

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

PROPIEDADES ELECTRÓNICAS Y EFECTO DE ANTILOCALIZACIÓN EN PELÍCULAS DELGADAS DEL AISLANTE TOPOLÓGICO Bi_2Se_3

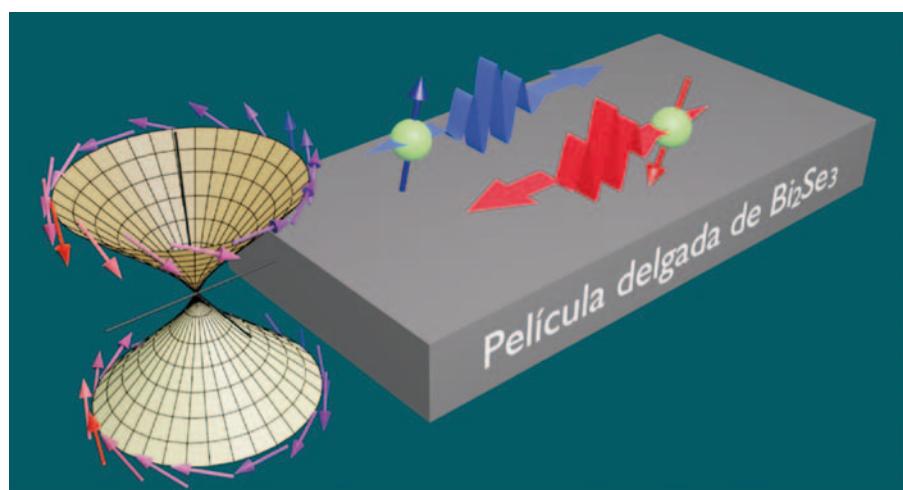
La naturaleza cuántica de la materia se pone de manifiesto una vez más en los materiales topológicos, cuya estructura de bandas posee una topología no convencional que les confiere propiedades únicas. Tal es el caso de los **aislantes topológicos**, materiales que se comportan como aislantes en su interior, pero que albergan estados conductores de la electricidad en su superficie. Estos estados se caracterizan, por un lado, por estar protegidos topológicamente, lo que les proporciona gran robustez frente a la dispersión por defectos, permitiéndoles conducir la electricidad con bajas pérdidas. Por otro lado, la interacción espín-órbita en ellos es muy intensa, lo que hace que la orientación del espín de los electrones esté condicionada por la dirección en la que se mueven. Esto último se conoce como acoplamiento espín-momento, y es la principal causa de algunos de los fenómenos más interesantes presentes en estos sistemas.

Recientemente, los investigadores Rubén Gracia-Abad, Soraya Sangiao y José María de Teresa, del Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA), en colaboración con Chiara Bigi, Sandeep Kumar Chaluvadi y Pasquale Orgiani, del Istituto Officina dei Materiali (IOM) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) de Trieste (Italia), han publicado un artículo en la revista *Nanomaterials* (DOI: 10.3390/nano11051077) en el que se revisan las propiedades electrónicas del Bi_2Se_3 , uno

de los aislantes topológicos que más interés ha despertado en los últimos años debido a la sencillez de su estructura de bandas y a su versatilidad a la hora de ser combinado con otros materiales. Este estudio se centra en el transporte electrónico en películas delgadas de este material, y presta especial atención al efecto de antilocalización débil. Este efecto tiene su origen en las leyes cuánticas que gobiernan el comportamiento de los electrones, el cual viene determinado por la longitud de coherencia, que



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



se define como la distancia media que un electrón puede recorrer dentro del material sin perder la información sobre su fase. Cuando la temperatura baja, los efectos cuánticos se hacen más significativos y esta distancia crece, dando lugar a fenómenos de interferencia cuántica. En concreto, los electrones que realizan trayectorias cerradas pueden interferir consigo mismo, y debido al acoplamiento espín-momento, lo hacen dando lugar a interferencias destructivas, que se traducen en una disminución global de la resistencia eléctrica en el material. Al aplicar un campo magnético, este efecto desaparece, lo que permite su caracterización.

