

# 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 actores<sup>1</sup>

## HÉLICES QUE TRANSFORMAN FLUJOS DE CALOR EN MOVIMIENTO

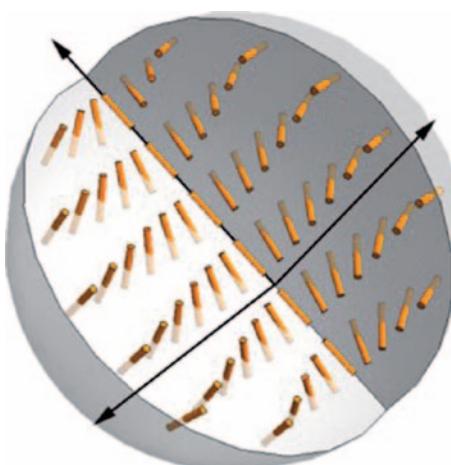
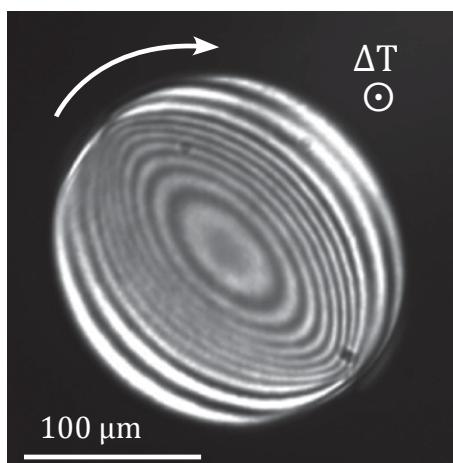
**L**os rotores y motores moleculares —como las proteínas encargadas de la auto-organización activa del citoesqueleto celular— son entes nanométricos que **transforman la energía circundante en movimiento** orientado. Entre los intentos incipientes del ser humano por replicar tal proeza, cabe destacar el comportamiento de los **cristales líquidos** cuyas moléculas, en determinadas condiciones, pueden adquirir una **rotación colectiva asociada**

este efecto puede ser observado en los llamados cristales líquidos colestéricos, cuyas moléculas se organizan formando hélices debido a la presencia de dopantes quirales (entidades que carecen de simetría espectral).

El efecto descrito por Lehmann fue incorporado en la hidrodinámica de cristales líquidos colestéricos en los años 60 del siglo pasado asumiendo que depende en exclusiva de la naturaleza quiral de los constituyentes. Sin embargo, experimentos recientes muestran que la presencia de quiralidad a escala molecular no es suficiente para que se manifieste la rotación Lehmann y que quizás tampoco sea necesaria.



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



con flujos de calor o de materia. A finales del siglo XIX, el físico alemán Otto Lehmann acuñó este término, “cristal líquido”, para resaltar que se trataba de sustancias que combinaban fluidez con propiedades ópticas similares a las de los cristales. El propio Lehmann reportó, observando gotas de derivados del colesterol, un **efecto termomecánico** en virtud del cual las moléculas del cristal líquido entraban en precesión al estar expuestas a un gradiente de temperatura. De forma generalizada,

Jordi Ignés-Mullol de la UB, en colaboración con colegas de la Escuela Normal Superior de Lyon, ha demostrado experimentalmente (DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.057801) que **la existencia de una configuración helicoidal macroscópica es condición necesaria y suficiente** para que la rotación Lehmann sea posible. Este resultado abre las puertas a un gran abanico de posibilidades para el **diseño de motores en la escala nanométrica** que puedan aprovechar localmente los allí ubicuos gradientes de temperatura.

El trabajo ha sido llevados a cabo mediante disoluciones acuosas del colorante alimentario E110, una substancia no quiral que forma las deno-

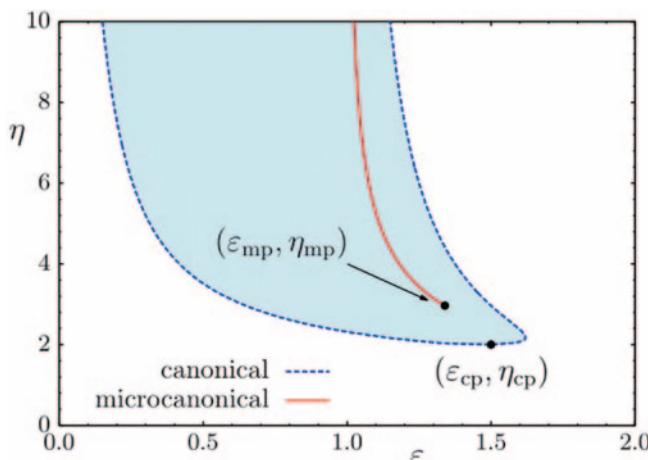
1 Sección preparada por Joaquín Marro (jmarro@ugr.es), en colaboración con actores implicados, que anima a proponer contribuciones relevantes para ser consideradas aquí.

minadas **fases líquido-cristalinas cromónicas**, cuyo nombre deriva de su similitud con la organización supramolecular del ADN al formar los cromosomas. Las gotas submilimétricas de fase nemática (sin quiralidad microscópica), en coexistencia con su fase isótropa, adquieren espontáneamente una configuración helicoidal debido a la naturaleza de los agregados supramoleculares fruto del autoensamblaje. En estos estudios se ha cuantificado la relación entre la velocidad de rotación y parámetros materiales o de control, con lo que **se ha podido esbozar un modelo**, todavía incompleto, que substituya o complemente modelos hidrodinámicos existentes.

## AISLADO O NO AISLADO, ÉSA ES LA CUESTIÓN

**L**as fases o estados cualitativamente distintos en los que puede presentarse la materia son objeto de estudio en termodinámica y en mecánica estadística, donde se sabe que **un fluido puede estar en la misma fase de equilibrio cuando está aislado que cuando está en contacto con un baño térmico** que fija su temperatura. En el lenguaje de la mecánica estadística, esto se corresponde con la **equivalencia de las colectividades** microcanónica (sistema aislado) y canónica (sistema en contacto con un baño térmico).

Pero **hay circunstancias en las que no se da tal equivalencia**. Es paradigm-



ma el caso de un gas bajo la influencia de su propia gravedad. Estos **sistemas autogravitantes**, que es como suelen llamarse, pueden encontrarse en configuraciones en las que aumenta la temperatura al disminuir la energía (se calientan al perder calor), siempre y cuando evolucionen completamente aislados del entorno. Este efecto contrario a la intuición se debe a que la gravedad es una **interacción de largo alcance**, capaz de acoplar partículas en una cierta región del sistema con todo el resto. Es por esto que, sin embargo, si el mismo sistema está en contacto con un baño térmico, ya no pueden darse esas extrañas configuraciones. El baño absorberá entonces el calor cedido por el sistema, de modo que la diferencia de temperatura entre ambos aumentará irreversiblemente, y nunca podrá por tanto alcanzarse el equilibrio térmico. En su lugar, el gas se ve obligado a sufrir una transición abrupta (un cambio de fase) a un nuevo estado en el que el equilibrio térmico con el baño pueda establecerse.

Ivan Latella y Agustín Pérez-Madrid de la UB, en colaboración con colegas italianos en el Instituto Superior de Sanidad, la Universidad de Florencia, INFN y SISSA, completando estudios anteriores (DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.230601), han estudiado recientemente (DOI: 10.1088/1742-5468/2016/07/073205) un modelo simplificado de gas autogravitante, conocido como *modelo de Thirring*, en el que se observa con precisión cómo el **comportamiento esencialmente depende de si el sistema está o no aislado**. Además de mostrar cambios de fase cuando se permite contacto con un baño térmico, el sistema también cambia de fase cuando está aislado. En ambos casos, los diagrá-

mas de fase muestran un punto crítico (véase figura adjunta) más allá del que las fases ya no pueden distinguirse entre sí, justo como ocurre con la transición entre líquido y gas del agua pura. En consecuencia, **configuraciones prohibidas para el sistema en interacción con el baño pueden observarse cuando el sistema está aislado**.

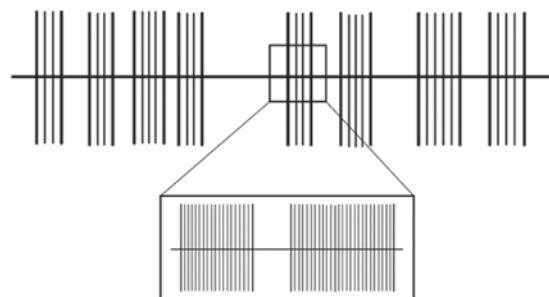
unas ramificaciones perpendiculares que lo cruzan (figura). La difusión a lo largo de estos peines resulta ser anómala pero el exponente no se parece al observado experimentalmente. Los mismos autores en colaboración con otro en el Instituto Max Planck en Dresden han propuesto ahora (DOI: 10.1088/1751-8113/49/35/355001) un **modelo de “peine fractal”** que da buena cuenta de la distribución y morfología irregulares de las espinas en sistemas reales suponiendo que la estructura fractal es un conjunto de Cantor.

Por otra parte, se sabe que **las partículas en difusión suelen de hecho quedar atrapadas en las espinas durante cierto tiempo, donde participan en diferentes reacciones químicas, y luego vuelven al eje principal**. Cuando estos hechos se tienen en cuenta, resulta que el DCM no solo indica difusión anómala sino, más concretamente, **superdifusión**, es decir que depende del tiempo como una potencia cuyo exponente es superior a la unidad (pero inferior a 2). A este tipo de comportamiento macros-

## LA DIFUSIÓN REAL ES ANÓMALA

**L**a difusión de una sustancia en un medio homogéneo se caracteriza por mostrar un perfil de concentraciones según una función **gaussiana** en el espacio y en el tiempo. En consecuencia, la dispersión a escala macroscópica en un medio homogéneo está caracterizada por un desplazamiento cuadrático medio (DCM) proporcional al tiempo. Sin embargo, en la naturaleza nos encontramos a menudo con difusiones en medios irregulares, con geometrías complejas (sustancias porosas, por ejemplo), que distan mucho de ser homogéneos. Ni el perfil de concentraciones tiene entonces que ser necesariamente gaussiano ni el DCM proporcional al tiempo.

