

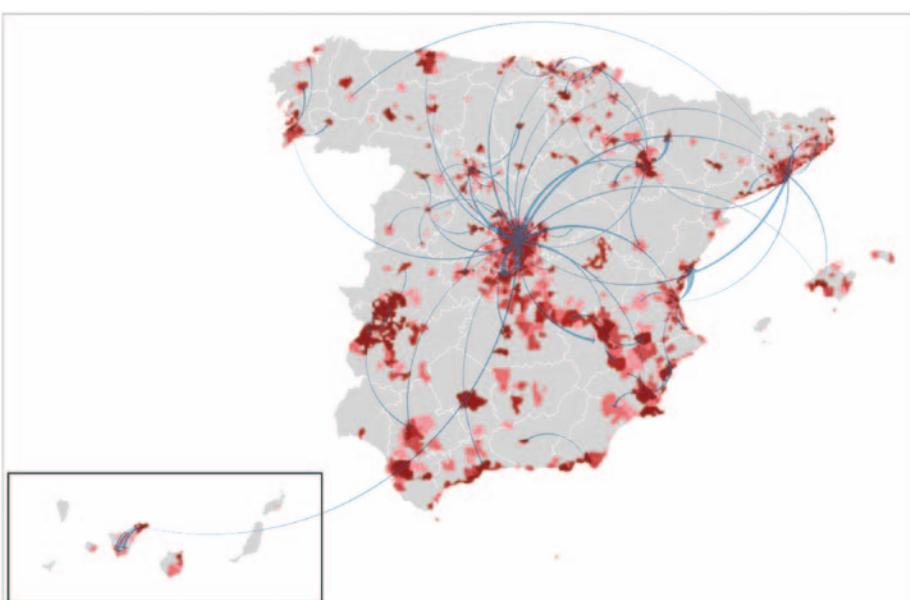
Puntos de interés

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

TRAS LAS HUELLAS DEL SARS-COV-2

En el 31 de diciembre de 2019, se notificó de forma oficial la existencia de un brote epidémico provocado por un nuevo coronavirus, denominado SARS-CoV-2, en la provincia de Hubei, en China continental. Esta epidemia es uno de los mayores retos a los que se enfrenta nuestra sociedad moderna y supone una amenaza sin precedentes para los

Zaragoza), con la participación de investigadores de la Universidad Federal de Viçosa (Brasil) y la Escuela de Medicina de Harvard (EE. UU.), concentraron sus esfuerzos en el diseño de un modelo que permitiera capturar las peculiaridades de la propagación del SARS-CoV-2 y el impacto sanitario de las infecciones graves por COVID-19. Para ello, usaron los modelos markovianos metapoblacionales generados en los últimos años donde, además de características epidemiológicas y clí-



sistemas sanitarios de todo el mundo. La gran capacidad de propagación del virus, caracterizada por un número reproductivo $R_0 \sim 3.0$, combinada con una gran fracción de contagios causados por infectados en fase presintomática o completamente asintomáticos, hace que el control de esta epidemia sea especialmente difícil.

Desde finales de enero dos equipos de investigadores liderados por Alex Arenas (Universitat Rovira i Virgili) y Jesús Gómez-Gardeñes (Universidad de

nicas, se introducen los aspectos más relevantes del comportamiento humano, como la distribución demográfica, patrones de contacto entre grupos de edades y los flujos de movilidad entre municipios. Estos resultados se publicaron el pasado mes de diciembre en la revista *Physical Review X* (DOI: 10.1103/PhysRevX.10.041055).

El 28 de febrero, una vez analizados los resultados que arrojaba el modelo para la evolución en España, lanzaron la alerta ante la inminente propagación de los contagios mediante la publicación de un mapa donde se recogía la propagación del riesgo de contagio en España. Con este mismo modelo, los dos grupos pudieron, ya



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

de lleno en la primera ola, evaluar las medidas de contención basadas en el distanciamiento y el confinamiento social. Según Arenas, “nuestros esfuerzos se dedicaron a evaluar estas medidas en términos de saturación hospitalaria, pronosticando con éxito tanto la incidencia observada en cada región como la sobrecarga del sistema sanitario”.

Por otra parte, según apunta Gómez-Gardeñes, “además del valor como herramienta de evaluación en tiempo real, el avance logrado con este modelo radica en haber encontrado una expresión analítica que relaciona la evolución del número de reproducción efectivo $\mathcal{R}(t)$ con las intervenciones no farmacológicas”. Este parámetro es clave para seguir la evolución de la transmisibilidad y los efectos de las medidas de contención, ya que cuantifica el número de infecciones secundarias generadas por un individuo infectado durante el transcurso de la epidemia y en función de las medidas que se van aplicando.

