

Puntos de interés

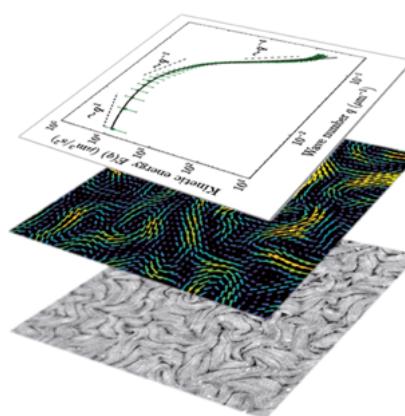
Descripción breve y sencilla de iniciativas docentes en nuestros colegios e institutos que han de ser resaltadas, de investigaciones relevantes de autores españoles o de extranjeros en instituciones españolas, y de otros hechos interesantes sobre ciencia y enseñanza, políticas educativa y científica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

TURBULENCIA ACTIVA: NÚMEROS SENCILLOS DETRÁS DEL CAOS

Tal y como describió en su trabajo pionero Andrey Kolmogorov en 1941, la dinámica en fluidos turbulentos se caracteriza por unas leyes de escala con exponentes universales. Durante estos últimos diez años, se han puesto de manifiesto fenómenos en apariencia similares a la turbulencia en el ámbito de los llamados fluidos activos: materiales, normalmente de origen biológico, formados por bacterias, células o extractos celulares cuyos componentes obtienen energía de su entorno para transformarla en movimiento. A concentraciones elevadas, estos fluidos activos son capaces de generar flujos caóticos parecidos a los turbulentos. Aunque todos estos sistemas operan a un número de Reynolds demasiado pequeño para poder ser descritos por la turbulencia clásica, los investigadores a menudo se refieren a los flujos caóticos en fluidos activos como “turbulencia activa”. Los experimentos realizados hasta la fecha no han podido poner de manifiesto si esta turbulencia activa está también caracterizada por leyes de escala universales, al igual que lo está la turbulencia clásica. En otras palabras, **no se había podido establecer el alcance de la analogía entre la turbulencia clásica y la activa**.

Un artículo publicado recientemente por Berta Martínez-Prat, Ricard Alert, Fanlong Meng, Jordi Ignés-Mullol, Jean-François Joanny, Jaume Casademunt, Ramin Golestanian y Francesc Sagués en la revista *Physical Review X* (DOI: 10.1103/PhysRevX.11.031065) ha demostrado experimentalmente la existencia de leyes de escala universales en turbulencia activa. Los autores

del trabajo forman parte de un equipo internacional compuesto por investigadores del Instituto de Nanociencia y Nanotecnología de la Universitat de Barcelona (IN²UB) y del Instituto de Sistemas Complejos de la Universitat de Barcelona (UBICS), en colaboración con investigadores de Princeton University, Instituto Curie e Instituto Max Planck para la Dinámica y la Auto-organización. En este trabajo, los investigadores han estudiado flujos a gran escala en una película de cristal líquido activo constituido por unos componentes celulares llamados microtúbulos y kinesinas (filamentos de proteína y motores



moleculares, respectivamente). Se trata de un material formado por la reconstitución *in vitro* de proteínas del citoesqueleto que, gracias a mecanismos de deplicación, se autoensamblan en una interfase entre líquidos inmiscibles. El resultado es la formación de una suspensión bidimensional de fibras autopropulsadas que se alinean formando un cristal líquido.

Inevitablemente, la película de fluido activo está acoplada hidrodinámicamente a las dos capas de fluidos ordinarios que forman la interfase, una fase acuosa y un aceite. Dicho acoplamiento con fluidos tridimensionales aporta una fuente externa para la disipación de la energía del material activo. Los investigadores modularon la disipación externa variando la viscosidad del aceite en un rango de cuatro ór-



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

denes de magnitud, lo que les permitió acceder a diferentes regímenes de la turbulencia activa. En los experimentos, los investigadores han medido la distribución de la energía cinética del fluido activo a diferentes escalas de longitud, con lo que han observado experimentalmente dos leyes de escala que se habían predicho de forma teórica. Además, han descubierto una nueva ley de escala que es el resultado del acoplamiento hidrodinámico entre el fluido activo y los pasivos.

