

Los premios Nobel en superconductividad

*Roberto Escudero**

Este año por quinta ocasión el premio Nobel de Física se ha otorgado a científicos que estudian o han estudiado superconductividad. En esta ocasión a dos rusos y a un inglés: Alexis A. Abrikosov, que actualmente está nacionalizado norteamericano y trabaja en los laboratorios de Argonne de Estados Unidos, a Vitaly L. Ginzburg, del Instituto Lebedev en Moscú, y a Anthony J. Leggett, de la Universidad de Illinois en Urbana. Los dos primeros toda su vida han trabajado en superconductividad, mientras que Leggett en un campo muy afín que es superfluidez en helio 3. No cabe duda que este campo ha sido de una fecundidad extraordinaria y verdaderamente en muchos aspectos ha impactado a la física en general, iniciando por supuesto con la física de la materia condensada. Es desde este punto de vista que no ha habido otro campo de la física que haya reunido tantos científicos tan notables y tantos premios Nobel. Los descubrimientos han sido innumerables y las aportaciones importantísimas. Pero, cabe preguntarnos; ¿por qué es tan importante este campo, por qué lo sigue siendo y en qué consiste? Mucha gente hace sólo unos cuantos años mencionaba que este tópico ya había dado todo de sí, pero como veremos adelante es tan fructífero y todavía en el futuro seguiremos oyendo de él, y seguro, desde mi punto de vista todavía faltan algunos premios Nobel que se otorguen en el futuro. Para adentrarnos en el campo, y claro, desarrollar una visión panorámica, quizá lo que tenemos que hacer es comentar un poco para así darnos una idea de cuáles han sido las contribuciones al conocimiento de la naturaleza y en particular al estudio de lo que en teorías modernas se llama Teoría de Muchos Cuerpos.

Heike Kamerlingh Onnes

H. Kamerlingh Onnes fue el primero en recibir el premio Nobel de física por su descubrimiento de la

superconductividad. En 1910 al haber superado el problema de obtener helio líquido, el último de los gases y también el más difícil de licuar, se propuso investigar qué sucede con el comportamiento electrónico de los sólidos. En particular qué comportamientos nuevos tendrán los metales al ser enfriados a esas temperaturas extremas de alrededor de 4.2 K, o inclusive menores. Lo que encontró fue sorprendente, extraordinario: observó que la resistencia eléctrica de algunos metales se reducía a niveles extraordinariamente pequeños, incapaces de ser medidos con instrumentos de aquella época, y todavía de esta época moderna. Más tarde, ideando experimentos en anillos de esos metales enfriados, encontró que en efecto la resistencia disminuye a valores, muy probablemente, por debajo de 10^{-19} Ohms. Él observó que al inyectar una corriente eléctrica ésta fluía sin necesidad de ser alimentada con una fuente. A este nuevo efecto Kamerlingh Onnes le llamó supraconductividad, porque parecía que un metal se tornaba un conductor perfecto. Motivado por este descubrimiento, él prosiguió con el estudio de muchos elementos de la tabla periódica y para su sorpresa encontró otros metales que se volvían superconductores al ser enfriados. Actualmente sabemos que superconductividad es un fenómeno más común de lo que Kamerlingh Onnes pensó. Al respecto cabe comentar que en particular los buenos conductores como la plata, el oro y el cobre no se volvían superconductores (actualmente sabemos que superconducen sólo a temperaturas extraordinariamente bajas, del orden de 400 a 600 microKelvin). En cambio, a diferencia de los metales nobles, el plomo, el estaño, el indio y otros metales se vuelven superconductores a temperaturas menos bajas. Onnes también descubrió que al aplicarles una corriente eléctrica el estado superconductor se destruía debido al campo magnético generado por la corriente. No fue sino hasta el año de 1933 cuando dos científicos alemanes, Meissner y Ochsenfeld, descubrieron la otra propiedad característica del estado superconductor: el diamagnetismo perfecto. Por tanto, las dos características del estado superconductor son: no presentar resistencia eléctrica al paso de la corriente

* Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México. Apartado Postal 70-360 México, DF, 04510, México.