Estos avances han ayudado a evaluar las medidas de contención realizadas durante la primera ola epidémica en diferentes países y regiones. Sus resultados permitirán a los responsables en salud pública determinar la reducción precisa de la movilidad y el grado de confinamiento necesarios para doblar la curva de incidencia de futuras epidemias ante las que no se cuente con otras medidas que la intervención sobre el comportamiento humano.

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

FORMACIÓN DE CADENAS ATÓMICAS DE ORO MEDIANTE ELECTRONES CALIENTES E HIDRÓGENO

El oro es el metal más inerte de la naturaleza. Sin embargo, la interacción entre el oro y el hidrógeno atómico se ha predicho teóricamente que debería de ser muy fuerte. **Hasta la fecha existen pocos experimentos que han podido estudiar esta interacción debido a que son necesarias técnicas sensibles al esquivo hidrógeno y tengan resolución de átomos individuales.**

En un trabajo publicado recientemente en la revista *ACS Nano* (DOI: 10.1021/acsnano.0c05507) por los investigadores Pablo Merino, del Institu-

electrones calientes de forma localizada con la punta del microscopio.

La superficie (111) del oro —Au(111)— reconstruye en lo que se conoce como una estructura “herringbone”, o de espina de arenque. Esta estructura consiste en una disposición periódica inducida por tensión donde los dominios están separados por paredes de solitón que imprimen el aspecto característico de “espina de pescado” de la superficie. En esta estructura 23 átomos se comprimen lateralmente en la capa atómica superior para encajar en una longitud correspondiente a 22 átomos del volumen. Al inducirse esta reconstrucción, la superficie de Au(111) relaja su tensión intrínseca en un 22 %.

Los investigadores han descubierto usando STM que cuando esta superficie se recubre con hidrógeno molecular y se le inyectan electrones calientes de hasta 10 eV, **los átomos extra comprimidos de la capa superior son expulsados de la superficie, reaccionan con las moléculas de H₂ disociándolas y forman cadenas atómicas en la superficie**. Las cadenas están constituidas por hidruros de un solo átomo de oro de anchura, alineadas con las direcciones de alta simetría de la superficie. Debido a la gran resolución del STM para inyectar electrones calientes es posible generar las cadenas de forma muy precisa en ciertas terrazas de la superficie.

Estos hallazgos experimentales han sido confrontados con cálculos *ab initio* basados en la teoría del funcional de la densidad (DFT) y simulaciones de imágenes STM. La teoría confirma que la energía suministrada por los electrones inyectados en la superficie es suficiente para extraer un primer átomo de oro de la superficie y disociar la primera molécula de H₂, dando como resultado la nucleación de un monómero de hidruro de oro estable en la superficie. **Este procedimiento inicia el crecimiento de una cadena atómica mediante el levantamiento, con un coste energético menor, del átomo extra vecino y así sucesivamente, en un mecanismo de cremallera**. Por tanto, los cálculos energéticos permiten desentrañar el mecanismo de formación y explicar la aparición de las estructuras unidimensionales. La simulación STM de la cadena más estable encontrada teóri-

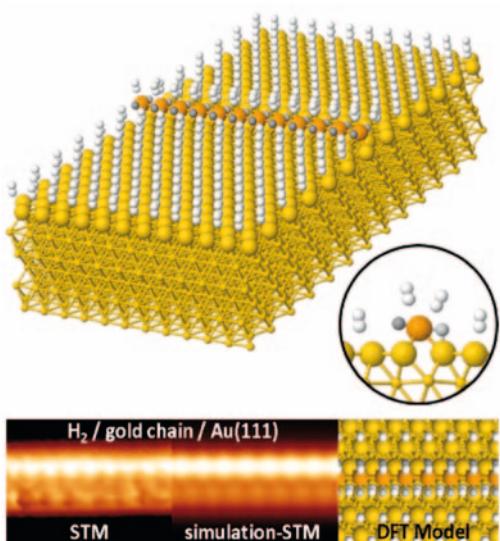
camente reproduce excelentemente la imagen observada en el experimento.

“Este hallazgo es sorprendente por la simplicidad de los actores principales del sistema, el oro y el hidrógeno. A pesar de que son elementos muy sencillos, su interacción da lugar a un novedoso tipo de estructuras unidimensionales y a una clase de reacción en cremallera que no se había observado antes en la formación de hidruros metálicos”, concluye el Dr. Merino, autor principal de este trabajo.