Para explicar las observaciones experimentales, los investigadores han desarrollado un marco teórico que, además de las leyes de escala, predice el espectro completo de la turbulencia activa. La teoría presenta un buen acuerdo con los experimentos en un rango amplio de viscosidades del aceite, y además permite acercarse a entender los mecanismos mediante los cuales se selecciona el tamaño de los vórtices en la turbulencia activa.

Los resultados de este trabajo muestran cómo algunos conceptos de la turbulencia clásica se pueden trasladar a la turbulencia activa, ámbito en el cual se ha estado buscando intensamente y durante mucho tiempo leyes de escala universales. Además, al poner de manifiesto la influencia de la disipación externa en la turbulencia activa, el nuevo trabajo da claves para que futuras investigaciones puedan entender mejor el inevitable acoplamiento entre los flujos activos bidimensionales y su entorno tridimensional.

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

GENERANDO DIVERSIDAD CELULAR DE FORMA SINTÉTICA

Una de las características definitorias de la materia viva es su **organización en unidades discretas, las células**, que compartimentan las reacciones bioquímicas que impulsan todos los procesos vitales. Tras más de medio siglo de descubrimientos revolucionarios en biología molecular, que han ensalzado el papel de los genes en el funcionamiento de la materia viva, descubrimientos recientes están volviendo a poner en evidencia el **papel fundamental de las células** en la autoorganización de los organismos vivos. En particular, la

ro pequeño (usualmente dos) de células distintas. Sin embargo, no existe aún una visión global de cómo se genera la tremenda multiestabilidad que exhibe nuestro genoma.

Una de las formas de enfrentarse a este problema es utilizar los métodos de la biología sintética para **validar mecanismos hipotéticos de generación de multiestabilidad**. Esto es lo que se ha conseguido recientemente en una colaboración entre el Prof. Jordi Garcia Ojalvo, de la Universidad Pompeu Fabra de Barcelona, y el laboratorio del Prof. Michael Elowitz en el Instituto de Tecnología de California en Pasadena (“Synthetic Multistability in Mammalian Cells”, bioRxiv, DOI 10.1101/2021.02.10.430659). Guiado por un modelo biofísico, el investigador

Ronghui Zhu, de Caltech, implementó un conjunto de factores de transcripción que activan su propia expresión genética actuando conjuntamente como homodímeros, pero que se inhiben mutuamente cuando forman heterodímeros. El modelo teórico muestra que este simple circuito puede dar lugar a estados celulares alternativos, en función de los distintos factores de transcripción que se expresan simultáneamente.

De acuerdo con las predicciones teóricas, los experimentos consiguieron producir **hasta siete estados celulares distintos**. El diseño del circuito lo hace fácilmente expandible, pues el número de estados **escala de forma prácticamente exponencial** con el número de factores de transcripción. De este modo, este trabajo establece un mecanismo mínimo potencial que puede conducir a la tremenda multiestabilidad que exhiben las células vivas.

SIMULACIÓN DE TRAYECTORIAS DE HACES DE NEUTRONES LENTOS Y APLICACIONES

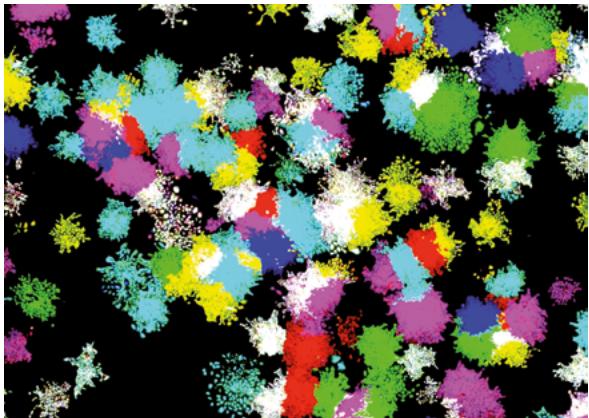
Desarrollar la óptica de neutrones con nuevas formulaciones e implementación de nuevos algoritmos es fundamental

para la expansión de métodos que permitan focalizar haces de neutrones y aplicar la tecnología en biomedicina.

