

FÍSICA

CRISTALES EN EL TIEMPO

Los cristales temporales son un nuevo
y sorprendente estado de la materia
que presenta la misma simetría
que los cristales ordinarios, pero
en el tiempo en vez de en el espacio

Frank Wilczek

Ilustración de Mark Ross Studio





Frank Wilczek es físico teórico en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. En 2004 recibió el premio Nobel de física por su trabajo en la teoría de la interacción fuerte y en 2012 propuso el concepto de los cristales temporales.



LOS CRISTALES

son las sustancias más ordenadas de la naturaleza. Sus átomos y moléculas se disponen en estructuras regulares que se repiten para dar lugar a sólidos estables y rígidos. Y también hermosos.

Estos materiales ya resultaban fascinantes y atractivos antes del nacimiento de la ciencia moderna y a menudo han sido apreciados como joyas. El afán de los científicos del siglo XIX por clasificarlos y comprender sus efectos sobre la luz trajo consigo importantes progresos en matemáticas y física. En el siglo XX, el estudio de la teoría cuántica que describe el comportamiento de los electrones en los cristales condujo a la electrónica basada en semiconductores y, en última instancia, a los teléfonos inteligentes e Internet.

El siguiente paso en nuestra comprensión de los cristales está teniendo lugar ahora, gracias a uno de los principios que se derivan de la teoría de la relatividad de Albert Einstein: el espacio y el tiempo están íntimamente conectados y se encuentran al mismo nivel. Por ello, resulta natural preguntarse si existen objetos que presenten propiedades análogas a las de los cristales ordinarios, pero en el tiempo en vez de en el espacio. Al explorar esta cuestión, descubrimos los «cristales temporales». Este nuevo concepto, junto con la clase creciente de materiales que engloba, ha conducido a fascinantes ideas físicas y podría servir para desarrollar relojes más precisos que los actuales, entre otras aplicaciones.

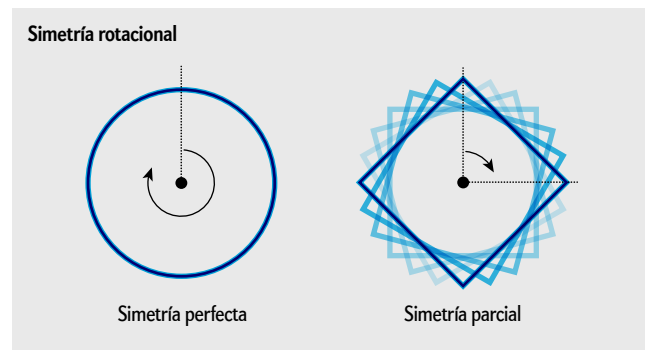
SIMETRÍA

Pero antes de nada, debemos aclarar qué es exactamente un cristal. La respuesta más útil a efectos científicos se apoya en dos conceptos profundos: la simetría y su ruptura espontánea.

En el lenguaje común, el término «simetría» se asocia con el equilibrio, la armonía o incluso la justicia. En física y matemáticas, su significado es más preciso: un objeto es simétrico o posee simetría si existe una transformación que, pudiendo cambiarlo, no lo hace.

Esta definición puede parecer extraña y abstracta, así que lo mejor es poner un ejemplo. Consideremos un círculo. Cuando lo rotamos un ángulo cualquiera alrededor de su centro, su aspecto no cambia, a pesar de que se hayan movido todos sus puntos: tiene una simetría rotacional perfecta. Un cuadrado

también tiene cierta simetría, pero menos que un círculo, ya que no recupera su apariencia hasta que lo rotamos 90 grados. Estos ejemplos muestran que el concepto matemático de simetría recoge un aspecto esencial de su significado habitual, al tiempo que añade la virtud de la precisión.



Una segunda ventaja de este concepto de simetría es que podemos generalizarlo de modo que se refiera no solo a las formas geométricas, sino también a las leyes físicas. Decimos que una ley tiene simetría si podemos cambiar el contexto en el que se aplica sin modificar la propia ley. Por ejemplo, el principal axioma de la relatividad especial es que las leyes de la física son las mismas cuando observamos el mundo desde distintas

EN SÍNTESIS

Los cristales corresponden a un estado ordenado de la materia donde la disposición de los átomos se repite con un cierto patrón. En la jerga de los físicos, se dice que presentan una «ruptura espontánea de la simetría bajo traslaciones espaciales».