En este contexto, hace unos años atrajo el interés de los físicos el **movimiento de partículas a través de una especie de dendritas que presentan ramificaciones (denominadas “espinas”) con diferentes formas y tamaños**. Los experimentos apuntaban a que la difusión por estas dendritas era anómala, concretamente, mostraban un **DCM proporcional a una potencia del tiempo con exponente menor que la unidad, esto es, se trataba de una difusión más lenta** que la gaussiana. Con objeto de abordar el problema en términos sencillos, Vicenç Méndez de la UAB, en una colaboración con el Instituto Israelí de Tecnología (DOI: 10.1016/j.chaos.2013.05.002), propuso en 2013 representar esas dendritas mediante un **“peine espinado”**, esto es, una estructura bidimensional con un eje principal y



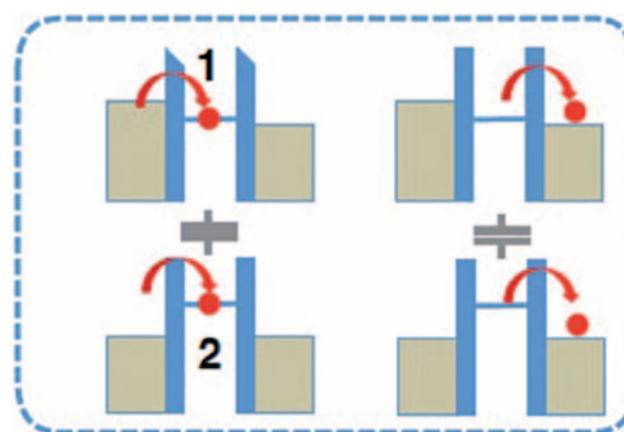
cópico se le asocia un comportamiento microscópico familiar que se ha descrito diciendo que **las partículas realizan vuelos de Lévy**. El modelo presentado es muy completo, ya que admite una gran variedad de tipos de difusión, pero todavía ha de concretarse especificando en él qué tipo de estructura fractal forman en realidad las dendritas con espinas. La solución puede estar próxima.

## ARRASTRE EN CONDUCTORES NANOMÉTRICOS ACOPLADOS

**U**n gran reto de la tecnología actual es la **implementación de dispositivos electrónicos a es-**

calas de unos pocos nanómetros, donde la física clásica pierde validez y tenemos de usar las leyes cuánticas. Además, cuando dos conductores eléctricos se encuentran próximos (los sistemas 1 y 2 de la figura), surge interacción entre ellos debida a la fuerza de Coulomb repulsiva entre electrones (simbolizada mediante un acople capacitivo en el gráfico). En estas condiciones, el paso de corriente por uno de los conductores (el 1) puede generar una corriente de arrastre coulombiana en el otro conductor (el 2) incluso cuando no está sometido a fuerza electromotriz alguna. Se trata de un fenómeno puramente clásico en el que interacciones entre cargas posibilitan el arrastre de electrones en uno de los conductores a consecuencia de la corriente generada en el otro. Sin embargo, supongamos que los conductores en cuestión son de los llamados **átomos artificiales o puntos cuánticos**. Estos sistemas son tan diminutos que los electrones dentro permanecen ligados en las tres dimensiones espaciales, siendo su espectro energético discreto (véase los niveles azules de la figura). Al acoplarlos mediante barreras aislantes a contactos metálicos (las regiones marrones de la figura), los electrones pueden fluir a bajas temperaturas a través del punto cuántico gracias al efecto túnel, cuyo origen es la naturaleza ondulatoria de los electrones. Es más, cuando dos puntos cuánticos se sitúan uno cerca del otro, puede darse una posibilidad más sorprendente: dos electrones pueden transmitirse simultáneamente a través de ambos puntos cuánticos debido a la combinación de efecto túnel e interacciones coulombianas, tal como quiere ilustrar la figura. Este fenómeno, conocido como **efecto túnel cooperativo**, solo puede explicarse en el contexto de la mecánica cuántica e influye de modo crucial en el efecto de arrastre.

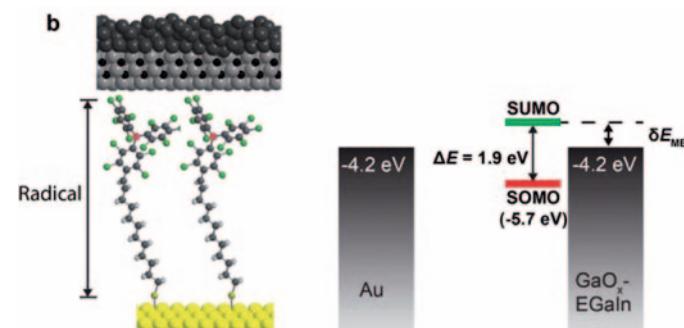
David Sánchez y Rosa López del IFISC (UIB-CSIC), en colaboración con la Universidad de Stanford y otros centros de investigación en Corea del Sur, California e Israel, han demostrado en el laboratorio por primera vez (DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.066602) la **existencia**



de este efecto túnel cooperativo en la corriente de arrastre que presenta un dispositivo de dos puntos cuánticos, y han sido capaces de reproducir los datos experimentales con un modelo teórico de transporte cuántico que tiene en cuenta las interacciones de repulsión entre electrones. Se trata de un avance clave para la compresión de la dinámica de partículas en conductores que interactúan entre sí que ha de tener **repercusiones en nanoelectrónica y computación cuántica**.

## CONTROLANDO SUTILMENTE LAS UNIONES MOLÉCULA-METAL

**L**a integración de ciertas moléculas en circuitos electrónicos permite miniaturizar al máximo los dispositivos y generar funcionalidades difíciles de obtener con los semiconductores convencionales. En particular, la conductancia del dispositivo puede entonces adecuarse a la aplicación en cuestión ajustando la estructura de la molécula. Un reto importante en estos diseños reside en el control de la **alineación de los niveles de energía** de los orbitales frontera moleculares HOMO (el ocupado más alto) y LUMO (el desocupado más bajo) **con respecto a los niveles de Fermi de**



**sus característicos orbitales frontera permite controlar el alineamiento de los orbitales activos en el transporte electrónico.**

Se sigue que el alineamiento de los niveles de energía en uniones molecu-

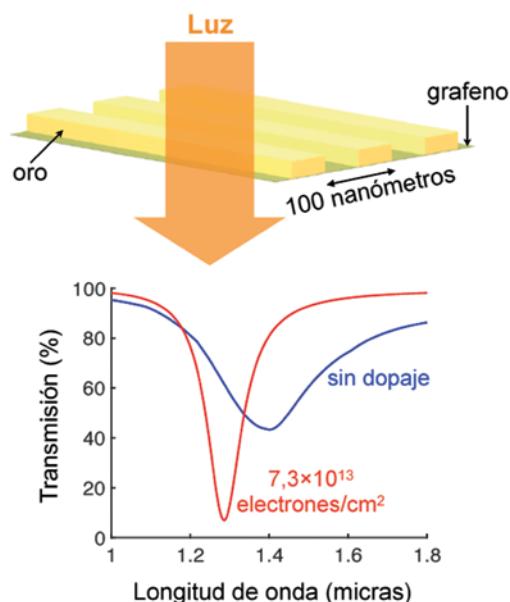
respecto a los niveles de Fermi de los electrodos "fuente" y "sumidero". Sin embargo, los niveles de energía en las uniones moleculares de solo dos terminales, al no poseer electrodo puerta, sufren de una especie de "apuntalamiento" por los niveles de Fermi de los electrodos más próximos, denominado *pillow effect*, que impide controlar su alineación.

Carlos Franco, Núria Crivillers, Marta Mas-Torrent, Concepció Rovira y Jaume Veciana en ICMAB-CSIC y UAB, en colaboración con la Universidad Nacional de Singapur, han preparado y estudiado (DOI: 10.1038/ncomms12066) diversas uniones moleculares sólidas de dos terminales, unas hechas con monocapas auto-ensambladas de moléculas de distinta longitud con grupos *radicalarios* estables, y otras análogas con grupos muy parecidos pero no-radicalarios, ambas con igual estructura supramolecular. Han observado así que la densidad de corriente electrónica que pasa por las uniones radicalarias es dos órdenes de magnitud superior a la que pasa por las no-radicalarias. Y han podido concluir que este incremento es debido a la menor barrera túnel que presentan las uniones radicalarias, donde se produce el transporte de electrones a través de un mecanismo túnel coherente no-resonante asistido por el orbital desocupado de menor energía, inferior a la de los orbitales LUMO de los no radicales. Esto muestra cómo la elección de moléculas radicalarias con

lares sólidas de dos terminales basadas en monocapas auto-ensambladas pueden regularse mediante modificaciones exclusivamente químicas, sin necesidad de alterar la estructura supramolecular de la unión. Esta estrategia supone una **nueva alternativa, muy atractiva, para controlar las propiedades eléctricas de esas uniones de dos terminales.**

## PLASMONES EN AYUDA DEL GRAFENO

**E**l **grafeno**, esa famosa película de carbono de un átomo de espesor, posee extraordinarias propiedades debido a su peculiar estructura de bandas de electrones. Por ejemplo, en su estado puro **absorbe** alrededor del 2.3 % de la **luz incidente en un amplio espectro** que va desde el infrarrojo hasta casi el límite del rango visible, pero **esta absorción disminuye drásticamente al ser “dopado”**, esto es, cargado eléctricamente como si fuera la placa de un condensador. Renwen Yu, Valerio Pruneri y Javier García de Abajo del ICFO en Barcelona han predicho recientemente (DOI: 10.1038/srep32144) que **esta respuesta óptica**



ha de permitir modular la transmisión de luz a través de estructuras híbridas que combinen **grafeno con rejillas nanométricas de metales nobles**. Como ilustra la figura adjunta, la modulación alcanzada es mucho mayor que la propia de la monocapa de carbono aislada.

