

El premio Nobel de Física 2003

Dr. Rubén Barrera Pérez

Este año el premio Nobel de Física fue otorgado a tres personalidades de la física teórica: dos físicos rusos, Vitaly L. Ginzburg y Alexei A. Abrikosov, por sus trabajos en superconductividad, y un físico británico-americano, Anthony J. Leggett, por sus trabajos en superfluidez. Vitaly Ginzburg, de 87 años, fue director del grupo teórico del Instituto de Física Lebedev en Moscú, donde continúa trabajando. Alexei Abrikosov, de 75 años, se formó y trabajó como físico en Moscú, pero ahora porta también la ciudadanía americana, ya que desde 1991 trabaja en los Laboratorios Argonne, cerca de Chicago, en los Estados Unidos. Anthony Leggett, de 65 años, nació en Londres y trabajó en la Universidad de Sussex, Inglaterra, donde realizó importantes contribuciones a la teoría de la superfluidez y en 1983 se trasladó a la Universidad de Illinois en Urbana, en los Estados Unidos, en donde continuó trabajando en tan apasionante tema.

Los temas de superconductividad y superfluidez gozan de un particular atractivo dentro de la física de la materia condensada, ya que tratan de fenómenos donde la mecánica cuántica, utilizada usualmente para comprender la física del mundo atómico, se pone de manifiesto a una escala macroscópica, lo que permite observar corrientes eléctricas que pueden circular o líquidos que puede fluir sin pérdida alguna de energía. Es interesante también notar que la fascinación y la comple-

jididad de estos fenómenos es tal que han dado ya lugar a siete premios Nobel:

- 1913:** Heike Kamerlingh Onnes, por el descubrimiento de la superconductividad.
- 1962:** Lev D. Landau, por la explicación de la superfluidez en helio-4.
- 1972:** John Bardeen, Leon Cooper y Robert Schrieffer, por la explicación de la superconductividad en superconductores tipo I (teoría BCS).
- 1978:** Piotr Kapitza, por el descubrimiento de la superfluidez en helio-4.
- 1987:** Georg Bednorz y Alex Müller, por el descubrimiento de superconductores cerámicos de alta temperatura crítica.
- 1996:** David Lee, Douglas Osheroff y Robert Richardson, por el descubrimiento de la superfluidez en helio-3.
- 2003:** Alexei A. Abrikosov y Vitaly L. Ginzburg, por la explicación de la superconductividad en superconductores tipo II, y Anthony J. Leggett por la explicación de la superfluidez en helio-3.

Es indudable que esta colección de premios Nobel alrededor de estos fenómenos les añade un encanto muy especial. Veamos en qué consisten y el porqué de

su fascinación, para en este contexto comentar las contribuciones específicas de los premiados de este año.

La aparición de estos fenómenos sucede sólo a muy bajas temperaturas, cercanas al llamado “cero absoluto”, correspondiente a -273 grados centígrados. La comprensión y observación de estos fenómenos requirió de experimentos realizados a estas temperaturas, lo que significó que los avances en esta área son resultado tanto del ingenio y la profundidad del pensamiento físico, como del ingenio y habilidad tecnológica para lograr temperaturas tan bajas. Por ejemplo, Kamerlingh Onnes fue el primero que logró licuar el helio, para lo cual tuvo que diseñar instrumentos refrigerantes que pudieran mantener temperaturas de unos cuantos grados por arriba del cero absoluto. Dado este paso crucial, realizó mediciones de la conductividad del mercurio a estas temperaturas y descubrió que en este material se manifestaba un nuevo fenómeno: la superconductividad. Su explicación requirió de la actividad continua de las mentes más excelsas por más de cuarenta años.

