

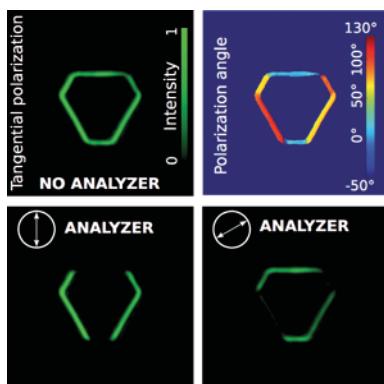
Puntos de interés

Descripción breve y sencilla de iniciativas docentes en nuestros colegios e institutos que han de ser resaltadas, de investigaciones relevantes de autores españoles o de extranjeros en instituciones españolas, y de otros hechos interesantes sobre ciencia y enseñanza, políticas educativa y científica y sus actores¹

CURVAS LÁSER CON POLARIZACIÓN NO UNIFORME

Todos estaríamos de acuerdo en que el láser es uno de los más importantes y versátiles instrumentos científicos de todos los tiempos que, desde su invención en 1960, no sólo ha transformado la ciencia y la tecnología, sino también nuestra vida cotidiana. Un haz láser se suele caracterizar por su distribución de intensidad, fase y polarización en el plano perpendicular a su dirección de propagación. Estas tres componentes son importantes para las múltiples aplicaciones del láser en ciencia y tecnología. En particular, la polarización describe la orientación de la oscilación del campo eléctrico de la luz. Superponiendo dos haces con polarizaciones ortogonales —por ejemplo, polarizaciones lineales perpendiculares entre sí o polarizaciones circulares a derecha y a izquierda— es posible construir un nuevo haz con polarización deseada; ya sea controlando la intensidad y/o el desfase entre tales haces. En la última década la creación de haces láser con polarización no uniforme, es decir con una polarización que puede ser diferente punto a punto, ha atraído el interés de la comunidad científica.

Recientemente, José A. Rodrigo y Tatiana Alieva, profesores de la Universidad Complutense de Madrid pertenecientes al Grupo Interdisciplinar de Computación Óptica (GICO-UCM), han desarrollado y demostrado experimentalmente



(*Scientific Reports*, DOI: 10.1038/s41598-018-26126-9) una técnica holográfica que permite diseñar y crear haces láser altamente enfocados con polarización no uniforme, con la ventaja de controlar independientemente su polarización, intensidad y fase a lo largo de curvas arbitrarias. Los autores han encontrado una expresión analítica a partir de la cual es posible crear fácilmente estos nuevos haces denominados como polimórficos vectoriales cuya polarización, intensidad, y fase pueden diseñarse a la carta de acuerdo a

la aplicación considerada. Éstos haces láser se pueden generar experimentalmente empleando un holograma generado por ordenador y un simple dispositivo interferométrico. Según señalan el Dr. Rodrigo y la Dra. Alieva, esta técnica permite, por ejemplo, crear fácilmente haces en forma

de curva con polarización lineal tangente o normal a ella, los cuales son de gran interés para el desarrollo de herramientas láser de fabricación y procesado de materiales tales como grabado, corte, ablación, soldadura, etc. Estos grados de libertad en el diseño del haz láser también se pueden explotar en aplicaciones como confinamiento y transporte óptico de micro- y nano-partículas (como ya demostraron los mismos autores en un trabajo anterior publicado también en *Scientific Reports*, DOI: 10.1038/srep33729), trampas láser para manipulación de átomos e iones, fabricación de metamateriales, etc.

PRIMERA UNIÓN TÚNEL FABRICADA CON UN MATERIAL 2D MAGNÉTICO

Las uniones túnel magnéticas son dispositivos que combinan capas de materiales magnéticos con



Ilustración por gentileza de Alberto García Gómez (albertogg.com).

otras de materiales no magnéticos, apiladas como el pan y el queso en un bocadillo. En los dispositivos clásicos las capas superior e inferior de la pila son imanes y están separadas por una barrera aislante situada en el centro que permite el paso de electrones por efecto túnel. La aplicación de un campo magnético externo permite controlar la orientación relativa de la imanación de las capas magnéticas del dispositivo dando lugar a un cambio abrupto en la resistencia eléctrica al pasar de una imanación paralela a una antiparalela. Este fenómeno, conocido como la magnetoresistencia túnel, permite el uso de estos dispositivos como sensores o transistores magnéticos. Por ejemplo, muchas cabezas lectoras de los discos duros de los ordenadores funcionan con uniones túnel magnéticas.