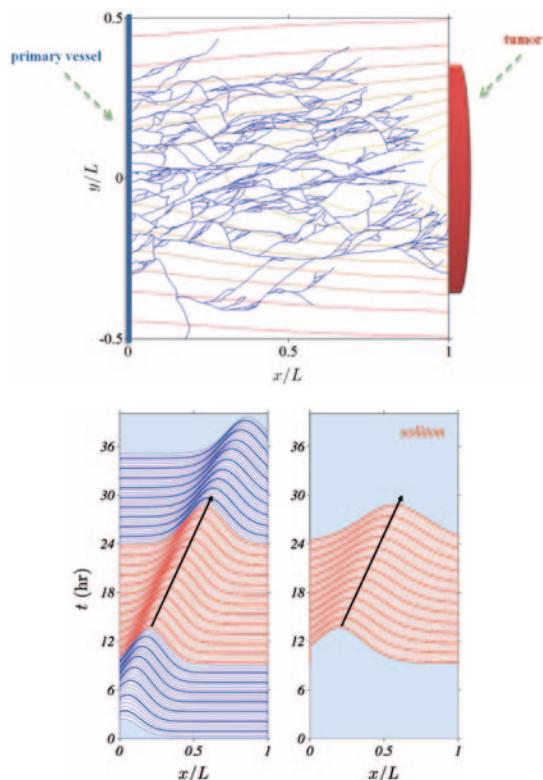
Esto es consecuencia, aclaran esos investigadores, de que los metales nobles soportan oscilaciones colectivas de sus electrones de conducción —los **plasmones de superficie**— a frecuencias que dependen de la geometría y dimensiones de la superficie metálica, y se acoplan con facilidad a la luz que incide sobre ellos, dando lugar a peculiares fenómenos ópticos como la absorción anómala de luz en redes metálicas de difracción. Para las rejillas ilustradas en la figura, la frecuencia de los plasmones está en el rango del infrarrojo cercano, donde el grafeno presenta su extraordinaria capacidad de modulación electro-óptica. El contacto de una monocapa de carbono con la rejilla puede afectar los plasmones pero, cuando el grafeno es incapaz de absorber luz por estar dopado, los plasmones logran oscilar, respetando las propiedades ópticas de la rejilla, incluso la presencia de un mínimo de transmisión asociado con dichas excitaciones. En cambio, la vida media de los plasmones disminuye drásticamente si el grafeno no está dopado, reduciéndose en consecuencia su capacidad para atenuar la transmisión de luz. Este comportamiento viene acompañado de un fuerte corrimiento en la frecuencia de los plasmones, como indica la figura.

La realización de estas propuestas supondría un avance importante hacia el objetivo de modular luz mediante la aplicación de pulsos eléctricos a velocidades grandes. Este tipo de modulación es hoy necesaria para transferir adecuadamente señales eléctricas por las redes de fibra óptica que sostienen el gran flujo de datos que demanda la sociedad. Las expectativas son de llegar así a dispositivos que modulen a velocidades 100 veces mayores que las actuales.

## SOLITONES EN TUMORES

**E**n la **angiogénesis** —generación y crecimiento de vasos sanguíneos— se segregan unas sustancias (factores de crecimiento) cuando falta oxígeno en las células de un tejido que, llegando a un vaso sanguíneo,

abren sus paredes y brotan capilares hacia la región con problemas transportando oxígeno y nutrientes. Estos mecanismos resultan ser esenciales para cerrar heridas y crecer y regenerar órganos, pero los tumores cancerosos se aprovechan de ellos, pues atraen vasos capilares que les alimenten y permitan crecer. La angiogénesis es también relevante en isquemias cardíacas, retinopatías diabéticas y de niños prematuros, reuma y enfermedades



músculo-esqueléticas y desórdenes inflamatorios, inmunes e infecciosos; de hecho, ya se han autorizado agentes anti-angiogénicos en el tratamiento del cáncer y la ceguera. Es claro, por tanto, el enorme interés que tiene la medicina por llegar a comprender y controlar estos mecanismos.

El estudio de la angiogénesis en tumores viene progresando desde hace 40 años combinando modelos matemáticos, computación y observaciones experimentales. Puesto que todavía se ignoran muchos aspectos de la dinámica celular, estos estudios involucran modelos estocásticos generalmente basados en que las células endoteliales que componen un capilar avanzando hacia un tumor son de dos tipos. Esto es, hay células (alrededor de diez) en la punta del capilar que no proliferan y se mueven según el gradiente

de concentración del factor de crecimiento hacia la región falta de oxígeno. Además, hay otras células que siguen a éstas, proliferan y van construyendo las paredes del capilar. Simplificando, las puntas avanzan sometidas a fricción, a una fuerza proporcional al gradiente del factor de crecimiento, y a una fuerza aleatoria que puede modelarse como un *ruido blanco*, y se sabe que pueden eventualmente dividirse en dos puntas y fusionarse con vasos sanguíneos que encuentran en su camino (*anastomosis*) —panel izquierdo en la figura adjunta.

Luis L. Bonilla, Manuel Carretero y Filippo Terragni de la UC3M, en colaboración con la Universidad de California en Santa Bárbara, acaban de resolver aproximadamente (DOI: 10.1038/srep31296) una **descripción** —que ellos mismos habían desarrollado antes en colaboración con la Universidad de Milán (DOI: 10.1103/PhysRevE.93.022413)— para la **densidad de las puntas activas de los capilares mediante una ecuación integro-diferencial**. Se sigue que esta **densidad avanza hacia el tumor como un solitón** similar al de las ondas en aguas superficiales y los tsunamis (panel derecho en la figura). El tratamiento numérico indica que el solitón es la solución estable al término de una etapa inicial de formación después de salir del vaso sanguíneo primario. Esta **identificación del solitón como motor de la angiogénesis** sugiere la posibilidad de describir ese complejo proceso mediante coordenadas colectivas, lo que en principio es muchísimo más sencillo, de modo que es un **importante primer paso para comprender y controlar la angiogénesis** inducida por tumores mediante modelos teóricos.

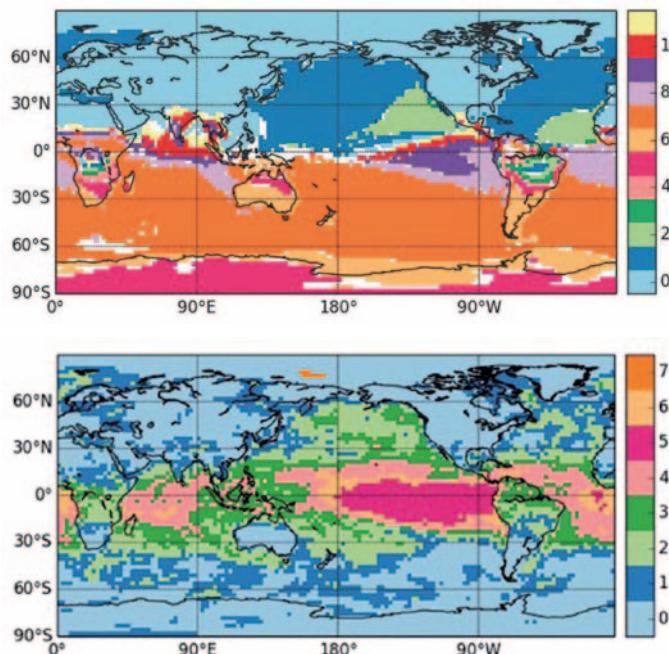
## IDENTIFICANDO SIMILITUDES CLIMÁTICAS

Muchos sistemas naturales pueden verse como conjuntos de unidades dinámicas que interaccionan en red con estructura modular, donde se relacionan distintas comunidades de nodos muy interconectados. El **clima de nuestro planeta**, con su enorme variedad de subsistemas relacionados, es paradigma de sistema con esta estructura. El **proyecto europeo LINC** (climatelinc.eu)

coordina científicos de distintas áreas para desarrollar técnicas que permitan comprender los fenómenos climáticos desde este punto de vista. Giulio Tirabassi y Cristina Masoller de la UPC han propuesto en este marco dos nuevos métodos para identificar comunidades climáticas, y los han validado analizando conjuntos de datos reticulares que cubren toda la superficie de la Tierra (DOI: 10.1038/srep29804). Identificando desfases entre series temporales de distintos puntos, y mediante técnicas simbólicas de análisis de datos, los investigadores han descubierto las **comunidades regionales más significativas en los fenómenos climáticos a gran escala**.

El primer método permite identificar **regiones geográficas con ciclos estacionales sincrónos**. La primera figura muestra con el mismo color las que tienen un ciclo de temperatura superficial del aire sincrónico; el desfase entre dos regiones se calcula restando los números asociados con cada color (en las zonas blancas no están bien definidos los desfases). Como se esperaba, hay un desfase de seis meses entre regiones continentales en distintos hemisferios (por ejemplo, la comunidad que contiene Argentina y Australia con la que contiene Canadá). También se observa que los océanos tienen un retraso mínimo de un mes respecto a las masas continentales, y aún mayor (dos o tres meses) en la región de El Niño, en el océano Pacífico oriental ecuatorial.

El segundo método propuesto detecta **comunidades con patrones de variabilidad climática similares**. Las redes climáticas se suelen construir analizando correlaciones, de modo que regiones vecinas estén muy fuertemente conectadas mientras que regiones distantes están débil o indirectamente conectadas. El método propuesto es novedoso pues se basa en **análisis estadístico simbólico de series temporales** (en lugar de analizar correlaciones)

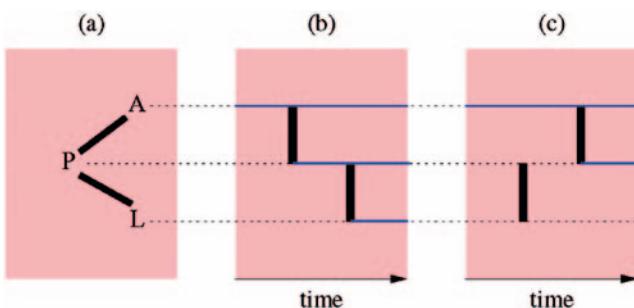


y permite identificar cuatro macro-comunidades con similares características climáticas. Se muestran en la segunda figura: los continentes en los dos hemisferios están en la misma comunidad, otra comunidad está formada por la región de El Niño, mientras que los océanos se dividen en dos comunidades que representan regiones tropicales y extra-tropicales. Un análisis detallado de las propiedades estadísticas de las series temporales simbólicas en estas comunidades permite demostrar que comparten similares patrones de variabilidad climática.

Estas herramientas para identificar comunidades a partir de señales observadas pueden ser útiles en el estudio de otros sistemas dinámicos complejos como, por ejemplo, el cerebro.