Los cristales temporales, un nuevo concepto propuesto en 2012, son un estado de la materia cuyos patrones se repiten en el tiempo en vez de en el espacio. Estos sistemas muestran una ruptura espontánea de la simetría bajo traslaciones temporales.

En 2017 se descubrieron los primeros materiales nuevos que se ajustan completamente a la noción de cristal temporal. Esos materiales y otros encontrados desde entonces ofrecen la posibilidad de crear relojes aún más precisos que los actuales.

plataformas que se mueven entre sí a velocidad constante. Por lo tanto, la relatividad requiere que las leyes de la física presenten simetría frente a las transformaciones que cambian la plataforma.

Para los cristales, incluidos los temporales, resultan relevantes otra clase de transformaciones, muy sencillas pero de enorme importancia: las traslaciones. Mientras que la relatividad postula que las leyes no cambian para observadores en distintas plataformas móviles, la simetría bajo traslaciones espaciales establece que tampoco lo hacen para observadores que se encuentran en distintos lugares. Si trasladamos nuestro laboratorio de un sitio a otro, en la nueva ubicación seguirán siendo válidas las mismas leyes. En otras palabras, la simetría bajo traslaciones espaciales implica que las leyes que descubrimos en un lugar determinado se cumplen en cualquier otro.

La simetría bajo traslaciones temporales expresa una idea similar, pero referida al tiempo en vez de al espacio. Afirma que las leyes que rigen hoy en día también son válidas para los observadores del pasado y del futuro. Dicho de otra forma, las leyes que descubrimos en un momento determinado se cumplen en cualquier otro. La simetría bajo traslaciones temporales es tan importante que merece un nombre menos intimidatorio, con menos de catorce sílabas, así que la denotaré por la letra griega tau (τ).

Si no existieran las simetrías bajo traslaciones espaciales y temporales, los experimentos realizados en distintos lugares y momentos no serían reproducibles. La ciencia tal y como la conocemos no sería posible sin estas simetrías, y los científicos las dan por supuestas en su trabajo diario. Pero es importante subrayar que se pueden comprobar empíricamente. Una manera de hacerlo es observar el comportamiento de los objetos astrofísicos distantes. Estos se encuentran en otros lugares y, debido a la velocidad finita con que se propaga la luz, los vemos tal y como eran en el pasado. Los astrónomos han determinado con gran precisión que esos objetos obedecen las mismas leyes que conocemos aquí y ahora.

RUPTURA DE SIMETRÍA

Pese a su gran simetría estética, la característica definitoria de los cristales para un físico es la manera en que *carecen* de simetría.

Consideremos una idealización drástica: un cristal unidimensional cuyos átomos se distribuyen a intervalos regulares a lo largo de una línea, separados por una distancia d . (Por lo tanto, sus coordenadas serán nd , donde n es un número entero.) Si movemos este cristal un poco a la derecha, ya no tendrá el mismo

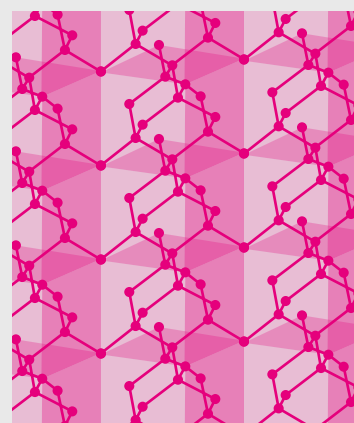
aspecto, salvo que la magnitud del desplazamiento coincida con la distancia d o con un múltiplo entero de ella. Eso indica que nuestro cristal idealizado tiene un grado reducido de simetría bajo traslaciones espaciales, del mismo modo que un cuadrado posee menos simetría rotacional que un círculo.

En verano de 2011 estaba preparando unas clases sobre este elegante capítulo de las matemáticas como parte de un curso sobre los usos de la simetría en física. Siempre procuro mirar con nuevos ojos el material que voy a enseñar e intento añadir

Ejemplos de patrones cristalinos complejos



Dos dimensiones (mosaico de la Alhambra)



Tres dimensiones (estructura del diamante)

algo nuevo. En aquella ocasión, se me ocurrió que sería posible extender la clasificación de los patrones cristalinos tridimensionales a un espaciotiempo de cuatro dimensiones.

