad está diseñando los trenes del futuro. Los raíles se reemplazarán por imanes que permitirán la levitación de los vagones (provistos, asimismo, de imanes) sobre un "colchón magnético". La propulsión será también de tipo magnético, si, por ejemplo, las paredes del tren contienen imanes que, por efecto del movimiento, inducirán una corriente en cables gruesos enterrados debajo de la vía, que proporcionarán la corriente

## **APLICACIONES**

## **COMENTARIOS FINALES**

necesaria para crear una fuerza magnética propulsora. Ya los japoneses construyeron un prototipo con el que alcanzaron velocidades de 400 km/h. pero los imanes tenían que permanecer a la temperatura del helio líquido, por lo que el ensayo nunca salió de su fase experimental. Ahora bien, si el estado superconductor se consigue a temperaturas más asequibles, el citado prototipo podrá convertirse en una realidad "a la vuelta de la esquina".

Con artificios electrónicos superconductores se podrán conseguir tiempos de conmutación inferiores a la mil millonésima de segundo. Su uso en informática permitirá minimizarlos todavía más y conseguir tiempos de respuestas mucho más cortos que los actuales.

Se barrunta la posibilidad de almacenar la energía eléctrica para utilizarla sólo cuando sea necesaria. Las bobinas superconductoras sustituirían a los actuales acumuladores, tan engorrosos que precisan de ventilación y recarga. Quizás ello haría cambiar el diseño de los submarinos convencionales.

La esperanza de alcanzar campos magnéticos de una intensidad muy superior a los actuales, ha hecho acto de presencia en los laboratorios dedicados al estudio de las altas energías. Representa una solución a sus problemas.

Puede suponer un avance muy importante en la física de las partículas que redundará en un mejor conocimiento de la estructura íntima de la materia.

Queremos añadir que los beneficios que la humanidad ha recibido siempre de la física podrán aumentar, en un tiempo no muy lejano, con cuantos progresos se hagan en el logro de materiales superconductores a temperaturas próximas a las ambientales.

La superconductividad resulta de un "estado coherente" de la materia; es decir, de un estado en el cual se establece un orden a escala macroscópica en el movimiento de las partículas, lo que supone que la materia adquiera propiedades nuevas. Estas propiedades están ligadas a la naturaleza ondulatoria de la materia, idea concebida por el recientemente fallecido premio Nobel, Louis de Broglie, y que resultan incomprensibles en el marco de una teoría puramente corpuscular.

La batalla por conseguir materiales que se hagan superconductores a temperaturas alejadas de la del helio líquido no cesa ni de día ni de noche, concentrándose en gran parte a los que lo sean a la temperatura del nitrógeno líquido. Como botón de muestra sirva lo que referimos a continuación. El pasado día 2 de julio se celebró en un hotel californiano una reunión, sólo dos meses después de la que celebró la American Physical Society en Nueva York y que duró ¡catorce horas!

Se pensó primero hacerla muy selectiva, de sólo catorce personas, para intercambiar puntos de vista y especular acerca de los nuevos materiales superconductores, pero

terminó, empleando un término taurino, con "un lleno hasta la bandera". Esta reunión, que pasará a ser famosa, estaba encabezada por los tres autores de la teoría BCS. Numerosas fueron las delegaciones rusa y japonesa, todas muy interesadas en el papel de las cerámicas. Pese a la importancia de que las posibles conclusiones quedaran un poco al margen de las viejas ambiciones de la física, buscar la verdad, al irrumpir en el aspecto tecnológico y, por tanto, en el económico, la camaradería estuvo presente en todo momento. "Somos un grupo de hermanos", dijo alguien del público.

Muchos de los asistentes sintieron la corazonada de que los descubrimientos de los últimos meses les había liberado de la inercia de la Física del Estado Sólido o de la Materia Condensada, habituada a la piadosa tolerancia de que, como en otros campos, los cálculos realizados eran inexactos o carentes de interés. La conclusión general fue, sin embargo, que no existe una teoría capaz de dar cuenta del comportamiento de esos óxidos ternarios. El epígrafe de esta reunión podría ser "BCS ha muerto, larga vida a BCS" y su inmediato objetivo "salvar las apariencias".

La teoría convencional BCS es una prueba con éxito de que en un metal superconductor los electrones están afectados por su mutua interacción con las vibraciones de los iones que forman la red cristalina, cuyo resultado parece paradójico, pues en lugar de repelerse se "aparean". Llegó a decirse, y a los físicos puros nos ha dolido, que el descubrimiento de las cerámicas superconductoras es lo mejor que podría suceder no a la Física del Estado Sólido, sino a la Química del Estado Sólido.

Para terminar, queremos rendir tributo a nuestros colegas españoles que, en condiciones precarias, están consiguiendo muy buenos resultados en sus investigaciones. Las dos universidades madrileñas trabajan con ahínco e ilusión. En la Complutense, que es la que mejor conozco, el profesor Vicent, antiguo alumno nuestro, gran figura en el campo del magnetismo, y el profesor Alario, del Departamento de Química Inorgánica, han conseguido cerámicas que se hacen superconductoras a temperaturas del orden de los 100 K. Parece ser que la inclusión del samario, por un lado, y la pureza de los elementos que utilizan, por otro, pueden ser las claves de los éxitos ya obtenidos y de los muchos que, con toda seguridad, están por llegar.