## IMPORTA CÓMO ES LA SECUENCIA DE LAS INTERACCIONES

Es bien conocida hoy día la importancia que tiene el concepto de red para entender los cruciales efectos de las interacciones en sistemas biológicos, sociales y tecnológicos. En este contexto interesan las propiedades de la red y su influencia en procesos tales como sincronización y propagación y difusión de señales, rumores o epidemias, un aspecto que, a pesar de notables progresos en las últimas décadas,



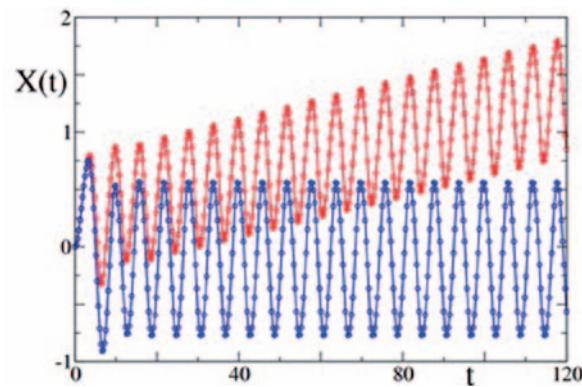
requiere todavía análisis profundos. Por ejemplo, hay que profundizar en las consecuencias de que las redes no son estructuras estáticas sino que las interacciones ocurren en momentos determinados y pueden darse secuencias de interacciones. Es el caso de las interacciones sociales, donde cada individuo no interactúa a la vez con todos sus contactos —gráfico (a) en la figura— sino que Pedro (P) habla primero con Alicia (A) y luego coincide con Luis (L) —gráfico (b)— o quizás Pedro habla primero con Luis y, al final del día, Alicia y Pedro cenan juntos —gráfico (c)—. Lo mismo ocurre en otras muchas circunstancias, y es evidente que la secuencia real de las interacciones en un sistema afectará generalmente a los procesos que se siguen de ellas. En fin, entender las consecuencias de todo esto es crucial para explicar procesos emergentes en sistemas complejos.

Konstantin Klemm y Víctor M. Eguíluz del IFISC (CSIC-UIB) en una colaboración con la Universidad Nazarbáyev de Kazajistán y las Universidades de Oxford y Bristol han encontrado soluciones analíticas a los llamados, en este contexto, *procesos de contacto y propagación* para secuencias de interacciones, tanto específicas como aleatorias, y han comparado los resultados con el mismo proceso dinámico sobre la *red agregada equivalente*, es decir, la red que contiene todas las interacciones (DOI:10.1088/1367-2630/18/7/073013). Este trabajo localiza el punto crítico para la propagación que separa la fase inactiva, mostrando que, si las interacciones entre los elementos de un sistema complejo ocurren secuencialmente, es más fácil que una epidemia se propague. Técnicamente, la no commutabilidad de las matrices de adyacencia a distintos tiempos es la que gobierna la dinámica. Este resultado abre la puerta a considerar otros aspectos que pueden ser fundamen-

tales para entender la propagación en redes complejas como, por ejemplo, la distinta duración de cada una de las interacciones o las correlaciones que existen en la secuencia de las interacciones.

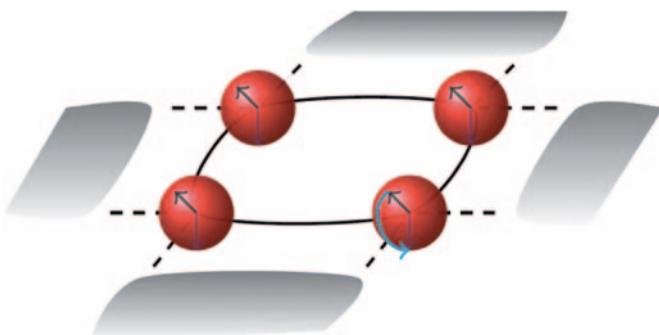
por separado, no dan lugar a transporte neto alguno. Estos investigadores han considerado explícitamente **dos casos**. En uno, las transiciones ocurren entre dos estados discretos, mientras que el sistema transita de forma continua en el otro. En el primer caso, el transporte neto ocurre únicamente si los tiempos de residencia en cada estado son diferentes. La línea azul en la **figura adjunta** muestra la ausencia de movimiento dirigido cuando los tiempos de residencia son iguales. La línea roja en esta figura pone de manifiesto la emergencia de transporte para tiempos diferentes.

Aunque el mecanismo propuesto solo es estudiado en este trabajo en el marco específico de la ecuación de sine-Gordon, la **idea puede ser fácilmente aplicada al caso de otros sistemas** con soluciones tipo solitón. Además, este trabajo puede servir de base a posibles **realizaciones experimentales** en uniones Josephson largas en las que podría observarse el fenómeno en cuestión.



## MAGNETISMO MODIFICADO POR CUÁNTICA FUERA DEL EQUILIBRIO

La naturaleza muestra diversos **cambios de fase fuera del equilibrio** —hoy casi puede decirse que se nos presenta como un gran combinado de ellos. Ya entendemos bien casos en física, biología y sociología que se corresponden con situaciones esencialmente clásicas pero ¿no serán todavía más interesantes en física las **transiciones entre estados macroscópicos de la materia directamente condicionados por las leyes cuánticas?** Oscar Viyuela de la UCM ha colabora-



do con investigadores de la Universidad Tecnológica de Dalian en China, la Escuela Normal de Pisa, la Universidad de California en Santa Bárbara, el CNRS francés, y la Universidad de St. Andrews en el estudio teórico desde esa perspectiva de un sistema magnético fuera del equilibrio (DOI: 10.1103/PhysRevX.6.031011).

Los investigadores, combinando un tratamiento campo medio de grupos de interacciones (véase una ilustración esquemática en la figura adjunta) con sofisticados métodos numéricos, han demostrado que, contrariamente a la situación estándar en termodinámica del equilibrio, fluctuaciones asociadas con interacciones de corto alcance pueden modificar drásticamente el diagrama de fases de un sistema magnético. Más concretamente, **pequeñas fluctuaciones cuánticas** (que no estarían incluidas en un tratamiento estándar de campo medio) **pueden hacer que el sistema deje de ser magnético cuando se encuentra fuera del equilibrio** debido, en el caso estudiado, a que sus elementos magnéticos (espines) son “volteados” por interacción con el entorno.

Desde el punto de vista experimental, sistemas magnéticos cuánticos fuera del equilibrio del tipo estudiado **pueden ser sintetizados** en diversas plataformas físicas de simulación cuántica. La idea, originalmente propuesta por Richard Feynman, consiste en **replicar las interacciones** del sistema cuántico de interés —que generalmente es difícil de observar en la naturaleza— **en otro sistema cuántico que pueda diseñarse y controlarse mejor en el laboratorio**: sistemas de iones atrapados, redes ópticas de átomos fríos o cavidades acopladas de *qubits* superconductores. En estas plataformas, las distintas variables del sistema como, por ejemplo, la intensidad y frecuencia de un haz

los resultados en este trabajo puedan pronto ser **verificados experimentalmente**.

## LA PIEL DE ORIÓN ES RUGOSA

**E**n el medio interestelar hay gigantescas nubes de polvo, hidrógeno molecular, monóxido de carbono y otros gases moleculares. Aparte de la fascinación que despierta ese “**espacio entre las estrellas**”, es reservorio material para formar nuevos cuerpos celestes, y resulta por tanto **crucial conocerlo bien**. Pero esos gases están a temperaturas muy bajas, entre 0 y -250 °C, de modo que sus emisiones solo pueden detectarse en el rango milimétrico: se trata de radiación electromagnética con energías intermedias entre el infrarrojo y las radioondas. **La interferometría** —que, combinando observaciones simultáneas de varios radiotelescopios separados por cientos de metros, equivale a observar con un único telescopio de estas dimensiones— hoy ya **permite afortunadamente obtener imágenes de muy alta resolución** en el rango relevante.

Javier R. Goicoechea, Sara Cuadrado, José Cernicharo y Nuria Marcelino del ICMM-CSIC en colaboración con Asunción Fuente del OAN-IGN en Alcalá de Henares y colegas del CNRS y otros centros franceses han obtenido (DOI: 10.1038/nature18957) la **primera imagen en alta resolución del borde de la nube molecular de Orión**, la región de formación de estrellas masivas

láser, pueden ser ajustadas y controladas por el experimentador, permitiendo el diseño de las interacciones físicas requeridas en cada circunstancia. Se abre así la posibilidad de que más cercana al Sistema Solar (a unos 1.350 años luz). Es **foco de atención de los astrofísicos** para comprender el nacimiento y evolución de este tipo de estrellas que, en el caso del cúmulo del Trapecio (en el centro de la nebulosa), son hasta 30 veces más masivas y 200.000 veces más luminosas que el Sol. Interesa estudiar la morfología y actividad en la zona como resultado de interacciones entre estrellas masivas jóvenes y la nube parental.

Las imágenes obtenidas —usando ALMA, un conjunto de 66 radio antenas a más de 5.000 metros de altura en el desierto de Atacama, Chile— revelan (figura adjunta) **filamentos y rugosidades con patrones periódicos en el borde de la nube molecular**. El intenso campo de radiación ultravioleta y los vientos procedentes de las estrellas del Trapecio **comprimen las capas más externas** de la nube molecular aumentando su densidad y dando lugar a esas estructuras.

Los investigadores **se preguntan ahora si grumos y filamentos densos como éstos**, formados por la compresión del borde irradiado de la nube, **podrían ser las “semillas” en la formación de una nueva generación de estrellas**. La masa de los grumos detectados con ALMA en Orión es muy pequeña com-



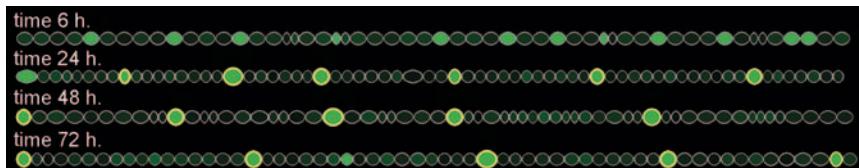
parada con la que se necesitaría para que la gravedad impulsara su colapso, pero **¿podrían estos grumos unirse y dar lugar a condensaciones más masivas?** Nuevas observaciones y modelos ayudarán a entender si estos mecanismos en la piel de Orión podrían ser, en definitiva, un mecanismo inductor de formación estelar.