La óptica de neutrones es la rama de la física que estudia la propagación y scattering de neutrones (lentos) en medios materiales. La ecuación estacionaria de Schrödinger proporciona una solución en la forma de onda escalar. Estas similitudes permiten explotar la enorme variedad de resultados de la óptica física (reflexión, refracción, scattering, difracción, confinamiento, etc.) para describir el comportamiento de haces de neutrones en medios materiales. En particular, la formulación matemática y el desarrollo de simulaciones numéricas para guías de onda de neutrones es un paso importante en la mejora de aplicaciones para terapia contra el cáncer, conocida como BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*).

Disponer de guías de onda de neutrones (equivalente a una fibra óptica), pero con sección transversal microscópica, es un paso importante para conseguir la focalización de neutrones en volúmenes del orden de 1 mm³. Para ello se estudian formulaciones que faciliten la implementación de algoritmos que simulen estos comportamientos en medios materiales. Es especialmente relevante la formación de modos de propagación, para lo que es necesario acudir a las ecuaciones de onda. Los neutrones térmicos poseen una longitud de onda en torno a $\lambda = 1.8 \text{ \AA}$, y se requiere describir guías planas con una sección transversal de unas 100 μm y propagaciones del orden del milímetro (hasta el de los centímetros). Computacionalmente, esta situación es inabordable haciendo uso de métodos de Diferencias Finitas.

Recientemente, los investigadores I. Molina de la Peña, M. L. Calvo y R. F. Álvarez-Estrada, de la UCM, han publicado un artículo en la revista *Applied Mathematical Modelling* (DOI: 10.1016/j.apm.2021.09.007) en el que se presenta un **nuevo algoritmo basado en funciones de Green y condiciones de contorno de Dirichlet**, con simulaciones de trayectorias de haces de neutrones y un tiempo de computación óptimo en comparación con otros métodos como los basados en diferencias finitas. Este algoritmo se caracteriza porque calcula el valor de la

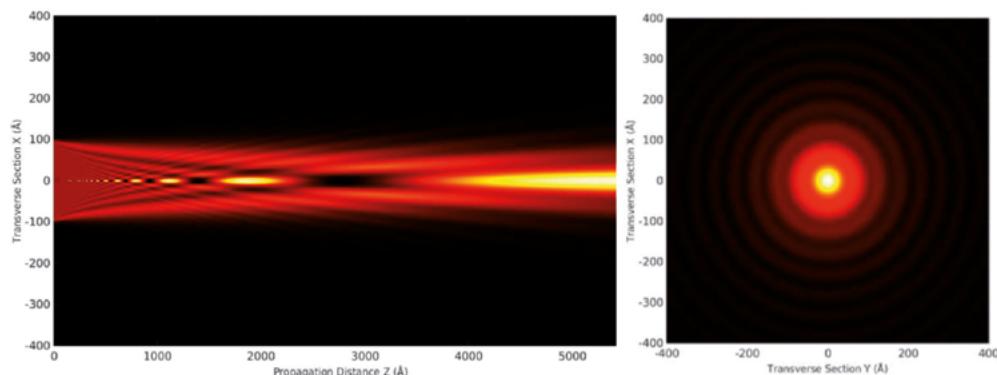


compartimentación celular permite la división del trabajo entre tipos de células diversas que, a pesar de tener el mismo genoma, realizan funciones tan distintas en el organismo como las neuronas y los glóbulos rojos, por ejemplo.

Durante décadas se ha considerado que el cuerpo humano contenía unos 200 tipos celulares distintos. Sin embargo, la reciente explosión de métodos que permiten el análisis masivo de la expresión genética en células individuales está mostrando que dicha cifra es una clara subestimación de la cantidad real, que puede ser más de un orden de magnitud superior: a partir de un único genoma, el cuerpo humano contiene **miles de tipos de células diferentes**. La forma en la cual se obtiene dicha enorme diversidad ha sido objeto de estudio de la biología del desarrollo durante décadas. Se han encontrado mecanismos de regulación genética particulares que explican la diferenciación de un tipo celular progenitor específico en un núme-

función escalar de cada punto del espacio de forma independiente a los demás (sólo a través de las funciones auxiliares en las fronteras), con lo que se puede

ella. Pero agua fría; puesto que, de usar agua caliente, lo único que se conseguiría sería aumentar el grosor de la capa de hielo... Y es que, bajo cambios



parallelizar de forma trivial.

