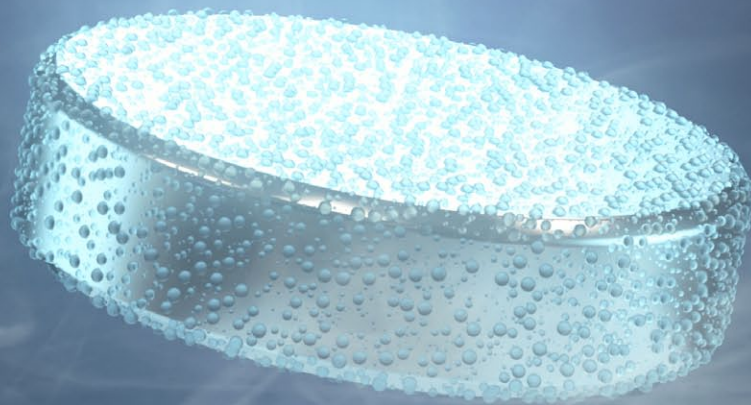


ESPECIAL



Material exóticos

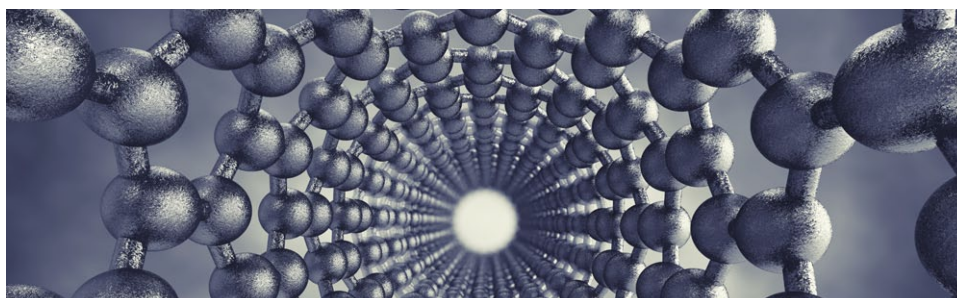
SCIENTIFIC
AMERICAN™

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

ESPECIAL

Materiales exóticos

CONTENIDO



Una selección de nuestros mejores artículos para ahondar en la ciencia de **los materiales exóticos**.

Aislantes topológicos

David Carpentier y Laurent Lévy
Investigación y Ciencia, agosto 2015

INCLUYE EL ARTÍCULO:

La búsqueda de partículas de Majorana

Ramón Aguado

El efecto Hall cuántico

Klaus Von Klitzing
Investigación y Ciencia, mayo 1986

Los electrones en planilandia

Steven Kivelson, Dung-Hai Lee y Shou-Cheng Zhang
Investigación y Ciencia, mayo 1996

Vórtices en superconductores

M.ª Pilar González, Javier Villegas, Eivira M.ª González y José Luis Vicent
Investigación y Ciencia, junio 2007

Líquidos y hielos de espín

Rafik Ballou y Claudine Lacroix
Investigación y Ciencia, abril 2009

La edad de diamante de la espintrónica

David D. Awschalom, Ryan Epstein y Ronald Hanson
Investigación y Ciencia, diciembre 2007

INCLUYE EL ARTÍCULO:

Control colectivo de espines

Yuichiro K. Kato

¿Aislante o metal?

Antonio Tejeda y A. Mascaraque
Investigación y Ciencia, marzo 2011

Grafeno

André K. Geim y Philip Kim
Investigación y Ciencia, junio 2008

Electrónica del grafeno

J. González Carmona, Francisco Guinea y M. A. H. Vozmediano
Investigación y Ciencia, septiembre 2010

Constantes que corren

M. A. H. Vozmediano
Investigación y Ciencia, marzo 2011

Fases cuánticas y teoría de cuerdas

Subir Sachdev
Investigación y Ciencia, marzo 2013

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1ª, 08021 Barcelona (España)
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

Copyright © Prensa Científica, S.A. y Scientific American, una división de Nature America, Inc.