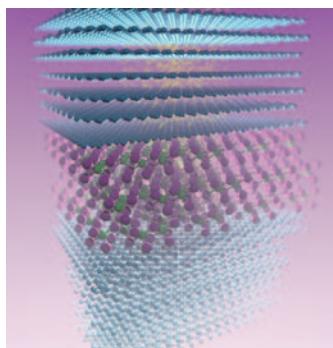
En un trabajo publicado en la revista *Science* (DOI: 10.1126/science.aar3617), una colaboración internacional liderada por Pablo Jarillo Herrero, profesor español de MIT, en la que participan otros cuatro científicos españoles, Efrén Navarro-Moratalla (Universidad de Valencia), José Luis Lado, David Soriano y Joaquín Fernández-Rossier (International Iberian Nanotechnology Laboratory, INL), se ha presentado una nueva forma de fabricar uniones túnel magnéticas a partir de un material 2D magnético. En concreto los investigadores hacen uso de capas de espesor atómico de triyoduro de cromo, el primer cristal bidimensional que presenta orden ferromagnético, descu-

1 Sección preparada por la redacción de la *Revista Española de Física*, en colaboración con actores implicados, que anima a proponer contribuciones relevantes para ser consideradas aquí.

bierto en 2017 también por el grupo del Dr. Pablo Jarillo y publicado en *Nature* (DOI: 10.1038/nature22391).

En las uniones túnel magnéticas convencionales, los imanes superior e inferior están fabricados a base de capas finas de metales o aleaciones magnéticas. Dada su naturaleza metálica, actúan como electrodos magnéticos, separados por una barrera túnel no magnética, que en general es un aislante de varios nanómetros de espesor. En los nuevos dispositivos a base de materiales 2D se cambia esta configuración por completo: **las capas exteriores están hechas de un conductor no magnético, mientras que el material magnético se encuentra en la propia barrera túnel**. En concreto, se emplea un número pequeño (entre 2 y 4) de monocapas de triyoduro de cromo como barrera túnel para separar dos electrodos no magnéticos de grafito. Estos dispositivos presentan valores de la magnetoresistencia túnel de hasta un 500% a una temperatura de 4 K. Valores incluso mayores de magnetoresistencia en dispositivos similares han sido asimismo presentados por el grupo de Xiadong Xu de la Universidad de Seattle, también en *Science* (DOI: 10.1126/science.aar4851), y por el grupo de Alberto Morpurgo, en *Nature Communications* (DOI: 10.1038/s41467-018-04953-8) que han seguido la misma aproximación novedosa.

En el caso de las uniones túnel magnéticas convencionales que operan en dispositivos comerciales, han sido necesarias décadas de perfeccionamiento en las técnicas de fabricación de mult capas usando materiales conocidos desde hace siglos, como el hierro, para lograr su optimización. El **descubrimiento reciente de materiales ferromagnéticos 2D** ha abierto la puerta a una estrategia diferente para la fabricación de dispositivos túnel magnéticos, que consiste en el apilamiento de diferentes materiales bidimensionales. Esta técnica, conceptualmente rudimentaria, permite solventar de forma ingeniosa los desafíos tecnológicos asociados a procedimientos de nanofabricación



convencionales. Además, los dispositivos reportados en *Science* permiten estudiar el espectro de excitaciones magnéticas (magnones) del triyoduro de cromo, haciendo uso de la llamada **espectroscopía de electrones túnel**. En los últimos meses, otros grupos han reportado el descubrimiento de otros materiales bidimensionales con orden magnético, algunos

de ellos a temperatura ambiente. Esto permite vislumbrar el desarrollo futuro de uniones túnel, y otros dispositivos magneto-electrónicos, basados en cristales bidimensionales, operando a temperatura ambiente.