Los autores han desarrollado una variedad de simulaciones que describen fenómenos muy significativos: confinamiento de haces de neutrones en guías de onda y generación de modos de propagación, simulación de placas zonales, en especial placas de Fresnel, holografía. También tiene aplicaciones potenciales al estudio de cavidades resonantes, acústica y curvatura de fibras.

Para las aplicaciones a BNCT los autores estudian también el diseño de acopladores de haces de neutrones que puedan conducir el haz de neutrones a zonas (en general, poco accesibles) donde se debe de aplicar la terapia de forma local y con gran precisión (como es el caso, por ejemplo, de pequeños tumores irresecables).

La BNCT está muy desarrollada en países como Japón, que son pioneros.

MEMORIA TÉRMICA EN FLUIDOS COMPLEJOS: ATAJOS Y RODEOS HACIA LO ESTACIONARIO

Desde la antigüedad se conoce y se hace uso del (más recientemente) llamado efecto *Mpemba*. Como ejemplo, en las mañanas de frío es habitual tratar de eliminar el hielo de la luna del coche vertiendo agua sobre

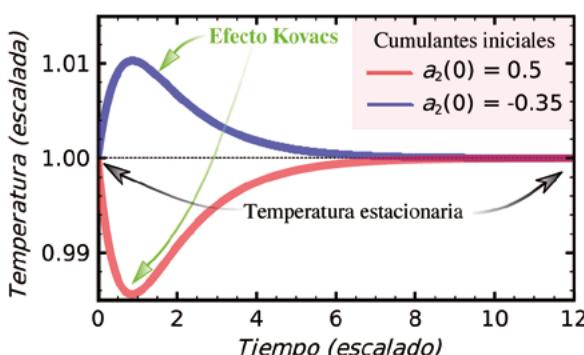
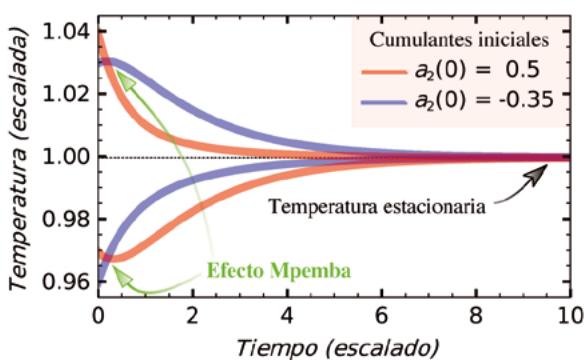
bruscos de temperatura (por ejemplo, al entrar en contacto con temperaturas mucho más frías), el agua caliente se congela antes que el agua fría. Este curioso efecto se circunscribe en una categoría de fenómenos conocidos como *efectos de memoria*. Los efectos de memoria se observan también en lo que se conoce como fluidos granulares (fluidos compuestos por partículas macroscópicas). En particular, recientemente se ha observado memoria térmica en partículas granulares viscoelásticas sometidas a la acción de un termostato. Las partículas viscoelásticas se caracterizan por que, cuando están en movimiento y chocan entre

sí, la pérdida de energía cinética que se produce depende de la velocidad relativa de las partículas que colisionan. El termostato garantiza que el sistema evoluciona hasta alcanzar una temperatura granular dada. Distinguimos distintos tipos de memoria térmica, dependiendo del estado inicial y evolución que inducimos en el sistema.

Por ejemplo, lo que se conoce como **efecto Mpemba** se produce cuando un fluido granular inicialmente más caliente, y bajo las condiciones iniciales adecuadas, enfriá más rápido que otro más frío hacia la temperatura fijada por el termostato.

Otro efecto contraintuitivo y que puede observarse en fluidos granulares es el conocido como **efecto Kovacs**. Este se observa cuando, en un instante determinado, el termostato fija como valor estacionario final de la temperatura granular *el mismo* valor que la temperatura del sistema en ese instante. La intuición, adquirida del comportamiento habitual en procesos de equilibrio, nos haría pensar que desde ese momento la temperatura ya no evolucionaría, pues ya está en su valor estacionario. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, puede observarse que la temperatura sigue evolucionando, marcando bien un máximo bien un mínimo, antes de retornar al valor estacionario, en un intento del sistema por recuperar valores anteriores en su historia.

