

FENÓMENOS EXTRAÑOS DE LA MATERIA EN UN MUNDO BIDIMENSIONAL

Los laureados de este año abrieron la puerta a un mundo desconocido donde la materia existe en estados extraños. La mitad del Premio Nobel de Física 2016 se concede a **David J. Thouless**, de la Universidad de Washington, Seattle, y la otra mitad a **F. Duncan M. Haldane**, de la Universidad de Princeton, y **J. Michael Kosterlitz**, de la Brown University, Providence. Sus descubrimientos han traído consigo avances en la comprensión teórica de los misterios de la materia y han creado nuevas perspectivas sobre el desarrollo de nuevos materiales.

David Thouless, Duncan Haldane y Michael Kosterlitz han utilizado métodos matemáticos avanzados para explicar fenómenos extraños en fases (o estados) inusuales de la materia, tales como superconductores, superfluidos o películas magnéticas delgadas. **Kosterlitz y Thouless** han estudiado fenómenos que tienen lugar en un mundo plano, en superficies o en capas extremadamente finas que pueden ser consideradas bidimensionales, en comparación con las tres dimensiones (longitud, anchura y altura) con las que se describe habitualmente la realidad. **Haldane** también ha estudiado la materia cuando forma hilos tan finos que pueden considerarse unidimensionales.

La física que tiene lugar en dos dimensiones es muy diferente a la que conocemos en el mundo que nos rodea. Una lámina muy delgada de materia está formada por millones de átomos y, aunque el comportamiento de cada átomo puede explicarse usando la física cuántica, los átomos muestran propiedades completamente diferentes cuando consideramos un conjunto de ellos. Nuevos fenómenos colectivos se están descubriendo continuamente en este mundo bidimensional y la física de la materia condensada es ahora uno de los campos más interesantes de la física.

El uso de los conceptos topológicos por los tres laureados fue decisivo para sus descubrimientos. La topología es una rama de las matemáticas que estudia cuáles son las propiedades de los cuerpos geométricos que no cambian cuando los deformamos de manera suave (sin rotura). Con la topología moderna como herramienta los laureados de este año presentaron resultados sorprendentes que han abierto nuevos campos de investigación y han llevado a la creación de nuevos e importantes conceptos dentro de varias áreas de la física.

