

Salvador Galindo Uribarri, Jaime Klapp Escribano
El burro cuántico de Sancho Panza (Los Nobel en Física 2003)
Ciencia Ergo Sum, vol. 11, núm. 3, noviembre, 2004, pp. 296-302,
Universidad Autónoma del Estado de México
México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10411309>



Ciencia Ergo Sum,
ISSN (Versión impresa): 1405-0269
ciencia.ergosum@yahoo.com.mx
Universidad Autónoma del Estado de México
México



Recepción: 15 de enero de 2004

Aceptación: 1 de junio de 2004

* Centro Nuclear "Dr. Nabor Carrillo Flores". AP. 18-1027. Col. Escandón, México, D.F. C. P. 11801.

Teléfono: (0155) 53 29 72 00

Correo electrónico: sgu@nuclear.inin.mx y klapp@nuclear.inin.mx

El burro cuántico de Sancho Panza (Los Nobel en Física 2003)

Salvador Galindo Uribarri* y Jaime Klapp Escribano*

Resumen. EL premio Nobel en Física 2003 fue compartido por Leggett, Abrikosov y Ginzburg, por sus contribuciones al entendimiento de fenómenos a bajas temperaturas. Este ensayo explica, a un nivel elemental, sus teorías. Además este trabajo presenta una serie de eventos –relacionados con las teorías mencionadas– que forman una historia de tres animales cuánticos: un gato, un calamar y un burro.

Palabras clave: historia de la ciencia PACS 01.65.+g.

The Quantum Donkey of Sancho Panza. (The 2003 Nobel Prizes in Physics)

Abstract. The 2003 Nobel prize in Physics was shared by Leggett, Abrikosov and Ginzburg, for their contributions to the understanding of low temperature phenomena. This essay explains, at an elementary level, their theories. In addition this work presents a series of events –related to the mentioned theories– that make up a story of three quantum animals: a cat, a squid and a donkey.

Key words: history of science PACS 01.65.+g.

1. Las dos ceremonias

El 10 de diciembre del 2003, Anthony Leggett, Alexei Abrikosov y Vitaly Ginzburg recibieron de manos del rey de Suecia sendas medallas de oro grabadas con la efigie de Alfred Nobel. El premio fue otorgado por la exposición de sus notables teorías, desarrolladas hace varias décadas, que explican fenómenos físicos ocurridos a bajas temperaturas. Ese mismo año se inauguró en la ciudad de México el edificio Torre Mayor, una formidable estructura. El inmueble es el más alto de América Latina. Los dos sucesos aparentemente no tienen conexión alguna.

2. La torre y la escala

La Torre Mayor llega a 225 metros de altura sobre el nivel del suelo, que equivalen a sus 52 pisos. Además, tiene 16 metros subterráneos que pertenecen a sus cuatro sótanos de estacionamientos, que se encuentran por debajo del nivel del Paseo de La Reforma, avenida donde se localiza el edificio.

A la presión atmosférica normal, el agua hierve a 100 °C y se congela a 0 °C. Por otro lado, el límite inferior que la temperatura puede alcanzar es de –273.15 °C. Este límite está impuesto por la propia naturaleza, y no es posible descender más. En consecuencia,

hace tiempo que se decidió adoptar, en lugar de la escala centígrada de temperaturas, una escala más apropiada y racional (la escala Kelvin), donde se parte del límite inferior ($-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$) asignándosele el cero de la escala Kelvin ($0\text{ }^{\circ}\text{K}$) y conservando la graduación centígrada. De esta manera, el agua se congela a $+273.15\text{ }^{\circ}\text{K}$ y hierve cien grados kelvin más arriba, esto es, a $+373.15\text{ }^{\circ}\text{K}$.

Hagamos ahora una asociación de ideas. Relacionemos el techo del piso 55 de la Torre Mayor con la temperatura a la que hierve el agua ($373.15\text{ }^{\circ}\text{K}$) y a la vez asociemos el suelo del nivel más bajo de los estacionamientos subterráneos de la misma torre con el cero absoluto ($0\text{ }^{\circ}\text{K}$). Entonces, la temperatura a la que se congela el agua corresponderá al piso 39 (ver figura 1). En ese mismo orden de ideas, nosotros, seres humanos, vivimos entre el piso 36 y el 47. Incidentalmente, la temperatura más alta que se ha generado en la Tierra (y que ocurre durante una explosión nuclear) es de unos $2 \times 10^8\text{ }^{\circ}\text{K}$. En nuestra 'escala', ese punto estaría a unos 130,000 km sobre la Torre Mayor.