SUPERCONDUCTIVIDAD

El fenómeno de la superconductividad se refiere al comportamiento de la corriente eléctrica en materiales a muy bajas temperaturas. En los materiales comúnmente llamados conductores, como la mayoría de los metales y sus aleaciones, existen electrones débilmente ligados a los átomos. Al perder un electrón, los átomos quedan como iones positivos. Por tanto, un modelo simple de un metal es el de una red de iones positivos inmersos en un “gas” de electrones, a los que se denominan electrones “libres”, por la facilidad que tienen de desplazarse en el seno del material en respuesta a la aplicación de campos eléctricos externos. Un ejemplo común es el comportamiento de la corriente eléctrica en los alambres de cobre.

Sin embargo, el transporte de los electrones en el metal se ve frenado por su interacción con las vibraciones de la red de iones y con las impurezas, esto es la resistencia eléctrica, y da lugar a que parte de la energía proporcionada por el campo eléctrico aplicado sea disipada en forma de calor; los alambres de cobre se calientan al paso de la corriente eléctrica. Sin embargo, conforme la temperatura disminuye, las vibraciones de

la red de iones también disminuyen, y esto se manifiesta como una disminución en la resistencia eléctrica. Por consiguiente uno esperaría que entre más baja sea la temperatura y más puro sea el metal, su resistencia debería ser también más baja. Esto se ha corroborado en multitud de experimentos. Sin embargo, surge la pregunta: ¿cuál es el límite? ¿Llegaría realmente la resistencia a ser cero en el cero absoluto de temperatura, y en un metal absolutamente puro? Esta pregunta fue lo que motivó a Kamerlingh Onnes a medir la resistencia del mercurio cuando logró mantener sus muestras por debajo de la temperatura de licuefacción del helio. Sin embargo la naturaleza resultó ser más evasiva y sorprendente cuando constató que no era necesario llegar al cero absoluto, sino que a unos cuantos grados por arriba de éste la resistencia de algunos metales se hacía estrictamente cero. A este sorpresivo fenómeno se le llamó superconductividad.

A la temperatura a la que un material se vuelve superconductor se le llama su temperatura crítica. Este descubrimiento echó a volar la imaginación de un sector de la comunidad de físicos de la materia condensada que exploraban la posibilidad de encontrar materiales superconductores que no necesitaran de refrigeración, o al menos no de una refrigeración tan extrema, y que

Los avances en esta área
son resultado tanto del ingenio
y la profundidad
del pensamiento físico,
como del ingenio
y habilidad tecnológica
para lograr temperaturas
tan bajas

pudieran ser utilizados en aplicaciones cotidianas. El sueño sería encontrar un material superconductor con una temperatura crítica por arriba de la temperatura ambiente, ya que esto haría posible transportar electricidad sin gasto alguno por disipación y sin las limitaciones generadas por la producción de calor. Así, hubo gente que dedicó su vida a buscar empíricamente metales y probar todo tipo de aleaciones con el fin de encontrar materiales con temperaturas críticas cada vez más altas. También hubo quien dedicó su vida a tratar de encontrar una explicación del fenómeno que pudiera servir de guía a tan desesperante búsqueda. Los resultados fueron exiguos, dando como resultado la preparación de aleaciones con temperaturas críticas de apenas una veintena de grados por arriba del cero absoluto.

Fue hasta la década de los cincuenta que en el departamento de física de la Universidad de Illinois, se construyó la primera explicación rigurosa del fenómeno de la superconductividad. Ésta se basó en una idea de Leon Cooper, quien proponía que, además de la

Fue hasta la década
de los cincuenta
que en el departamento de física
de la Universidad de Illinois,
se construyó la primera explicación
rigurosa del fenómeno
de la superconductividad