## COMPLETANDO EL ESCENARIO REACCIÓN-DIFUSIÓN

**E**l estudio de la formación de patrones es un campo de enorme importancia en física básica y en física aplicada. De hecho, las propiedades de muchos materiales dependen de cómo se organizan las moléculas en su superficie, y nuestro propio cuerpo es resultado de la formación de patrones durante el desarrollo embrionario. Alan Turing fue pionero en el estudio de esos procesos de formación en sistemas químicos y biológicos. En un célebre artículo de 1952, desarrolló un modelo en el que dos sustancias pueden difundirse espacialmente mientras reaccionan en-

Javier Muñoz-García y Saúl Ares, en la UC3M, usando observaciones experimentales sobre la genética y el metabolismo de esas cianobacterias, han formulado una teoría que explica la formación de heterocistes (DOI: 10.1073/pnas.1524383113). La figura ilustra la evolución temporal, según simulaciones por ordenador de su teoría, de un filamento de cianobacterias inicialmente sin heterocistes: el color verde marca la concentración de activador, y las células con una membrana amarilla se han diferenciado en heterocistes.

El modelo muestra cómo, para comprender el mantenimiento del patrón cuando ya se han formado los primeros heterocistes, hay que ir más allá de Turing. Es necesario considerar dos tipos de inhibidores funcionando en escalas



tre ellas, con la particularidad de que una es **activadora**, capaz de potenciar tanto su propia producción como la de la otra sustancia, y ésta es **inhibidora**, que puede tener el efecto contrario. Este tipo de **mecanismo de reacción-difusión** se sabe hoy que puede dar lugar a una gran variedad de patrones: rayados, topis, espirales...

Hay cianobacterias que se organizan en ambientes pobres en nitrógeno de tal forma que son ejemplo de **patrón de Turing**. Se trata de las cianobacterias del género *Anabaena*, que forman filamentos unidimensionales de modo que cada célula vive pegada a dos vecinas. En ausencia de nitrógeno fijado en moléculas orgánicas, que es el único que pueden usar los seres vivos, aproximadamente una de cada diez células *Anabaena*, repartidas de forma casi regular a lo largo del filamento, se diferencian en un tipo de célula llamada *heterociste*, que es capaz de fijar nitrógeno orgánico a partir del N<sub>2</sub> ambiental y compartirlo con el resto de células del filamento. Sin embargo, así como las células en el filamento se siguen dividiendo y éste crece, los **heterocistes tienden a separarse entre sí**, mientras aparecen otros intermedios para mantener la proporción 1/10 con el resto de células.

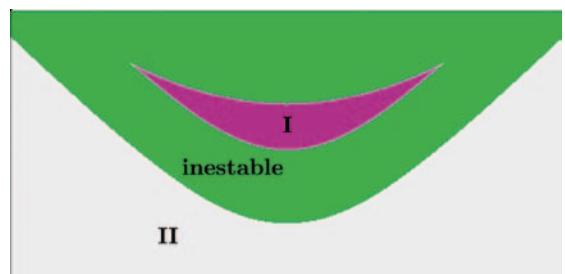
**de tiempo diferentes:** uno producido a tiempos tempranos por células sin diferenciar, y otro producido más tarde por los heterocistes. La comparación del modelo con datos experimentales ha permitido, además, predecir que debe de existir un segundo inhibidor producido en los heterocistes, probablemente relacionado con el nitrógeno orgánico sintetizado en ellos.

## INESTABILIDADES DINÁMICAS Y TOPOLOGÍA EN SISTEMAS BOSÓNICOS

**E**s sabido que la naturaleza consta de partículas fundamentalmente distintas: mientras los bosones tienden a organizarse ocupando un mismo estado cuántico, los fermiones se evitan. Con esa estrategia microscópica forman la materia cuyo estudio macroscópico consiste en gran parte en comprender **cómo se organizan conjuntos de esas partículas para, bajo diversas condiciones, formar distintas fases**. Un hito en estos estudios ha

sido el descubrimiento de nuevas fases relacionadas con lo que se denomina *orden topológico*. Éste, relacionado con la estructura y simetrías del sistema y caracterizado por los llamados *invariantes topológicos*, varía cuando el sistema sufre ciertos cambios de fase. Detectar y analizar estas **transiciones que involucran cambios topológicos** es generalmente mucho más difícil que el hacerlo en el caso de cambios de fase más convencionales cuyos parámetros de orden —la densidad material o la magnetización de las fases, por ejemplo— son experimentalmente accesibles con relativa sencillez.

El descubrimiento del efecto Hall cuántico popularizó un sistema con orden topológico, lo que ha llevado a descubrir muchos fenómenos relacionados con topología en sistema de fermiones. Sin embargo, **el papel de la topología en sistemas de bosones apenas ha sido todavía estudiado**, a pesar de esperarse que su muy diferente estadística genere nuevas e interesantes, seguramente exóticas propiedades. En este contexto es ya conocido que un estado bosónico en un sistema de bosones interactuantes puede presentar fuertes amplificaciones debido a **inestabilidades dinámicas** —como esas que pueden ocurrir en la amplitud de la oscilación cuando un niño se columpia—. Mónica Benito y Gloria Platero, del



ICMM-CSIC, en colaboración con colegas de la Universidad Técnica de Berlín, han demostrado recientemente (DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.045302) que las inestabilidades asociadas con algunas transiciones topológicas **pueden permitir detectar y caracterizar la transición**. Es más, el trabajo indica cómo se generan en la fase topológica **estados localizados con ocupación exponencialmente creciente**, lo que ciertamente favorecería su detección experimental. Resulta particularmente interesante cómo, midiendo las inesta-

bilidades dinámicas específicas de estos sistemas, se generan esos estados localizados con ocupación creciente, lo que **no tiene analogía en el caso de sistemas fermiónicos**. Por otra parte, es previsible que estos estados sean de **utilidad** en el desarrollo de nuevos nano-dispositivos relacionados con la amplificación de señales, ya que evitan pérdidas debidas a ruido.

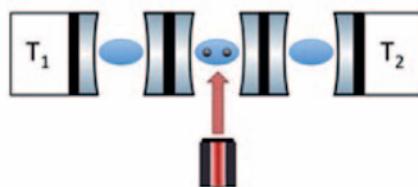
Las investigadoras presentan como ejemplo un detallado análisis de un sistema unidimensional de modos bosónicos con acoplamientos alternos distintos que, sujeto a un campo externo periódico, exhibe inestabilidades dinámicas. Según lo esperado, las distintas fases topológicas quedan separadas entonces por una zona inestable (figura adjunta).

## UN INTERRUPTOR ATÓMICO CONTROLADO POR SIMETRÍA

**L**a miniaturización de dispositivos electrónicos es un reto de la tecnología actual. La ley de Moore, que predice que el número de transistores en un circuito integrado se duplicaría cada dos años, empieza a ser exagerada, pero el tamaño de los transistores sigue disminuyendo y nos vamos acercando a una situación en la que los componentes electrónicos se aproximan al nivel atómico. Esto no solo afecta a la técnica, sino que supone desafíos teóricos pues, así como esos dispositivos reducen su tamaño, la física cuántica empieza a jugar un importante papel.

Daniel Manzano de la UGR, también en el MIT y en la Universidad de Tecnología y Diseño de Singapur, donde ha colaborado con Elica Kyoseva, acaba de presentar (DOI: 10.1038/srep31161) un modelo de **interruptor capaz de controlar el flujo de energía manipulando dos átomos**. El dispositivo consiste en tres cavidades ópticas conectadas (como ilustra la figura). La primera y la última reciben fotones de dos baños térmicos, y hay dos átomos en medio que actúan como interruptor del flujo de fotones entre el baño caliente y el frío.

Lo más novedoso del diseño consiste en que, a diferencia de propuestas anteriores, **no se basa en introducir o extraer átomos** del dispositivo, sino en



controlar su estado de simetría interna mediante la aplicación de un láser. Esto es, **el estado de los átomos determina su interacción con los fotones**. Cuando se encuentran en un estado simétrico, interactúan con los fotones e incrementan el flujo, mientras que si están en un estado antisimétrico son invisibles para los fotones de la cavidad, y esto hace que la corriente de energía decaiga. La diferencia de corriente entre un estado y el otro puede alcanzar hasta tres órdenes de magnitud, lo que supone una mejora frente a diseños anteriores, pues el dispositivo no ve así severamente limitadas sus aplicaciones.

La idea general, es decir, el control de corriente por simetría, se puede extender en principio con facilidad a otros dispositivos tales como spins o átomos fríos, y el dispositivo puede utilizarse como pieza primaria en el diseño de nuevos transistores, abriendo una nueva puerta a la construcción de dispositivos nanoscópicos.

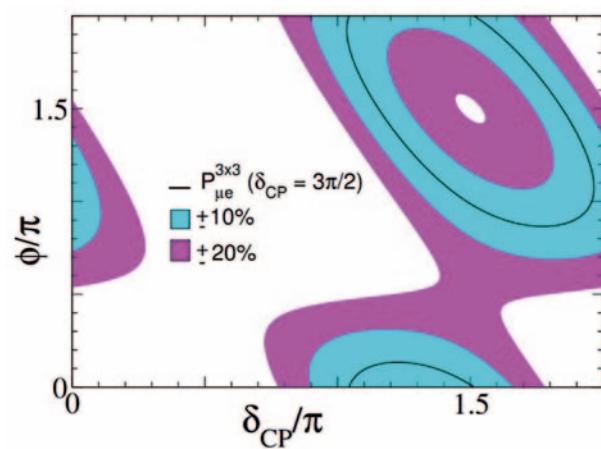
## OSCILACIONES DE NEUTRINOS Y ASIMETRÍA MATERIA–ANTIMATERIA

**E**l descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos, por el que Takaaki Kajita y Arthur McDonald recibieron el Nobel en 2015, es un importante hito ya que establece de forma inequívoca que **los neutrinos tienen masa**, en contra de lo esperado en el *modelo estándar*. En consecuencia, hay que volver a trabajar la teoría para atribuir masa a estas partículas fundamentales. Un paradigma predominante propone que **adquieren esa propiedad debido a la existencia de mensajeros pesados que no han podido ser todavía observados** debido a que su producción requeriría grandes energías.

Sin embargo, la existencia de estos mensajeros podría ponerse en evidencia de forma indirecta a través del comportamiento de los neutrinos ligeros conocidos. En particular, **pueden esperarse modificaciones en las oscilaciones** respecto a las predicciones más sencillas.