ESPECIAL n.º 23 ISSN: 2385-5657

En portada: iStock / ktsimage | Imagen superior: iStock / nobeastsوفيرce

David Carpentier trabaja en el laboratorio de física de la Escuela Normal Superior de Lyon. Sus investigaciones se centran en el transporte ondulatorio de los electrones y en las fases topológicas de la materia.



Laurent Lévy es físico del estado sólido en la Universidad de Grenoble y miembro del Instituto Néel de física de la materia condensada, en la misma ciudad.



MATERIA CONDENSADA

Aislantes topológicos

Un nuevo tipo de materiales presentan la peculiaridad de tener un interior aislante y una superficie conductora. Su descubrimiento ha cambiado la manera de entender las fases de la materia

David Carpentier y Laurent Lévy

A

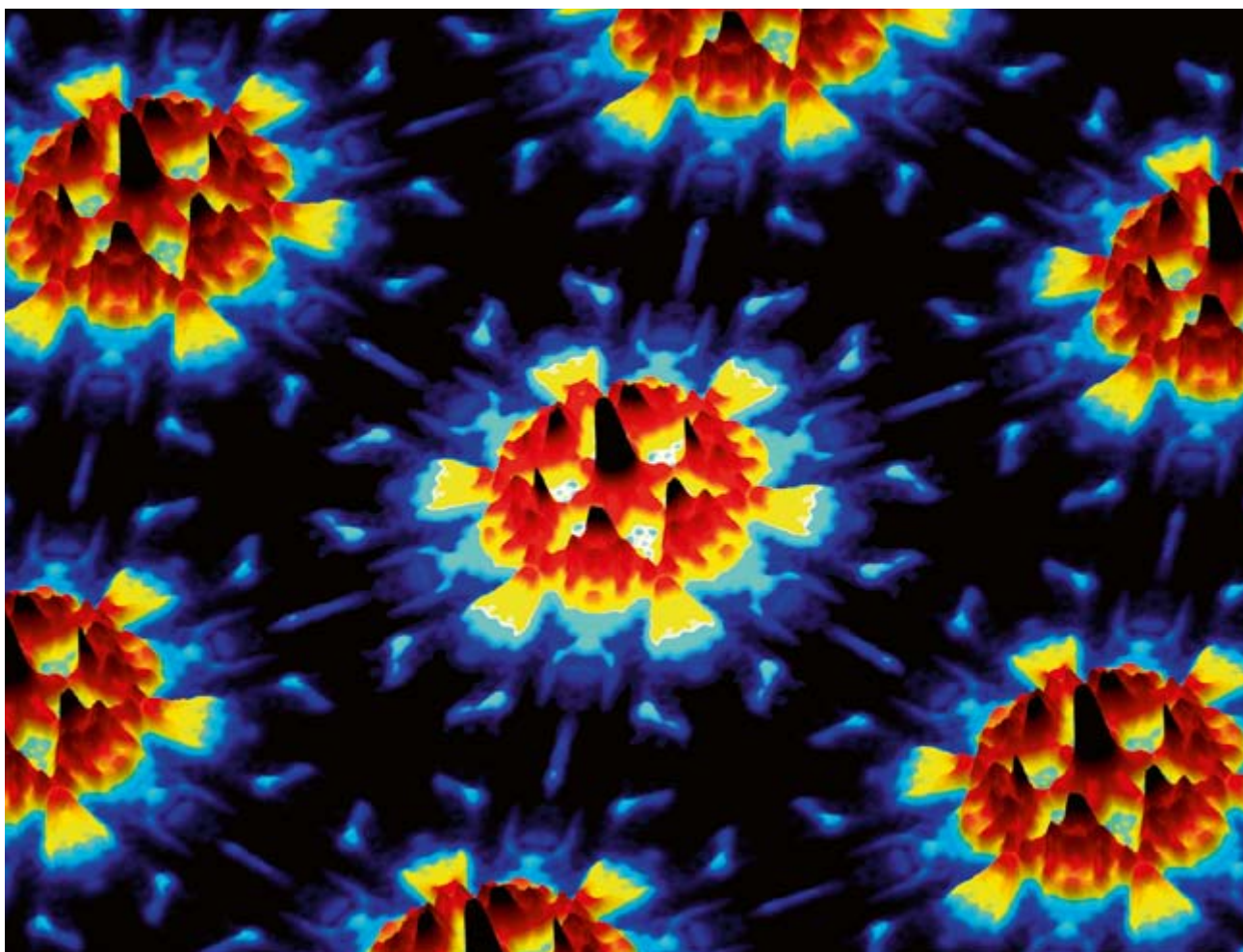
LO LARGO DE LOS SIGLOS, LOS MATEMÁTICOS HAN DESCUBIERTO TODO TIPO DE estructuras geométricas y algebraicas que en un principio no auguraban aplicación práctica alguna. Con el tiempo, sin embargo, muchas de ellas han acabado manifestándose en las leyes físicas. A modo de ejemplo, baste mencionar el espacio de Minkowski (un espacio pseudoeuclídeo de cuatro dimensiones básico para entender la teoría de la relatividad) o los grupos de simetría, relevantes en el estudio de los cristales.