fuerza eléctrica repulsiva existente entre los electrones, podía aparecer entre ellos, a muy bajas temperaturas, una fuerza atractiva mediada por su interacción con la red de iones positivos. Aunque los cálculos mostraban que, de existir esa fuerza atractiva, debería ser muy débil, el resultado era alentador, ya que en un sistema eléctricamente neutro hacía posible que los electrones se “aparearan” modificando drásticamente su dinámica en presencia de campos eléctricos. A estos “pares” de electrones se les conoce ahora como los “pares de Cooper”. El trabajo de John Bardeen y de Bob Schrieffer, entonces estudiante de doctorado en la Universidad de Illinois, consistió en insertar esta idea dentro del formalismo estricto de la mecánica cuántica, haciendo ver, de manera rigurosa, que si los electrones se “aparean” como resultado de una fuerza atractiva, su comportamiento dinámico cambia drásticamente y se comportan, en un cierto sentido, como “bosones”, término que se asigna a partículas cuyo comportamiento colectivo es diametralmente opuesto al comportamiento colectivo de los electrones (a las partículas que tienen el mismo comportamiento colectivo que los electrones se les llama, genéricamente: “fermiones”). Los bosones tienen la propiedad de poderse “condensar” a bajas temperaturas, es decir, llegar a un estado fuertemente correlacionado en el que cada partícula pierde su independencia dinámica y el comportamiento dinámico del colectivo se describe como el comportamiento de un solo estado correlacionado, denominado “función de onda macroscópica”.

El concepto de función de onda es un concepto total en mecánica cuántica, ya que reemplaza el concepto clásico de trayectoria, sustituyéndolo por información relacionada únicamente con la distribución espacial de la probabilidad de encontrar a las partículas. Lo que en el *argot* técnico se denomina “nubes de probabilidad”. Uno de los problemas más complejos y difíciles en mecánica cuántica es la construcción de la función de onda de un sistema de muchas partículas.

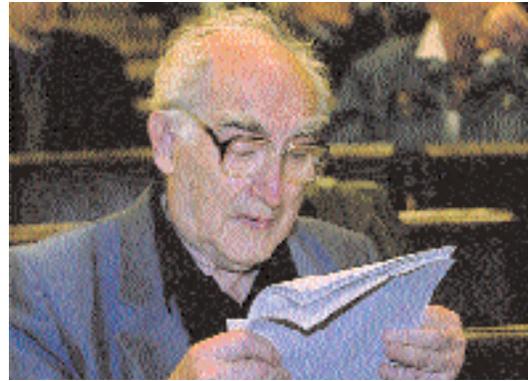
La diferencia entre fermiones y bosones reside, precisamente, en las propiedades de simetría de estas funciones de onda, llamadas “de muchos cuerpos”, ante el intercambio de partículas. Una de las técnicas más populares para la construcción de la función de onda de un sistema de muchas partículas es construirla como

suma de productos de las funciones de onda de las partículas independientes; y en este contexto, mientras en el caso de los fermiones no es posible tener productos que contengan a dos o más partículas con la misma función de onda, en el caso de bosones esto sí se permite. Y el estado condensado de bosones, llamado técnicamente el condensado de Bose-Einstein, corresponde a tener un número muy grande y macroscópicamente significativo de partículas en el estado de energía más baja. Esto sucede sólo a muy bajas temperaturas y se espera que en el cero absoluto todas las partículas se encuentren en el estado condensado.

El trabajo de Bardeen, Cooper y Schrieffer, por el cual recibieron el Nobel de física en 1972, consistió en formular de manera rigurosa las propiedades “bosónicas” de los pares de Cooper con las restricciones impuestas a una función de onda correspondiente a fermiones. Dado este paso crucial, fue posible entender las misteriosas propiedades del estado superconductor. A esta teoría se le conoce ahora como la “teoría BCS”, en honor a Bardeen-Cooper-Schrieffer.

Mientras todo esto sucedía en Urbana, Illinois, del otro lado del Atlántico, en la suntuosa ciudad de Moscú, el reconocido profesor Lev Landau y el entonces joven y brillante físico Vitaly Ginzburg, miembros eminentes de la floreciente escuela soviética de física teórica, elaboraban una teoría alternativa del estado superconductor. A su teoría se le conoce ahora como la teoría de Ginzburg-Landau. Esta teoría fue utilizada posteriormente por Alexei Abrikosov para explicar las propiedades magnéticas de los materiales superconductores tipo II. Para entender la profundidad e importancia de la contribución del profesor Abrikosov, nos tendremos un poco para recordar las propiedades magnéticas de los materiales superconductores.