Mariam Tórtola y José W.F. Valle en el IFIC CSIC-UV, en colaboración con el CINVESTAV de México, han concluido (DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.061804) que **la existencia de neutrinos pesados podría afectar a las oscilaciones de los neutrinos ligeros en experimentos en los que se produjeran en un acelerador y fueran luego detectados a varios cientos de kilómetros de distancia**, con objeto de buscar posibles transformaciones en el tipo de neutrino observado respecto del producido. La observación de este “**cambio de sabor**” **del neutrino**, ya detectada en Japón (experimento T2K) y EE. UU. (NOvA), permite determinar propiedades fundamentales de los neutrinos como sus masas relativas y la forma en la que se mezclan entre sí que ya han sido medidas con bastante precisión en diferentes tipos de experimentos. Sin embargo, **hay un parámetro** (correspondiente al eje horizontal de la figura adjunta) **que todavía no se ha conseguido determinar bien y que podría ser responsable de la violación de una simetría básica asociada a la diferencia entre materia y antimateria** y, potencialmente, explicar la asimetría observada en el universo.

Estos investigadores han estudiado cómo las medidas de precisión de este parámetro previstas en futuros experimentos (como el DUNE en EE. UU.) pueden verse afectadas por la existencia de neutrinos pesados. En concreto, **la existencia de tales neutrinos implica-**



ría la presencia de una nueva fase, indicada en el eje vertical de la figura, lo que impediría la determinación precisa del parámetro en cuestión. En consecuencia, las observaciones de neutrinos en este tipo de experimentos presentarían una confusión entre la fase estándar y la nueva fase, como ilustra la figura. Esto podría implicar la necesidad de rediseñar las características experimentales de los experimentos previstos.

## SOBRE LA IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS FINITOS

**E**n los *medios granulares*, compuestos por partículas sólidas macroscópicas, se dice que la energía no se conserva en las colisiones entre esos “granos” debido a que, en términos más rigurosos, la energía supuestamente disipada se transmite a grados de libertad internos. Hay multitud de sistemas con este comportamiento, desde los prosaicos sacos de semillas o arena hasta los cúmulos de polvo galáctico y los cinturones de asteroides. A pesar de su peculiaridad, los medios granulares pueden mostrarse en estados análogos a los tradicionales de la materia, y se describen de hecho como un “estado de agregación granular de la materia”. En los últimos veinte años, vienen en consecuencia siendo estudiados con métodos de la física estadística pero, aun siendo muy grande, el número de granos en cada uno de estos sistemas es muy inferior al número de Avogadro y, por tanto, la magnitud de las fluctuaciones en ellos y otros efectos de tamaño finito son aquí extraordinariamente relevantes. La descripción más rigurosa que disponemos para estudiar gases granulares es la **ecuación de Boltzmann inelástica**,

pero su complejidad matemática obliga a realizar aproximaciones difíciles de controlar en la práctica. Como en otras disciplinas, se recurre por ello al **uso de modelos sencillos reticulares**. Esto es, se modela el sistema discretizando el espacio e intentando incluir el mínimo de ingredientes que, simultáneamente, permita mantener la fenomenología relevante del sistema real y conseguir un modelo con solución analítica.

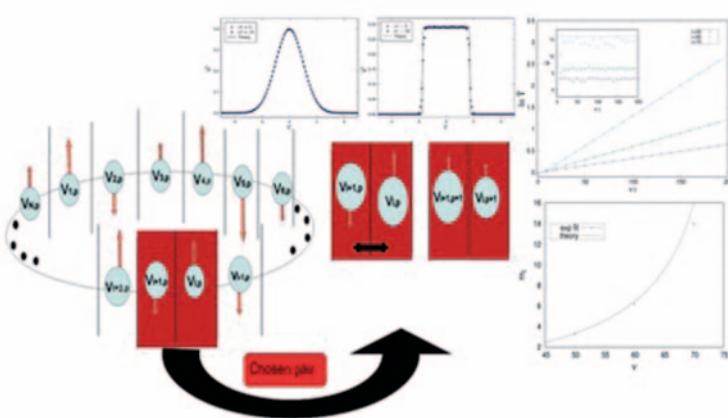
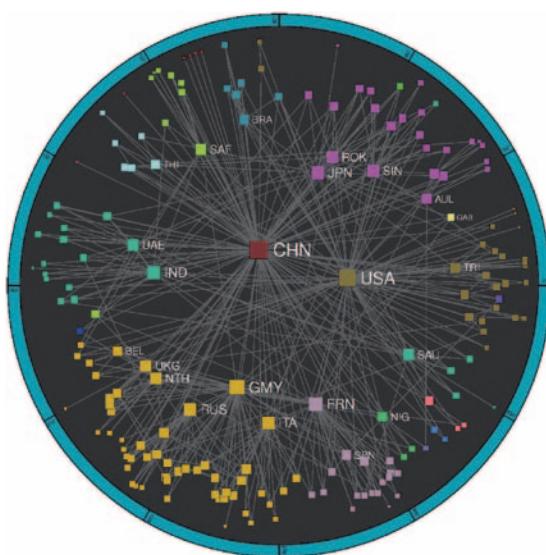
Carlos A. Plata y Antonio Prados de la US en colaboración con Antonio Lasanta de la UEX y colegas de la Universidad de Roma han estudiado la **relajación de fluidos granulares partiendo de un modelo de red unidimensional** (DOI: 10.1088/1742-5468/2016/09/093203). En concreto, han estudiado analíticamente el llamado **estado de enfriamiento homogéneo** (HCS), esto es, han seguido la evolución libre de un fluido granular en el que su energía media decrece monótonamente con el tiempo debido a la inelasticidad de las colisiones. Se sabe que el HCS es **inestable** cuando el tamaño del sistema se aproxima a un cierto valor crítico, que depende del grado de inelasticidad, al “dispararse” las fluctuaciones de la velocidad transversal. Los investigadores **han explicado esta inestabilidad transversal** con detalle mediante un análisis perturbativo de escalas múltiples y resolviendo exactamente un problema de autovalores. Además, han observado y justificado teóricamente un **novedoso fenómeno de multiescala**: las fluctuaciones de la energía total no escalan del modo esperado con la energía media, de modo que la varianza de la energía dividida por la energía media no es independiente del tiempo en el HCS. El sencillo método que

presentan no solo permite la resolución exacta de la evolución temporal de las magnitudes de interés, sino una **mejor comprensión global de ciertos aspectos básicos de la fenomenología de los fluidos granulares**.

## GEOMETRÍA OCULTA EN LAS RELACIONES COMERCIALES

**E**l comercio internacional mueve anualmente billones de euros y es un mecanismo clave en el proceso de globalización mundial. Su representación **como una red**, donde los nodos son países y las conexiones se corresponden con la importación y exportación de bienes, descubre una **estructura compleja** caracterizada por una **gran heterogeneidad** en el número de intercambios por país, la presencia de muchas relaciones a tres, o el **fenómeno pequeño mundo**, que implica que el número de conexiones que separa cualquier pareja de países es sorprendentemente pequeño.

Tradicionalmente, el comercio internacional se ha estudiado utilizando una



ley que, en analogía formal con la ley de la gravitación universal de Newton, establece que el **comercio entre dos países crece con el producto de sus Productos Internos Brutos y decrece con la distancia que los separa**, geográfica o inducida por otros factores. Aunque esta ley reproduce bien los volúmenes de comercio, es incapaz de predecir la existencia de las conexiones y, por lo tanto, de ex-

plicar la estructura global de la red. Guillermo García-Pérez, Marián Boguñá, Antoine Allard y M. Ángeles Serrano, de la UB, han propuesto un nuevo **modelo capaz de predecir la existencia de intercambios comerciales significativos entre países** (DOI: 10.1038/srep33441). El tamaño económico se combina en este modelo con la distancia para dar lugar a **una descripción puramente geométrica en el espacio hiperbólico**, en la que la existencia de un canal de comercio depende de la distancia que separa ambos países, con la particularidad de que la distancia hiperbólica crece con el alejamiento del centro del disco.

Usando este modelo se ha construido el **World Trade Atlas 1870-2013** como una **colección de mapas anuales de la red de comercio internacional** con datos correspondientes a todos esos años. La figura adjunta muestra el mapa de 2013 y el atlas completo puede verse en <http://morfeno.ffn.ub.edu/wta1870-2013>. En estos mapas, los países aparecen en coordenadas específicas del plano hiperbólico, más próximos al centro cuanto mayor es su economía, de manera que su probabilidad de interacción es mayor cuanto más cerca se hallan. Además de proporcionar una sencilla e intuitiva visualización, estos mapas permiten **medir cuantitativamente efectos de las fuerzas de globalización, jerarquización y localización que dominan el sistema**. Así, se ha encontrado que las pequeñas economías encuentran cada vez más dificultades para conectarse entre sí, mientras que las grandes han ido aumentando su hegemonía, y que los países tienden a agruparse, pero siguiendo una estructura cada vez más jerárquica.

## NANOCABLES PARA COMBATIR AL CÁNCER DESDE DENTRO

**L**as “raras” propiedades de los *nanomateriales* abren nuevas vías en la generación de terapias para combatir el cáncer, como ocurre con los *nanocables magnéticos* que muestran buena biocompatibilidad y una excelente adecuación para la internalización celular *in vitro*.

