

aplicar un voltaje requiere añadir una capa metálica (electrodo) al dispositivo, lo cual desestabiliza la ferroelectricidad. Por tanto, una pregunta natural consiste en plantearse la posibilidad de escribir bits ferroeléctricos sin aplicar voltajes. La respuesta, según un artículo publicado el pasado mes de abril en la revista *Science* junto con Alexei Gruverman, de la Universidad de Nebraska-Lincoln, y otros colaboradores, es afirmativa.

Nuestro trabajo demostró la posibilidad de invertir la orientación de un dipolo ferroeléctrico sin más que apretar con cierto tipo de punzón muy afilado:

la punta de un microscopio de fuerzas atómicas, cuyo diámetro asciende a unos escasos 10 nanómetros, o 10 millonésimas de milímetro. Al trabajar con una aguja tan fina, una fuerza diminuta genera una enorme presión sobre el área de contacto. En concreto, una masa de apenas un miligramo induce una presión de un gigapascal; el equivalente a concentrar el peso de cuatro elefantes adultos sobre una moneda de un euro. A pesar de su magnitud, sin embargo, ello no bastaría por sí solo para invertir la orientación de un dipolo eléctrico. La clave reside en que, al hallarse tan concentrada, la de-

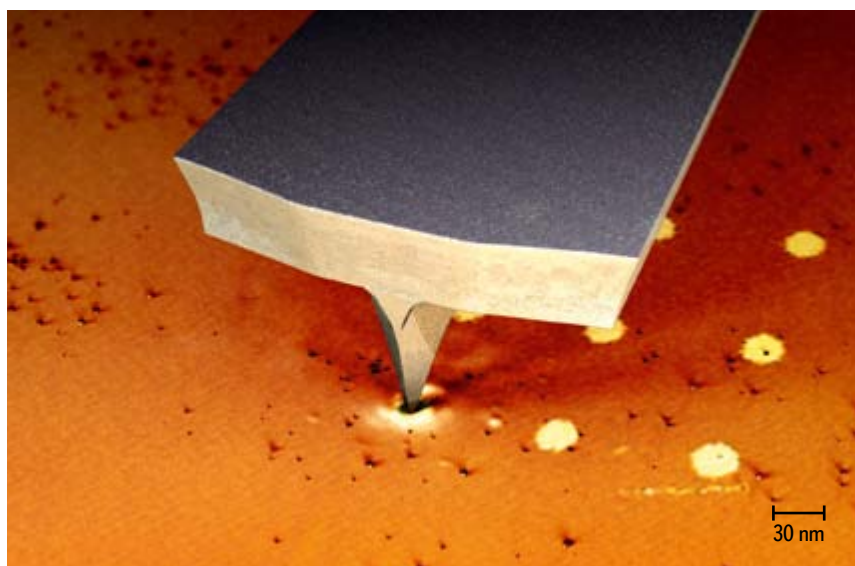
formación producida no es homogénea. Y las diferencias en la deformación del material sí pueden invertir la polarización gracias a un mecanismo conocido como flexoelectricidad.

La flexoelectricidad fue descubierta hace casi medio siglo en la Unión Soviética. Pero, al tratarse de un efecto de proporciones modestas, quedó relegada durante decenios al cajón de las curiosidades académicas. A escalas nanométricas, sin embargo, los gradientes pueden ser enormes, por lo que todo efecto que dependa de ellos —como la flexoelectricidad— puede ver multiplicada su magnitud en similares proporciones. El control de la polarización en memorias ferroeléctricas recién demostrado constituye un buen ejemplo de ello.