EN SÍNTESIS

Un nuevo tipo de materiales, los aislantes topológicos, se caracterizan por ser aislantes en el interior y conductores en la superficie. Dicha característica tiene un origen muy poco común: las propiedades topológicas de la función de onda cuántica de los electrones.

Aunque conductora, la superficie de estos materiales resulta completamente distinta de los metales conocidos. Sus electrones obedecen una dinámica formalmente análoga a la de las partículas relativistas y su espín queda determinado por su sentido de propagación.

Predichos teóricamente hace unos diez años, los primeros materiales de este tipo ya han llegado al laboratorio. Sus inusuales propiedades prometen aplicaciones en computación cuántica y espintrónica, un nuevo tipo de electrónica basada en el espín del electrón.



ONDAS CUÁNTICAS EN 2D: Los aislantes topológicos no conducen la electricidad en el interior, pero sí en la superficie. Esta imagen computarizada muestra el patrón de interferencia de los estados electrónicos de superficie en una aleación de bismuto. Las propiedades topológicas de la función de onda cuántica garantizan que, en la superficie de estos materiales, el espín del electrón queda fijado por su dirección de movimiento.

Algunos objetos familiares, como los nudos y las superficies, han sido estudiados y clasificados por la topología. Esta rama de las matemáticas se centra en aquellas propiedades de los objetos que permanecen invariantes cuando los deformamos. Uno de los trabajos pioneros en este campo se debe al matemático suizo Leonhard Euler, quien en 1736 demostró la imposibilidad de cruzar los siete puentes de la ciudad de Königsberg pasando una sola vez por cada uno de ellos. La solución de este problema no depende de la longitud de los puentes ni de los detalles del camino, sino únicamente de las restricciones que impone tener que cruzarlos una sola vez.

Hace diez años, nadie hubiera adivinado que el carácter aislante o conductor de la materia pudiese guardar relación con las propiedades topológicas de las superficies cerradas. En 2005, sin embargo, varios trabajos pioneros demostraron que ciertos sólidos poseen un orden topológico oculto, y que algunos materiales pueden ser aislantes en el interior y conductores en la superficie. Conocidos con el nombre de aislantes topológicos, las propiedades únicas de estos materiales prometen interesantes aplicaciones en espintrónica, una versión de la electrónica basada en el espín del electrón. Al mismo tiempo, podrían constituir la base de los futuros ordenadores cuánticos.

Pero, además, su hallazgo ha cuestionado uno de los principios fundamentales de la física de la materia condensada: la relación entre orden y simetría. La clasificación moderna de los posibles estados de la materia se basa en la simetría. En un líquido, por ejemplo, las moléculas se distribuyen de manera aleatoria. Si las desplazamos una distancia arbitraria, obtendremos una configuración que también se corresponde con la de un líquido. Por ello, decimos que dicho estado es invariante bajo traslaciones espaciales. No ocurre lo mismo en un sólido cristalino, cuyos átomos se encuentran colocados en los nodos de un retículo periódico. Dicha configuración no se muestra invariante bajo traslaciones arbitrarias, sino solo bajo aquellas que desplazan cada átomo hasta otro nodo de la red. Es decir, el conjunto de traslaciones que dejan invariante la estructura atómica de un cristal resulta menos numeroso que en el caso de un líquido. Al pasar del estado líquido al sólido, la materia se ordena y su simetría disminuye.