Mediante medidas de magnetotransporte, han analizado la evolución de este efecto al variar el espesor, la temperatura y el campo magnético aplicado, y a partir de los datos obtenidos,

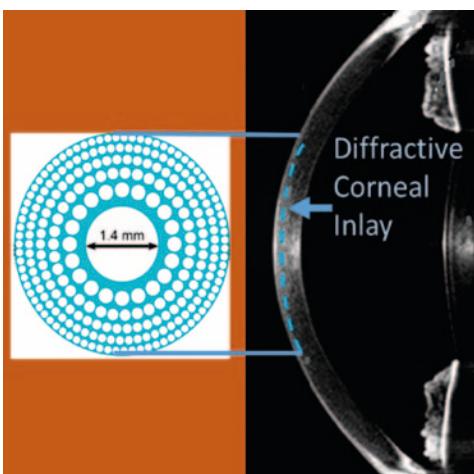
cotejándolos con los datos reportados en experimentos anteriores, se muestra que este efecto es universal y puede estar originado tanto por los estados topológicos presentes en la superficie como por los estados residuales que contribuyen en el interior del material, debido a defectos creados de forma natural. Esto permite entender la naturaleza del transporte electrónico en el material y determinar la influencia de los estados superficiales. Además, se observa que, a pesar de encontrar una gran variabilidad en las propiedades de las muestras, existe una relación que permite predecir la longitud de coherencia a partir de la movilidad electrónica de la muestra. Todo esto abre una vía para seguir avanzando en la comprensión del Bi_2Se_3 y en su implementación en aplicaciones como computación cuántica y espintrónica.

¹ Sección preparada por Augusto Beléndez, en colaboración con actores implicados, que anima a proponer contribuciones relevantes para ser consideradas aquí.

PRIMER IMPLANTE INTRACORNEAL TRIFOCAL PARA EL TRATAMIENTO DE LA PRESBICIA

El uso de implantes intracorneales (IC) es uno de los procedimientos quirúrgicos más recientes en oftalmología para el tratamiento de la presbicia. En esta técnica se crea una cavidad en el estroma corneal con un láser de femtosegundo donde el IC es implantado por el cirujano. Los diseños actuales de los IC son dispositivos ópticos, bien refractivos o bien de efecto estenopeico. Con los primeros se consigue un efecto bifocal que permite una buena visión de objetos cercanos (lectura) y lejanos, pero **no proporciona buenas imágenes a distancias intermedias** (ordenador, dispositivos móviles), mientras que los segundos aportan una extensión de la profundidad de campo, pero **tienen bajo rendimiento a distancias cercanas**. Por estos motivos, los IC actuales solo se implantan en el ojo no dominante, creando en el paciente un efecto de cuasimonovisión que a menudo crea problemas en la visión estereoscópica. Además, una limitación de

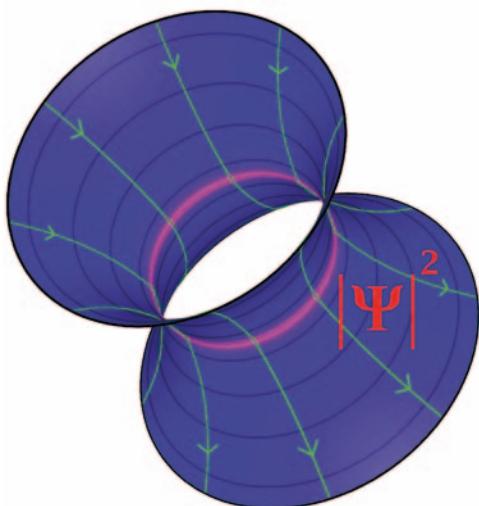
Valencia, de la Universidad Politécnica de Valencia, y Salvador García-Delpuebla de la Fundación Aiken, ha propuesto el **primer IC trifocal, que supera todos los hándicaps de sus precedentes**, pues, a diferencia de éstos, utiliza una lente difractiva diseñada usando el concepto de *photon sieve* (tamiz de fotones) de fase. De esta forma, estos IC difractivos están conformados por un anillo transparente fabricado con un material biocompatible (un hidrogel de silicona con un índice de refracción de 1,458) cuyo espesor, menor que 5 micras, una vez implantado dentro el estroma corneal, no tendría prácticamente efectos sobre su estructura. Con miles de microagujeros en su superficie distribuidos en las zonas pares de una placa de zonal de Fresnel se crean tres focos difractivos con los órdenes de difracción (-1, 0 y +1). De este modo, el nuevo implante es capaz de convertir a la córnea en un sistema óptico trifocal que, **al ser de fase y tener mejor eficiencia difractiva, podría implantarse en ambos ojos**, señala el Dr. Furlan. Además permitiría un mejor flujo de nutrientes en el estroma corneal. En el artículo se han demostrado numéricamente las buenas prestaciones del nuevo IC difractivo en formación de imágenes, en comparación con un IC refractivo disponible en el mercado, tanto a distancias cercanas e intermedias como para objetos a distancias lejanas. **Los buenos resultados fueron confirmados experimentalmente empleando un simulador óptico basado en óptica adaptativa.** Por otra parte, este nuevo dispositivo IC, al ser el primer implante difractivo totalmente transparente, **sería completamente compatible con la cirugía refractiva con láser, así como con cirugía de cataratas**. El Dr. Furlan concluye que el siguiente paso de este proyecto es la construcción física de los primeros prototipos para luego caracterizarlos y posteriormente comenzar con los ensayos clínicos.