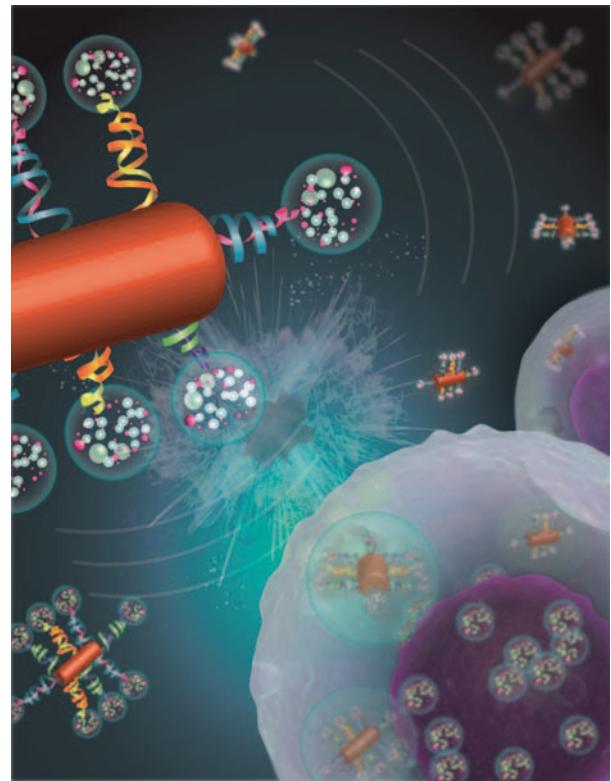
Antonio Aires, Francisco J. Terán, Jael F. Cadenas y Aitziber L. Cortajarena, en IMDEA Nanociencia y CIC biomaGU-

NE, en colaboración con la Universidad Rey Abdulá de Arabia Saudí, han empleado **nanocables magnéticos de hierro con un agente quimioterapéutico para inducir la muerte de células cancerígenas** mediante la **combinación del efecto quimioterapéutico con la perturbación mecánica** provocada por el movimiento de los diminutos cables magnéticos cuando están sometidos a un campo magnético alterno de baja frecuencia.

Por un lado, el **agente quimioterapéutico queda inmovilizado en la superficie** de esos nanocables a través de un enlace que permite su liberación selectiva en el interior de las células. Por otro lado, el movimiento mecano-magnético de los nanocables, es debido a que **presentan un gran momento magnético debido a su fuerte anisotropía** de modo que, al ser sometidos a un campo magnético alterno de baja frecuencia, generan grandes fuerzas y pares de torsión al tratar de alinear su momento magnético con el campo magnético externo. La figura es una ilustración artística de cómo los nanocables liberan el fármaco en el interior de células cancerosas. En el trabajo en cuestión (DOI: 10.1038/srep35786), concretamente se recubren nanocables de óxido de hierro con dos tipos de moléculas biocompatibles que permiten la adición posterior del agente quimioterapéutico. La internalización en células cancerígenas de mama se evaluó empleando microscopía confocal por reflexión y espectrometría de masas, mostrando que la formulación recubierta de albúmina de suero bovino presenta mayor internalización y menor aglomeración. Se concluye por tanto que la **albúmina de suero bovino parece ser mejor candidato para revestir los nanocables en aplicaciones biomédicas**. Estudios de citotoxicidad revelaron que el efecto en células de cáncer de mama de los nanocables con agente quimioterapéutico depende de la concentración del agente. Es también destacable que se observó un **claro efecto citotóxico sinérgico cuando un campo magnético**

**alterno de baja frecuencia (1mT, 10 Hz) se aplica** a las células tratadas con las diferentes formulaciones.

El trabajo concluye que los **nanomateriales multifuncionales son potencialmente muy útiles en el desarrollo de nuevas terapias multimodales**, en las que varios efectos citotóxicos son producidos por una única (nano) medicina, siendo la eficacia terapéutica final

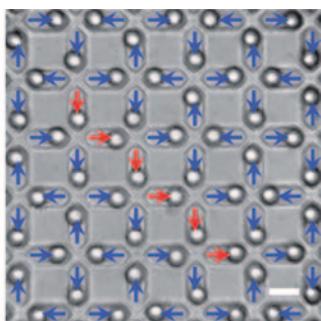
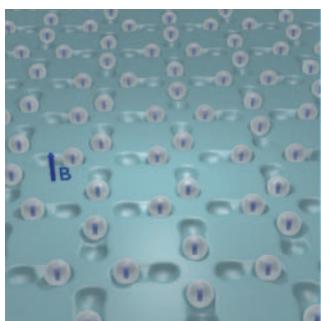


mayor que la suma de la que se obtiene del uso de las partes.

## CUANDO LA GEOMETRÍA FRUSTRA

**S**urge **frustración geométrica** en un sistema de muchos cuerpos cuando una estructura reticular impide la minimización simultánea de todas las energías de interacción locales. Es un fenómeno interesante, pues **conduce a estados fundamentales altamente degenerados y a fases complejas**, incluidas algunas muy familiares de la materia como el agua congelada y otras menos conocidas como el “hielo de espín” y ciertos materiales magnéticos.

En el caso del **agua congelada**, los átomos de oxígeno se ordenan en una estructura tetraédrica regular, donde cada átomo de oxígeno está ligado a



otros cuatro por un enlace mediante un átomo de hidrógeno. La repulsión entre los átomos de hidrógeno confinados en esta estructura implica que la configuración de mínima energía del sistema esté caracterizada por dos átomos de hidrógeno cerca de un oxígeno y otros dos alejados. Esta configuración se llama la **regla del hielo** y fue utilizada por Pauling en el año 1935 para explicar la presencia de entropía residual en el agua congelada a baja temperatura. El **hielo de espines** es un sistema análogo, donde los átomos de hidrógeno son sustituidos por **momentos magnéticos que apuntan hacia o desde el centro de un vértice de una estructura tetraédrica**. Este sistema ha llamado la atención por la aparición en él de defectos con propiedades de “monopolos magnéticos”, esto es, pares de vértices donde se viola la regla del hielo de forma que los espines magnéticos están descompensados. Estos defectos resultan interaccionar entre sí de forma similar a las cargas eléctricas.

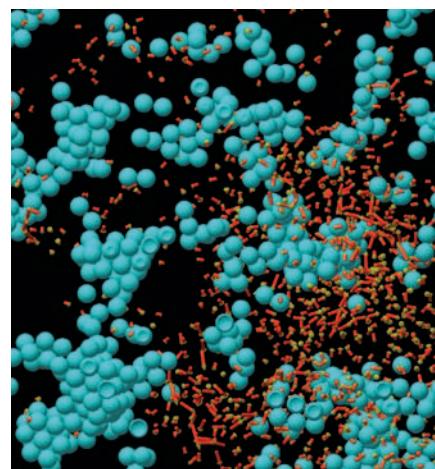
Johannes Loehr, Antonio Ortiz-Ambroz y Pietro Tierno, de la UB, han introducido recientemente (DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.168001) **un sistema alternativo de frustración geométrica** en la escala microscópica que, como ilustra la figura, involucra **partículas coloidales paramagnéticas** confinadas en pozos litográficos. En presencia de un campo magnético externo, las partículas interactúan entre sí de forma repulsiva, pero la geometría de los pozos fuerza a los vértices a cumplir la regla del hielo para minimizar la energía del sistema. A diferencia de otros sistemas frustrados, esta realización experimental **permite introducir defectos**, por ejemplo, desplazando las partículas individuales mediante una pinza óptica. Una vez creada una línea de defectos, tiende a contraerse para restablecer el estado de mínima energía, y la interacción entre los extremos de la línea

sigue la misma ley que en el caso del hielo de espines. Además de proporcionar un sistema alternativo donde investigar fenómenos de frustración geométrica, este trabajo supone un paso significativo hacia la **realización de nuevos dispositivos de memoria y procesamiento** basados en corrientes magnéticas.

## VIDRIOS QUE CRISTALIZAN MEDIANTE AVALANCHAS

**L**os vidrios son **sólidos no cristalinos**, con propiedades mecánicas características de los sólidos (incapaces de fluir como éstos) pero, como los líquidos, con estructura carente de orden de largo alcance a nivel molecular. Los detectamos con facilidad a nuestro alrededor, y hoy son parte importante de las nuevas tecnologías al permitir un eficaz transporte de información (a través de fibras ópticas), por ejemplo. Pueden crearse subenfriando rápidamente un líquido por debajo de su temperatura de cristalización, de modo que el sistema quede atrapado en una configuración desordenada, ya que la reorganización en una estructura cristalina ordenada, termodinámicamente más estable, es muy lenta. Sin embargo, con el tiempo, puede darse la llamada **devitrificación**, consistente en la aparición de dominios cristalinos en el seno del vidrio, capaz de inutilizar el material al cambiar sus propiedades físicas.

Eduardo Sanz y Chantal Valeriani, de la UCM, colaborando con colegas



en las Universidades de Edimburgo y La Sapienza de Roma, tratando de comprender el mecanismo microscópico de la devitrificación para llegar a controlarlo, estudiaron numéricamente (DOI: 10.1073/pnas.1308338110) un conjunto de **esferas duras** (que no pueden solapar), pues se trata del sistema más sencillo conocido que puede presentarse en estados fluido, vítreo y cristalino. Descubrieron de este modo que la devitrificación en este caso **ocurre por avalanchas**, esto es, desplazamientos cooperativos de pequeños grupos de partículas —representados mediante vectores rojos en la figura adjunta, que no muestra las partículas del vidrio para evidenciar las avalanchas— que se suceden de manera estocástica e intermitente en el vidrio. Esas avalanchas crean una especie de cizalla local que facilita la aparición y el crecimiento de pequeños cristales (representados como partículas azules en la figura) en sus proximidades.

Sanz y Valeriani, esta vez con Pablo Rosales-Pelaez y Pablo Montero de Higes, también de la UCM, acaban de confirmar (DOI: 10.1088/1742-5468/2016/09/094005) que **este mecanismo de devitrificación por avalanchas es más general**, pues también se observa cuando el potencial permite un cierto grado de solapamiento entre las partículas y cuando se trabaja en condiciones de presión o de densidad constante. Más concretamente, han visto cómo esa devitrificación se hace más evidente al aumentar la densidad, alargándose los períodos de reposo entre avalanchas y agudizándose el contraste dinámico entre reposos y avalanchas. Además, observan que disminuye el grado de cristalinidad del sistema generado por las avalanchas, de modo que el vidrio se hace más resistente a la devitrificación, al aumentar la densidad. Es, sin duda, un camino hacia un mejor control de estos procesos.

## ANTIFERROMAGNETOS COMO ALTERNATIVA A LOS FERROMAGNETOS

**E**l monopolio de los materiales ferromagnéticos en el campo del magnetismo y sus aplicaciones parece excesivo y, como sucede en otros

campos de la física aplicada, genera una inercia que podría llevarnos a minusvalorar alternativas que, para ciertas aplicaciones, pueden ser igual o más interesantes. Los materiales antiferro-

rando con científicos de MPI en Alemania, KAIST en República de Corea y ASCR de República Checa, vienen trabajado en posibles vías para la **manipulación del magnetismo en materiales antiferromagnéticos**.