El universo desde que se generó en el *Big Bang*, ha ido enfriándose paulatinamente hasta llegar a la temperatura actual, aproximadamente $3\text{ }^{\circ}\text{K}$, que es la de la radiación cósmica de fondo. Esta radiación es observada por los astrónomos y corresponde en la 'escala' de la Torre Mayor a unos 2 m sobre el pavimento de su estacionamiento subterráneo más bajo. Sin embargo, el ser humano en sus laboratorios ha logrado descender la temperatura más allá que estos $3\text{ }^{\circ}\text{K}$, unas cuantas mil millonésimas de grados Kelvin. En la 'escala' Torre Mayor, equivale a la cienmillonésima parte del diámetro de un cabello humano colocado sobre el piso del sótano inferior.

Lo asombroso y sobre lo que debemos reflexionar es que de acuerdo con las teorías cosmológicas en boga, el universo como tal nunca ha estado más frío que los $3\text{ }^{\circ}\text{K}$ de la radiación cósmica de fondo. Si esto es cierto, cada ocasión que un laboratorio enfría una muestra por debajo de los $3\text{ }^{\circ}\text{K}$ está sometiendo la materia a una temperatura que jamás ha existido en el cosmos. ¿Significa esto que no hay nada nuevo bajo el sol? Tal vez sí, tal vez *el ser humano ha llegado a donde la naturaleza no ha arribado*. Aunque existe la posibilidad de que civilizaciones extraterrestres tengan refrigeradores mejores que los humanos.

3. ¿Qué se espera encontrar a bajas temperaturas?

Cuando calentamos agua a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($373.15\text{ }^{\circ}\text{K}$) la hacemos hervir, y cuando bajamos su temperatura a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($273.15\text{ }^{\circ}\text{K}$) la congelamos. Estos tres cambios de fase, sólido a líquido a gas, son el resultado de una competencia entre el ordenamiento y un desordenamiento en las moléculas de agua.

Hablando técnicamente, la competencia es entre E , la energía asociada al estado del sistema, y S , la entropía. Esta última es una medida del desorden del sistema. Cuantitativamente hablando:

$$F = E - TS,$$

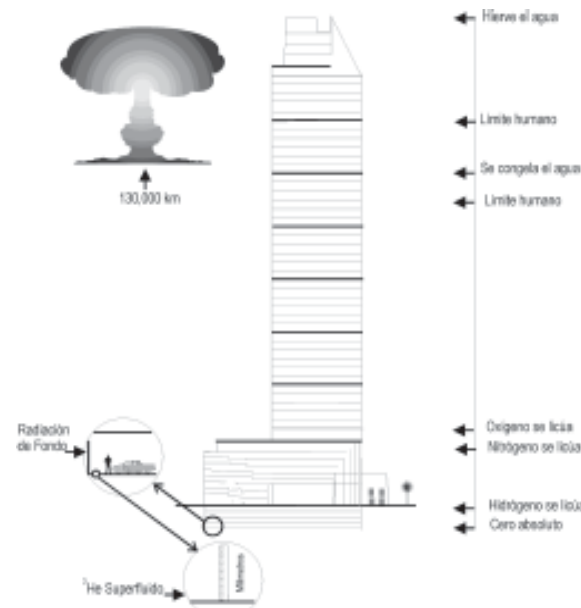


Figura 1. La Torre Mayor y la temperatura: comparación de escalas.

donde F es una cantidad que la naturaleza se encarga de minimizar y se conoce como la energía libre del sistema. Cabe aclarar que tanto E como S no dependen de la temperatura T ; por lo tanto, si enfriamos el sistema, el término TS se volverá diminuto y el sistema escogerá un estado cuya energía asociada, E , sea pequeña. Si por el contrario aumentamos la temperatura, el término TS crece y en consecuencia el sistema adoptará un estado de mayor energía E .

Tomemos de nuevo el caso del agua como ejemplo. Si bajamos su temperatura, las moléculas de agua en el hielo se acomodan en un arreglo cristalino, de manera que se reduce E , la energía del sistema, y al mismo tiempo el desorden S del sistema también disminuye. Por otro lado, si hacemos hervir el agua, las moléculas de vapor se mueven rápidamente entre sí, es decir, el desorden S del sistema se incrementa al mismo tiempo que la energía E de movimiento también se incrementa. En ambos casos la naturaleza se encarga de que la diferencia $E - TS$ tenga un valor mínimo.

El vapor, el hielo y el agua son tres fases de una misma sustancia, con propiedades distintas que todos conocemos. Así, mientras más baja sea la temperatura, los sistemas presentarán fases más ordenadas. Un descenso en la temperatura por debajo de los $3\text{ }^{\circ}\text{K}$ implica posibles descubrimientos de nuevas fases de la materia nunca antes formadas en la naturaleza. ¿Qué habrá por debajo de los $3\text{ }^{\circ}\text{K}$?, es decir, ¿qué habrá por debajo de los 2 m del cuarto sótano de la Torre Mayor? ¡Después de todo, la temperatura del universo está por encima de ese nivel!