los dispositivos IC actuales es que, para evitar el riesgo de rechazo, debe asegurarse que los mismos no impidan el flujo de nutrientes en el tejido circundante.

En un artículo publicado recientemente en la revista *Scientific Reports* (DOI: 10.1038/s41598-021-86005-8), un equipo de investigadores formado por Walter D. Furlan y Diego Montagud-Martínez, de la Universidad de Valencia, Vicente Ferrando y Juan Antonio Monsoriu, de la Universidad de

Estos objetos teóricos aparecen como soluciones de las ecuaciones de Einstein. Es sabido que la existencia de un agujero de gusano atravesable requiere de una distribución de energía alrededor de la garganta que viola varias condiciones energéticas. Por ello, modelos anteriores típicamente introducen materia exótica.



Por materia exótica se entiende materia que no entra en la descripción propuesta por el modelo estándar de partículas. Por ejemplo, el campo escalar fantasma, que poseen una energía cinética negativa. Este es un tipo de materia nunca observado en la naturaleza.

Los campos escalares, utilizados normalmente en modelos de agujeros de gusano atravesables, son bosones. Son matemáticamente simples, muchas veces preferidos para el análisis teórico. Sin embargo, el único campo escalar fundamental que actualmente se observa en la naturaleza es el bosón de Higgs, y no admite una geometría de agujero de gusano.

En un artículo publicado en la revista *Physical Review Letters* (DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.101102) por José Luis Blázquez Salcedo, del Departamento de Física Teórica e IPARCOS (UCM), Christian Knoll, del Institut für Physik de la Universidad de Oldenburg (Alemania), y Eugen Radu, del Departamento de Matemática da Universidad de Aveiro y el CIDMA (Portugal), se han construido por primera vez agujeros de gusano atravesables en la teoría de Einstein-Dirac-Maxwell. Como señala el Dr. Blázquez Salcedo, "esto significa que consideraremos la teoría de Einstein para la gravedad (relatividad general),

AGUJEROS DE GUSANO ATRAVESABLES

Un agujero de gusano es una **estructura hipotética en forma de túnel** (garganta) en el espacio-tiempo, que en principio permitiría acortar la distancia entre eventos en el Universo.

la teoría de Maxwell para los campos electromagnéticos, y la teoría de Dirac para fermiones". Es decir, **para la construcción teórica de los agujeros de gusano, consideran materia descrita por el modelo estándar de física de partículas, mientras que emplean la teoría de la gravedad de Einstein.**

Por tanto, "el marco teórico general de nuestro trabajo no contiene nada fuera de las teorías aceptadas", añade el Dr. Blázquez Salcedo. Muchas de las partículas fundamentales que encontramos en la naturaleza son fermiones (electrones, positrones, etc.). Los campos de Dirac violan naturalmente las condiciones de energía, por lo que los fermiones proporcionan la interacción adicional para equilibrar la atracción gravitacional y mantener abierto el agujero de gusano.

La hipótesis de que los fermiones pueden soportar la geometría de un agujero de gusano no es nueva. Ya en los años sesenta del siglo pasado, John Archibald Wheeler propuso en el contexto de su modelo de "carga sin carga" la existencia de este tipo de soluciones. Sin embargo, hasta este trabajo, nunca se había construido un ejemplo explícito de esta idea.