La idea general de clasificar los estados de la materia en función de simetrías cada vez más restringidas se ha empleado desde hace tiempo. Y es precisamente este principio el que se ha venido abajo con el descubrimiento de los aislantes topológicos, ya que el orden que los caracteriza no puede describirse

en términos de una reducción de simetría. Con independencia de sus aplicaciones prácticas, estos materiales han propiciado un nuevo campo conceptual que abre las puertas a extender la clasificación tradicional de los estados de la materia condensada.

AISLANTES Y CONDUCTORES

Un aislante es un sólido que no conduce la electricidad: si aplicamos una pequeña diferencia de potencial entre sus extremos, no veremos circular ninguna corriente eléctrica. Por el contrario, en un metal mediremos una corriente proporcional al voltaje aplicado. ¿A qué se debe esta diferencia de comportamiento? Al fin y al cabo, un cristal se encuentra formado por una agrupación periódica de átomos, tanto si se trata de un aislante como si es un conductor.

Para responder a dicha pregunta, debemos considerar la manera en que se distribuyen los electrones en el interior de un cristal. Según la mecánica cuántica, un electrón no debe considerarse una partícula puntual, sino una onda que se propaga por el interior del sólido. Dicha onda queda descrita por una función compleja $\psi(r)$, donde r representa la posición dentro del cristal. Esta función de onda asigna a cada punto del espacio un módulo y una fase (las dos cantidades que definen un número complejo).

En física clásica, la trayectoria de una partícula no solo depende de su posición, sino también de su momento. De manera análoga, la función de onda cuántica de un electrón queda parametrizada por su momento, k , por lo que se denota mediante $\psi_k(r)$. Para un electrón que se propaga en el vacío, el momento puede tomar cualquier valor. En el interior de un cristal, sin embargo, la estructura periódica de la red limita los valores posibles del momento. Ello se debe a que la función de onda ha de reflejar las simetrías del cristal: si efectuamos un desplazamiento dado por un vector R que une dos átomos de la red, el resultado será indistinguible de la red original. En consecuencia, la función de onda desplazada, $\psi_k(r + R)$, deberá identificarse con la de partida, $\psi_k(r)$. Esta propiedad implica que el momento k del electrón solo puede tomar valores dentro de una región finita, denominada zona de Brillouin. Dicha región resulta tener un tamaño del orden de $2\pi/a$ en cada dirección, donde a denota la distancia típica entre dos nodos de la red. (Nótese que la zona de Brillouin no corresponde a ninguna región física del interior del cristal, sino que hace referencia a un espacio abstracto, el «espacio de momentos», definido por los distintos valores del momento del electrón.)

Una de las propiedades fundamentales de la zona de Brillouin es que sus bordes opuestos deben identificarse dos a dos, ya que ambos describen el mismo estado electrónico. La figura geométrica que se obtiene al «pegar» dichos bordes recibe el nombre de toro de Brillouin (véase el recuadro «Zona de Brillouin y bandas de energía»).

La estructura periódica de un cristal también determina las interferencias de las ondas asociadas a los electrones. En óptica, la interferencia de las

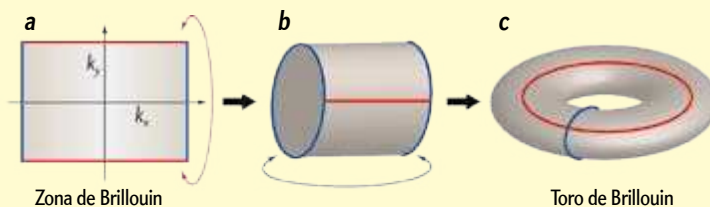
ondas luminosas se produce cuando la luz puede tomar varios caminos entre la fuente y el punto de observación. Cuando eso ocurre, en la zona de llegada de la luz se observan franjas de interferencia, las cuales quedan especificadas por la longitud relativa de los distintos caminos. En un sólido, la geometría del retículo provoca que las ondas electrónicas interfieran de manera constructiva o destructiva. La consecuencia práctica de dichas interferencias es que, para cada momento k del electrón, su ener-