Aún quedan varios problemas técnicos por resolver antes de que el descubrimiento pueda trasladarse a un dispositivo real. Uno de ellos se debe a que la punta solo puede señalar en una dirección, por lo que la polarización puede pasar de estar dirigida hacia arriba a estarlo hacia abajo, pero no a la inversa. Ello significa que, de momento, podemos escribir bits gracias a la flexoelectricidad, pero no borrarlos. Pese a todo, el mecanismo no se antoja completamente descabellado ni la idea completamente nueva: al convertir la presión mecánica en información, la flexoelectricidad replica, a escala nanoscópica, el funcionamiento de una máquina de escribir.

—Gustau Catalan
Investigador ICREA

Centro de Investigación en Nanociencia
y Nanotecnología (CIN2-CSIC)
Barcelona



Vuelta al cincel: Recreación por ordenador del efecto que ejerce la punta de un microscopio de fuerzas atómicas al ser aplicada sobre una superficie ferroeléctrica. Al apretar en un punto, la polarización del material queda invertida (*zonas blancas, el color es simulado*). El método podría encontrar aplicaciones para almacenar información en tarjetas de memoria eléctricas (en lugar de magnéticas) sin necesidad de aplicar voltajes.

QUÍMICA FÍSICA

La danza del agua en los nanocanales

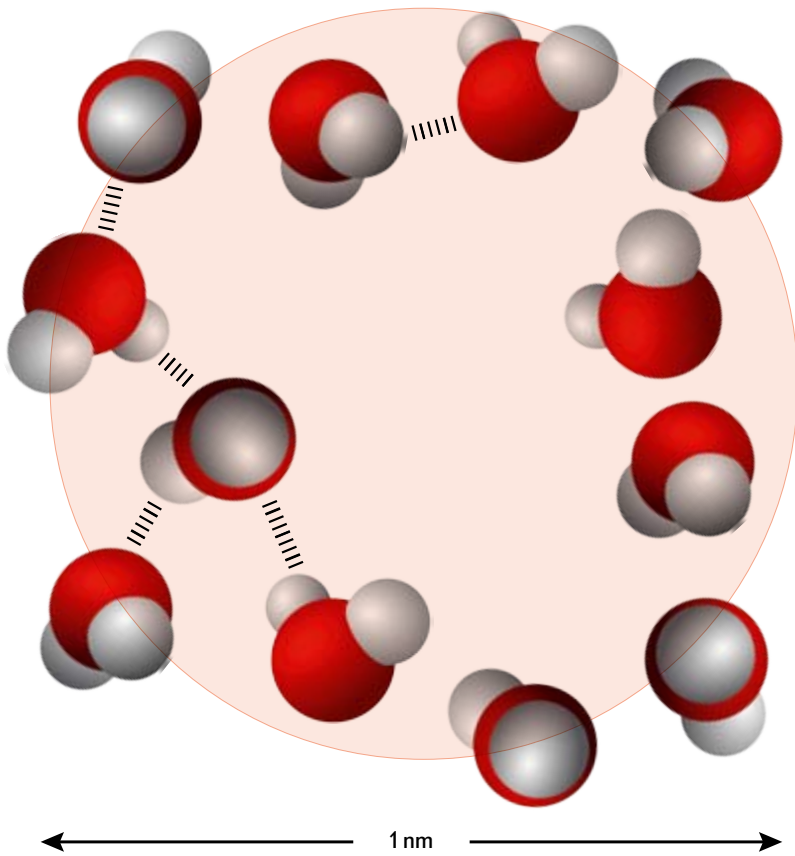
Cooperación y desorden en la difusión del agua

El agua es una sustancia peculiar. Hasta la fecha, se han documentado en ella no menos de 67 propiedades anómalas, la más conocida de las cuales quizá sea el aumento de volumen que experimenta cuando se enfría por debajo de los 4 grados centígrados. A ello se debe que las tuberías revientan en invierno, que el iceberg que hundió el *Titanic* flotase, o que el mar y los lagos se congelen desde la superficie hacia el fondo, gracias a lo cual la vida continúa en el agua que per-

manece líquida bajo el hielo. En un trabajo reciente publicado en *Physical Review E* en enero de 2012 hemos hallado la relación que guarda otra de las extrañas propiedades de este líquido con la física que gobierna su difusión a través de canales de escala nanométrica. El descubrimiento podría ayudar a mejorar los procesos de filtración y desalinización.