El Dr. Blázquez Salcedo concluye que, hasta donde sabemos, no existe evidencia observacional de la existencia de ningún tipo de agujero de gusano. Por tanto, el interés de su modelo es, en principio, solo teórico. **Debido a la naturaleza cuántica de los fermiones, esperan que estos agujeros de gusano, en el hipotético caso de que existieran, fueran microscópicos.** Aún son necesarios más estudios teóricos para analizar las propiedades de estos objetos y estudiarlos en el contexto de teorías más completas, por ejemplo, incluyendo efectos cuánticos.

DISPOSITIVOS MICROELECTROMECÁNICOS, SUEÑO Y ENFERMEDAD DE ALZHEIMER

La enfermedad de Alzheimer (AD) es un proceso neurodegenerativo causado por la desbocada acumulación de ciertas moléculas (β -amiloides y proteínas- τ) en el cerebro. En un individuo sano, estas sustancias son

producidas durante el día de manera natural por el propio organismo como mecanismo de defensa, pero son recicladas durante el sueño profundo, restaurando el equilibrio. Sin embargo, en un enfermo de AD, el tandem $\beta+\tau$ acaba formando condensados de manera inadvertida, colapsando eventualmente cada sinapsis. **Este proceso iterativo de "auto-ahogamiento cognitivo" se va repitiendo hasta que es demasiado tarde para actuar.** Es en este punto cuando comienzan a hacerse visibles los síntomas por todos conocidos: pérdida drástica de memoria, desorientación, estados de alteración y demencia.

Lo que parece estar bien establecido por la comunidad científica es la mencionada relación entre sueño y AD. Recientemente, se han llevado a cabo estudios clínicos en personas sanas en los que se ha comprobado la presencia elevada de compuestos $\beta+\tau$ tras una única noche de privación de sueño. Trabajos parecidos se han realizado con pacientes diagnosticados con AD. **Sin embargo, la ejecución de este tipo de ensayos es mucho más complicada por la naturaleza impulsiva (y, en ocasiones, agresiva) asociada a los individuos afectados por esta enfermedad.** Las razones de tipo ético y/o de respeto a la intimidad son también un factor limitante en este campo de investigación.

En un artículo publicado en la revista *Sleep & Breathing* (DOI:10.1007/s11325-021-02327-x), el físico Alberto Corbi y el Dr. Daniel Burgos (ambos miembros de Instituto de Investigación, Innovación y Tecnología Educativas de la Universidad Internacional de La Rioja) han diseñado un sistema que permite monitorizar el sueño de personas con AD de manera no intrusiva. **La implementación está basada en el uso de dispositivos electromecánicos (MEMS) para el seguimiento de los movimientos del enfermo durante la noche.** Como señala el Dr. Corbí, el hardware subyacente tiene forma de sencilla y cómoda pulsera, la cual registra aceleraciones de manera continua y autónoma y los datos se almacenan en una memoria de estado sólido a una frecuencia de 50Hz durante casi un mes, sin necesidad de conexión a la

red eléctrica o de datos (reforzando la premisa de respeto por la privacidad). Seguidamente, es posible estimar los períodos de sueño mediante un algoritmo llamado "estimation of stationary sleep-segments" (DOI:10.1109/ICHI.2014.24). En el transcurso de la

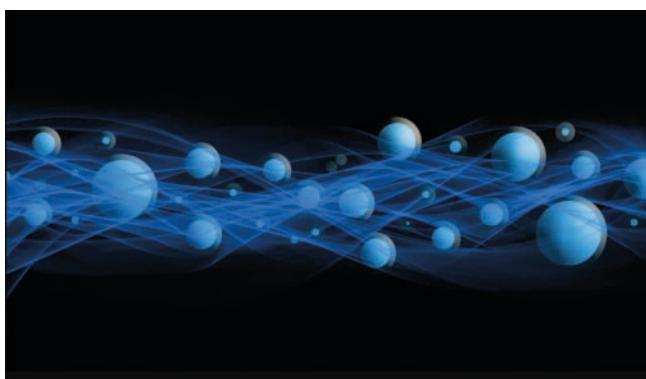


investigación ha supervisado el sueño de tres grupos de personas, según su estado clínico de avance de la enfermedad (sano, AD-leve y AD-severo) durante varias noches. A continuación, aplicando un algoritmo de máxima verosimilitud, **ha sido posible volver a clasificar con gran precisión el estado de deterioro cognitivo de estos participantes de manera no supervisada.** "Esta investigación ha contribuido a afirmar el nexo entre sueño y AD y ha demostrado que la Física tiene mucho que aportar a la neurología, incluso más allá del ámbito de la radiofísica", concluye el Dr. Corbí.