ESTADOS ELECTRÓNICOS

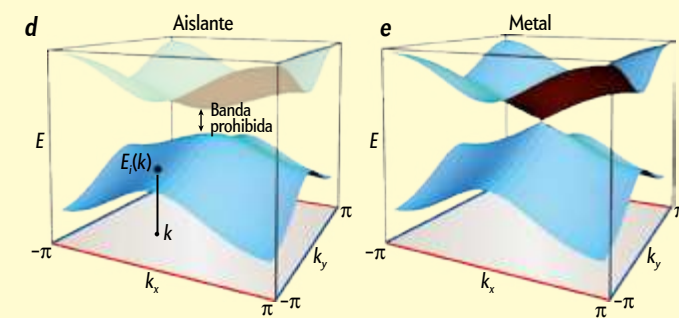
Zona de Brillouin y bandas de energía

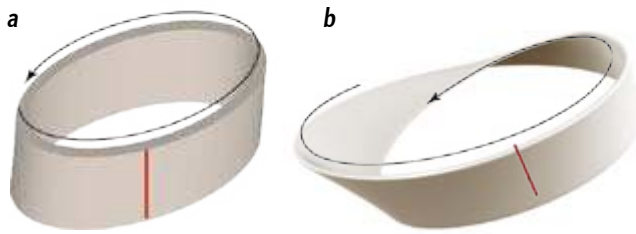
En un sólido cristalino, la estructura periódica de la red limita los valores que pueden tomar el momento k y la energía E de los electrones. Esa distribución de momentos y energías determina el carácter aislante o conductor de un material.

Para facilitar su representación gráfica, a continuación consideraremos el caso de un cristal bidimensional. El conjunto de valores que puede tomar cada una de las dos componentes del momento del electrón (k_x y k_y) configura una región en el espacio de momentos conocida como «zona de Brillouin» (a). Los extremos opuestos de una celda de Brillouin (rojo y azul) representan el mismo estado electrónico, por lo que deben identificarse dos a dos (a y b). La topología de la zona de Brillouin es, por tanto, la de un toro, una superficie cerrada que puede rodearse en dos direcciones distintas (c). Las propiedades topológicas de un material quedan determinadas por la manera en que se comporta la función de onda cuántica al recorrer el toro de Brillouin.



Para cada valor posible del momento (para cada punto del toro de Brillouin), la energía del electrón solo puede tomar ciertos valores: $E_1(k)$, $E_2(k)$, etcétera. El conjunto de energías $E_i(k)$ que se obtiene al considerar todos los valores posibles del momento k define la «banda de energía» E_i (superficies azules). Los electrones de un sólido van ocupando estas bandas en orden de energía creciente. De esta manera, las bandas de menor energía se encuentran llenas y las de energía superior, vacías. En un aislante (d), las bandas llenas están separadas de las vacías por un intervalo de energías prohibidas (gap). En un conductor (e) las bandas electrónicas están conectadas. Ello permite que los electrones puedan pasar con facilidad de una banda llena a otra vacía y, de esta manera, conducir la electricidad.





DIFERENCIAS GLOBALES: Las propiedades topológicas de un objeto no dependen de sus detalles locales, sino de su estructura global. Esta figura muestra una cinta normal (a) y una banda de Möbius (b). Sus secciones locales (rojo) resultan indistinguibles. Sin embargo, al dar una vuelta completa a cada una de las bandas, en un caso regresaremos al punto de partida y en el otro no. Esta propiedad es topológica, ya que no depende de los detalles particulares de la cinta, como su anchura o su longitud. De hecho, una cinta normal no puede convertirse en una de Möbius mediante transformaciones continuas.

gía solo puede tomar determinados valores: $E_1(k)$, $E_2(k)$, etcétera. El conjunto de valores $E_i(k)$ para todos los momentos k del toro de Brillouin define la «banda de energía» E_i .