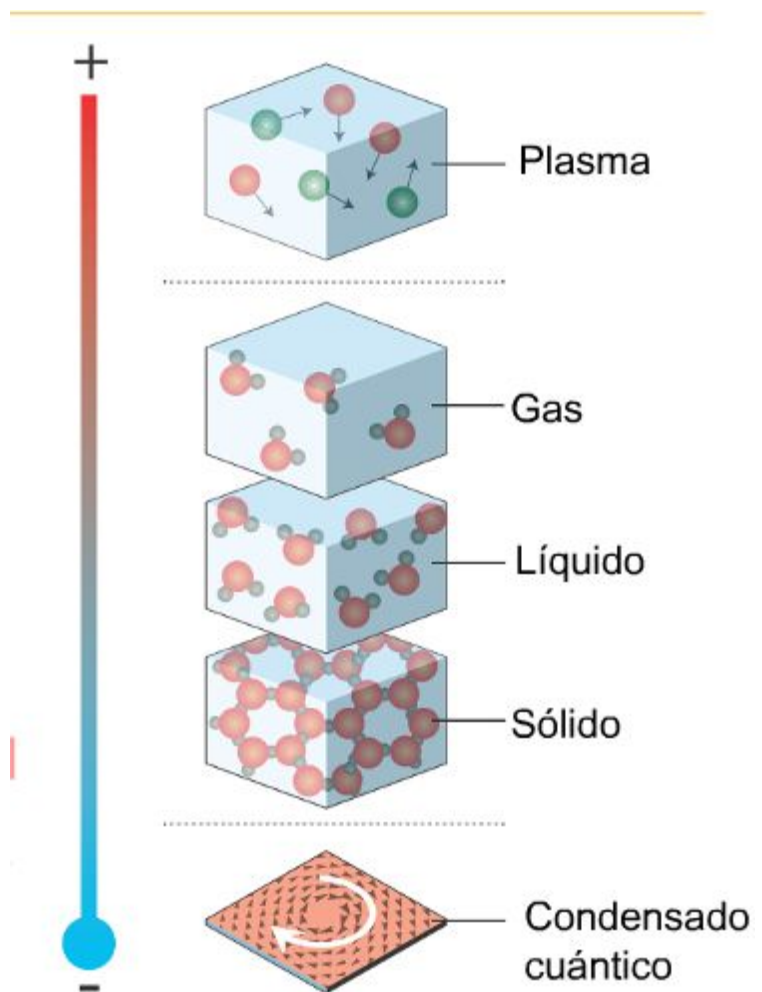


Fig. 1 Fases de la materia. Las fases más comunes son gas, líquido y materia sólida. Sin embargo, a temperaturas extremadamente altas o bajas, la materia asume otros estados más exóticos.

La física cuántica se hace visible a bajas temperaturas

En el fondo, toda la materia está gobernada por las leyes de la física cuántica. Los gases, líquidos y sólidos son las fases habituales de la materia, en las que los efectos cuánticos están a menudo ocultos por movimientos atómicos aleatorios. Pero a temperaturas extremas, cerca del cero absoluto ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) la materia asume nuevas fases extrañas y se comporta de manera inesperada. La física cuántica, que sólo funciona en el mundo de lo muy pequeño, se hace visible de repente (fg.1).

Las fases ordinarias de la materia cambian cuando la temperatura varía. Por ejemplo, una transición de fase ocurre cuando el hielo, que consiste en cristales bien ordenados, se calienta y funde convirtiéndose en agua líquida, una fase más caótica. Cuando miramos al mundo en dos dimensiones de la materia, encontramos fases materiales que aún no han sido exploradas completamente.

Cosas extrañas pueden pasar cuando la temperatura es muy baja. Por ejemplo, cesa de repente la resistencia debida al movimiento molecular. Así la corriente eléctrica fluye sin resistencia en un superconductor, o un vórtice en un superfluido gira continuamente sin detenerse.

La primera persona que estudió sistemáticamente los superfluidos fue el ruso **Pyotr Kapitsa**, en los años treinta. Enfrío helio-4 hasta $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$, observando que podía atravesar lentamente las paredes del recipiente que lo contenía, comportándose extrañamente, como un superfluido, en el que la viscosidad ha desaparecido por completo. Kapitsa fue recompensado con el Premio Nobel de Física en 1978, y desde entonces se han obtenido en el laboratorio varios tipos de superfluidos: helio superfluido, delgadas películas de superconductores, capas delgadas de materiales magnéticos y nanotubos conductores de la electricidad, son algunas de los nuevos materiales en los que la materia se encuentra en nuevas fases que ahora están siendo intensamente estudiadas.

Los pares de vórtices proporcionan la solución

Los investigadores creyeron durante mucho tiempo que las fluctuaciones térmicas destruyen todo orden en la materia en un mundo plano, bidimensional, incluso en el cero absoluto. Si no hay fases ordenadas, no puede haber transiciones de fase. Pero a principios de los años setenta, **David Thouless y Michael Kosterlitz** se reunieron en Birmingham, Gran Bretaña, y desafiaron la teoría que entonces imperaba. Juntos, asumieron el problema de las transiciones de fase en dos dimensiones (primero por curiosidad, y más tarde por ignorancia, según sus propias palabras). Esta cooperación dio lugar a una comprensión totalmente nueva de las transiciones de fase que se considera como uno de los descubrimientos más importantes del siglo XX en la física de la materia condensada. Se llama transición de KT (transición de Kosterlitz-Thouless) o la transición de BKT, donde el B es para Vadim Berezinskii, un físico teórico de Moscú ahora fallecido que había presentado ideas similares.