Este artículo fue solicitado a Roberto Escudero por el director de la revista.



El Comité Nobel anuncia a los galardonados en Física del año 2003. Los tres premiados de izquierda a derecha en la foto son: Alexis A. Abrikosov, Vitaly L. Ginzburg y Anthony J. Leggett.

y ser un diamagneto perfecto. ¿Cuál es el significado de esta última propiedad? Significa que, simplemente, si colocamos un imán o bobina cerca de un superconductor, el campo magnético del imán o las líneas de flujo del campo magnético no podrán penetrar en su interior. A este nuevo fenómeno, descubierto por Meissner y Ochsenfeld se le llamó efecto Meissner. Cosas de la ciencia... yo le hubiera llamado Meissner-Ochsenfeld.

Superconductividad es un fenómeno que generalmente se presenta a muy bajas temperaturas, debido a que los procesos de interacciones elementales que dan lugar al fenómeno son de muy pequeña energía; si las energías de interacción fueran más grandes la superconductividad se obtendría a temperaturas más altas.

No fue sino hasta los primeros años de la década de los cincuenta que la visión y el genio de Landau y Ginzburg crearon la teoría fenomenológica-cuántica, la teoría de Ginzburg y Landau (G-L) como actualmente se le conoce. En ella se explica de una manera simple el comportamiento de un superconductor en presencia de campos magnéticos (por cierto a Vitaly Ginzburg se le ha otorgado una parte del premio Nobel de Física del año 2003). Unos cuantos años después de que la teoría G-L fue acep-

tada, un estudiante de Landau predijo que en algunos tipos de superconductores el efecto Meissner deja de existir cuando el campo magnético rebasa un valor umbral. Este estudiante, Alexis Abrikosov (que también recibe otra parte del premio Nobel de Física de 2003) demostró que en superconductores conocidos ahora como del tipo II, las líneas de flujo magnético penetran paulatinamente en el superconductor. Él encontró que a medida que el campo magnético aplicado se incrementa, cuantos de vórtices magnéticos penetran en el superconductor, formando una red "cristalina" triangular con características del estado normal. En el momento que los vórtices magnéticos han compactado o llenado completamente al material superconductor la resistencia eléctrica adquiere un valor finito distinto de cero y la superconductividad se ha destruido. Fue sin embargo hasta el año de 1957 que John Bardeen, Leon Cooper y Robert Schrieffer encontraron un mecanismo microscópico que da lugar a la superconductividad: el apareamiento de electrones con espines opuestos. A escala microscópica esta nueva teoría explica que para que un superconductor se forme se requiere que los electrones se acoplen y formen parejas. La teoría estándar de la superconductividad, la teoría microscópica de Bardeen, Cooper y Schrieffer



Heike Kamerlingh Onnes.

conformar una teoría que explique el estado superconductor se debió a que en esa época todavía en la física del estado sólido no se manejaban las teorías de muchos cuerpos con el detalle actual y los fenómenos que tienen que ver con sistemas fuertemente correlacionados. Imaginemos que para resolver el problema tuviéramos que resolver 10^{19} ecuaciones diferenciales, sabemos que es imposible. Lo que Bardeen, Cooper y Schrieffer hicieron fue tomar métodos de física nuclear y adaptarlos al estado sólido. Lo anterior resultó tan benéfico y dio tan buenos frutos que muchos conceptos nuevos de la física matemática fueron subsecuentemente desarrollados en la física de sólidos y posteriormente exportados a otras ramas de la física, recientemente se comienzan a usar en la rama más compleja de la física: la biología, así como también en el mundo de las finanzas y de la macroeconomía.