Para desalinizar el agua es necesario filtrarla a través de canales microscópicos. Pero, como cabría esperar, el líquido

se mueve con mayor dificultad a medida que disminuye el diámetro de dichos canales, lo que entorpece y ralentiza el proceso. La solución a este problema llega por medio de una vía inesperada: el agua vuelve a fluir con facilidad cuando el diámetro del canal se hace inferior a un nanómetro, la cienmilésima parte del diámetro de un cabello, o el tamaño aproximado de tres moléculas de agua alineadas. La aplicación de este resultado podría multiplicar por mil la veloci-



Líquido anómalo: Al fluir, las moléculas de agua se organizan en regiones de casi un nanómetro de diámetro en las que unas 12 moléculas se mueven de manera coordinada gracias al establecimiento de enlaces por puente de hidrógeno (*líneas discontinuas*). Tales regiones cooperativas permiten explicar las peculiares propiedades de difusión del líquido.

dad de desalinización de las membranas actuales.

¿Cómo explicar que la movilidad del agua aumente cuando se filtra a través de canales tan finos? Por regla general, las moléculas de un líquido experimentan mayores dificultades para avanzar a medida que este se comprime. Sin embargo, bajo un amplio régimen de presiones, al agua le sucede justamente lo contrario. Esta y otras peculiaridades del disolvente universal se deben a que sus moléculas pueden coexistir en diversas disposiciones microscópicas: por un lado, pueden distribuirse de manera ordenada en una configuración de densidad baja; por otro, pueden adoptar una distribución desordenada, caracterizada por una densidad mayor. La aparición de tales estructuras se debe a la formación de enlaces por puente de hidrógeno (originados por la atracción que experimenta el átomo de hidrógeno de una molécula con uno de los átomos de oxígeno de la molécula vecina), un tipo de enlace cuyas propiedades cuánticas aún

carecen de explicación satisfactoria [véase «Agua. El enlace de hidrógeno», por José Teixeira; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2000].

Regiones cooperativas

A temperaturas y presiones reducidas, cada molécula de agua forma un promedio de cuatro enlaces por puente de hidrógeno con otras tantas vecinas. Estas tratan de alejarse lo más posible unas de otras, por lo que tienden a colocarse en los vértices de un tetraedro regular. Dicho orden resulta máximo en el hielo, en el que cada molécula se comporta como una acróbata que aguanta con firmeza a sus cuatro vecinas.

También el estado líquido exhibe cierto grado de orden. Sin embargo, este se asemeja más a un baile en el que cada molécula se encuentra unida en promedio a otras cuatro, pero en el que cambia sin cesar de compañera. Al aumentar la presión del líquido, se incrementa también su densidad, hasta que llega un momen-

educación
ciencia filosofía
universidad opinión
comunicación
ética cuestionar historia
reflexión observar conocimiento
experimento blog 2.0
investigación diálogo

SciLogs

Ciencia en primera persona



CARMEN AGUSTÍN PAVÓN

Neurobiología



JOSÉ MARÍA EIRÍN LÓPEZ

Evolución molecular



OWEN S. WANGENSTEEN

Mar y vida



LUIS CARDONA PASCUAL

Ciencia marina



CLAUDI MANS TEIXIDÓ

Ciencia de la vida cotidiana



YVONNE BUCHHOLZ

Psicología y neurociencia al día



IGNACIO UGARTE

A una unidad astronómica



ÁNGEL GARCIMARTÍN MONTERO

Física y sociedad

Y MÁS...

www.investigacionyciencia.es/blogs

to en el que cada molécula posee más de cuatro vecinas y no sabe a cuál de ellas unirse en su danza. De este modo, el intercambio de parejas se torna más rápido (cada 10^{-12} segundos) y mejora la difusión. A presiones aún más elevadas, no obstante, las moléculas se encuentran tan próximas unas a otras que más bien parecen pasajeros en el metro a la hora punta: se empujan en todas direcciones y se obstaculizan el paso unas a otras. Como resultado, la difusión media disminuye.