4. El largo descenso a los estacionamientos

La historia del Premio Nobel 2003 en Física comienza en la segunda mitad del siglo XVIII, cuando en aquel entonces la pregunta no era

¿qué tanto podemos disminuir la temperatura de un objeto?, sino ¿podemos volver líquidos a los gases?, es decir ¿podemos licuar gases?

Con este propósito, algunos investigadores utilizaron presión sobre los gases, otros emplearon refrigeración y otros más usaron ambas técnicas para lograr licuefacciones. En 1798 el amoníaco logró condensarse y así siguieron otros gases. El hecho es que para el siglo XIX, en 1877, los científicos ya habían logrado licuar el oxígeno a 90.1 °K; en 1883, licuar el nitrógeno a 77.3 °K, y el hidrógeno, en 1898, a 20.4 °K (ver la figura 1). En las postrimerías del XIX sólo faltaba licuar al helio.

El helio (He) es el más ligero de los gases nobles. Se llaman así porque no reaccionan químicamente consigo mismos ni con algún otro elemento en la naturaleza. El helio se encuentra naturalmente en dos formas, esto es, dos isótopos. El más abundante se representa como ${}^4\text{He}$, donde el número 4 significa la cantidad de nucleones que componen su núcleo atómico (dos protones y dos neutrones). En contraste, el núcleo del isótopo menos abundante, ${}^3\text{He}$, posee un solo neutrón, de manera que es más ligero. Este último aparece en la naturaleza en una proporción de uno por cada 10 millones de átomos del ${}^4\text{He}$. A temperaturas normales, los dos tipos de helio se comportan de igual manera y sólo difieren en sus pesos atómicos. Si el gas helio es enfriado a unos cuantos grados sobre el cero absoluto, se condensa y pasa a una fase líquida.

El 10 de julio de 1908, Heike Kamerlingh Onnes, en la Universidad de Leiden, Holanda, logró la licuefacción del helio a 4.22 °K. Cabe notar que esta temperatura está tan sólo a un grado y fracción por encima de la temperatura de la radiación cósmica, es decir, muy cercana al umbral de lo experimentado por el universo mismo.

Corría el año de 1911 y Kamerlingh estaba estudiando la conductividad eléctrica del mercurio cuando notó que al ser enfriado a unos cuantos grados por encima del cero absoluto, su resistencia al paso de corriente eléctrica desaparecía. Nombró a este nuevo fenómeno superconductividad. A principios del siglo XX, el mundo comenzaba a depender de la electricidad y por lo tanto el descubrimiento de Kamerlingh era muy importante. El reconocimiento no tardó en llegar, por este trabajo recibió el Premio Nobel de Física en 1913. Sin embargo, en esa época no había explicación alguna para esa notable rareza.

La habilidad para alcanzar bajas temperaturas llevó al descubrimiento de propiedades muy extrañas de la materia, totalmente distintas de las propiedades que muestra la materia a temperatura ambiente. Además de la superconductividad, observada como ya mencionamos por Kamerlingh, otra propiedad, la superfluidez, fue descubierta 30 años más tarde, en 1937, por Peter Kapitza, del Instituto de Problemas Físicos en Moscú.

Mientras que la superconductividad tiene que ver con la falta de resistencia al paso de corriente eléctrica que presentan algunos materiales a bajas temperaturas, la superfluidez está relacionada con la circulación del helio líquido sin fricción, también a bajas temperaturas. Los aspectos básicos de ambos fenómenos fueron

aclarados medio siglo después a través de una teoría conocida como Teoría BCS. Una explicación más amplia tuvo que esperar a las contribuciones de los laureados con el Nobel 2003.

5. La teoría BCS

La superconductividad es un fenómeno peculiar que ocurre en muchos materiales, entre ellos algunos metales. A temperatura ambiente, los metales ofrecen resistencia al paso de corriente eléctrica. La magnitud de esta resistencia depende de la temperatura del metal: si es enfriado, su resistencia disminuye. Esto se debe a que en un metal los electrones causantes de la conducción de corriente eléctrica, llamados electrones de conducción, se mueven individualmente al azar de manera similar a los átomos en un gas. Cuando los electrones de conducción se mueven como parte de la corriente eléctrica, van chocando con los átomos que forman el material. Estas obstrucciones ocasionan que los electrones se dispersen y causan la resistencia del material al paso de corriente. A su vez, los átomos que forman el material oscilan alrededor de sus posiciones de equilibrio. Cuando desciende la temperatura del material, estas oscilaciones van haciéndose más pequeñas y los choques entre los electrones de conducción y los átomos que forman el material se vuelven menos frecuentes, lo que reduce la resistencia del metal. Sin embargo, en los metales superconductores hay una temperatura llamada de transición, por debajo de la cual la resistencia eléctrica del material desaparece completamente.