Después del descubrimiento de la superconductividad se creyó por mucho tiempo que los materiales superconductores, al pasar por debajo de su temperatura crítica, deberían “guardar”, sin cambio alguno, el campo magnético que se encontraba en su seno cuando estaban en el estado normal (no-superconductor). Sin embargo, en 1933 la sorpresa fue tener finalmente evidencia de que los superconductores expelían el campo magnético de su interior. Cuando se colocaba un material superconductor en presencia de un campo magnético, se



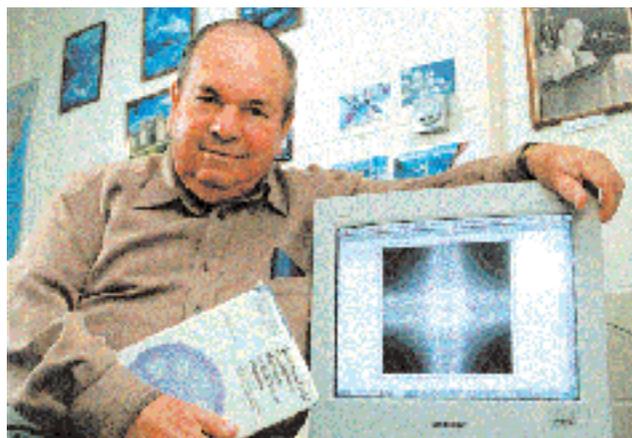
Vitaly Ginzburg

La teoría de Ginzburg-Landau fue utilizada posteriormente por Alexei Abrikosov para explicar las propiedades magnéticas de los materiales superconductores tipo II

inducían en éste corrientes eléctricas superficiales con la propiedad de producir un campo magnético tal que cancelaba exactamente al campo magnético externo, dejando así al superconductor con campo magnético cero en su interior. A este fenómeno de repulsión del campo magnético por el superconductor se le conoce ahora como “efecto Meissner”. Por otro lado, cuando el campo magnético aplicado rebasaba un cierto valor crítico, su presencia destruía el estado superconductor. A materiales con esta propiedad se les denominó superconductores tipo I.

Dado que una propiedad de las corrientes eléctricas es precisamente producir campos magnéticos, este fenómeno restringía la magnitud de las corrientes eléctricas capaces de ser transportadas por alambres superconductores, ya que corrientes demasiado altas podían producir campos magnéticos con magnitudes que destruyeran el estado superconductor. Al valor máximo de la densidad de corriente capaz de ser transportada en el estado superconductor se le denomina densidad de corriente crítica.

Una de las aplicaciones actuales más comunes de los alambres superconductores es la producción de campos magnéticos altos, ya que se pueden construir bobinas superconductoras con una alta densidad de co-



Alexei Abrikosov

rriente sin los problemas asociados a la disipación de calor. El precio que se paga es tener que mantenerlas a temperatura de helio líquido. Pero la existencia de la densidad de corriente crítica limita de manera tajante los valores máximos posibles del campo magnético producido por corrientes superconductoras. De no existir la densidad de corriente crítica, el valor máximo del campo magnético no tendría límite. La naturaleza siempre se cuida de no poder alcanzar situaciones extremas (o absurdas).