Cuando le mencioné esta línea de investigación matemática a mi antiguo estudiante de doctorado Alfred Shapere, ahora en la Universidad de Kentucky, me instó a considerar dos preguntas físicas muy básicas que me embarcaron en una fascinante aventura científica:

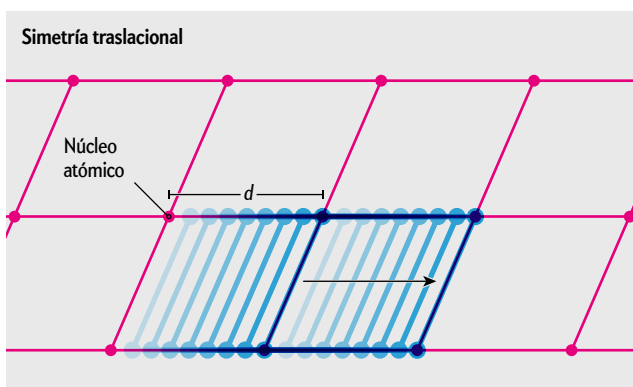
¿Qué sistemas del mundo real podrían describir los cristales espaciotemporales?

¿Podrían esos patrones llevarnos a identificar nuevos estados de la materia?

La primera pregunta es bastante fácil de responder: mientras que los cristales ordinarios son disposiciones ordenadas de objetos en el espacio, los cristales espaciotemporales son disposiciones ordenadas de eventos en el espaciotiempo.

Igual que con los cristales espaciales, podemos hacernos una idea considerando el caso unidimensional, en el que los cristales espaciotemporales se reducen a cristales puramente temporales. Buscamos, pues, sistemas cuyo estado global se repita a intervalos periódicos. Y no hace falta buscar mucho: la Tierra, por ejemplo, adopta la misma orientación espacial cada 24 horas y el sistema formado por la Tierra y el Sol repite su disposición al cabo de un año.

Durante décadas, científicos e inventores han desarrollado relojes cada vez más precisos a partir de sistemas que repiten su configuración a intervalos regulares. Los relojes de péndulo y de cuerda fueron remplazados por otros basados en las vibraciones de los cristales (tradicionales), que a su vez han sido desbancados por los relojes que emplean las vibraciones atómicas. Los relojes atómicos alcanzan precisiones extraordinarias, pero hay buenos motivos para seguir mejorándolos.



Y los cristales temporales podrían resultar de ayuda, como veremos enseguida.

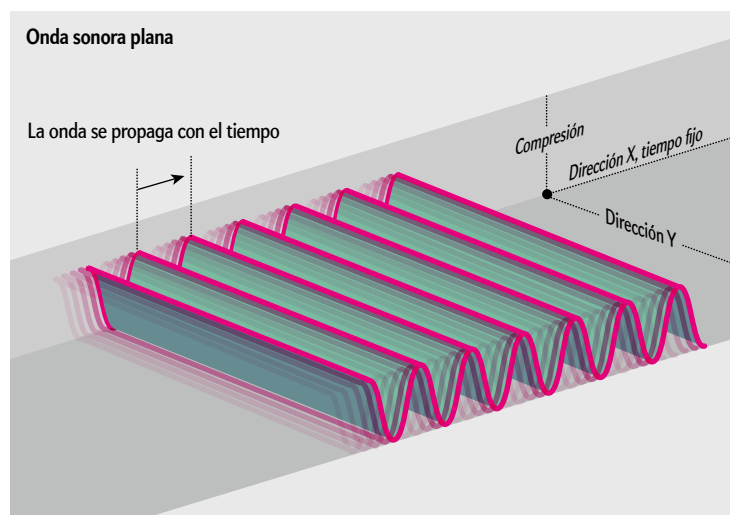
Algunos sistemas del mundo real también exhiben patrones propios de los cristales espaciotemporales de más dimensiones. Por ejemplo, el patrón de la figura que aparece bajo estas líneas puede representar una onda sonora plana, donde la altura de la superficie indica la compresión del aire en función de la posición y el tiempo. Seguramente no resulte fácil dar con cristales espaciotemporales más complicados en la naturaleza, aunque podría ser un reto interesante para ingenieros y artistas (imaginemos una espectacular versión dinámica de la Alhambra).