Cuando desciende la temperatura en los metales superconductores, el movimiento de los electrones de conducción se acopla a las oscilaciones de los átomos en la red cristalina que forman el material metálico. Por 'acoplar' queremos decir que la interacción entre los electrones y las oscilaciones de la red lleva a la formación de pares de electrones cuyos movimientos se correlacionan; es decir, el movimiento de un electrón depende de cómo se mueve el otro electrón. Este movimiento acoplado entre pares de electrones y oscilaciones de la red recibe el nombre de pares de Cooper en honor al científico que los propuso.

Partiendo de la idea de este acoplamiento básico entre electrones, en 1957, tres físicos, John Bardeen, el mismo Leon Cooper y Robert Schrieffer, mostraron que a su vez los pares de Cooper se acoplan entre ellos mismos y esto lleva a la formación de un estado cuántico, coherente y gigantesco, donde participa la mayor parte de los electrones de conducción. La teoría recibió el nombre de Teoría BCS por las iniciales de los apellidos de los autores. La Teoría BCS muestra que este movimiento ordenado de electrones en el estado superconductor contrasta con el movimiento aleatorio de los electrones de conducción (anteriormente) a temperaturas mayores que la de la transición superconductora. Un punto interesante es que, dado este acoplamiento característico, es difícil romper un par de Cooper sin perturbar los otros pares, y el romper uno de ellos requiere invertir gran energía pues altera a todos los demás pares, lo que

implica que un sistema superconductor tiene una gran estabilidad. Por ejemplo, podemos tomar un anillo de material superconductor y enfriarlo por debajo de su temperatura de transición e inducir una corriente eléctrica que circule por ese anillo. El anillo mantendrá la corriente eléctrica por todo el tiempo que su temperatura permanezca por debajo de su temperatura de transición. Esto puede apreciarse en

los superconductores que forman los imanes de los equipos médicos de resonancia magnética en cualquier hospital moderno.

Inmediatamente después del descubrimiento de los superconductores, sus propiedades fueron investigadas. Más tarde se descubrió que los superconductores, al ser sometidos a campos magnéticos, podían dividirse en dos clases. En la primera, llamada 'tipo I', los materiales pierden su propiedad superconductora a campos magnéticos altos, mientras que en la segunda, los llamados 'tipo II', la retienen. Estos últimos son en general aleaciones de varios metales o compuestos consistentes de elementos no metálicos y cobre. La evidencia experimental indicaba que la retención de la propiedad de superconductividad, así como de otras propiedades mostradas por los llamados 'tipo II' no podían ser explicadas por la Teoría BCS. En otras palabras, la teoría estaba incompleta y se necesitaba plantear una más amplia que cubriera ambos tipos de superconductores. Ella surgió en el contexto de los condensados Bose-Einstein.

6. Condensados de Bose-Einstein

Los pares de Cooper están íntimamente relacionados con el fenómeno llamado condensación de Bose-Einstein (B-E). Este fenómeno fue predicho por Einstein basado en el trabajo del físico indio Satyendra Nath Bose. Para entender la condensación B-E revisaremos algunas particularidades de la mecánica cuántica.

La mecánica cuántica describe cómo funciona la naturaleza a escala atómica, y tiene muchas características que chocan con nuestra intuición adquirida a través de la experiencia diaria. Una de ellas es el hecho de que las partículas tienen propiedades ondulatorias, por lo que una expresión matemática llamada 'función de onda' define su estado cuántico. Otra característica es la de que las partículas subatómicas son una de dos, o intrínsecamente clausrofóbicas o gregarias. Las primeras reciben el nombre de fermiones y las segundas, bosones.

Los fermiones actúan de manera clausrofóbica, es decir, dos fermiones no pueden ocupar estados cuánticos idénticos estando en el mismo lugar. Son ejemplos de fermiones los protones, electrones y neutrones.

Los bosones actúan de manera gregaria. Bosones de una especie particular tienden a agruparse en estados idénticos si se les da la oportunidad. Como ejemplo podemos mencionar a los fotones (partículas de luz).

Alexei Abrikosov, fue capaz de mostrar matemáticamente cómo se forman ciertos vórtices en el condensado de B-E y cómo el campo magnético externo puede penetrar el material a lo largo de los canales formados por los vórtices, lo cual explica porqué los materiales del tipo II retienen sus propiedades superconductoras en campos magnéticos altos.