Pero siguiendo con la superconductividad, diremos que dos hechos son dignos de mencionar: cuando un material transita al estado superconductor la entropía del sistema se torna menor que la del estado normal; esto nos indica que el estado superconductor es un estado más ordenado, con simetría restringida, y por consiguiente más estable que el estado normal. También es interesante mencionar que a diferencia de otras transiciones de fase de segundo orden, ésta no toma lugar en el espacio real, sino en el espacio fase. ¿Cuál es el significado de esto? Si uno pudiera mirar con un microscopio de suficiente resolución lo que le ocurre a un material en el estado superconductor, nunca se observaría diferencia alguna con respecto al estado normal; no se producen cambios en la estructura cristalina, ni en la estructura electrónica, los electrones siguen siendo electrones

fer (BCS), y por supuesto premios Nobel por este descubrimiento, explica con detalle esos procesos microscópicos. Cabe hacer énfasis en que para ser desarrollado este modelo se requirieron del orden de 50 años medidos a partir del descubrimiento de Heike Kamerlingh Onnes en 1911. Esta larga búsqueda para

y la red cristalina sigue siendo la misma. Sucede que los pares de electrones se forman a distancias inmensamente grandes comparativamente con la dimensión de los electrones, de tal forma que los dos electrones que forman una pareja se encuentra muy alejados uno del otro, y entre ellos hay un número enorme de electrones, miles o millones de electrones y miles o millones de parejas que distinguen cuál es su pareja. A propósito del nombre de los pares, a éstos se les llama los pares de Cooper, porque fue Leon Cooper (la C de la teoría BCS) que demostró que era posible que los electrones se aparearan, a pesar del mismo signo de su carga eléctrica, al crear-se una inestabilidad en la superficie de Fermi.

En la búsqueda de nuevos materiales superconductores, en la década de los años 50 y 60 se descubrieron los superconductores del tipo II, los que presentan características distintas a los elementos descubiertos por Onnes. En éstos se requiere para destruir al estado superconductor enormes campos magnéticos. Por supuesto una implicación de estos nuevos materiales fueron las aplicaciones, pues al soportar grandes corrientes sin que se destruya el estado superconductor, los vuelve excelentes generadores para producir campos magnéticos sumamente intensos. De hecho, ésta es actualmente una de las mejores utilidades de la superconductividad a nivel de tecnología. Con ellos se pueden construir bobinas que generan campos magnéticos muy intensos. Por ejemplo, los sistemas de tomografía digital computarizada empleados en hospitales cuentan con bobinas superconductoras para generar los campos magnéticos que dan lugar a las imágenes extraordinarias del cerebro u otros órganos. Sin estos campos magnéticos serían imposibles los avances médicos en esta área de la medicina (también el premio Nobel en Medicina 2003 ha sido otorgado a dos médicos por su implementación de las técnicas de resonancia magnética nuclear). Otras aplicaciones de la superconductividad, se encuentran, por supuesto, en instrumentos más sofisticados de laboratorio, y se usan para la detección de campos magnéticos muy pequeños; tan pequeños como para detectar un solo cuanto de flujo magnético.

La historia no termina aquí: en 1986 ocurre el descubrimiento fantástico de las cerámicas superconductoras a base de cobre, oxígeno, alcalinotérreos y lantánidos. Bednorz y Müller descubren que materiales del tipo La-Ba-Cu-O presentan superconductividad a temperaturas jamás alcanzadas, 35 K, inclusive rebasando los límites de las predicciones