Dependiendo de la naturaleza del cristal, las distintas bandas de energía se solaparán o quedarán separadas por un intervalo de energías prohibidas (*gap*). Esta estructura de bandas es la que determina las propiedades aislantes o conductoras de un material. En un aislante, la banda de menor energía se encuentra repleta de electrones; la siguiente banda energética está vacía; y una y otra quedan separadas por un intervalo de energías prohibidas. Si entre los extremos del sólido aplicamos un voltaje inferior al que corresponde a la banda prohibida, la energía electrostática no podrá transmitirse a los electrones y no circulará ninguna corriente. En un conductor, en cambio, las bandas de energía se tocan, por lo que incluso un pequeño voltaje bastará para comunicar energía a los electrones de la banda inferior y promocionarlos a la siguiente, lo que permitirá el paso de la corriente eléctrica.

UN ORDEN TOPOLÓGICO OCULTO

Así pues, un aislante es un sólido en el que algunas bandas de energía se encuentran repletas de electrones mientras otras se hallan vacías. Una vez conocida la estructura de bandas y la anchura de la banda prohibida, resulta interesante analizar las simetrías que exhiben las funciones de onda de las bandas llenas. Como veremos, en ellas puede esconderse un orden topológico insospechado.

Por simplicidad, supongamos que nuestro aislante solo posee una banda energética llena, $E_1(k)$. En ella, cada valor del momento k pertenece al toro de Brillouin describe un estado electrónico, por lo que tiene asociada una función de onda correspondiente, $\psi_k(r)$. Consideremos ahora el objeto matemático formado por todas las funciones de onda asociadas a la banda E_1 (una por cada punto k del toro de Brillouin) y preguntémosnos cómo cambian dichas funciones a medida que el momento k recorre todo el toro. Al dar una vuelta completa al toro de Brillouin y volver al punto de partida, ¿hallaremos la misma función de onda?

Como mencionábamos más arriba, toda función de onda viene dada por un módulo y una fase. Las sorpresas llegan al analizar el comportamiento de esta última. Tomemos un punto cualquiera k_0 del toro de Brillouin y consideremos la función

de onda $\psi_{k_0}(r)$. A medida que recorramos el toro, la función de onda variará de forma continua. Sin embargo, al dar una vuelta completa y regresar al punto k_0 , las reglas de la mecánica dictan que la función de onda resultante no tiene por qué ser idéntica a la de partida: ambas han de tener el mismo módulo, pero pueden diferir en una fase.

En general, las propiedades topológicas de un objeto se encuentran relacionadas con sus aspectos globales; es decir, no pueden distinguirse atendiendo únicamente a su comportamiento local. En nuestro caso, la variación de fase que puede experimentar la función de onda al dar una vuelta al toro de Brillouin es topológica, ya que no depende del punto en que hayamos iniciado nuestro recorrido, k_0 , ni del camino concreto que hayamos escogido para rodear el toro. Solo aparece al considerar las propiedades globales de este objeto y el conjunto de todas las funciones de onda definidas sobre él.

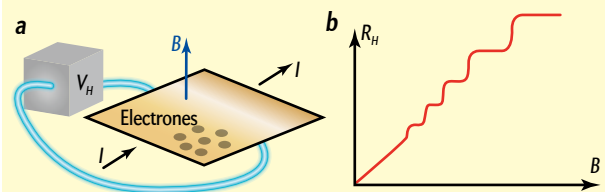
Dicha variación de fase es cero en casi todos los aislantes conocidos. En 1982, sin embargo, se descubrió que había un estado de la materia en el que no ocurría así. Dicho estado aparece durante el efecto Hall cuántico, un fenómeno que tiene lugar cuando un conjunto de electrones confinados a moverse en un plano se ven sometidos a un campo magnético externo muy intenso. El análisis de este estado de la materia puso de relieve la importancia de las propiedades topológicas y obligó a introducir una nueva noción de orden en materia condensada: el orden topológico. Este no se encuentra asociado a ninguna simetría, sino que caracteriza los estados de la materia según las propiedades topológicas de las funciones de onda electrónicas.