Aquí cabe señalar un importantísimo hecho, que objetos formados por un número par de fermiones pueden actuar como bosones.

Una condensación de B-E ocurre cuando una colección de bosones de una especie es enfriada lo suficiente y su densidad aumenta sin llegar a convertirse en un sólido. En este caso, las funciones de onda de cada componente del condensado crecen y se traslapan de manera que todos los bosones se condensan en un solo estado cuántico. Esto es, su comportamiento colectivo puede ser descrito con una única función de onda

En el caso de la Teoría BCS, los pares de Cooper (dos fermiones) actúan como bosones al agruparse con otros pares, de manera que todos los pares pierden su identidad individual y forman un condensado B-E.

7. Los Nobel 2003 (Abrikosov y Ginzburg)

Alexei Abrikosov, durante su estancia en el Instituto Kapitsa para Problemas de Física, en Moscú, logró formular una nueva teoría para describir el comportamiento de los superconductores del tipo II. Fue capaz de mostrar matemáticamente cómo se forman ciertos vórtices en el condensado de B-E y cómo el campo magnético externo puede penetrar el material a lo largo de los canales formados por los vórtices, lo cual explica porqué los materiales del tipo II retienen sus propiedades superconductoras en campos magnéticos altos.

El argumento de Abrikosov estuvo basado en los trabajos de Vitaly Ginzburg y Lev Landau (Nobel en Física 1962, por otros estudios). Ambos se dieron cuenta de que un cierto tipo de función de onda debía ser introducida para describir la densidad del condensado, si la interacción entre el superconductor y el campo magnético externo quería ser descrita. Dicha función se introdujo con una variable llamada parámetro de orden. Entonces resultó evidente para ellos que existía un valor del parámetro que partía a los superconductores en dos tipos distintos. Pero en aquel tiempo sólo se conocía un tipo de superconductor y no había razón para considerar valores del parámetro de orden mayor a los del valor límite. El mérito de Abrikosov fue darse cuenta de que los materiales tipo II podían ser descritos por el otro conjunto de valores mayores del parámetro de orden, y así desarrolló y calculó sus propiedades. Entre ellas encontró la cuantización del flujo magnético a través de los vórtices formados en el material. En otras palabras, el flujo magnético a través del vórtice no puede tomar todos los valores

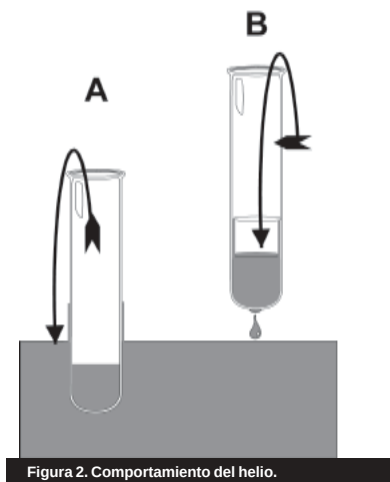
sino sólo valores discretos permitidos por la teoría. El lector deberá recordar esto más adelante.

8. El tercer Nobel 2003 (Leggett)

Cuando el helio líquido reduce su temperatura a 2.19 °K, cambia a una nueva fase cuyas propiedades son notables. En principio uno esperaría que así como al disminuir la temperatura del agua, el helio se solidificara. Esto no ocurre. La figura 2 muestra el extraño comportamiento del helio. En la figura 2A, si un tubo de ensaye es sumergido en el líquido, el helio formará una película delgada en las paredes del tubo y trepará por ellas llenando el tubo hasta igualar niveles dentro y fuera; pero si el tubo de ensaye es extraído, el helio formará una película y ésta se saldrá del tubo (figura 2B). En otras palabras, el helio cesa toda su resistencia y fluye libremente.

El hecho de que el ^4He se convierte en superfluido fue descubierto por Pyotr Kapitsa a fines de los años treinta. Este fenómeno fue explicado casi inmediatamente por el joven físico Lev Landau (quien recibió el Nobel de Física en 1962 por su explicación; Kapitsa lo obtuvo hasta 1978). La transformación del helio de un líquido normal a un líquido superfluido ocurre a 2.12 °K y es un ejemplo de una condensación B-E. Este proceso no sólo se observa en líquidos sino que ha sido recientemente observado en gases. Por esta razón, el Nobel en Física 2001 fue otorgado a Eric Cornell, Wolfgang Ketterle y Carl Wieman.