En un artículo publicado en la revista *Physics of Fluids* (DOI: 10.1063/5.0050804), un equipo de investigadores de las universidades Carlos III de Madrid (Emanuel Mompó y Aurora Torrente), de Extremadura (Miguel Ángel López-Castaño y Francisco Vega Reyes) y de Granada (Antonio Lasanta) estudia teórica y computacionalmente, en fluidos granulares de partículas viscoelásticas, la presencia de efectos de memoria térmica, detectando los efectos *Mpemba* y *Kovacs* descritos. Adicionalmente, en este trabajo los autores proporcio-



nan una explicación común para ambos fenómenos: el acoplamiento que existe entre la temperatura granular del sistema y los valores iniciales de momentos de orden superior de la correspondiente función de distribución (conocidos como cumulantes, y que miden la desviación con respecto a la distribución de Maxwell-Boltzmann). Esto supone un avance en el estudio de fluidos granulares, pues el modelo viscoelástico de colisiones es mucho más próximo al comportamiento experimental de las colisiones entre partículas macroscópicas.

USO DE HACES NEUTRONES PARA EL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS FOTÓNICAS

Actualmente el uso de las tecnologías fotónicas está experimentando un gran crecimiento. Para ello es necesario métodos de análisis que permitan caracterizar los dispositivos de una forma más precisa. Dentro de estas nuevas técnicas se encuentran el uso de rayos X, haces de electrones y de neutrones. Uno de los problemas que se puede resolver mediante estas técnicas es el de la **caracterización de los perfiles del índice de refracción en estructuras fotónicas mediante series**

se obtienen dos ondas que se propagan e interfieren en el medio. Esto hace que para la caracterización de los medios se analiza como varía la intensidad de estas con respecto a la variación del ángulo de reconstrucción. Sin embargo, las fases relativas de las componentes de Fourier no se pueden obtener, ya que es necesario la obtención de múltiples ondas. Una posible solución para obtener múltiples ordenes difractados es usar longitudes de onda varios órdenes más pequeñas que el tamaño del periodo de la red. Para conseguir estas se pueden usar, por ejemplo, haces de neutrones que tienen una longitud de onda de 1.7 nm en lugar de láseres en el visible, que son los que se han considerado tradicionalmente. Estos resultados han sido publicados en la revista *Optics Express* (DOI: 10.1364/OE.424233) por un equipo internacional formado por los investigadores Antonio Fimia y Roque F. Madrigal, de la Universidad Miguel Hernández de Elche, Martin Fally y Jürgen Klepp, de la Universidad de Viena (Austria), Yasuo Tomita, de la Universidad de Electro-Comunicaciones (Japón), Jinxin Guo, de la Universidad de Tecnología de Beijing (China), y Joachim Kohlbrecher, del ETH de Zúrich y el Instituto Paul Scherrer (Suiza). Han hecho uso de la **difracción de neutrones para obtener los perfiles del**

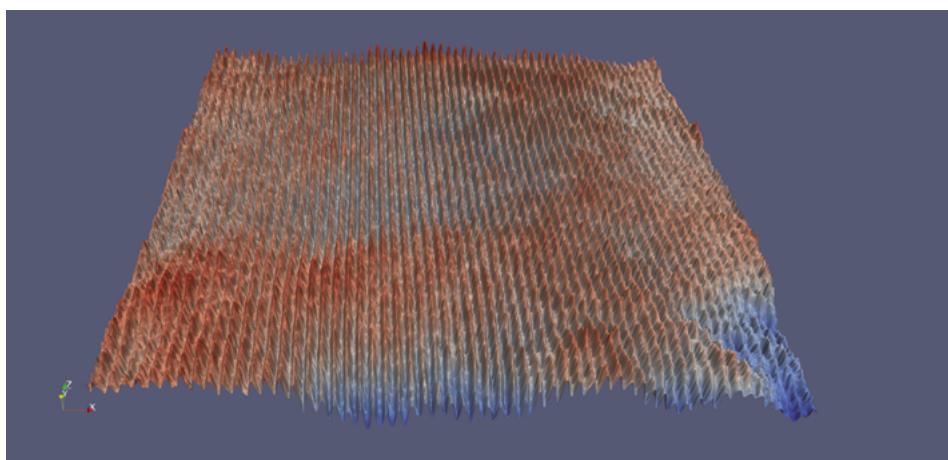
dice. Se ha usado SANS (Small Angle Neutron Scattering) en el SINQ (The Swiss Spallation Neutron Source) del Instituto Paul Scherrer de Suiza. Los resultados obtenidos mediante esta técnica se han complementado mediante el uso de microscopía digital holográfica.