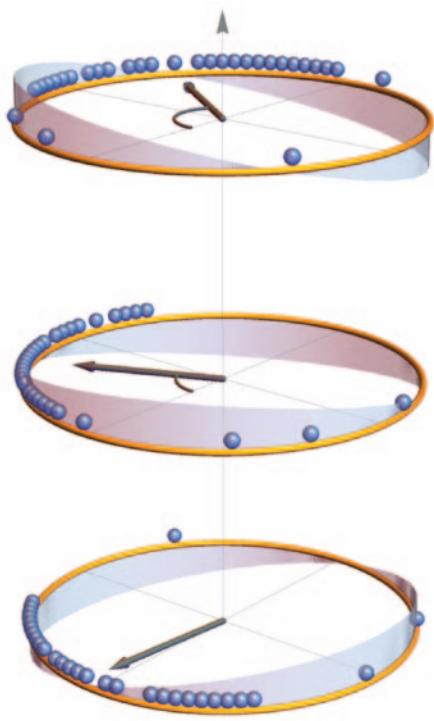
CREANDO CRISTALES DE TIEMPO A PARTIR DE EVENTOS RAROS

Hace ya más de 80 años, Lev Landau (Premio Nobel de Física en 1962) estableció la conexión entre la ruptura espontánea de simetrías y las transiciones de fase. Desde entonces, su idea ha sido ampliamente utilizada para la descripción de multitud de fenómenos físicos. Sin embargo, hasta hace unos años, este planteamiento no había sido aplicado a la **simetría bajo traslaciones temporales**, considerada históricamente como especial e irrompible a nivel fundamental. Esto cambió en 2012, cuando Frank Wilczek (Premio Nobel de Física en 2004) y Alfred Shapere propusieron el concepto de “cristal del tiempo”, un sistema que **rompe espontáneamente esta simetría en su estado fundamental**. Este nombre se debe a que dichos sistemas **presentan un comportamiento periódico espontáneo en el tiempo**, de forma análoga a los cristales “normales” que presentan un patrón repetitivo en el espacio. Estos nuevos **cristales temporales han despertado un gran interés tanto a nivel teórico como experimental**, dadas sus posibles aplicaciones en campos como la computación cuántica o la metroología.

En un reciente trabajo publicado en la revista *Physical Review Letters* (DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.160601), los investigadores Rubén Hurtado Gutiérrez, Carlos Pérez Espigares y Pablo Hurtado, de la Universidad de Granada, junto con Federico Carollo, de la Universidad de Tübingen, han descubierto una **nueva forma de crear cristales del tiempo** clásicos estudiando



to de Ciencia de Materiales de Madrid y del Instituto de Física Fundamental del CSIC, A. Roslawska, A. Grewal, C. C. Leon, K. Kuhnke, K. Kern, del Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, y C. González, actualmente en la Universidad Complutense de Madrid, se ha investigado la reacción de hidrógeno con la superficie (111) de oro mediante microscopio de efecto túnel (STM, por sus siglas en inglés) a bajas temperaturas en ultra-alto vacío complementado con simulaciones teóricas. Sorprendentemente, se observa que **la superficie del metal se reestructura formando cadenas de átomos de oro enlazados fuertemente con átomos de hidrógeno (también conocidos como hidruros de oro)** cuando se le inyectan



las **fluctuaciones raras** de sistemas de muchas partículas. En concreto, los autores encuentran que ciertos sistemas unidimensionales se comportan como un **cristal temporal cuando la corriente de partículas fluctúa muy por debajo de su valor típico** o promedio. Este fenómeno, aunque resulta muy interesante desde el punto de vista teórico, parece a primera vista de poco interés práctico al ser estas fluctuaciones tremendamente improbables. Sin embargo, un análisis detallado de la dinámica del sistema muestra que **este comportamiento improbable puede hacerse "típico"** aplicando cierto campo de empaquetamiento externo. Esto permite proponer un **nuevo modelo** que presenta una **transición de fase a una fase de tipo cristal de tiempo** similar a la del modelo original, pero que puede aprovecharse a nivel práctico de manera controlada y precisa. Dicho modelo se ha verificado mediante **simulaciones numéricas en Proteus**, el superordenador del Instituto Carlos I de Física Teórica y Computacional, demostrando que presenta todas las características de un cristal de tiempo. Además, en el trabajo se discute la posibilidad de **implementar experimentalmente estos nuevos cristales temporales** en sistemas coloidales mediante el uso de pinzas ópticas. “Estos resultados son importantes porque, a nivel fundamental, abren un camino inexplorado para entender mejor el tiempo y sus sime-

trías, mientras que, a nivel práctico, nos enseñan nuevas formas de crear cristales de tiempo”, afirman los autores.