Por otro lado, la transformación del isótopo ^3He en un superfluido no fue descubierta sino hasta la década de los setenta por David Lee, Douglas Osheroff y Robert Richardson (todos Nobel de Física en 1996). Una de las razones de la manera de este descubrimiento se debe a que la transformación ocurre a una temperatura muy baja, aproximadamente mil veces más baja que de la transición del ^4He . Esto es consecuencia de que el isótopo ^3He difiere en el número impar de fermiones que contiene (dos protones y un neutrón) del contenido del isótopo ^4He (par), y por lo tanto el primero no es un bosón. La implicación, como fermión, es que no puede transformarse directamente en un condensado B-E y experimenta un paso intermedio similar a la formación de pares de Cooper. En este caso, el ^3He forma pares de átomos, sus propiedades resultan ser más complicadas que las del ^4He superfluido. Esta diferencia se debe a que los átomos de ^3He presentan propiedades magnéticas. ¿Por qué? La explicación simple es la de que cada protón o neutrón puede considerarse un pequeño imán de barra. El nombre técnico del imán es el de 'espín'. El asunto es que cuando existe un número impar de espines, éstos no pueden acomodarse para cancelar su magnetismo. Por lo tanto, siempre hay un magnetismo presente en el ^3He . Esto además implica que el ^3He superfluido es



un líquido anisotrópico, es decir, tiene diferentes propiedades en distintas direcciones del espacio por lo que, para minimizar su energía libre (F), forma tres fases distintas o mezclas de las tres fases, dependiendo de la temperatura presión y campo magnético que se le aplique externamente. Así como un pedazo de hierro pierde o gana su magnetismo a diferentes temperaturas, es decir cambia de fase, no es extraño que se presenten distintas fases en el ^3He superfluido.

El físico que explica, con la teoría arriba esquematizada, las propiedades del ^3He superfluido es Anthony Leggett, laureado por este hecho con el Nobel en 2003.

Esa teoría fue desarrollada en los años setenta mientras trabajaba en la Universidad de Sussex, Inglaterra. Finalmente diremos que las teorías de Abrikosov, Ginzburg y Leggett han tenido implicaciones y aplicaciones en otros campos de la ciencia.

9. Aplicaciones e implicaciones

Por el lado de la superconductividad, los modernos escáners de resonancia magnética utilizan materiales superconductores para producir campos magnéticos necesarios en el proceso de obtención de imágenes. Por el lado de los superfluidos, éstos han sido utilizados como medio en el estudio de la formación de turbulencia, uno de los últimos problemas por resolver de la mecánica clásica.

En la física, así como en todas las disciplinas, el intercambio y uso de ideas en otros campos resultan fructíferos. La física de partículas elementales y la cosmología han tomado muchas ideas de la teoría de Leggett. Pero quizás la exploración más curiosa sea en el campo de las interpretaciones de la mecánica cuántica. Es decir, entre la tenue línea que divide a la filosofía de la filosofía natural, si es que existe tal división.

10. La interpretación de Copenhague

Desde comienzos de la mecánica cuántica han existido conflictos entre las implicaciones literales de sus predicciones y las observaciones prácticas. Esto ha dado paso a diferentes interpretaciones de la mecánica cuántica, una de las cuales fue propuesta por Niels Bohr, quien fue uno de los fundadores de la propia teoría. La interpretación de Bohr se conoce como la de Copenhague por la ciudad donde trabajó el científico.

En la mecánica cuántica es posible predecir la probabilidad de que un átomo, por ejemplo, se encuentre en uno de sus posibles estados. Imaginemos un átomo radiactivo que puede estar en dos estados, a saber: sin emitir radiación (excitado) y después de

haber emitido la radiación (desexcitado). La mecánica cuántica puede calcular la probabilidad de ambos estados si se manifiestan en un experimento. Ahora bien, según la interpretación de Copenhague, es perfectamente consistente concebir al átomo en todos sus posibles estados simultáneamente mientras no ocurra una observación. Esto se conoce como la superposición de estados.

11. El gato de Schroedinger

Erwin Schroedinger, otro de los científicos que desarrolló la mecánica cuántica, no compartía el punto de vista de la escuela de Copenhague, por lo que desarrolló un argumento del tipo *reductio ad absurdum* para refutar la interpretación antedicha. Con esta intención, ideó un experimento mental (*Gedanken Experiment*).

Schroedinger imaginó un experimento consistente en tener dentro de una caja a un gato. En el interior de dicha caja se encuentra un átomo radiactivo que en algún momento emite radiación. Dicha radiación puede ser detectada por un contador Geiger que, al momento de detectar la radiación, dispara un mecanismo especial que destapa una botella llena de gas venenoso y mata al gato. Ahora bien, de acuerdo con la interpretación de Copenhague, el átomo, mientras no se observa, se encuentra simultáneamente en dos estados, excitado y desexcitado. En consecuencia, ¡el gato está a la vez vivo y muerto! Sólo en el momento de observar si la emisión radiactiva sucedió o no en el interior de la caja se decide la suerte del gato. Esto naturalmente contradice nuestro sentido común, por lo que parece incorrecta la interpretación de Copenhague. Sin embargo, todavía podríamos preguntarnos: si es que existen las superposiciones de estados, ¿por qué no las observamos?, ¿por qué no observamos un gato muerto y vivo al mismo tiempo?