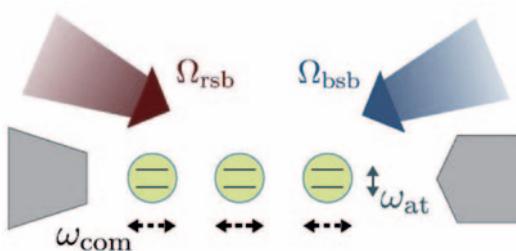
EL SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA Y LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS

El segundo principio de la termodinámica establece qué procesos pueden ocurrir espontáneamente. Una de sus consecuencias es que el rendimiento de cualquier tecnología es limitado; la calidad de la energía se degrada en cada proceso y es imposible recuperar la situación inicial. Durante los próximos años se espera una **revolución tecnológica basada en la mecánica cuántica**. El segundo principio de la termodinámica también se cumple en sistemas microscópicos, pero el principio de superposición, el entrelazamiento y la coherencia cuántica introducen matices importantes en su formulación. **Uno de los retos de la termodinámica cuántica es entender cómo todas estas propiedades pueden aprovecharse para diseñar máquinas que superan las limitaciones de los sistemas clásicos.**

En un trabajo publicado recientemente en *Nature Communications* (DOI: 10.1038/s41467-018-04407-1) en el que participan los investigadores Jordi Mur (Universidad de Oxford), Rafael Molina (Instituto de Estructura de la Materia, IEM-CSIC) y Armando

Relaño (Universidad Complutense de Madrid), se ha estudiado cómo se manifiesta la **irreversibilidad en sistemas cuánticos pequeños**. Como señala el Dr. Relaño, en particular el trabajo se centra en cómo se degrada la información en procesos de no equilibrio, y cómo esa pérdida de información útil puede compensar, en parte, la degradación de la energía. Concretamente, se formulan dos teoremas que generalizan los de Jarzynsky y Tasaki-Crooks, válidos para **sistemas cuyo estado de equilibrio solo depende de la temperatura**; son dos teoremas aplicables para cualquier tipo de proceso de no equilibrio, con independencia de la naturaleza de los estados iniciales y de la "trayectoria" seguida por el proceso. Gracias a ellos, y a partir de simulaciones numéricas en el modelo de Dicke, realizable experimentalmente con tecnologías de átomos ultrafríos y circuitos superconductores, se ha proporcionado un **mecanismo para rastrear cuánta información cuántica hay almacenada en estados de equilibrio**.

Si bien el trabajo es de naturaleza puramente teórica, los autores esperan que sus resultados puedan utilizarse para diseñar máquinas cuánticas más eficientes. La información almacenada en los estados de equilibrio permite aumentar el trabajo mecánico extraíble del sistema; también puede utilizarse



para diseñar **termómetros aplicables a sistemas cuánticos pequeños a bajas temperaturas, y sensores cuánticos basados en teoría cuántica de la información y en termodinámica cuántica**. Hay actualmente un gran esfuerzo europeo con un proyecto emblemático en tecnologías cuánticas (*Flagship on Quantum Technologies*); su objetivo es transformar los conocimientos sobre física cuántica en aparatos útiles y comercializables. Confiamos en que los resultados presentados ayuden en este esfuerzo.

CABLES MOLECULARES DE ALTA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Investigadores de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), el Instituto de Física de la Materia Condensada (IFIMAC) y el IMDEA Nanociencia han conseguido aislar y medir la resistencia eléctrica a nivel de molécula individual de cadenas de polímeros metal-orgánicos. El trabajo, publicado en la revista *Advanced Materials* (DOI: 10.1002/adma.201705645), demuestra que dichas cadenas se pueden aislar fácilmente desde fase líquida y que la corriente medida a través de las mismas sobrepasa la del resto de cables moleculares conocidos hasta la fecha.