Sin embargo, estos tipos de cristales espaciotemporales no hacen más que renombrar fenómenos que ya conocemos. Para adentrarnos en territorios inexplorados, debemos considerar la segunda pregunta de Shapere. Y eso requiere introducir la idea de ruptura espontánea de simetría.

RUPTURA ESPONTÁNEA DE SIMETRÍA

Cuando un líquido o un gas se enfría y cristaliza, ocurre algo notable: la nueva solución de las leyes físicas (el cristal) presenta menos simetría que las propias leyes. Como esta reducción de la simetría aparece simplemente al bajar la temperatura, sin ninguna intervención externa especial, decimos que la simetría bajo traslaciones espaciales se rompe «espontáneamente».

Otra característica importante de la cristalización es que se produce un cambio brusco en el comportamiento del sistema, lo que en lenguaje técnico se llama una transición de fase discontinua. Por encima de una cierta temperatura crítica (que depende de la composición química del sistema y de la presión ambiente)



tenemos un líquido; por debajo de ella, un cristal, que es un objeto con unas propiedades muy diferentes. La transición ocurre de forma predecible y conlleva la emisión de energía en forma de calor. El hecho de que un pequeño cambio en las condiciones ambientales lleve a una sustancia a reorganizarse en un material cualitativamente distinto no deja de ser reseñable, por familiar que nos resulte (en el caso del agua y el hielo).

La rigidez de los cristales es otra de las propiedades que los distingue de líquidos y gases. Desde un punto de vista microscópico, surge porque el patrón organizado de los átomos del cristal persiste a grandes distancias y el sistema opone resistencia a los intentos de romper dicha ordenación.

Las tres propiedades de la cristalización que hemos mencionado (reducción de la simetría, transición de fase discontinua y rigidez) están íntimamente relacionadas. El principio básico que las explica es que los átomos «quieren» disponerse en configuraciones energéticamente favorables. Bajo distintas condiciones (por ejemplo, de presión y temperatura) pueden prevalecer diferentes configuraciones, o fases. Y cuando las condiciones cambian, a menudo presenciamos transiciones de fase discontinuas. La opción ganadora se impondrá en todo el material, ya que la formación de tales patrones requiere la acción colectiva de los átomos. Si se perturba el nuevo patrón, el sistema vuelve a su estado anterior.

Dado que la ruptura espontánea de simetría aúna un conjunto de ideas tan interesantes y con tantas implicaciones, me pareció importante explorar la posibilidad de que τ pudiera romperse espontáneamente. Mientras trabajaba en esa idea, se la expliqué a mi mujer, Betsy Devine: «Es como un cristal, pero en el tiempo». «¿Y cómo lo vas a llamar?», me preguntó intrigada por mi entusiasmo. «Ruptura espontánea de la simetría bajo traslaciones temporales», le dije, a lo que ella replicó: «Ni se te ocurra. Llámalos cristales temporales». Por supuesto, le hice caso. En 2012 publiqué dos artículos, uno de ellos con Shapere, que introducían este concepto. Así pues, un cristal temporal es un sistema en el que τ está espontáneamente rota.

Cabe preguntarse por qué nadie había combinado aún las ideas de τ y ruptura espontánea de simetría, que por separado se entendían bien desde hacía muchos años. La razón es que τ difiere de otras simetrías en un aspecto crucial, que hace de su posible ruptura espontánea una cuestión mucho más sutil. La

diferencia está relacionada con un profundo teorema demostrado por la matemática Emmy Noether en 1915 [véase «Cien años del teorema de Noether», por David E. Rowe; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2018]. El teorema de Noether conecta la simetría con las leyes de conservación, y demuestra que a cada forma de simetría le corresponde una cantidad conservada. En relación al problema que nos ocupa, el teorema de Noether afirma que τ implica la conservación de la energía. Y al contrario: cuando un sistema rompe τ , su energía no se conserva y esta deja de ser una cantidad útil para describirlo. (De manera más precisa, sin τ no es posible construir una cantidad similar a la energía e independiente del tiempo sumando las contribuciones de las partes del sistema.)

La visión habitual es que la ruptura espontánea de simetría ocurre porque la configuración con menor simetría es favorable desde el punto de vista energético. Si el estado de mínima energía rompe la simetría espacial y la energía del sistema se conserva, dicho estado persistirá una vez que se alcance. Así es como

los científicos explican la cristalización ordinaria.