12. ¿Vivo o muerto, o todo lo contrario?

La pregunta anterior tiene su respuesta en 1970, cuando Dieter Zeh, de la Universidad de Heidelberg, mostró que las superposiciones persisten mientras estén lo suficientemente aisladas del resto del universo. Pequeñas interacciones hacen que la superposición cambie a una situación clásica donde observamos a los estados bien definidos. Los objetos macroscópicos (como los gatos) no pueden mantenerse aislados de interacciones externas y pierden su condición de superposición, es decir, colapsan. En contraste, es más fácil aislar los objetos muy pequeños, tales como átomos, partículas atómicas y subatómicas, y esto explica por qué retienen sus propiedades cuánticas.

En 1989 Anthony Leggett escribía acerca de la posibilidad de utilizar un circuito de superconductores para hacer un experimento que probara las predicciones mecanocuánticas donde dicho circuito pudiese estar en dos estados. El experimento propuesto consistiría en probar que el circuito se encuentra en un solo estado (o no) antes de hacer la medición. La idea, pues, era utilizar un objeto

macroscópico (el circuito) relativamente aislado de interacciones (a bajas temperaturas) para hacer el experimento.

Leggett decía:

Si un experimento así pudiera realizarse, y resulta a favor de la predicción cuántica, resolvería la aparente paradoja [del gato], pero si por el contrario, el resultado fuera adverso a la mecánica cuántica, sería más excitante ya que indicaría que la teoría no es universal y a cierto nivel o escala o complejidad, nuevos efectos, por el momento desconocidos, comienzan a jugar un papel (Davis, 1989: 184)

En el último año del milenio pasado, 2000, dos experimentos similares, confirmaron la predicción cuántica. Uno de ellos fue conducido por Jonathan Friedman, James Lukens y colaboradores en la Universidad Estatal de Nueva York (SUNY, Stony Brook), y el otro por el grupo de Caspar van der Wal, Johan E. Mooij de la Universidad Tecnológica de Delf (Países Bajos).

Ambos grupos utilizaron un dispositivo conocido por sus siglas en inglés como SQUIDS, que traducido libremente al castellano sería dispositivo superconductor de interferencia cuántica. Un SQUID podría describirse físicamente como un argollita cuadrada de dimensiones muy pequeñas (micrones) y fabricada de un material superconductor. La predicción cuántica para un SQUID permite que a través de su abertura pasen ciertas cantidades discretas, es decir cuantizadas, de flujo magnético (véase la sección 7. Los Nobel 2003).

Si se aplica un campo magnético externo al SQUID y el valor de dicho campo no corresponde a los valores permitidos por la predicción cuántica, entonces una corriente eléctrica se establece en el arillo del SQUID. Esta corriente a su vez establece un campo magnético justo de la magnitud y dirección necesarias para compensar, es decir, sumarse o restarse al campo magnético externo, de manera que el resultado sea igual a uno de los valores del flujo magnético, a través del SQUID, permitidos por la mecánica cuántica.

El punto interesante es precisamente cuando el flujo magnético aplicado externamente se encuentra justo a medio valor entre dos valores permitidos por la teoría cuántica. En este caso, el SQUID estaría igualmente inclinado (con igual probabilidad) a producir una corriente eléctrica a través de su arillo, que girara en el sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario. En el primer caso, el flujo magnético generado se sumaría al flujo aplicado, y así el valor del flujo resultante se redondearía a alguno de los permitidos por la teoría. En el segundo caso, el flujo se ajustaría al otro valor permitido.

Quiere decir que tenemos cuatro situaciones: dos estados y dos superposiciones. En cuanto a los estados, en uno la corriente gira en el sentido de las manecillas del reloj, digamos convencionalmente, en sentido positivo, y en el otro estado, en sentido negativo. En cuanto a las dos superposiciones, una corresponde a la situación

igual a estado positivo más negativo, y la otra a estado positivo menos el estado negativo. Curiosamente, las dos superposiciones tienen energías diferentes.