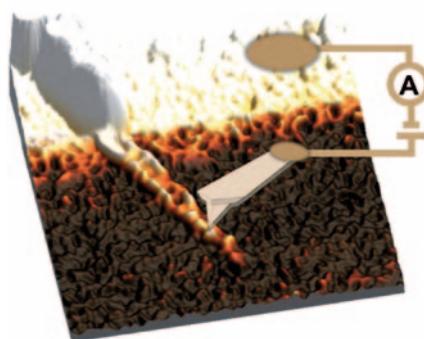
Los cables moleculares son componentes esenciales para la futura nanoelectrónica. Sin embargo, la preparación de moléculas individuales capaces de conducir corriente eléctrica a largas distancias representa todavía un gran desafío.

Lo que han conseguido los investigadores de la UAM es, en primer lugar, preparar de forma sencilla fibras y cadenas individuales de polímeros metal-orgánicos MMX, consistentes en secuencias quasi-unidimensionales de átomos de haluros (X) que unen subunidades basadas en dos iones metálicos (MM) conectados por ligandos orgánicos, obteniéndolas de forma directa desde fase líquida. Y en segundo lugar, medir sus propiedades de conducción eléctrica hasta distancias superiores a 250 nm, lo que supone las mayores distancias para las que se ha medido corriente en cables moleculares al nivel de molécula individual.

Según señala el Dr. Ares, en dichas medidas se ha podido cuantificar la resistencia eléctrica a lo largo de una cadena formada por tan solo una o dos moléculas, observando una dependencia exponencial de la misma. Los cálculos teóricos basados en su estructura de bandas predicen una conductancia eléctrica todavía más alta que la medida experimentalmente. La realidad es que durante la formación de las cadenas se originan defectos estructurales, los cuales se han incluido en las simulaciones teóricas realizadas en este trabajo, confirmando que la corriente que circula por las mismas está limitada por

dichos defectos, principalmente por vacantes de átomos de iodo a través de los cuales tiene que circular la corriente. Los cálculos teóricos así realizados reproducen el comportamiento exponencial observado experimentalmente, que se atribuye a localización de Anderson (una mayor dificultad en el movimiento de los electrones debido a la interferencia que producen los defectos).

Los resultados de este trabajo postulan las cadenas de polímeros MMX como candidatos a futuros cables moleculares, poniendo de relieve el papel



que juegan los defectos en las propiedades de transporte de cables unidimensionales y su importancia para la electrónica molecular.

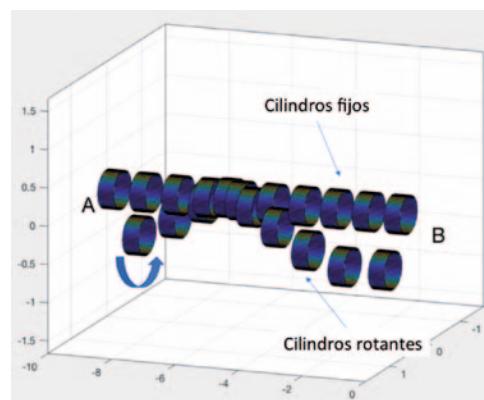
MODULACIÓN ESPACIO-TEMPORAL EN MATERIALES

El diseño de materiales o sistemas con propiedades térmicas no-recíprocas es uno de los grandes retos de la ciencia de materiales en general. También llamados "diodos térmicos", por su analogía con los diodos electrónicos, los sistemas térmicos no-recíprocos permiten el flujo de calor en un sentido pero no en el otro, de modo que se comportan de manera análoga a como lo hacen los diodos semiconductores con la corriente eléctrica.

Existen diversas propuestas para la realización de diodos térmicos, no obstante éstas siempre van acompañadas de dos elementos indispensables para obtener no-reciprocidad: una estructura asimétrica y un componente no-lineal. La combinación de estos dos elementos puede dar lugar a propiedades no-recíprocas para la propagación del calor, pero presentan un notable inconveniente: la respuesta no-lineal estará limitada, entre otros factores, en frecuencia

y temperatura, por lo tanto el efecto es observable con ciertas limitaciones.