Pero una explicación en términos energéticos no sirve para la ruptura de τ , ya que esta elimina la posibilidad de usar la energía. Esta evidente dificultad situó la posibilidad de la ruptura espontánea de τ , y la noción asociada de cristal temporal, más allá del horizonte conceptual de la mayoría de los físicos.

No obstante, hay un modo más general de entender la ruptura espontánea de simetría que sí es aplicable al caso de τ . En vez de reorganizarse espontáneamente para alcanzar un estado de menor energía, un material podría pasar a un estado que fuera más estable por otras razones. Por ejemplo, no es fácil desbaratar los patrones ordenados que se extienden a lo largo

de grandes distancias o períodos de tiempo e involucran muchas partículas porque la mayoría de fuerzas disruptivas actúan a pequeñas escalas locales. Así, un material podría aumentar su estabilidad adoptando un nuevo patrón que ocurriese a escalas mayores.

Por supuesto, ningún estado ordinario de la materia puede aguantar todas las disrupciones. Pensemos en los diamantes. Una mítica campaña de publicidad popularizó el eslogan «un diamante es para siempre». Pero, en la atmósfera adecuada y a suficiente temperatura, un diamante puede arder y convertirse en cenizas. En realidad, los diamantes no son un estado estable del carbono a las temperaturas y presiones habituales: se crean a presiones mucho más altas y, una vez formados, sobreviven mucho tiempo a presiones ordinarias. Pero los físicos estiman que un diamante acabará convirtiéndose en grafito si esperamos lo suficiente. También podría ser que las fluctuaciones cuánticas convirtiesen el diamante en un minúsculo agujero negro, aunque esto es aún menos probable. O que la desintegración de sus protones lo fuera erosionando poco a poco. En la práctica, un «estado de la materia» (como el diamante) es una configuración de una sustancia que presenta un cierto grado de estabilidad frente a un amplio abanico de cambios externos.

CRISTALES TEMPORALES ANTIGUOS Y NUEVOS

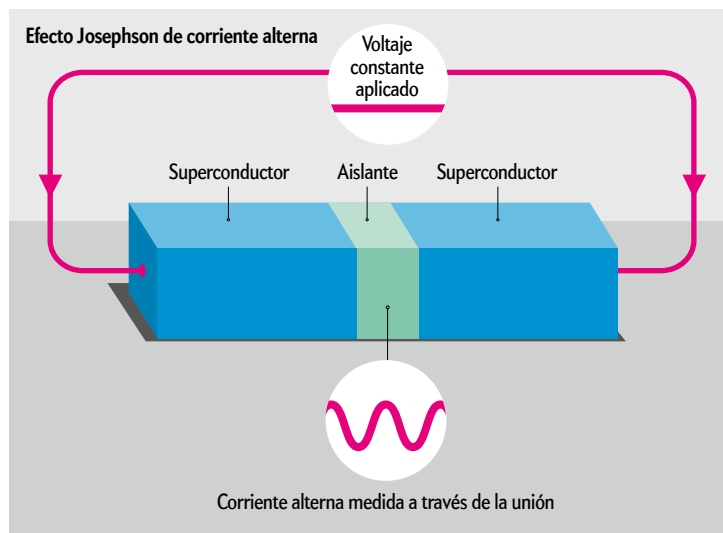
El efecto Josephson de corriente alterna es una de las joyas de la física y constituye el prototipo de una gran familia de cristales temporales. Se produce cuando aplicamos un voltaje constante V a través de un aislante que separa dos materiales superconductores (lo que se conoce como una unión Josephson, en honor del físico Brian Josephson). En esta situación, se observa una corriente alterna con frecuencia $2eV/\hbar$ a través de la unión, donde e es la carga del electrón y \hbar es la constante de Planck reducida. Por tanto, aunque la configuración física del sistema no varía con el tiempo (es decir, respeta τ), su comportamiento sí lo hace. La simetría completa bajo traslaciones temporales se ha reducido a una simetría bajo traslaciones temporales por múltiplos del período $\hbar/2eV$.

El efecto Josephson de corriente alterna encarna el concepto más básico de un cristal temporal. Sin embargo, en algunos aspectos, no es un sistema ideal. Para mantener el voltaje hay que cerrar el circuito y conectar una batería. Pero los circuitos de corriente alterna tienden a disipar calor y las baterías acaban por agotarse. Además, las corrientes oscilantes emiten ondas electromagnéticas. Por todas estas razones, las uniones Josephson no son completamente estables.