La transición de fase topológica no es una transición de fase ordinaria, como la que existe entre el hielo y el agua. El papel principal en una transición topológica es desempeñado por pequeños vórtices en el material bidimensional. A temperaturas bajas forman parejas. Cuando la temperatura aumenta, se produce una transición de fase: los vórtices se alejan repentinamente uno del otro y navegan en el material por sí mismos (figura 2).

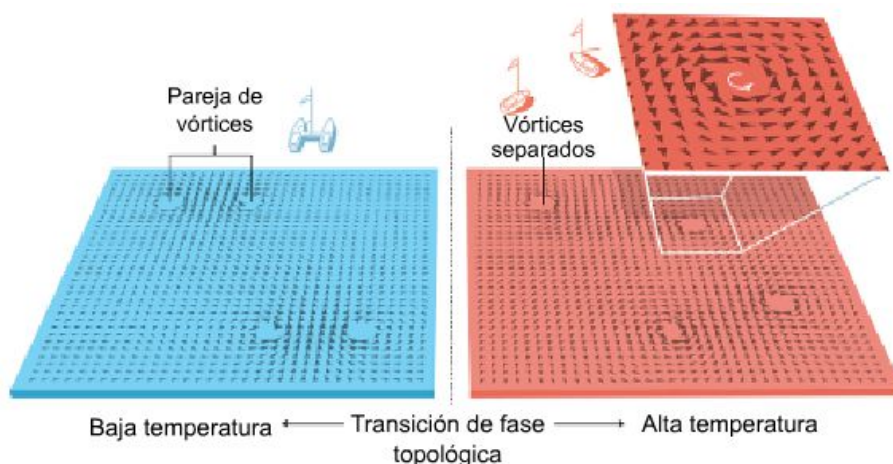


Fig. 2 Transición de fase. Ocurre cuando existe transición de un estado de la materia a otro, como cuando el hielo funde y se convierte en agua. Utilizando la topología, Kosterlitz y Thouless describieron una transición de fase topológica en una fina capa de materia muy fría. A temperaturas muy bajas, se forman pares de vórtices y luego se separan repentinamente a la temperatura de transición de fase. Este fue uno de los descubrimientos más importantes del siglo XX en la física de la materia condensada.

Lo maravilloso de esta teoría es que la transición KT es universal y se puede utilizar para diferentes tipos de materiales. Por ello se ha convertido en una herramienta útil que no solo se aplica en el mundo de la materia condensada, sino también en otras áreas de la física, como la física atómica o la mecánica estadística. La teoría de la transición KT también ha sido desarrollada por sus creadores y otros, y ha sido confirmada experimentalmente.

Los misteriosos saltos cuánticos

Los desarrollos experimentales produjeron una serie de nuevos estados de la materia que requerían explicación. En la década de 1980, tanto David Thouless como Duncan Haldane presentaron un nuevo trabajo teórico que desafió las teorías anteriores, de las cuales una era la mecánica cuántica, para determinar qué materiales conducían la electricidad. Esto se había desarrollado inicialmente en la década de 1930 y, algunas décadas más tarde, esta área de la física se consideraba bien entendida.

Por lo tanto, fue una gran sorpresa cuando, en 1983, David Thouless demostró que la descripción anterior era incompleta y, a bajas temperaturas y en presencia de campos magnéticos fuertes, era necesario un nuevo tipo de teoría, donde los conceptos topológicos eran vitales. Prácticamente al mismo tiempo, Duncan Haldane también llegó a una conclusión similar, e igualmente inesperada, al analizar las cadenas atómicas magnéticas. Su trabajo ha sido fundamental en los sucesivos desarrollos de la teoría de nuevas fases de la materia.

El misterioso fenómeno que David Thouless describió teóricamente, usando la topología, es el efecto Hall cuántico. Fue descubierto en 1980 por el físico alemán Klaus von Klitzing, premiado con el Premio Nobel en 1985 al estudiar una delgada capa conductora entre dos semiconductores, donde los electrones fueron enfriados a unos pocos grados por encima del cero absoluto y sometidos a un fuerte campo magnético.