En trabajos recientes, este equipo de científicos investiga esa manipulación mediante el uso subsidiario de materiales ferromagnéticos que, situados muy cerca de los materiales antiferromagnéticos, permiten modificar el espín de estos últimos (DOI: 10.1038/srep35471) permitiendo caracterizarlos de una forma “sencilla” y revisar el estado actual del control del ordenamiento antiferromagnético mediante

corriente o tensión eléctrica (DOI: 10.1109/TMAG.2016.2606561) lo que tiene que permitir el control del ordenamiento magnético de una forma energéticamente eficiente. Estos trabajos, junto con otros publicados durante los últimos años por grupos trabajando en el problema por todo el mundo, deben permitir el avance tanto de la caracterización de materiales antiferromagnéticos como del desarrollo de **metodologías de manipulación que permitan aplicaciones basadas en el uso de materiales antiferromagnéticos**.

magnéticos —que podrían verse como una alternativa real a los ferromagnéticos para ciertas aplicaciones— tienen los espines de sus átomos ordenados a nivel microscópico como los ferromagnetos pero, mientras en éstos todos tienden a apuntar en la misma dirección, el espín de dos átomos adyacentes es antiparalelo en materiales antiferromagnéticos. Esto hace que el momento magnético total sea cero en los antiferromagnéticos, mientras que los materiales ferromagnéticos tienen momento total no nulo. **La tendencia de los espines en un material ferromagnético a alinearse en la dirección de un campo magnético aplicado los hace fáciles de manipular y útiles para diversas aplicaciones.** Por el contrario, **los materiales antiferromagnéticos son insensibles**, por tener momento total nulo, a la presencia de campos magnéticos externos y **puede seguirse de esto una gran ventaja para algunas aplicaciones**. El problema es que su potencial atractivo tecnológico ha venido siendo minusvalorado debido a la **dificultad que presentan a su manipulación**. La capacidad de manipular el ordenamiento magnético en materiales antiferromagnéticos de una forma fácil y energéticamente eficiente es paso previo indispensable para sacar partido a sus posibles interesantes aplicaciones.

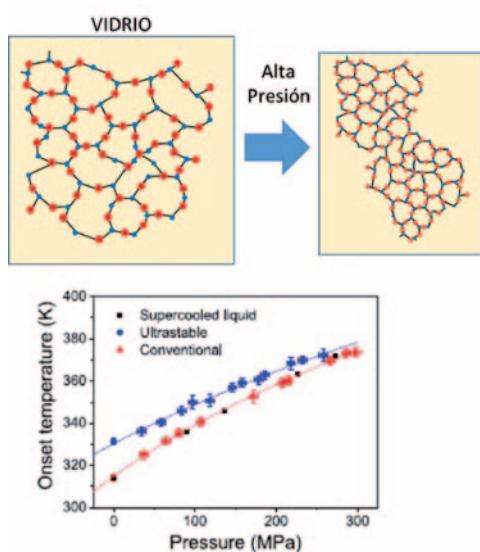
Ignasi Fina, Xavier Martí, Regina Galceran, José Cisneros-Fernández, Bernat Bozzo, Carlos Frontera, Laura López-Mir, Lluís Balcells, y Benjamín Martínez, del ICMAB-CSIC, colabo-

**un auténtico cambio de fase termodinámico.** El descubrimiento reciente de que —en cuestión de horas— pueden sintetizarse, mediante evaporación térmica, sólidos desordenados con una estabilidad termodinámica comparable a la de los ámbares naturales —envejecidos durante decenas de millones de años— está abriendo **nuevos caminos** en el estudio de vidrios.

Se ha establecido recientemente un interesante **paralelismo entre la dinámica del vidrio y la del líquido subenfriado**. C. Rodríguez-Tinoco, J. Ràfols-Ribé, M. González-Silveira y Javier Rodríguez-Viejo, de la UAB, usando técnicas de calorimetría con velocidades de calentamiento ultrarrápidas (hasta  $5 \times 10^4$  K/s), han determinado, a presión ambiente, la **dinámica de vidrios de varias estabilidades a temperaturas nunca antes exploradas** (DOI: 10.1038/srep35607). Aparte de observar **dinámicas de relajación cuantitativamente similares**, resulta que la variación de la viscosidad y del tiempo de relajación con la temperatura puede ser descrita mediante una expresión análoga a la de los líquidos, pero incorporando el concepto de estabilidad termodinámica. En un estudio paralelo (DOI: 10.1038/srep34296), este mismo grupo de la UAB, en colaboración con M. Barrio, P. Lloveras y J. Ll Tamarit, de la UPC, y con la Universidad de Grenoble, ha podido determinar la dinámica de vidrios con estabilidades diferentes en el rango de presiones entre 1 y 3 000 atmósferas. Han notado así que, mientras que a baja presión los vidrios se comportan de manera muy diferente, con temperaturas de inicio de la tran-

## DESPEJANDO EL ENIGMA DE LOS VIDRIOS

**L**os **vidrios** —esos materiales estructuralmente desordenados, sin la periodicidad espacial que caracteriza a los sólidos cristalinos— **son difíciles de modelar**, por lo que suele decirse que una buena comprensión del estado vítreo es uno de los grandes temas pendientes en física de la materia condensada. Por ejemplo, aunque pueda parecer sorprendente, todavía hoy no sabemos si se trata de **líquidos extremadamente viscosos** o de **una fase distinta de la materia**, esto es, una con propiedades termodinámicas diferenciadas. La duda no se resuelve al notar la existencia de una **transición vítrea** de origen cinético entre el vidrio y el líquido subenfriado que **podría esconder** a la observación experimental



sición vítreo que difieren en más de 20 °C, tanto esta temperatura como su variación con la presión tienden a valores **muy próximos cuando los vidrios están a presión elevada**, como ilustra la figura adjunta. Es un comportamiento explicable teniendo en cuenta variaciones de densidad y su dependencia con la presión. Sorprendentemente, vidrios con estabilidades muy diferentes siguen **leyes de escala comunes entre sí y análogas a las del estado líquido** si se introducen parámetros que dependen de la presión y la temperatura. Seguir con el estudio de vidrios ultra estables desentrañará sin duda enigmas del estado vítreo.

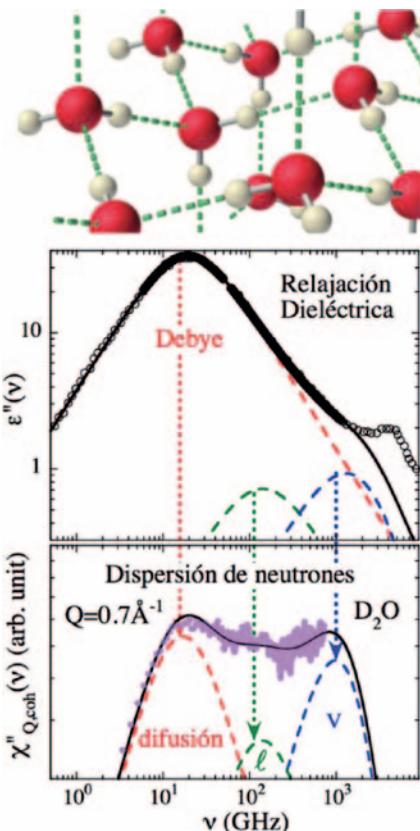
## DESCIFRANDO MOVIMIENTOS MOLECULARES EN EL AGUA

**L**as moléculas de agua se comportan como dipolos debido a la distribución asimétrica de sus electrones. Interesa entonces cómo cambia la parte imaginaria de la constante dielectrica compleja con la frecuencia  $\nu$  del campo aplicado. Esa función,  $\epsilon''(\nu)$ , presenta para el agua un “pico de Debye” bien definido a frecuencias alrededor de 20 GHz. Recientemente, ha podido llegarse a la región de las vibraciones intermoleculares, en torno de los 5 THz, y se han detectado dos procesos adicionales de baja amplitud a frecuencias altas. Se ha planteado así el problema de interpretar esta caracterización más completa de la relajación dieléctrica del agua a temperatura ambiente.

**Relajación Dieléctrica** a temperatura ambiente. El problema es que las interacciones dipolo-dipolo dan lugar en el agua a un entramado molecular a través de enlaces “puentes de hidrógeno” (figura), lo que implica una relajación dipolar de naturaleza colectiva **difícil de interpretar microscópicamente en términos de movimientos moleculares**.

El intervalo de frecuencia relevante para la relajación dieléctrica del agua puede también explorarse mediante **dispersión de neutrones**, que ofrece información directa acerca de los **núcleos atómicos** con resolución espacio/temporal, esto es, **detalles de la estructura y dinámicos**. Usando esta técnica, Arantxa Arbe, Fernando Álvarez, Paula Malo de Molina y Juan Colmenero, del CSIC-UPV/EHU, en San Sebastián, en colaboración con el Instituto Laue-Langevin de Grenoble, han conseguido descifrar los movimientos moleculares involucrados (DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.185501).

Los factores de estructura dinámicos medidos durante la dispersión de neutrones permiten calcular las correspondientes susceptibilidades dinámicas, directamente comparables con la función  $\epsilon''(\nu)$ . Estos investigadores han deducido de este modo que la relajación dieléctrica colectiva —el **pico de Debye**— está ligado a la **difusión molecular** y que, para que tenga lugar, las moléculas, han de desplazarse distancias comparables a las intermoleculares. También han identificado en estos experimentos los **movimientos moleculares** asociados a los procesos dieléctricos de baja amplitud que habían sido detectados



a alta frecuencia, concluyendo que un proceso a 2 THz está asociado a las oscilaciones de cadenas de tres oxígenos conectados por puentes de hidrógeno y otro alrededor de 0'15 THz es debido a movimientos moleculares espacialmente restringidos por el entramado de puentes de hidrógeno que preceden a la difusión.

En definitiva, este trabajo ofrece una **descripción unificada** que abre **una nueva vía** para el estudio de la dinámica del agua bajo diferentes condiciones, esto es, sobre-enfriada, confinada, biológica, etc., así como para la investigación de otros líquidos con puentes de hidrógeno.

# XXXVI Reunión Bienal de Física de la RSEF

17-21  
Santiago  
de Compostela  
2017

## 26 Encuentro Ibérico de Enseñanza de la Física



Real  
Sociedad  
Española de  
Física  
R.S.E.F.

Más información en la web de la RSEF y a través del correo electrónico: [bienalrsef2017@gmail.com](mailto:bienalrsef2017@gmail.com)