Introduciendo diversas mejoras (como circuitos superconductores, condensadores eficientes en lugar de baterías ordinarias y barreras para atrapar la radiación) es posible paliar sustancialmente esas deficiencias. Y otros sistemas basados en superfluidos o imanes en vez de en superconductores exhiben efectos físicos análogos, al tiempo que minimizan los problemas. En un trabajo reciente, Nikolay Prokof'ev y Boris Svistunov han propuesto excelentes ejemplos de cristales temporales usando dos superfluidos interpenetrantes.

Pensar en la ruptura de τ ha puesto el foco en estos asuntos y ha permitido descubrir nuevos ejemplos y diseñar experimentos útiles. Pese a ello, como la idea central ya estaba implícita en el trabajo de Josephson de 1962, parece adecuado referirse a todos estos sistemas como cristales temporales «antiguos».

Los «nuevos» cristales temporales llegaron con el número del 9 de marzo de 2017 de la revista *Nature*, cuya portada mostraba unos preciosos (y metafóricos) cristales temporales y anunciaba «Cristales temporales: Primeras observaciones de un nuevo estado exótico de la materia». En el interior, dos artículos independientes daban cuenta del descubrimiento. En uno de los experimentos, un equipo dirigido por Christopher Monroe, de la Universidad de Maryland en College Park, creó un cristal temporal a partir de una cadena de iones de iterbio. En el otro, el grupo de Mikhail Lukin en Harvard empleó un sistema formado por muchos miles de defectos (los llamados centros nitrógeno-vacante) de un diamante.



En ambos sistemas, los espines de los átomos (los iones de iterbio o los defectos del diamante) cambian regularmente de dirección, con lo que periódicamente se regresa a la configuración original. En el experimento de Monroe, los investigadores usaron láseres para invertir el espín de los iones y correlacionarlos, dando lugar a estados entrelazados. Como resultado, los espines de los iones comenzaron a oscilar, pero con solo la mitad de frecuencia que los pulsos láser. Lukin y su equipo emplearon pulsos de microondas para invertir los espines de los defectos del diamante. Observaron cristales temporales con períodos dos y tres veces mayores que el de los pulsos. En ambos estudios, los materiales recibieron estimulación externa (mediante láseres o pulsos de microondas), pero adquirieron un período diferente al de los estímulos. En otras palabras, rompieron la simetría temporal de forma espontánea.

Estos experimentos iniciaron una línea de trabajo en física de materiales que ha crecido hasta convertirse en una pequeña industria. Desde entonces han aparecido más materiales basados en los mismos principios (bautizados como «cristales temporales de Floquet») y se están investigando muchos otros.

Los cristales temporales de Floquet difieren en aspectos importantes de otros fenómenos relacionados descubiertos mucho antes. Por ejemplo, en 1831 Michael Faraday observó que, al agitar verticalmente una masa de mercurio con período T , el flujo resultante a menudo tenía período $2T$. Pero la ruptura de simetría en el sistema de Faraday —y en muchos otros estudiados hasta 2017— no permite establecer una separación clara entre el material y el estímulo (en este caso, el acto de agitar) y no presenta las señales distintivas de la ruptura espontánea de simetría. La

acción externa no deja de aportar energía (o entropía, siendo más precisos) al material, que la irradia en forma de calor.

Lo que sucede es simplemente que el sistema completo formado por el material y el estímulo posee menos simetría que este último por separado. Por el contrario, en los sistemas descubiertos en 2017, tras un breve régimen transitorio el material alcanza un estado estacionario en el que ya no intercambia energía o entropía con la acción externa. La diferencia es sutil pero clave desde el punto de vista físico. Los nuevos cristales temporales de Floquet representan fases de la materia distintas y muestran las señales típicas de la ruptura espontánea de simetría.

En ese sentido, la rotación de la Tierra o su revolución anual alrededor del Sol no constituyen cristales temporales. Su impresionante estabilidad viene impuesta por la conservación aproximada de la energía y del momento angular. Estas cantidades no toman los valores mínimos, así que no es posible justificar la estabilidad en términos energéticos. Dichos sistemas tampoco involucran patrones a gran escala. Pero precisamente debido a los enormes valores de la energía y el momento angular, introducir cambios significativos en ellos requiere perturbaciones grandes o que actúen durante mucho tiempo. Ciertamente, efectos como las mareas, la influencia gravitatoria de otros planetas o incluso la evolución del Sol alteran ligeramente esos sistemas astronómicos y obligan a corregir de vez en cuando las medidas de tiempo asociadas a ellos, como el día o el año.