EFFECTO CUMULATIVO EN COLISIONES NUCLEARES QUE MUESTRA CÓMO LA CROMODINÁMICA CUÁNTICA ACELERA PARTÍCULAS

Un experimento realizado por una colaboración en la que participan centros de investigación y universidades americanas y rusas, haciendo colisiones Cu-Au a 200 GeV/c en el acelerador del laboratorio nacional americano de Brookhaven, en Long Island (EE. UU.), muestra evidencia de la **producción de un chorro (jet) de partículas con energía mucho más alta que la energía de los nucleones de los núcleos incidentes** (arXiv:2110.09432, enviado a *Physical Review C*). Los resultados están de acuerdo con la predicción teórica realizada hace 25 años y publicados en la revista *Physics Letters B* (DOI: 10.1016/S0370-2693(96)01248-8) por una colaboración entre el Instituto Gallego de Física de Altas Energías de la Universidad de Santiago de Compostela (Néstor Armesto, Elena G. Ferreiro, Carlos Pajares), la Universidad de San Petersburgo (Mikhail Braun) y el Instituto de Nuclear Physics de San Petersburgo (Yuly Shabelski).

Las partículas se producen con mayor energía que los nucleones incidentes debido a fenómenos coherentes y colectivos que se realizan en la colisión debido a la alta densidad de colisiones y al detalle de la interacción fuerte descrito por la cromodinámica cuántica (QCD).

En la colisión relativista de los núcleos entre los constituyentes (quarks) de los nucleones de ambos núcleos se forma una configuración del campo de color similar al de una cuerda. El campo de color, agente de las interacciones fuertes entre

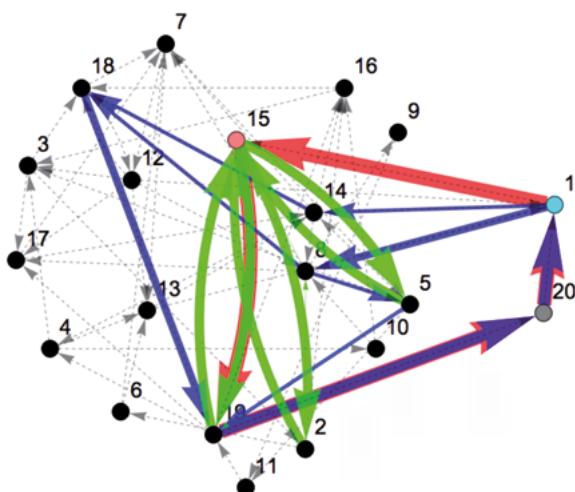


de Fourier de redes de difracción.

Para calcular los perfiles de las redes de difracción de fase normalmente se han usado los fenómenos de difracción. Estos métodos tienen el inconveniente de que para redes de volumen en el mejor de los casos

índice de refracción de estructuras periódicas realizadas en un fotopolímero en el que se ha dispersado uniformemente nanopartículas de SiO₂, que proporcionan una gran diferencia de índice de refracción, consiguiendo así grandes modulaciones de ín-

los quarks, se concentra transversalmente a la distancia entre los quarks contrariamente a lo que sucede con la interacción electromagnética que se esparce en todo el espacio. De esta manera, se forman cuerdas entre los quarks. A muy alta energía y/o núcleos pesados hay muchas interacciones, formándose muchas cuerdas. Dado que la superficie de la colisión es limi-



tada, varias de las cuerdas formadas se solapan transversalmente formando clusters de cuerdas con una energía suma de la de las cuerdas que le forman y con el campo resultante de combinar los individuales de acuerdo con QCD. La fragmentación de estos clusters produce partículas que pueden tener una energía mucho más alta que los nucleones incidentes. **Es como si las partículas producidas experimentasen una nueva aceleración proveniente de la acumulación de energía del cluster.** Por ello el artículo enviado a *Physical Review C* (arXiv:2110.09432) lleva por título "Evidence for a QCD Accelerator in Relativistic Heavy Ion Collisions".