MEDIDA INDIRECTA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ

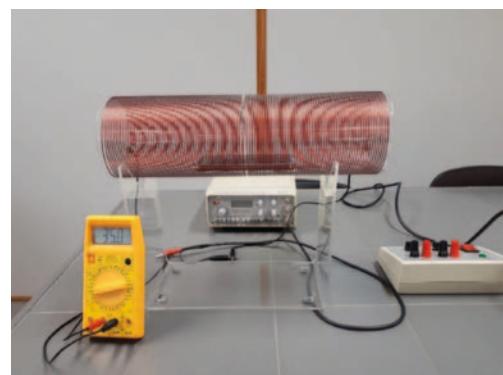
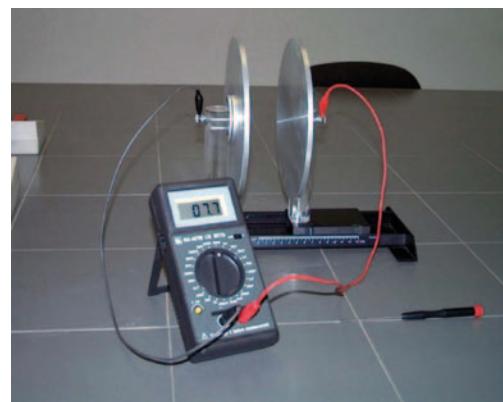
La velocidad de una onda sonora en una cuerda sujetada por sus dos extremos depende de la raíz cuadrada del cociente entre la tensión de la cuerda y su densidad longitudinal de masa. Es decir, **depende de propiedades mecánicas del medio en el que se propaga**. La velocidad de una onda electromagnética debe depender de las propiedades eléctricas y magnéticas del medio en el que se propaga. Si es en el vacío, debe depender de la permitividad eléctrica del vacío (ϵ_0) y de la permeabilidad magnética del vacío (μ_0). A efectos prácticos aire y vacío son equiparables.

En un artículo recientemente publicado en la revista *Journal of King Saud University-Science* (DOI: 10.1016/j.jksus.2020.06.017), los investigadores Enrique Arribas, Isabel Escobar y Raquel Ramírez, de la Universidad de Castilla-La Mancha, con la colaboración de Augusto Beléndez, de la Universidad de Alicante, y Teresa Franco Martínez, del Instituto Politécnico Nacional de México, han determinado la velocidad de la luz mediante la conocida fórmula $c = (\epsilon_0 \mu_0)^{1/2}$ con instrumental típico utilizado en las prácticas de Física General y con la ayuda de un *smartphone*.

Primeramente, se determinó la permitividad eléctrica ϵ_0 a partir de la **medida de la capacidad de un condensador de placas planoparalelas**, variando para ello la separación entre sus placas (d). Mediante un ajuste por mínimos cuadrados se obtuvo la pendiente de la recta de los datos de C frente a $1/d$, que está relacionada con ϵ_0 . A continuación se calculó la permeabilidad magnética μ_0 , **usando un solenoide por el que se hacía pasar diferentes valores de la corriente eléctrica y se medía el campo magnético en su centro usando el sensor Hall de un smartphone y la aplicación Physics Toolbox**. Mediante otro ajuste por mínimos cuadrados, la pendiente de la línea de ajuste está relacionada con μ_0 . Ahora, los datos que se ajustaron fueron el campo magnético y la corriente eléctrica.

Los valores obtenidos para la permitividad y la permeabilidad (con sus respectivos errores) fueron $\epsilon_0 = (8.87 \pm 0.29) \cdot 10^{-12} F/m$ y $\mu_0 = (1.25 \pm 0.03) \cdot 10^{-6} NA^{-2}$.

El resultado obtenido finalmente para la velocidad de la luz fue $c = (3.00 \pm 0.06) \cdot 10^8 m/s$, con un error relativo del 1.9 %. El valor real que es 299792458 m/s está dentro del intervalo de error. El error absoluto se calculó mediante la técnica RMS teniendo en cuenta los errores de la permitividad y de la permeabilidad.



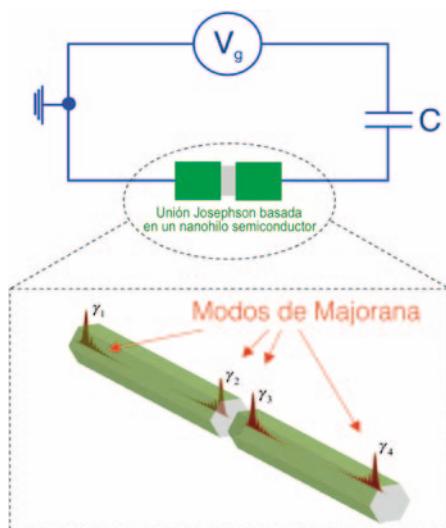
También se tuvo en cuenta el **tamaño finito del solenoide** porque el cociente entre su radio y su longitud es 0.15. La permeabilidad cambió un poco, $\mu_0 = (1.30 \pm 0.03) \cdot 10^{-6} NA^{-2}$ y el valor de la velocidad de la luz bajó ligeramente a $c = (2.94 \pm 0.06) \cdot 10^8 m/s$. Este valor era compatible con el anterior y con el valor exacto.