En un estudio reciente publicado en la revista *Physical Review Letters* (DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.125501) el Dr. Daniel Torrent, de la Universitat Jaume I de Castellón (UJI), en colaboración con investigadores de la Universidad de Burdeos (Francia), ha demostrado que la llamada "modulación espacio-temporal" puede ser una alternativa interesante para la realización de materiales no-recíprocos. Según explica el Dr. Torrent, un material modulado espacialmente es un material cuyas propiedades (constante dieléctrica, densidad, conductividad térmica, etc.) dependen de la posición. Así pues, el clásico material multicapa, en el que dos materiales tipo A y B se alternan formando una estructura periódica, es un ejemplo de material modulado espacialmente. Un material modulado "temporalmente" es más difícil de imaginar (y de realizar), y consiste en un material cuyas propiedades no son constantes en el tiempo. Un ejemplo sencillo podría ser un material cuya conductividad térmica depende, por ejemplo, de un campo eléctrico aplicado. Si variamos temporalmente el campo eléctrico aplicado, también lo hará la conductividad térmica. La combinación de ambas modulaciones da lugar a una modulación "espacio-temporal", aunque en general entendemos por dicha modulación un caso particular en el que la dependencia de las propiedades del



material son en forma de onda viajera, es decir, funciones de $x-v_0 t$.

Una posible realización mecánica de dicho material puede verse en la figura: Imaginamos una serie de cilindros metálicos fijos en el espacio, y otra serie de cilindros en espiral que puede rotar

como se indica. Es evidente que si tuviéramos que definir una función para describir la conductividad térmica de dicha estructura sería de la forma indicada anteriormente, ya que hay un pico de conductividad que “viaja” por la estructura (en la citada referencia pude verse una animación de la figura que ayuda a su visualización).

Como explica el Dr. Torrent, es fácil imaginar que un “material” con esa estructura tendrá propiedades térmicas no-recíprocas: si fijamos el extremo A a una temperatura más elevada que el B, y la rotación de los cilindros se sincroniza con el tiempo de difusión térmica del metal, el calor fluirá rápidamente de A a B. Por el contrario, es fácil ver cómo el calor no puede fluir de B a A tan fácilmente. Puede demostrarse que si los cilindros pueden ceder calor al medio que los rodea, el flujo en la dirección B → A es prácticamente nulo, por lo tanto **este sistema se comporta como un diodo térmico**, salvando muchas de las dificultades que plantean otros sistemas basados en elementos no lineales.