ORDEN TOPOLÓGICO

Efecto Hall cuántico

El primer estado topológico de la materia fue identificado al estudiar el efecto Hall cuántico. La versión clásica de este fenómeno tiene lugar cuando se hace pasar una corriente eléctrica I a través de una placa conductora en presencia de un campo magnético B perpendicular a ella (a). En tal caso, aparece una diferencia de potencial V_H perpendicular a la corriente aplicada. El cociente entre dicho voltaje y la intensidad de la corriente recibe el nombre de resistencia de Hall, $R_H = V_H/I$.

En 1980, Klaus von Klitzing observó que, a bajas temperaturas, los valores de la resistencia de Hall se encontraban cuantizados (b). Este efecto se debe a la aparición de niveles de energía discretos; es decir, separados por una «banda prohibida», tal y como ocurre en un aislante. En 1982, David Thouless, de la Universidad de Washington en Seattle, y sus colaboradores demostraron que los niveles de energía llenos del estado de Hall presentan un orden topológico relacionado con la fase cuántica de los electrones. La topología no trivial del efecto Hall se manifiesta en que los cuantos de resistencia solo dependen de constantes fundamentales de la naturaleza.



Durante más de dos décadas, el concepto de orden topológico quedó restringido al efecto Hall cuántico: un fenómeno exótico e interesante, pero asociado a unas condiciones físicas muy particulares. Esa visión saltó por los aires con el trabajo de Charles Kane y Eugene Mele, investigadores de la Universidad de Pensilvania. En 2005, estos dos físicos mostraron que un orden topológico también podía aparecer en algunos sólidos en su estado natural, sin necesidad de ningún campo magnético externo.

LA IMPORTANCIA DEL ESPÍN

Volvamos a los posibles estados electrónicos del toro de Brillouin. Hasta ahora, hemos pasado por alto una propiedad clave del electrón: su espín. El espín corresponde a una propiedad intrínseca de la partícula, como su carga o su masa. Constituye el análogo cuántico de un pequeño momento angular, y puede representarse mediante un vector S que apunte en una dirección arbitraria. A dicho vector se le asocian dos estados de espín, los cuales denotaremos por \uparrow y \downarrow según el espín apunte en el mismo sentido que S o en el opuesto. Este atributo cuántico del electrón implica que, en cada punto del toro de Brillouin, podemos tener no uno, sino dos estados electrónicos y, por tanto, dos funciones de onda: $\psi_{k\uparrow}(r)$ y $\psi_{k\downarrow}(r)$.

El trabajo de Kane y Mele consideraba cierto efecto dependiente del espín del electrón: la interacción espín-órbita. De origen relativista, esta surge debido a que, bajo ciertas circunstancias, el estado de espín puede influir sobre el movimiento del electrón. Los investigadores estudiaron qué restricciones imponía la interacción espín-órbita sobre la topología de las bandas electrónicas. En concreto, se interesaron por una de las propiedades fundamentales de dicha interacción: su invariancia bajo inversión temporal.

En general, una transformación de inversión temporal consiste en invertir las velocidades de las partículas (o, de manera equivalente, sus momentos) sin alterar sus posiciones. Al efectuar una transformación de este tipo, el espín del electrón también cambia. Consideremos la función de onda $\psi_{k\uparrow}(r)$ y llamemos $T\psi_{k\uparrow}(r)$ al resultado de aplicar sobre ella una transformación de inversión temporal. Sabemos que $T\psi_{k\uparrow}(r)$ debe describir un electrón con momento $-k$ y estado de espín \downarrow , por lo que cabría pensar que la función de onda transformada ha de ser $\psi_{-k\downarrow}(r)$. Pero, una vez más, las leyes cuánticas nos dicen que $T\psi_{k\uparrow}(r)$ y $\psi_{-k\downarrow}(r)$ no tienen por qué ser idénticas, sino que una y otra pueden diferir en una fase. ¿Reviste importancia dicha fase? En otras palabras, ¿podemos escogerla de tal modo que sea siempre nula?