BITS CUÁNTICOS HÍBRIDOS SEMICONDUCTOR-SUPERCONDUCTOR

Durante los últimos años hemos asistido a un progreso sin precedentes en lo que se ha venido a llamar la “**segunda revolución cuántica**”. Esta revolución

pretende ir más allá de los principios cuánticos subyacentes que gobiernan gran parte de nuestros dispositivos actuales, desde el transistor al láser, y explotar propiedades genuinamente cuánticas (superposición cuántica, entrelazamiento, etc.) en el desarrollo de nuevas tecnologías.

Entre las muchas aplicaciones de estas nuevas tecnologías cuánticas, destaca la **computación cuántica** por las



grandes expectativas que ha generado. En particular, se espera que un ordenador basado en bits cuánticos (*qubits*) pueda realizar tareas irresolubles para los superordenadores más potentes de los que disponemos hoy en día. Esta “supremacía” o “ventaja” cuántica nos permitiría realizar grandes avances en campos muy diversos de la ciencia y la tecnología, que van desde el diseño de fármacos o nuevos materiales hasta la resolución de problemas de logística o finanzas.

Los primeros pasos en esta dirección son muy prometedores. Recientemente, varios gigantes de la tecnología (Google, IBM, Intel, Microsoft, Amazon, etc.) han apostado fuertemente por la computación cuántica. Algunos de sus logros más espectaculares, como la consecución de supremacía cuántica por parte de Google o la posibilidad de usar el ordenador de IBM en la nube, empiezan a aparecer en la prensa generalista. A pesar de este progreso, que ha generado cierto triunfalismo y una cierta sensación de burbuja relacionada con todo lo “Quantum”, debemos ser prudentes. Los logros de Google y, en general, de cualquier plataforma de

computación cuántica se centran en tareas muy concretas y/o en sistemas de pocos *qubits*. Estamos todavía muy lejos de tener las plataformas escalables de miles de *qubits* que necesitamos para corregir errores, debidos a decoherencia cuántica, mediante redundancia en el proceso de computación.

Los ordenadores cuánticos de las plataformas más exitosas (Google, IBM) contienen chips con *qubits* basados en dispositivos superconductores. La frecuencia del *qubit* se manipula mediante pequeños flujos magnéticos que permiten operar las puertas lógicas de manera rápida pero que, en contrapartida, generan ruido y decoherencia.

Una de las propuestas que pretende mejorar estos diseños se basa en *qubits* híbridos en los que la unión Josephson de un *qubit* superconductor se reemplaza por una unión basada en un material semiconductor. Estos *qubits* híbridos semiconductor-superconductor, permiten una manipulación de puertas puramente eléctrica y mejor integración. En un reciente artículo, publicado como perspectiva invitada en *Applied Physics Letters* (DOI: 10.1063/5.0024124), Ramón Aguado (investigador científico del CSIC que trabaja en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid) detalla todos los avances recientes en este nuevo enfoque para el *hardware* cuántico. La versatilidad de estos diseños híbridos permite explorar distintos prototipos, que incluyen los *transmon* basados en semiconductores, los *qubits* basados en estados de Andreev (superposiciones cuánticas partícula-hueco en un superconductor) y los *qubits* topológicos.

Estos últimos se basan en estados de Majorana, el análogo en física de la materia condensada a las exóticas partículas (iguales a sus propias antipartículas) predichas por Ettore Majorana en 1937 en el contexto de física relativista de altas energías. La gran ventaja de un *qubit* topológico es que la información se almacena de manera no-local en los modos de Majorana. Se ha demostrado teóricamente que esta no-localidad dota al *qubit* de Majorana de una gran inmunidad frente al ruido y la decoherencia (protección topológica). **La demostración experimental de un *qubit* topológico (direc-**

ción que explora Microsoft) sería una auténtica revolución en el campo, ya que su resiliencia a fallos permitiría construir ordenadores cuánticos sin necesidad de un escalado masivo.