En física no es raro que ocurran cosas extrañas cuando se trabaja a bajas temperaturas. Por ejemplo, algunos materiales se vuelven magnéticos. La razón es que todos los pequeños imanes atómicos del material apuntan repentinamente en la misma dirección, dando lugar a un campo magnético que puede medirse.

Sin embargo, el efecto Hall cuántico es más difícil de entender; La conductividad eléctrica en la capa toma solo valores particulares, extremadamente precisos, algo que es inusual en la física. Las mediciones proporcionan exactamente los mismos resultados incluso si la temperatura, el campo magnético o la cantidad de impurezas en el semiconductor varían. Cuando el campo magnético cambia lo suficiente, la conductividad de la capa también cambia, pero a saltos; si se reduce la fuerza del campo magnético, la conductividad eléctrica primero se hace dos veces más grande, después se triplica, cuadruplica, y así sucesivamente. Estos saltos no podían explicarse por la física conocida en ese momento, pero David Thouless encontró la solución a este enigma usando la topología.

La respuesta estaba en la topología

La topología describe las propiedades que permanecen inalteradas cuando un objeto es estirado, retorcido o deformado, pero sin romperlo. Topológicamente, una esfera y un bol pertenecen a la misma categoría, porque un objeto esférico de arcilla se puede transformar en un bol. Sin embargo, una rosquilla, con un agujero en el centro, y una taza de café, con un agujero en el mango, pertenecen a otra categoría; También pueden ser remodelados para a partir de uno obtener el otro. Los objetos topológicos pueden contener un agujero, dos, tres, o cuatro... es decir, un número entero. Esto resultó muy útil a la hora de describir la conductividad eléctrica encontrada en el efecto Hall cuántico, que sólo cambia en cantidades que son múltiplos exactos de un número entero (fig.3).

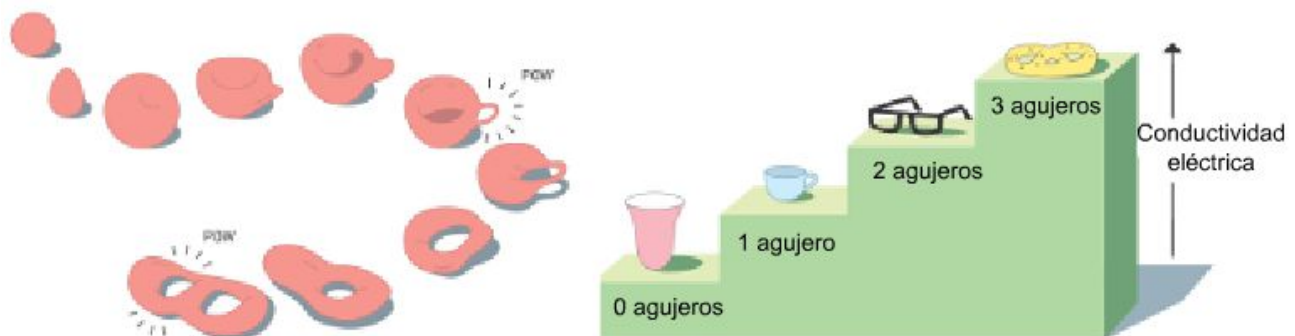


Fig. 3. Topología. Esta rama de las matemáticas estudia las propiedades que cambian gradualmente, como el número de agujeros en los objetos. La topología fue la clave de los descubrimientos de los Premios Nobel, y explica por qué la conductividad de capas finas cambia a saltos según números enteros.

En el efecto Hall cuántico, los electrones se mueven relativamente libres en los semiconductores y forman algo llamado fluido cuántico topológico. De la misma manera que cuando muchas partículas se juntan, aparecen nuevas propiedades, los electrones en el fluido cuántico topológico también muestran características sorprendentes. Del mismo modo que no se puede determinar si hay un agujero en una taza de café mirando sólo una pequeña parte de ella, es imposible determinar si los electrones han formado un líquido cuántico topológico si solo se observa lo que está sucediendo a algunos de ellos. Sin embargo, la conductividad describe el movimiento colectivo de los electrones y, debido a la topología, varía a saltos; está cuantizada. Otra característica del fluido cuántico topológico es que en sus bordes presenta propiedades inusuales. Esto ya había sido predicho por la teoría y fue confirmado posteriormente de forma experimental.