En cambio, los patrones de los nuevos cristales temporales exhiben una gran rigidez y estabilidad. Eso proporciona una forma de dividir el tiempo con gran precisión, lo que podría resultar clave para construir relojes más avanzados. Los modernos relojes atómicos son prodigios de exactitud, pero carecen de la garantía de estabilidad a largo plazo de los cristales temporales. Estos nuevos estados de la materia podrían dar lugar a relojes más precisos y menos complicados, capaces de realizar medidas exquisitas de la distancia y el tiempo. Las aplicaciones irían desde sistemas GPS mejorados hasta nuevos métodos para descubrir cuevas subterráneas y depósitos minerales a través de su influencia en la gravedad, o incluso la detección de ondas gravitacionales. La Agencia de Proyectos Avanzados de Investigación para la Defensa de EE.UU. (DARPA) financia la investigación en cristales temporales con estas posibilidades en mente.

EL UNIVERSO DE τ

El conjunto de ideas y experimentos en torno a los cristales temporales y la ruptura espontánea de τ constituye un campo que se encuentra aún en su infancia. Hay muchas incógnitas por resolver y numerosos frentes de crecimiento. Un proyecto en curso es ampliar la lista de cristales temporales físicos —diseñando nuevos materiales de este tipo y descubriéndolos en la naturaleza— con ejemplos más prácticos y que muestren una mayor variedad de patrones espaciotemporales. Los físicos también pretenden analizar y comprender las transiciones de fase que hacen que la materia adquiera y abandone estos estados.

Otro objetivo es examinar en detalle las propiedades físicas de los cristales temporales (y también de los espaciotemporales, en los que tanto la simetría espacial como τ están espontáneamente rotas). El ejemplo de los cristales semiconductores mencionado al principio es inspirador: ¿qué descubriremos al estudiar la manera en que los cristales temporales modifican el comportamiento de los electrones y la luz que se propagan en su interior?

Una vez que hemos aceptado la posibilidad de tener estados de la materia donde interviene el tiempo, además de los cristales temporales podemos considerar cuasicristales temporales (materiales muy ordenados pero sin patrones repetitivos), líquidos temporales (en los que la densidad temporal de eventos es constante pero el período no lo es) y vidrios temporales

EXPERIMENTOS

Cómo hacer un cristal temporal

En los cristales ordinarios, los átomos repiten su disposición cada cierta distancia. De modo análogo, los cristales temporales son estados de la materia que se repiten cada cierto tiempo. Los primeros materiales nuevos que encajan en esta categoría fueron descubiertos en 2017 por dos equipos de investigación: uno liderado por Mikhail Lukin, de Harvard, y el otro por Christopher Monroe, de la Universidad de Maryland en College Park.

Cristal ordinario: se repite la posición del objeto



Cristal temporal: se repiten los eventos



El experimento de Lukin

El grupo de Lukin creó un cristal temporal manipulando los espines de los átomos en los llamados «centros nitrógeno-vacante» (impurezas en la red de un diamante). Los investigadores irradian periódicamente el diamante con pulsos láser. Entre dos pulsos, los espines segúan interaccionando entre sí. El sistema repitió periódicamente su configuración global, aunque no con el mismo período que los pulsos de microondas. En cambio, el sistema adoptó su propia frecuencia, inferior a la de los pulsos.

Tiempo →

Pulso de microondas

Interacciones

Pulso de microondas



Configuración de espines de los centros nitrógeno-vacante de un diamante

Configuración de espines alternativa


(con un patrón que parece perfectamente rígido pero que en realidad presenta pequeñas desviaciones). Los investigadores están explorando activamente estas y otras posibilidades y ya han identificado algunas formas de cuasicristales temporales y una clase de líquido temporal.

Hasta ahora hemos considerado fases de la materia en las que interviene τ . Concluiré con dos breves comentarios sobre τ en cosmología y en los agujeros negros.