CONOS DE DIRAC PARA BOSONES

El grafeno bicapa rotado ha atraído una enorme atención debido al reciente descubrimiento por parte del grupo de Pablo Jarillo Herrero, del MIT, de la superconductividad, es decir, el transporte de carga eléctrica sin pérdida de energía. Esta fase aparece a un ángulo de rotación aproximadamente de 1.05°, llamado en la literatura como **ángulo mágico**, por la emergencia de bandas electrónicas prácticamente planas. Pero este descubrimiento era solo el principio de una serie de nuevas y sorprendentes observaciones, como ferromagnetismo Hall anómalo, estados aislantes correlacionados y otras fases topológicas no-triviales.

En un artículo recientemente publicado en la revista *Physical Review Applied* (DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.L011001), los investigadores Luis Brey y Tobias Stauber, del Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC), y Tetiana Slipchenko y Luis Martín-Moreno, del Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón, se predice **otra fase sin precedentes que emerge para ángulos de giro aún menores que el ángulo mágico**. En este régimen del llamado grafeno mínimamente rotado, las dos capas hexagonales están fuertemente deformadas, de tal modo que la bicapa consiste de parches triangulares donde el apilamiento de las láminas es de tipo Bernal con un orden AB y BA alternándose entre triángulos vecinos.

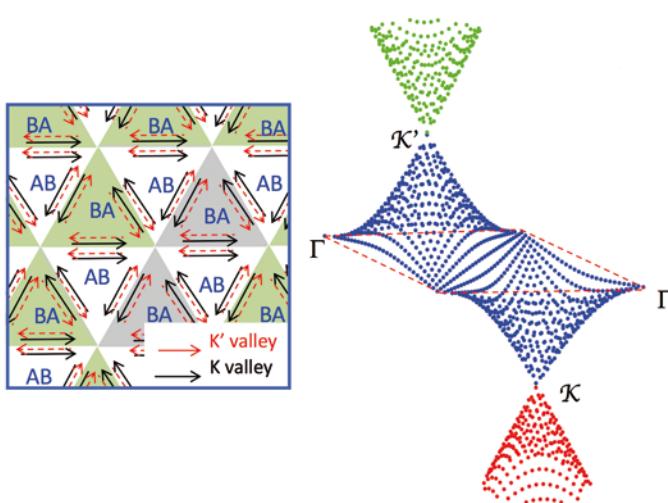
La aplicación de una diferencia de potencial eléctrico entre las capas abre un *gap* electrónico en los parches, aparcando estados electrónicos topológicamente protegidos en los bordes de los parches triangulares, debido a la diferencia en orden topológico entre triángulos con orden AB y orden BA. Estos estados son los únicos canales de conducción eléctrica posibles cuando el potencial químico está localizado en el *gap*.

Luis Brey y colaboradores estudiaron las excitaciones colectivas de estos estados electrónicos utilizando un modelo macroscópico por un lado y un modelo de red por otro. En ambos casos, los autores encontraron que la dispersión de las excitaciones se caracteriza por la existencia de dos conos de Dirac, de tal manera que estos plasmones son inherentemente quirales, mostrando que también hay cuasipartículas bosónicas cuya dinámica se rige por conos de Dirac.

Como señala el Dr. Brey, "los plasmones están compuestos de patrones de corriente que envuelven los parches triangulares, con distinto sentido y quiralidad dependiendo del cono al que pertenezcan". Los autores proponen que la estructura de los campos eléctricos asociados con estos plasmones quedaría reflejada en un experimento de microscopía de barrido de campo cercano, que mide localmente los campos eléctricos creados por los plasmones que han sido inducidos por la punta oscilante de un microscopio de fuerzas atómicas.

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que la frecuencia donde existen los conos de Dirac para plasmones puede modularse mediante la manipulación del ángulo de rotación de la bicapa rotada, añade el Dr. Brey, y concluye que también se puede sintonizar la frecuencia modificando la intensidad de la interacción de Coulomb mediante la modificación del entorno dieléctrico donde está depositada la bicapa.

Finalmente, la existencia de estos conos de Dirac abre la posibilidad de perturbar el sistema de tal manera que el sistema abriera un *gap* en torno a estos puntos de Dirac y convertir la bicapa en un cristal fotónico, donde la luz no podría propagarse en el rango de frecuencias del *gap* creado. Aún más interesante y exótico sería poder crear un *gap* de signo opuesto en los dos conos de Dirac, de tal manera que el sistema sería equivalente al aislante topológico de Haldane y soportaría plasmones unidimensionales girando alrededor de la muestra —un estado plasmónico sin precedentes—.