NO-LOCALIDAD CUÁNTICA GENUINAMENTE MULTIPARTITA EN REDES DE ESTADOS BIPARTITOS

El entrelazamiento y la no-localidad en estados cuánticos multicomponentes juegan un papel fundamental en las tecnologías cuánticas. Mientras que el entrelazamiento es una propiedad de los estados, la no-localidad se manifiesta en las correlaciones que se extraen de estos. En concreto, es una propiedad de las distribuciones de probabilidad conjunta que se obtienen a partir de medidas locales sobre los estados. Este fenómeno se revela a través de la violación de desigualdades de Bell y es responsable de la incompatibilidad de la teoría cuántica con modelos de variables ocultas locales. En los últimos años, esta in-

compatibilidad se ha utilizado para dar propuestas concretas de protocolos irrealizables clásicamente que se formulan directamente sobre las distribuciones de probabilidad no locales. Sin embargo, aunque la no-localidad sólo puede surgir de un estado entrelazado, se sabe que no todos los estados entrelazados dan lugar a ella.



Las aplicaciones más punteras requieren de no-localidad genuinamente multipartita. Esto implica que las correlaciones no locales se extienden sobre todas las partes y no solamente sobre un subconjunto de éstas. Generar estas correlaciones en el laboratorio es un desafío ingente que exige la preparación, control y distribución de estados cuánticos entrelazados de muchas partes. Una forma asequible de lograrlo es a través de redes conexas donde se comparte entrelazamiento bipartito entre pares de partes. Por ello, en la actualidad se investiga la implantación de protocolos cuánticos en redes, en lo que a veces se ha dado en llamar “quantum internet”. Es más, es relativamente sencillo demostrar que, si se comparten estados entrelazados puros, el estado correspondiente a una red conexa contiene siempre entrelazamiento genuinamente multipartito.

Ahora bien, ¿es esto suficiente para obtener no-localidad genuinamente multipartita? En un artículo publicado en *Physical Review Letters* (DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.040501) por Patricia Contreras-Tejada, del Instituto de Ciencias Matemáticas de Madrid, Carlos Palazuelos, del Departamento de Análisis Matemático y Matemática Aplicada de la UCM y el Instituto de Ciencias Matemáticas de Madrid, y Julio I. de Vicente, del Departamento de Matemáticas de la Universidad Carlos III de Madrid, se da una respuesta

positiva a esta pregunta con toda generalidad: **cualquier red conexa de estados bipartitos entrelazados puros da lugar a no-localidad genuinamente multipartita independientemente de la cantidad de entrelazamiento y la geometría de la red**. De hecho, como indica el Dr. De Vicente, se construyen explícitamente desigualdades de Bell y las medidas necesarias para obtener una violación en función de los estados que comparten cada par de nodos. La independencia de la geometría permite que la propiedad deseada se manifieste en redes sencillas: por ejemplo, una red tipo estrella en la que un nodo central dotado de un laboratorio competente reparte estados entrelazados a nodos satélite mucho más precariamente equipados.

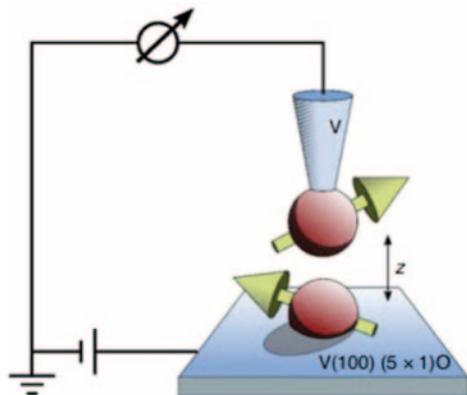
El siguiente paso, en el que están trabajando, es estudiar qué papel juega el ruido en los estados de la red, ya que cualquier implementación realista conllevará estados no puros. El Dr. De Vicente concluye señalando que “podemos adelantar que en este caso tanto la calidad del entrelazamiento como la topología de la red juegan un papel determinante”. Así, además de sus aplicaciones concretas, estas investigaciones abren la puerta al uso de la teoría de redes en este contexto.