La teoría del estado estacionario del universo, popular a mediados del siglo xx, constituyó un intento de mantener τ en cosmología. Este modelo postulaba que el estado del universo (o su aspecto) a grandes escalas no dependía del tiempo; es decir, que retiene la simetría bajo traslaciones temporales. Aunque el universo se expande, la teoría proponía una creación continua de materia que haría que la densidad media del cosmos se mantuviera constante. Pero aquel modelo no resistió la prueba del tiempo. Los astrónomos han reunido pruebas abrumadoras de que, hace 13.700 millones de años, tras la gran explosión, el universo era un lugar muy diferente, por más que rigieran las mismas leyes físicas. En ese sentido, τ está rota (quizás espontáneamente) por el universo en su conjunto. Algunos cosmólogos también han sugerido que nuestro universo es cíclico o que pasó por una fase de rápidas oscilaciones. Estas propuestas, que de momento no son sino especulaciones, nos acercan al conjunto de ideas relativas a los cristales temporales.

Finalmente, las ecuaciones de la relatividad general, que condensan nuestro conocimiento actual sobre la estructura del espaciotiempo, están basadas en la idea de que podemos especificar una distancia bien definida entre dos puntos próximos cualesquiera. No obstante, sabemos que eso deja de cumplirse al menos en dos situaciones extremas: cuando extrapolamos la teoría de la gran explosión a sus instantes iniciales, y en el interior de los agujeros negros. En otros dominios de la física,

el hecho de que las ecuaciones que describen el comportamiento de un determinado estado de la materia dejen de ser válidas suele indicar que el sistema va a experimentar una transición de fase. ¿Podría ser que en condiciones extremas (de presiones altas, temperaturas elevadas o cambios rápidos) el propio espaciotiempo abandone τ ?

En definitiva, el concepto de los cristales temporales ofrece la oportunidad de realizar avances teóricos (como comprender la cosmología y los agujeros negros desde otra perspectiva) y prácticos. Los nuevos tipos de cristales temporales que previsiblemente aparecerán en los próximos años deberían acercarnos a la meta de desarrollar relojes más perfectos y podrían presentar otras propiedades útiles. Al margen de esto, son sistemas interesantes en sí mismos que nos permiten ampliar nuestras ideas sobre cómo puede organizarse la materia. 

PARA SABER MÁS

Quantum time crystals. Frank Wilczek en *Physical Review Letters*, vol. 109, n.º 16, art. 160401, octubre de 2012.

Classical time crystals. Alfred Shapere y Frank Wilczek en *Physical Review Letters*, vol. 109, n.º 16, art. 160402, octubre de 2012.

Observation of a discrete time crystal. Jiehang Zhang et al. en *Nature*, vol. 543, págs. 217-220, marzo de 2017.

Observation of a discrete time-crystalline order in a disordered dipolar many-body system. Soonwon Choi et al. en *Nature*, vol. 543, págs. 221-225, marzo de 2017.

Time crystals: A review. Krzysztof Sacha y Jakub Zakrzewski en *Reports of Progress in Physics*, vol. 81, n.º 1, art. 016401, enero de 2018.

Time crystals in periodically driven systems. Norman Y. Yao y Chetan Nayak en *Physics Today*, vol. 71, n.º 19, págs. 40-47, septiembre de 2018.

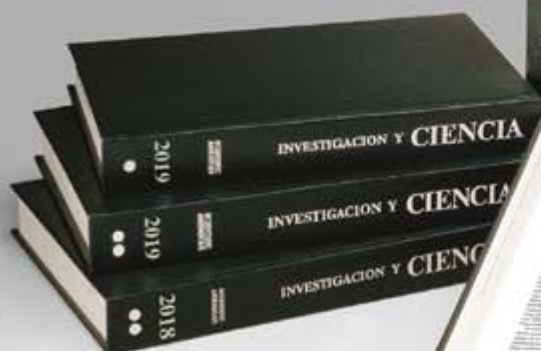
EN NUESTRO ARCHIVO

Cristales temporales. Piers Coleman en *IyC*, agosto de 2013.

LOS EJEMPLARES DE

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

FORMAN VOLUMENES DE INTERÉS PERMANENTE



Disponibles las tapas del año 2019

Para efectuar tu pedido:

☎ 935 952 368

✉ contacto@investigacionyciencia.es

🌐 investigacionyciencia.es/catalogo

Para que puedas conservar y consultar mejor la revista, ponemos a tu disposición tapas para encuadernar los ejemplares.