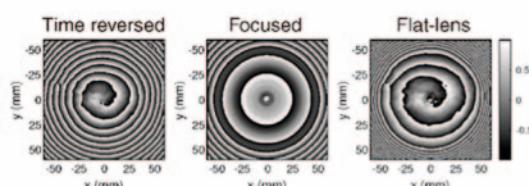
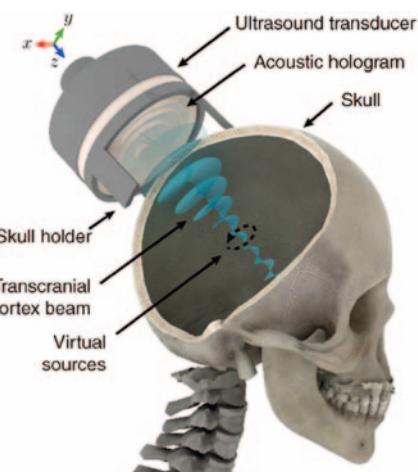
HOLOGRAMAS ACÚSTICOS PARA TERAPIA EN NEUROLOGÍA

Sí bien conocido que los haces de luz pueden ser modulados mediante hologramas ópticos para generar imágenes visibles. Análogamente, mediante hologramas acústicos también se pueden sintetizar *imágenes acústicas*, es decir, concentrar el sonido o las vibraciones en una zona arbitraria del espacio y, simultáneamente, permitir que otras zonas permanezcan en silencio o en reposo. Los hologramas acústicos modifican el frente de ondas mecánicas de manera que son capaces de modular tanto su fase como, en algunos casos, su amplitud. Para ondas acústicas de frecuencias ultrasónicas, como las usadas comúnmente en aplicaciones biomédicas, de alrededor de 1 MHz, se pueden fabricar hologramas acústicos mediante impresión 3D en polímeros elásticos, resultando en lentes acústicas con una escala de rugosidad de algunos milímetros.

Estos hologramas acústicos han encontrado una aplicación reciente en el ámbito biomédico para las nuevas terapias de ultrasonidos focalizados en neurología. Los ultrasonidos focalizados se emplean comúnmente para múltiples terapias neurológicas, y ofrecen múltiples aspectos deseables, puesto que no emplean radiación ionizante, resultando en tratamientos completamente no invasivos, seguros y de cos-

te moderado. Ejemplos de estos tratamientos son la ablación térmica de los núcleos talámicos mediante ultrasonidos focalizados para el tratamiento del temblor esencial, la apertura de la barrera hematoencefálica para la administración de fármacos de manera localizada y no invasiva, o aplicaciones de neuromodulación localizada mediante la acción mecánica de los ultrasonidos sobre los tejidos del sistema nervioso central. Sin embargo, en su camino hasta el foco, los

haces de ultrasonidos se ven afectados por las aberraciones que introducen los tejidos, principalmente los huesos, que provocan una fuerte atenuación y refracción modificando el frente de ondas irregularmente. Estas aberraciones y refracciones resultan en una pérdida de la focalización y la pérdida de control del punto focal. Además, en muchos casos la zona de interés terapéutico no es un solo punto, sino una estructura con una caprichosa forma en tres dimensiones,



como ocurre en terapias sobre núcleos del cerebro profundo, por ejemplo, el hipocampo.

En un artículo recientemente publicado en la revista *Physical Review Applied* (DOI: 10.1103/PhysRevApplied.14.054070) por los investigadores Sergio Jiménez Gambín, Noé Jiménez y Francisco Camarena, del grupo de Ultrasonidos del Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular, centro mixto entre el CSIC y la Universitat Politècnica de València que dirige el Prof. José M.^a Benlloch, se han desarrollado lentes holográficas acústicas para superar estas limitaciones y focalizar campos ultrasónicos libres de aberraciones dentro del cráneo. Los resultados demuestran que, utilizando lentes impresas en 3D de bajo coste, los haces ultrasónicos pueden focalizarse en el interior del cráneo de manera eficientemente y sin aberraciones. Puesto que los hologramas permiten un control muy preciso del frente de ondas mecánicas, se pueden obtener lentes holográficas que compensan las aberraciones introducidas por los huesos y, simultáneamente, focalizan la energía mecánica en varios puntos focales, “lo que permite focalizar a la vez sobre varias estructuras del sistema nervioso central, por ejemplo, el hipocampo izquierdo y el derecho”, concluye el Dr. Noé Jiménez. Estos hologramas acústicos van más allá de los haces de ultrasonidos tradicionales, pues permiten sintetizar imágenes acústicas con una estructura más elaborada, facilitando la generación de haces curvados, o incluso zonas focales con la forma del órgano a tratar.