EXPLORANDO LOS LÍMITES DEL TRANSPORTE CUÁNTICO

La invención del microscopio de efecto túnel (STM) en los años 1980 revolucionó el mundo de la nanociencia y permitió por primera vez explorar y manipular la materia a escala atómica. En la actualidad el STM permite estudiar la competición entre magnetismo y superconductividad, dos fases antagónicas de la materia, a escala atómica. Una de las manifestaciones de esa competición es la aparición de unos estados ligados de energía, conocidos como estados de Yu-Shiba-Rusinov (YSR), que están muy localizados espacialmente. Dichos estados

energéticos tienen propiedades únicas y parte de su interés reside en el hecho de que pueden ser los precursores de los llamados estados de Majorana, que podrían ser la base de un nuevo tipo de computación cuántica. Sin embargo, y a pesar de enormes esfuerzos, había sido imposible hasta ahora explorar el transporte de corriente entre estados YSR individuales, lo que tiene un gran interés porque constituiría el límite último del transporte electrónico cuántico.

Este problema ha sido resuelto en un artículo reciente publicado en *Nature Physics* (DOI: 10.1038/s41567-020-0971-0) por un equipo internacional formado por el grupo de Christian Ast



y Klaus Kern, del Max Planck Institute for Solid State Research en Stuttgart, el grupo de Joachim Ankerhold, en la Universidad de Ulm, y los investigadores Alfredo Levy Yeyati y Juan Carlos Cuevas, del Condensed Matter Physics Center (IFIMAC) de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). En este trabajo, los investigadores usaron un STM de muy bajas temperaturas (10 mK) para explorar la corriente eléctrica entre estados YSR individuales vía el efecto túnel cuántico. Para ello, atraparon una impureza magnética con la punta de vanadio del microscopio, que a su vez fue usada para explorar otra impureza magnética depositada en una superficie de vanadio, que es un material superconductor a esas bajas temperaturas. De este modo, fueron capaces de medir la corriente eléctrica entre dos estados ligados superconductores localizados a escala atómica (uno en cada impureza), lo cual supone la configuración más elemental jamás creada para producir una corriente por efecto túnel.

La realización de un STM modificado con impurezas magnéticas y

sus correspondientes estados ligados superconductores **abre la puerta a investigar numerosos fenómenos físicos**. Por ejemplo, esto puede permitir estudiar estados de Majorana que se pueden realizar en cadenas de átomos magnéticos. También puede utilizarse para estudiar nuevos tipos de superconductividad que pueden surgir de su competición con el magnetismo, así como la generación de corriente de espín, que son temas cruciales para el campo de la emergente *Espíntrónica Superconductora*. Finalmente, este nuevo instrumento también va a permitir estudiar el magnetismo en nanoestructuras con un nivel de precisión y detalle sin precedentes.

CRISTALES HIDRODINÁMICOS: UN NUEVO ESTADO DE LA MATERIA

Apartir de ondas de Faraday excitadas en la superficie del agua a la que se añade una pizca de un extracto vegetal, la escina, se ha encontrado una nueva forma de sólido, ordenado y estático, pero constituido en realidad por un líquido desordenado en continuo movimiento.

Una investigación internacional liderada por la UCM, publicada en *Nature Communications* (DOI: 10.1038/s41467-021-21403-0) y en la que han participado investigadores del Departamento de Química Física (UCM), el Instituto de Investigación Sanitaria Hospital Doce de Octubre de Madrid, el Instituto de Investigaciones Biosanitarias de la Universidad Francisco de Vitoria y el Departamento de Matemáticas Aplicadas y Sistemas de la

Universidad Autónoma Metropolitana Cuajimalpa de México, ha descrito por primera vez un nuevo estado exótico de la materia: los cristales hidrodinámicos, constituidos por un fluido en movimiento, aunque ordenados como en un sólido cristalino y estático.