CÓMO ENCONTRAR CAMINOS ÓPTIMOS A TRAVÉS DE LA FÍSICA ESTADÍSTICA

Los caminos más cortos entre dos puntos o nodos en un medio discreto (un retículo, un grafo regular o una red compleja, por ejemplo) son objetos de estudio de gran interés tanto teórico

como práctico. Pensemos en los caminos más cortos entre dos estaciones de metro, entre dos ciudades conectadas por carretera, entre dos neuronas en la corteza visual, o entre dos servidores en internet... En la teoría de redes contemporánea dichos caminos también son importantes para la definición de varios índices estructurales relevantes, como la eficiencia o la centralidad.

De hecho, a menudo lo que realmente interesa no es conocer el camino más corto, sino algún otro tipo de camino óptimo: el más largo, o el más corto de entre los que evitan un determinado nodo, o entre los que, al contrario, pasan siempre por el mismo. La literatura está llena de algoritmos específicos para tratar estos casos.

En un trabajo de investigación recientemente publicado en la revista *Physical Review E* (DOI: 10.1103/PhysRevE.103.022319), Ricardo Guí

tiérrez, de la Universidad Carlos III de Madrid, y Carlos Pérez-Espigares, de la Universidad de Granada, han propuesto una **generalización de los caminos óptimos basada en la física estadística**. Su metodología comprende los caminos óptimos mencionados en el párrafo anterior, pero también permite encontrar, por ejemplo, los caminos que minimizan el tiempo de comunicación entre dos servidores sin saturar un determinado canal, o los que garantizan que una determinada estación en una red de transporte se visita con el doble de frecuencia que otra, o aquellos que maximizan las fluctuaciones del tiempo necesario para llegar de un punto a otro en un proceso difusivo. "Si tuviéramos que destacar el punto fuerte de enfocar así el estudio de caminos óptimos sería su versatilidad, ya que permite tratar casi cualquier definición imaginable de camino óptimo con el número de ligaduras que uno quiera imponer", comentan los autores del artículo. En estos momentos discuten con otros científicos españoles la posibilidad de aplicar sus hallazgos al estudio de **redes biológicas**, así como su generalización a las caminatas cuánticas, donde podrían

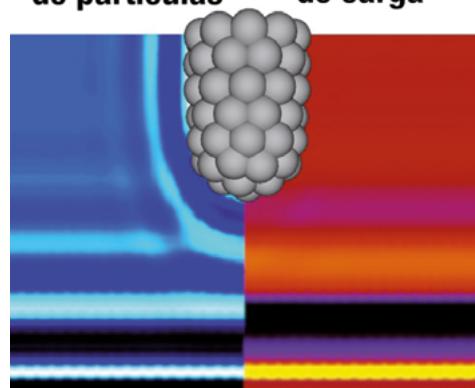
ofrecer pistas para la **mejora de distintos tipos de algoritmos cuánticos** respecto a su versión clásica.

La propuesta está basada en el estudio de colectividades estadísticas de trayectorias de caminantes aleatorios, y se asienta sobre un marco teórico desarrollado durante las últimas décadas en el que las colectividades de la física estadística se adaptan a un contexto dinámico. La estadística de las trayectorias para tiempos largos está contenida en las llamadas funciones de grandes desviaciones, que cumplen un papel análogo al de los potenciales termodinámicos. Mientras que esta aproximación probabilística basada en grandes desviaciones está en la base matemática de la física estadística del equilibrio, y se considera el lenguaje natural para el estudio de muchos fenómenos fuera del equilibrio, su aplicación en el campo de los sistemas complejos (incluidos grafos aleatorios, redes dirigidas, sistemas espaciales, etc.) apenas acaba de comenzar.