Sin embargo, posteriormente se descubrieron otro tipo de materiales superconductores, a los que se llamaron de tipo II, en los que había una coexistencia del fenómeno superconductor con la presencia del campo magnético. Este tipo de materiales se caracterizaron por la presencia de dos campos magnéticos críticos. El primero caracteriza el valor del campo magnético al cual el campo comienza a penetrar al material sin destruir el estado superconductor, y el segundo es el valor al cual finalmente desaparece el estado superconductor. Abrikosov, trabajando en el Instituto Kapitza para Problemas Físicos en Moscú, utilizó la teoría de Ginzburg-Landau para concluir que el campo magnético se iba introduciendo en el material en regiones aisladas de forma tubular, con un flujo de campo magnético que estaba cuantizado, es decir que tomaba valores discretos en unidades de “cuantos” de flujo. Estos “tubos” de campo magnético se acomodaban ordenadamente en el seno del material. Dicen que cuando Abrikosov le presentó los resultados de su teoría al profesor Landau, a éste no le pareció muy convincente, lo cual desanimó profundamente el espíritu del joven Abrikosov e hizo que su teoría permaneciera por algunos años en el cajón de su escritorio. Cuando finalmente salió a luz, fue aceptada amplia y entusiastamente por la comunidad de físicos, abriendo así el estudio riguroso y la comprensión de los superconductores tipo II, sirviendo también como guía para la búsqueda de aplicaciones de este tipo de materiales. Después del colapso de la Unión Soviética, Alexei Abrikosov se trasladó en 1991 a los Estados Unidos para incorporarse a los Laboratorios Argonne.

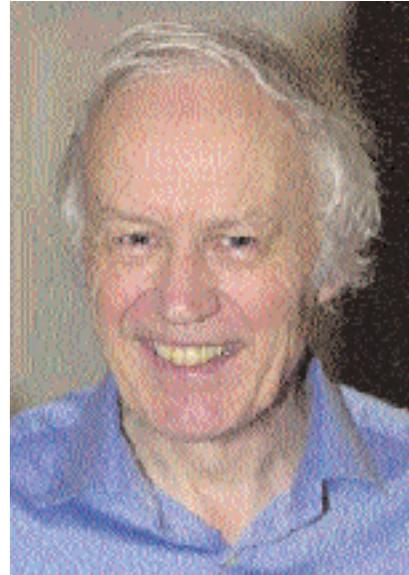
Sin embargo, los misterios de la superconductividad no han terminado, y la solución de otros enigmas seguramente dará lugar a otra carrera por un premio Nobel.

SUPERFLUIDEZ

Otro fenómeno similar a la superconductividad es el de la superfluidez. En este caso, cuando se enfría al helio líquido a una temperatura por debajo de los 2.17 grados kelvin, este líquido pasa al estado superfluido, en el que puede fluir sin resistencia alguna. Se puede observar, por ejemplo, cómo se puede salir del contenedor, “trepando” por sus paredes. Este fenómeno, aunque en esencia es parecido al de la superconductividad, posee su propia personalidad. Primeramente, los átomos de helio son bosones y no fermiones, como los electrones; por ello, en su comportamiento colectivo cuántico se puede esperar, con el descenso de la temperatura, el paso a un estado de condensado Bose-Einstein. El fenómeno fue descubierto en 1938 por Piotr Kapitza (Premio Nobel 1978), uno de los físicos experimentales más reconocidos y apreciados de la Rusia soviética, y simultáneamente por Allen y Misener, en Inglaterra. Este fenómeno fue explicado en términos de la dinámica de un modelo de “dos fluidos” introducido por el propio Landau (premio Nobel 1962) utilizando la teoría del parámetro de orden, a la que ya hemos hecho referencia, y en donde aparece por primera vez el concepto de cuasi-partícula para referirse a las excitaciones térmicas del estado base o estado de más baja energía.

Por otro lado, el helio tiene dos isótopos: el helio-4 y el helio-3. El más abundante, y por mucho, es el helio 4 que se encuentra naturalmente a una razón de 10 millones de átomos de helio-4 por cada átomo de helio-3. El helio-4 tiene en el núcleo dos protones y dos neutrones, y dos electrones “orbitando” a su alrededor; es además un bosón. El helio licuado por Kamerlingh Onnes y el fenómeno de superfluidez encontrado por Kapitza se refieren naturalmente al helio-4. Por otro lado, el átomo de helio-3 tiene los mismos dos electrones y dos protones, pero en su núcleo tiene un solo neutrón y es, por el contrario, un fermión.