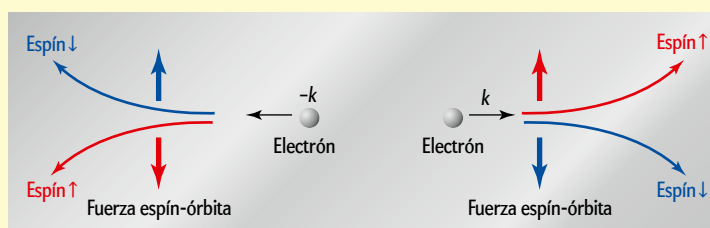
Una vez más, la respuesta depende de las propiedades topológicas del conjunto de funciones de onda definidas sobre el toro de Brillouin. Al estudiar el comportamiento de esta fase tras dar una vuelta completa al toro, Kane y Mele identificaron una nueva propiedad topológica, distinta de la que aparece en el efecto Hall cuántico. Dicha propiedad caracteriza un orden inusual y, por tanto, un nuevo estado de la materia: el de aislante topológico.

El primer estado de aislante topológico predicho tenía lugar en dos dimensiones espaciales: se trataba de una propiedad de los electrones restringidos a moverse en un plano y sometidos a una fuerte interacción espín-órbita. Por sus similitudes con

Interacción espín-órbita

El origen físico de las fases topológicas de un sólido se encuentra en la interacción espín-órbita, un efecto relativista por el que el espín del electrón puede influir en el movimiento de la partícula. En el caso de un electrón que orbita en torno a un núcleo, dicho efecto puede entenderse como debido al campo magnético que, en el sistema de referencia de reposo del electrón, genera el núcleo atómico al «girar» en torno al electrón.

La interacción espín-órbita suele desempeñar un papel secundario en física de la materia condensada. Sin embargo, sus consecuencias se hacen palpables en algunos materiales compuestos por átomos pesados. Ello se debe a que, cerca de un núcleo con un número atómico elevado, los electrones alcanzan velocidades relativistas, lo que aumenta la intensidad de la interacción espín-órbita.



La fuerza debida a la interacción espín-órbita actúa de forma análoga a un campo magnético. Para un electrón que avanza con momento k , la interacción desviará la partícula en un sentido o en el opuesto dependiendo de cuál sea su estado de espín \uparrow o \downarrow . De igual modo, un electrón con espín dado se verá desviado en un sentido u otro según su momento sea k o $-k$.

el efecto Hall cuántico, dicho estado fue denominado «efecto Hall cuántico de espín». En 2006, sin embargo, tres grupos teóricos independientes demostraron de forma simultánea que el efecto Hall cuántico de espín podía generalizarse a materiales tridimensionales. Es decir, que el mismo orden topológico podía existir de forma natural en un cristal. Aquel hallazgo disparó la búsqueda de materiales topológicos.

Una vez más, el tipo de orden que caracteriza a los aislantes topológicos no puede deducirse a partir de las propiedades locales de las funciones de onda. Ello garantiza la robustez de dichos materiales: al igual que una banda de Möbius no puede deformarse poco a poco hasta convertirla en una banda normal, las funciones de onda de un aislante topológico no pueden transformarse de manera continua en las de un aislante común. Ello implica que numerosas propiedades de estos materiales son insensibles ante pequeñas perturbaciones.

ESTADOS DE SUPERFICIE

Por exóticos que puedan resultar, los aislantes topológicos no habrían tenido tanto impacto si no fuese por una propiedad sorprendente: la existencia de estados metálicos, o conductores, en su superficie. Para entender la relación entre estos estados de superficie y el orden topológico, consideremos qué ocurre al tomar una porción de aislante topológico y rodearla de un aislante normal, como el aire. ¿Cómo describir la interfase entre ambos materiales?

Al cruzar la frontera que separa uno de otro, las bandas de energía y las funciones de onda del aislante ordinario dan paso

Continúa en la página 82