VISUALIZAR ELECTROLITOS Y MOLÉCULAS DE AGUA CERCA DE UNA SUPERFICIE

El lector de esta revista habrá visto numerosas imágenes de microscopía de fuerzas, de efecto túnel o de microscopía electrónica con resolución atómica. Todas esas imágenes pertenecen a

Densidad de partículas



Densidad de carga

materiales en estado sólido. Obtener imágenes con similar resolución de un líquido está resultando ser considera-

blemente más arduo. **En un líquido, todas las especies químicas, como moléculas de agua, electrolitos o gases disueltos, están en movimiento, lo cual impide o en el mejor de los casos dificulta su observación.** A pesar de las dificultades, existen muchos incentivos para desarrollar una microscopía de alta resolución para visualizar líquidos. Esa microscopía facilitaría el desarrollo nuevos dispositivos para almacenar energía química. También permitiría proponer nuevos métodos para purificar agua o para entender mejor la influencia del agua y los electrolitos en la estructura de las proteínas.

En los últimos años se ha desarrollado un nuevo tipo de microscopía, la microscopía de fuerzas en 3D (3D AFM, por sus siglas en inglés) que está permitiendo la observación con resolución molecular de las especies químicas presentes en un líquido que está en las proximidades de una superficie sólida. En un artículo publicado en la revista *Physical Review Letters* (DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.196101) por los investigadores Simone Benaglia, Manuel R. Uhlig, Enrique Chacón y Ricardo García, del Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC), y José Hernández Muñoz y Pedro Tarazona, del IFIMAC Condensed Matter Physics Center (UAM), presentan unos resultados obtenidos por uno de los pocos microscopios que existen en el mundo para observar los componentes de un líquido que está en contacto con una superficie sólida. Los editores de *Physical Review Letters* han destacado la última contribución de este grupo como ***Editor's suggestion***. En ella se describe un método para identificar las especies químicas neutras (por ejemplo, moléculas de agua) de las especies químicas que tienen carga (por ejemplo, iones de sodio).

Lo que han observado los científicos es que **el tipo de carga eléctrica** (o la neutralidad eléctrica) **del dedo molecular de un microscopio de fuerzas** es determinante para observar y separar las moléculas de agua de los electrolitos. Un dedo molecular con carga (positiva o negativa) sólo verá los electrolitos, mientras que un dedo molecular neutro sólo verá las moléculas de agua. La neutralidad del dedo molecular se puede modificar fácilmente al aplicar un vol-

taje y variar su polaridad. En definitiva, el método permite separar las fuerzas asociadas a la densidad de partículas de aquellas asociadas a la densidad de carga.

“Nuestro método ha proporcionado las primeras imágenes de la distribución de los átomos, moléculas e iones de un líquido en contacto con superficies de mica y de grafito. **Este método y la interpretación de los resultados han sido el fruto de una colaboración muy estrecha entre físicos experimentales y teóricos**” destaca el Prof. del CSIC Ricardo García.

CONVIRTIENDO CONTEXTUALIDAD EN NO-LOCALIDAD

Hay dos demostraciones fundamentales de que la mecánica cuántica (MC) no se puede simular con (ciertas) teorías de variables ocultas. Por un lado, el

compatibles se midan conjuntamente. Por otro lado, el teorema de Bell, de 1964, señala que las predicciones de la MC para medidas locales sobre los componentes de un sistema compuesto (preparado en un determinado estado entrelazado) no pueden simularse suponiendo que los resultados de las medidas sólo dependen de variables ocultas locales. Las demostraciones del teorema de KS son de dos tipos: las que valen para cualquier estado cuántico y las que sólo valen para determinados estados. Es sabido que cualquier demostración del teorema de Bell se puede convertir en una demostración (válida para un estado determinado) del teorema de KS. En un artículo reciente publicado en la revista *Physical Review Letters* (DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.070401), el Prof. Adán Cabello, de la Universidad de Sevilla, presenta un método para convertir cualquier demostración del teorema de KS en una demostración del teorema de Bell. Este método permite, además, identificar desigualdades de Bell



Ernst Specker (1920-2011), Simon Kochen y Adán Cabello en Zúrich en 2009. Fotografía de Arthur Jaffe.

teorema de Kochen y Specker (KS), de 1960-1967, muestra que las predicciones de la MC, para medidas que no perturban observables compatibles, no se pueden reproducir si estas medidas revelan resultados preexistentes e independientes de qué otros observables

en las que la violación cuántica conserva propiedades que tenía la violación cuántica de una desigualdad no-contextual, y diseñar experimentos en los que se violen, simultáneamente, una desigualdad de Bell y (localmente) una desigualdad no-contextual.