Otro hito tuvo lugar en 1988, cuando **Duncan Haldane** descubrió que los fluidos cuánticos topológicos, como el del efecto Hall cuántico, pueden formarse en capas semiconductoras finas, incluso cuando no hay campos magnéticos. Duncan confesó que nunca había soñado con que su modelo teórico se confirmaría experimentalmente, pero en fecha tan reciente como 2014, este modelo fue validado en un experimento usando átomos que se enfriaron hasta casi el cero absoluto.

Nuevos materiales topológicos

En un trabajo muy anterior (de 1982), Duncan Haldane hizo una predicción que sorprendió incluso a los especialistas. En estudios teóricos de cadenas de átomos con propiedades magnéticas que hay en algunos materiales, descubrió que las cadenas tenían propiedades diferentes dependiendo del carácter de los imanes atómicos. En física cuántica existen dos tipos de imanes atómicos, pares e impares. Haldane demostró que una cadena formada de imanes pares es topológica, mientras que una cadena de imanes impares no lo es. Al igual que en el caso del fluido cuántico topológico, no es posible determinar si una cadena atómica es topológica, o no, investigando solo una pequeña parte de ella. Y, al igual que en el caso del fluido cuántico, las propiedades topológicas se revelan en los bordes. Eso es así porque en los extremos de la cadena la propiedad cuántica conocida como spin tiene un valor semientero

Inicialmente, nadie creía el razonamiento de Haldane sobre las cadenas atómicas; los investigadores estaban convencidos de que ya los entendían por completo. Pero Haldane había descubierto el primer ejemplo de un nuevo tipo de material topológico, que ahora es un campo de investigación muy activo en física de la materia condensada.

Los fluidos Hall cuánticos y las cadenas atómicas magnéticas están incluidos en este nuevo grupo de estados topológicos. Más tarde los investigadores descubrieron otros estados topológicos inesperados de la materia, no sólo en cadenas y en los bordes de capas delgadas, sino también en materiales tridimensionales ordinarios.

Actualmente estamos empezando a hablar de aislantes topológicos, superconductores topológicos y metales topológicos. Estos son ejemplos de áreas que en la última década han definido la investigación de primera línea en física de la materia condensada, con la esperanza de que los materiales topológicos serán útiles para nuevas generaciones de dispositivos electrónicos y superconductores, o en futuros ordenadores cuánticos. La investigación actual está revelando ahora los secretos de la materia descubierta en los exóticos mundo bidimensionales descubiertos por los premios Nobel de este año.

LINKS AND FURTHER READING

Additional information on this year's prizes, including a scientific background in English, is available on the website of the Royal Swedish Academy of Sciences, <http://kva.se>, and at <http://nobelprize.org>. There, and at <http://kvatv.se>, you can watch video footage of the press conferences, the Nobel Lectures and more. Information on exhibitions and activities related to the Nobel Prizes and the Prize in Economic Sciences is available at www.nobelmuseum.se.

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics 2016

with one half to DAVID J. THOULESS	and the other half to F. DUNCAN M. HALDANE	and J. MICHAEL KOSTERLITZ
Born 1934 in Bearsden, UK. Ph.D. 1958 from Cornell University, Ithaca, NY, USA. Emeritus Professor at University of Washington, Seattle, WA, USA.	Born 1951 in London, UK. Ph.D. 1978 from Cambridge University, UK. Eugene Higgins Professor of Physics at Princeton University, NJ, USA.	Born 1942 in Aberdeen, UK. Ph.D. 1969 from Oxford University, UK. Harrison E. Farnsworth Professor of Physics at Brown University, Providence, RI, USA.
https://sharepoint.washington.edu/phys/people/Pages/view-person.aspx?pid=85	www.princeton.edu/physics/people/display_person.xml?netid=haldane&display=faculty	https://vivo.brown.edu/display/jkosterlitz