El mismo grupo de investigación valenciano también ha demostrado que los hologramas permiten sintetizar otros campos acústicos complejos dentro del cráneo, como por ejemplo haces de vórtice. Estos haces presentan una singularidad de fase en el eje, lo que abre las puertas para atrapar y manipular sin contacto pequeños objetos, como agregaciones de fármacos o coágulos dentro del sistema nervioso central de manera no invasiva. Los hologramas acústicos abren nuevas vías para generalizar aplicaciones emergentes de los ultrasonidos terapéuticos, como la apertura de la barrera hematoencefálica o neuromodulación mediante sistemas no invasivos y de muy bajo coste.

CONTROL DE ONDAS ELÁSTICAS MEDIANTE PATRONES DE MUARÉ

La interacción de campos ondulatorios, tanto acústicos como electromagnéticos, con materiales periódicos presenta una gran variedad de propiedades que han dado lugar a un sinfín de aplicaciones. Estas estructuras, análogas a los cristales en la física del estado sólido, explotan la interacción de la periodicidad del movimiento ondulatorio con la suya propia, dando como resultado propiedades de propagación en el material llenas de peculiaridades.

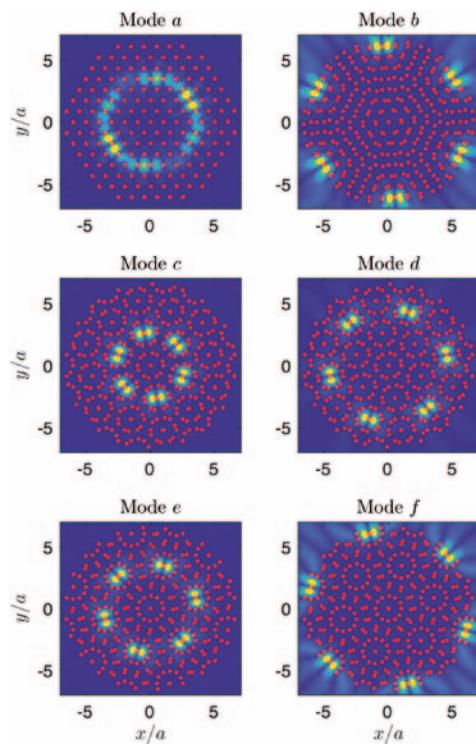
En el lado opuesto a los materiales periódicamente modulados se encuentran los materiales desordenados, en los cuales se encuentran impurezas de forma aleatoria por todo el material. En este caso, cuando una onda se propaga por dicho medio, encuentra dispersores de manera aleatoria, pero para determinados parámetros desorden-longitud de onda pueden darse fenómenos interesantes relacionados con la localización espacial de la energía.

Aunque podría concluirse que todos los materiales pertenecen a un tipo o a otro, es decir, o están modulados periódicamente o de manera aleatoria, lo cierto es que no es así. Existe una situación híbrida que corresponde a los denominados medios aperiódicos, los cuales presentan propiedades típicas de materiales tanto periódicos como desordenados.

Existen muchas maneras de crear materiales aperiódicos, pero recientemente se cuenta con una familia de cristales aperiódicos que ha despertado el interés de investigadores en varias áreas: son los **patrones de Muaré** (en inglés “Moiré patterns”). Estos patrones se generan cuando se superponen dos redes periódicas y se les aplica un giro relativo, como puede verse en la figura para varios ángulos diferentes. Como puede apreciarse, en función del valor del ángulo se forman patrones que parecen periódicos pero que, observados de cerca, no lo son. Los patrones nunca se repiten salvo para una serie de ángulos especiales. Estas estructuras se han popularizado debido a que **otorgan al grafeno propiedades superconduc-**

toras, aunque en otros campos de la física ondulatoria también presentan propiedades interesantes.

En un trabajo reciente publicado en la revista *Physical Review Applied* (DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.L011001), los investigadores Marc Martí Sabaté y Dani Torrent Martí, de la Universitat Jaume I (UJI) de Castelló, han estudiado las propiedades acústicas de placas elásticas en las que se han insertado resonadores siguiendo patrones de Muaré. Como



señala el Dr. Torrent, “como se trata de muestras pequeñas, este trabajo nos ha permitido profundizar más en los mecanismos de localización de ondas en estos materiales”, y añade que “el trabajo demuestra que existe una interacción dominante entre pares de dispersores de las dos redes”. Como puede verse en la figura, el lugar exacto en el que esta interacción tiene lugar depende fuertemente del ángulo de giro entre las dos redes que forman el patrón de Muaré, por lo que es posible “sintonizar” la frecuencia y el lugar a la que aparece el estado localizado.

Esta capacidad de seleccionar la frecuencia de localización del campo acústico mediante un mecanismo tan sencillo tiene gran relevancia, sobre todo de cara a la fabricación de dispositivos basados en estas ondas, como biosensores, microlentes o dispositivos de recuperación de la energía térmica, concluye el Dr. Torrent.