teóricas que aseguraban que el límite máximo de superconductividad debería estar a alrededor de los 30 K (otra razón para no confiar mucho en los físicos teóricos). Todavía más extraordinario fue el hecho de que a los pocos meses de este descubrimiento se encontró un nuevo compuesto, también cerámico de cobre y oxígeno, con temperaturas de 40 K, luego de 90 K y un año después de 125 K, y posteriormente de 135 K. Las expectativas de aplicaciones fueron inmensas: imaginemos trenes levitados, cables superconductores, almacenamiento de energía, automóviles que no contaminan, focos que no iluminan (claro porque al no existir resistencia el filamento no se calentaría, aquí seguiríamos usando focos con filamento de tungsteno), etcétera. A J. Georg Bednorz y K. Alexander Müller se les otorgó también el premio Nobel de Física en 1987. Desafortunadamente todo esto ha quedado en la imaginación, hasta la fecha no hay esas grandes aplicaciones. Las expectativas fueron demasiadas y tienen utilidad en aspectos sólo muy sofisticados, pero que no llenaron las expectativas que se tenían en un principio. Quizás a futuro se logre encontrarles aplicaciones más de la vida diaria. Sin embargo, algo que realmente ha generado un gran interés con estos materiales es que una nueva física ha surgido para tratar de explicar el fenómeno. El mecanismo microscópico que da lugar al apareamiento electrónico, aspecto indispensable para la superconductividad, no se ha descubierto en estos materiales y existen tantas teorías (que por supuesto no funcionan) como físicos teóricos dedicados a la superconductividad. Mientras tanto, nuevos mecanismos y experimentos se intentan para probar modelos que expliquen el fenómeno. La efervescencia ha sido extraordinaria y todavía no se llega a consenso del proceso para generar el apareamiento a tan altas temperaturas. Una impresión general que se ha obtenido de todos estos nuevos descubrimientos es que ahora se piensa que no hay límite en temperatura para que exista superconductividad. Casi no se puede dudar, por ahora según opinión de teóricos y experimentales, de que con el tiempo muy probablemente se descubrirán materiales que sean superconductores a temperatura ambiente o inclusive más altas. También cabe indicar que los descubrimientos de materiales cerámicos y otros materiales orgánicos, sistemas con fullerenos, tubulenos de carbono, etcétera, han servido para hacernos recordar la inagotable inventiva de la naturaleza para crear nuevos fenómenos. Ahora también se sabe que un mecanismo único, como el propuesto en la teoría

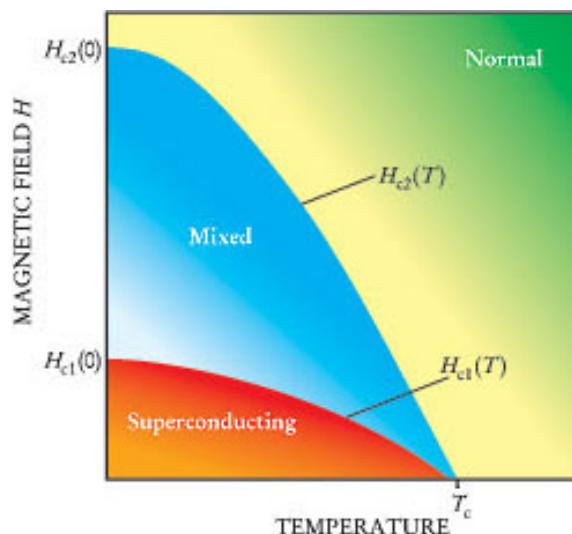


Figura 1. Diagrama de campo magnético *versus* temperatura en un superconductor del tipo II. La parte más inferior indica el estado Meissner, que es la región donde el campo magnético no penetra en el superconductor. La segunda región es el estado mixto en donde se forma la red de vórtices magnéticos predicha por Abrikosov.

BCS no lo es todo. Asimismo también debemos pensar y meditar que muchas aleaciones, compuestos orgánicos e inorgánicos están ahí, esperando a ser descubiertos como recientemente sucedió con el nuevo superconductor, MgB_2 . A nadie se le ocurrió medirlo, fue hasta que en enero de 2001, Akimitsu *et al.*, (*Nature* **410**, 63, 2001) lo midieron en Japón, y para su gran sorpresa encontraron superconductividad a 39 K. Más alta que cualquier otro sistema metálico jamás medido. Este compuesto se había fabricado en forma comercial por años y nunca a nadie se le ocurrió medirlo. No cabe duda que en ciencia también el factor suerte es importante. Yo recuerdo que hace unos años un colega mío tenía ganas de meter un gato en un baño de nitrógeno líquido, él tenía la sospecha de que el cerebro de los gatos debería ser superconductor. Ahora me arrepiento de no haberlo dejado hacer el experimento, tal vez hubiera descubierto que también el ADN se vuelve superconductor (Kasumov, *et al.*, *Science*. **291**, 280 (2001). ▀

Agradecimientos

Se agradece a Conacyt, proyecto G0017 y DGAPA-UNAM, proyecto IN102101.