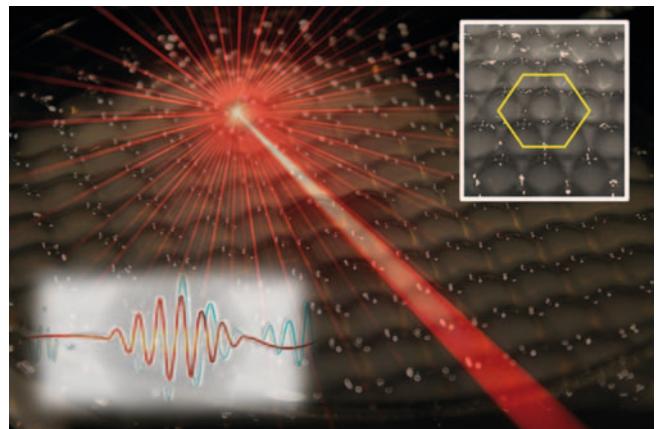
El Prof. Francisco Monroy, investigador del Departamento de Química Física de la UCM, señala que el descubrimiento de este nuevo estado de la materia transporta nuestra imaginación a múltiples panoramas y realidades, desde la comprensión de las leyes fundamentales que gobiernan la estructura de los condensados de ondas a diferentes escalas, pasando por la creación controlada de defectos en las redes cristalinas formadas, hasta usos tecnológicos en que los nuevos cristales hidrodinámicos puedan utilizarse como plantillas moldeables de nuevos materiales biocompatibles.

Este nuevo tipo de cristal se obtiene cuando las ondas excitadas en la superficie del agua —ondas de Faraday formadas cuando se vibra el líquido, como en una coctelera— aparecen ordenadas por efecto de la rigidez tras añadir un aditivo especial llamado escina, que es un extracto natural obtenido de los frutos secos y utilizado como “superalimento” en dietas de reducción del colesterol. “Esta biocompatibilidad será crucial para futuras aplicaciones de los nuevos ‘cristales de agua’ en biotecnología”, añade el investigador de la UCM.

El Prof. Monroy explica que, en condiciones habituales, las ondas aparecerán muy desordenadas en su coctelera, pero la mera presencia del aditivo

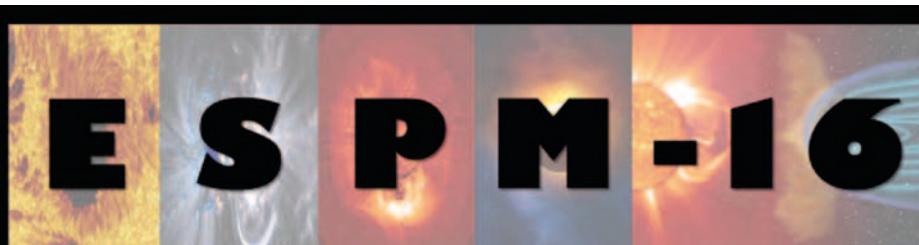
es suficiente para congelar la hidrodinámica en un patrón ordenado de paquetes de onda, una tesela perfecta, como si fuera un cristal sólido, pero de agua líquida.

El equipo de investigación ha hecho uso de un altavoz para excitar las ondas y de unos contenedores llenos de agua con una pequeña cantidad de escina

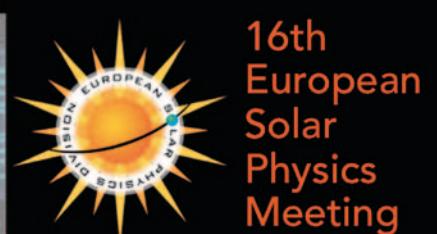


disuelta, con el que se ha fabricado un sencillo dispositivo capaz de generar un patrón de ondas de Faraday perfectamente ordenadas en la superficie del líquido, el cristal hidrodinámico. “Sin embargo, en ausencia del aditivo, la superficie aparecía completamente desordenada”, puntualiza el investigador.

El Prof. Monroy concluye que el nuevo concepto y sus aplicaciones prácticas se encontrarán muy pronto incorporados a los libros de texto como un nuevo paradigma de la condensación de cuasipartículas discretas de naturaleza ondulatoria en el límite clásico. En concreto, el cristal hidrodinámico y los paquetes de ondas de Faraday que lo constituyen suponen el equivalente clásico de los cristales ordinarios, y sus excitaciones colectivas, bajo la forma de ondas de materia de “De Broglie” estudiadas en los libros de física moderna.



6-10 septiembre 2021
Online



<https://indico.ict.inaf.it/event/794/>