Significó un gran esfuerzo separar los átomos de helio-3 de los de helio-4 y poder comenzar a obtener pequeñas cantidades de helio-3 líquido. También, a nivel teórico, se hicieron avances en el estudio de las propiedades de las mezclas de helio-3 y helio 4 en solución. Por ejemplo, en el mismo legendario departamento de física de la Universidad de Illinois, Gordon Baym y



Anthony J. Leggett

En este caso, cuando se enfría al helio líquido a una temperatura por debajo de los 2.17 grados kelvin, este líquido pasa al estado superfluido, en el que puede fluir sin resistencia alguna

David Pines realizaron estudios seminales sobre las propiedades termodinámicas de estas soluciones, dando lugar al diseño de un nuevo tipo de refrigeradores que utilizaban soluciones enriquecidas de helio 3 en helio 4 y aprovechaban el calor latente de la solución. El primero de estos refrigeradores de dilución fue construido en Finlandia, mostrando la factibilidad de las predicciones teóricas y estimulando la apertura a nuevas ideas para lograr bajar la temperatura. No es difícil adivinar el reto que ha representado para la comunidad de físicos y tecnólogos el logro de temperaturas cada vez más bajas. No estaríamos lejanos a la verdad si comparamos esta pasión por lo frío con la pasión por la conquista del Everest o por la generada por la imposición de un nuevo récord en la carrera de 100 metros planos. El otro reto era el poder separar una cantidad suficientemente grande de helio-3 y poder realizar entonces experimentos a temperaturas muy, muy bajas. La pregunta que flotaba en el ambiente era si el helio-3, un fermión como los electrones, era capaz de pasar a un estado de superfluidez, análogo al de la superconductividad de los sistemas de electrones.

Indudablemente la llegada de Leggett a Urbana hizo renacer el interés por la superfluidez en un departamento de física con una amplia tradición en la mecánica cuántica de muchos cuerpos

No fue sino hasta la década de los setenta cuando David Lee, Douglas Osheroff y Robert Richardson reportaron el descubrimiento de la superfluidez en helio-3. Hay que hacer notar que en este caso la temperatura crítica de transición al estado superfluido es de algunos cuantos milgrados por encima del cero absoluto. En esa misma década, Tony Leggett, por entonces profesor en la Universidad de Sussex, en Inglaterra, comenzó a realizar avances significativos en la explicación de tan singular fenómeno. Aunque la diferencia entre un electrón y un átomo de helio-3 es enorme, las ideas de apareamiento y la formación de pares de átomos semejantes a los pares de Cooper, con un comportamiento colectivo parecido al de los bosones, fueron las ideas iniciales que permearon el desarrollo de la explicación teórica de la superfluidez del helio-3, formulada por Leggett.

En 1983 Tony Leggett deja Inglaterra y se traslada al departamento de física de la Universidad de Illinois. A comienzos de los setenta, el interés por la superfluidez comenzaba a decaer en Urbana, y el grupo teórico comenzó a interesarse en astrofísica, en estrellas de neutrones y en las observaciones entonces recientes de los pulsares. Por cierto, yo fui el último estudiante de doctorado en Urbana que realizó una tesis sobre superfluidez, durante el viraje de intereses hacia la astrofísica. Indudablemente la llegada de Leggett a Urbana hizo renacer el interés por la superfluidez en un departamento de física con una amplia tradición en la mecánica cuántica de muchos cuerpos. Las propiedades del helio-3 superfluido resultaron ser mucho más ricas que las del estado superconductor, encontrándose varias fases con estados anisotrópicos; es decir, con estados que manifestaban propiedades distintas dependiendo de la dirección y que no podemos describir aquí en detalle. Tony Leggett, además de poseer una mente brillante, es un físico con muchos y muy variados intereses. Por ejemplo, cuando todavía vivía en Inglaterra dedicó varios años de su vida a tratar problemas relacionados con la enseñanza de la física.

En mi opinión muy personal el premio es muy merecido, aunque les llega tardíamente, ya que el trabajo premiado fue realizado y apreciado desde hace ya varias décadas. Sin embargo, como dice el dicho mexicano: “más vale tarde que nunca”.