Podemos ofrecer una explicación a esta diferencia de energías con una analogía muy burda, pero que sirva de ejemplo: un sistema compuesto de dos agujas imantadas. Como campo magnético externo aplicado sobre el sistema, tendríamos el campo magnético de la Tierra. Ahora bien, la primera superposición correspondería a una aguja imantada o brújula apuntando hacia el norte (estado positivo) más otra aguja apuntando hacia el sur (estado negativo). La energía de esta primera superposición correspondería a la necesaria para mantener la aguja que apunta hacia el sur en su lugar y evitar que se regrese a apuntar al norte. La segunda superposición corresponde al estado positivo menos estado negativo. En este caso, 'menos estado negativo' significa que la segunda aguja ya está apuntando hacia el norte y no necesitamos detenerla. En consecuencia, esta última superposición posee menos energía, difiere así de la primera superposición.

Hemos mencionado que cuando el campo magnético externo tiene un valor exactamente intermedio entre dos campos permitidos por la teoría cuántica, las dos superposiciones son igualmente probables. En una situación de aislamiento del sistema, es decir, en la situación de coherencia, la alternancia entre las dos superposiciones corresponde a una oscilación en la energía del sistema, ya que hay diferencias de energía entre estas.

En el caso de un SQUID, como en el de cualquier dispositivo macroscópico, es imposible tenerlos bien aislados, y en consecuencia el mecanismo de decoherencia o colapso surge y la superposición pasa rápidamente al estado positivo o negativo, con lo que se eliminan las ambigüedades. Sin embargo, en los experimentos realizados en las universidades de SUNY y Delf ha sido posible medir las oscilaciones de energía durante periodos muy cortos antes de que ocurra un colapso. La detección de las oscilaciones prueba la existencia real de las superposiciones

El hecho de encontrar efectos cuánticos en dispositivos del grosor de un cabello, es decir, en objetos enormes comparados con objetos atómicos, es una prueba crucial de la validez de la teoría. Es como saber que si aislamos al gato de Schroedinger, puede estar oscilando entre la vida y la muerte. Un hecho divertido es que la palabra squid en inglés significa calamar. En otras palabras, se tiene un gato y un calamar cuánticos. Pero hay un tercer animal cuántico

13. El tercer animal cuántico

Queremos finalmente resaltar un episodio de *El Quijote* al que sólo se le ha señalado como un involuntario gazapo del Manco de Lepanto, pero que muestra al tercer animal cuántico: el burro de Sancho Panza.

En el capítulo xxiii de *El Quijote*, le roban el burro a Sancho Panza. Posteriormente, en el capítulo xxv, Sancho se encuentra

espoleando su burro y en ese mismo capítulo lamenta la ausencia de su jumento. Esto es un error de Cervantes, pero a la luz de la interpretación de Copenhague, el burro se encuentra en la superposición de dos estados (robado $\pm$ no robado). Más adelante (capítulo xxx), Sancho encuentra al ladrón de su burro y recupera al animal. En otras palabras, se presenta el colapso de estados cuánticos del jumento. Claro que no fue la intención de esta obra maestra de la literatura mundial incursionar en el terreno de la ciencia. Como ya señalamos, pasarían varios siglos para que se llegara a realizar un experimento de superposición de estados sobre un objeto macroscópico. Sin embargo, y en descargo de Cervantes, queremos apuntar que él mismo se da cuenta de la 'metida de pata' (de Cervantes, no del cuadrúpedo), y es en el libro segundo, capítulo IV de *El Quijote* que el escritor reconoce su yerro en un simpático diálogo entre el bachiller Sansón Carrasco y el escudero panzón:

— No está es eso el yerro —replicó Sansón— sino en que antes de haber [a]parecido el jumento, dice el autor que iba a caballo Sancho en el mismo rucio.

— A eso —dijo Sancho— no sé qué responder, sino que el historiador se engañó, o ya sería descuido del impresor (Cervantes, 1997: 333).



Bibliografía y lecturas recomendadas

- Cervantes, M. (1997). *El ingenioso Hidalgo Don Quijote de la Mancha*. 19 ed. Porrúa, México.
- Davies, P. (1989). "The New Physics", en Leggett, A. *Low Temperature Physics*. Cambridge University Press.
- Davis, H. (1949). "Low Temperature Physics", *Scientific American*. Vol. 180, Núm. 6, junio.
- Graham, P. (2000). "Schroedinger SQUID", *Collins Scientific American*. Vol. 283, Núm. 4.
- Hackermuller *et al.* (2004). "Decoherence Observed in Interference of C-70 Molecules" en <www.decoherence.de> (23 de febrero).
- Lifshitz, E. M. (1958). "Superfluidity", *Scientific American*. Vol. 198, Núm. 6, junio.
- Tegmark, M. y J. A. Wheeler (2001). "100 Years of Quantum Mysteries", *Scientific American*. Vol. 284, Núm. 2.