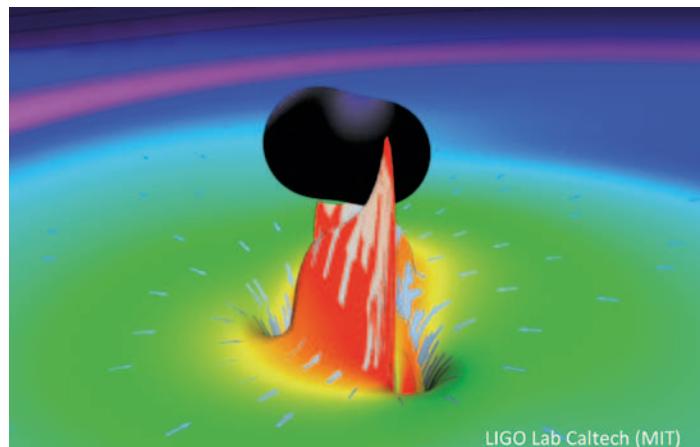
ECOS DE AGUJEROS DE GUSANO

La detección de ondas gravitacionales producidas durante la colisión de agujeros negros por parte de las colaboraciones LIGO y Virgo permitirá verificar muchas **propiedades de estos objetos que hasta ahora pertenecían al terreno de la física estrictamente teórica**. En particular, será posible poner a prueba la existencia de horizontes de eventos, que son precisamente la característica principal de los agujeros negros. Según observaron Cardoso y otros [Phys. Rev. D 94 (2016) n.º 8, 084031], una posible forma de distinguir si los objetos que hasta ahora asumíamos como agujeros negros son realmente tales o, sin embargo, son alguna clase de “objeto exótico compacto”, es **mediante la búsqueda de posibles ecos en la parte final de la señal de onda detectada**. En presencia de horizontes, durante la fase final de la colisión de los agujeros negros, conocida como “ringdown”, la señal gravitacional oscila como resultado de las vibraciones del objeto resultante tras la colisión, para poco después apagarse completamente. **Si en vez de horizonte existe algún tipo de estructura, o una garganta,**

como en el caso de un agujero de gusano, la señal vuelve a crecer y oscilar momentáneamente en intervalos cuasiperiódicos que se van apagando poco a poco. A estas oscilaciones se las conoce como ecos, y su presencia en la señal representaría una prueba casi definitiva de que los presuntos agujeros negros son en realidad algún tipo de objeto exótico sin horizonte. La búsqueda de ecos precisa de formas de onda teóricas con las cuales comparar la señal medida, lo que implica la necesidad de modelizar objetos compactos alternativos a los agujeros negros. Algunos objetos exóticos compactos hipotéticos que han sido considerados en la literatura incluyen las estrellas de bosones, las “estrellas de gravedad” (gravastars) o los agujeros de gusano. En un trabajo publicado en *Physical Review D* (DOI: 10.1103/PhysRevD.97.024040) en el que participan los investigadores Pablo Bueno (Institute

los cuales corresponden a los modos y frecuencias propias de un sistema dissipativo. Estas frecuencias resultan ser muy distintas a los de un agujero negro. Sin embargo, han encontrado que los modos que más se excitan son precisamente aquellos que están cercanos a los modos que tendría un agujero negro. **Esta es una predicción concreta que podría verificarse experimentalmente, y que debería ser genérica para cualquier tipo de objeto alternativo a los agujeros negros.** Además, este hecho junto la observación de que los modos cuasi-normales de agujeros de gusano son parecidos a una base de Fourier, nos permiten producir una estimación muy aproximada de la forma de onda de los ecos gravitacionales.

Es importante enfatizar que la existencia de agujeros de gusano presenta numerosas dificultades teóricas, por lo que su posible existencia es bastante



LIGO Lab Caltech (MIT)

for Theoretical Physics, Leuven, Bélgica) y Pablo A. Cano (Instituto de Física Teórica, UAM/CSIC) se ha avanzado en la modelización de formas de onda de ecos, y para ello se centran en un modelo concreto, consistente en un nuevo tipo de agujeros de gusano en rotación. Como señalan los Dres. Bueno y Cano, **los objetos que proponen serían muy parecidos a un agujero negro de Kerr salvo que nos acercásemos mucho a la región cercana al horizonte, donde en su lugar habría una “garganta”**. Desde el punto de vista de un observador externo, serían prácticamente indistinguibles de un agujero negro salvo por la existencia de ecos en la radiación gravitacional resultante. Para caracterizar la forma de onda producida por estos agujeros de gusano han estudiado las frecuencias y modos cuasi-normales de estos objetos,

improbable. Sin embargo, como indican los Dres. Bueno y Cano, **desde el punto de vista teórico representan modelos sencillos en los que no es necesario preocuparse de la estructura interna (ya que no existe, en su lugar hay una garganta)**. En general, la mayoría de modelos alternativos presentan algún tipo de inconveniente, pero la posibilidad que se nos abre de poner a prueba su posible existencia hace imprescindible considerarlos. De hecho, algunos autores aseguran que LIGO ya ha detectado la presencia de ecos en las señales gravitatorias [p.e., Afshordi et al. Phys. Rev. D 96 (2017) n.º 8, 082004], aunque la percepción de la comunidad es que se necesitará más tiempo para dar una respuesta definitiva. **Si los ecos están ahí, es seguro que darán lugar una de las revoluciones científicas del siglo xxi.**