La situación se complica aún más en canales muy estrechos, como los que podemos encontrar en el interior de las células, en plantas, rocas y también en los nuevos materiales nanoscópicos, como los nanotubos de carbono, fabricados hoy en día a gran escala con miras a todo tipo de aplicaciones.

Mediante cálculos analíticos y simulaciones por ordenador demostramos que, para fluir, las moléculas de agua han de

moverse de manera coordinada en regiones de casi un nanómetro de diámetro que albergan unas 12 moléculas. Este resultado aparece como consecuencia de la cooperación entre los enlaces por puente de hidrógeno. En canales de anchura superior al nanómetro, las moléculas danzan juntas en las regiones cooperativas. Pero, conforme un conducto se torna más estrecho, esos agregados ven limitados sus movimientos, de manera que una restricción del espacio disponible dificulta la difusión. Sin embargo, cuando los canales miden menos de un nanómetro de diámetro, el número de elementos en los agregados disminuye de manera progresiva hasta reducirse a moléculas aisladas, las cuales se difunden con mayor rapidez, aunque dispongan de menos espacio.

Nuestros cálculos encajan con los resultados experimentales que R. R. Nair y sus colaboradores, de la Universidad de Manchester, y S. Karan y su grupo, del

Instituto Nacional de Ciencia de Materiales de Japón, publicaron en la revista *Science* en enero de 2012. Dichos estudios consideraban la permeabilidad de ciertas membranas de óxido de grafeno y de carbono amorfo. Aunque estas impiden el paso de todo tipo de líquidos y gases, los investigadores observaron que el agua fluía a través de ellas casi con total libertad, hasta 10^{10} veces más rápido que el helio. Esta sorprendente propiedad puede explicarse a partir de la estructura microscópica de dichas membranas: el diámetro de sus intersticios asciende, de hecho, a un nanómetro.

—Francisco de los Santos
Departamento de electromagnetismo
y física de la materia
Universidad de Granada
—Giancarlo Franzese
Departamento de física fundamental
Universidad de Barcelona

NANOTECNOLOGÍA

Nuevos biosensores nanomecánicos

La progresiva miniaturización de los dispositivos electromecánicos abre nuevas perspectivas en biología

Los microscopios de fuerza atómica constituyen una de las herramientas más empleadas en la exploración del nanomundo. Basados en un principio de funcionamiento similar al de un tocadiscos, permiten rastrear y resolver con gran precisión los detalles de una superficie a escala nanométrica. En 1994, varios trabajos casi simultáneos demostraron que los mismos elementos que otorgaban a este instrumento su exquisita sensibilidad podían emplearse como una nueva herramienta sensora de aplicaciones casi infinitas. Nos referimos a las micropalanca, pequeñas estructuras mecánicas con forma de trampolín que, al interactuar con otras sustancias, ven modificadas algunas de sus propiedades, como su masa o su forma. Ahora, una nueva generación de dispositivos aún más diminutos promete un abanico de aplicaciones insospechadas en biología y medicina.

Las micropalanca suelen fabricarse con materiales semiconductores —con el silicio como gran favorito— y con un espesor muy inferior a su anchura o su longitud; las proporciones 1:50:400 corresponden al diseño más empleado. Gozan de una enorme sensibilidad para medir propiedades a escalas microscópicas: de-

tectan fuerzas inferiores al nanonewton, variaciones de temperatura de 0,01 grados y masas añadidas a su superficie del orden de picogramos, el equivalente a tres bacterias *E. coli*. Además, presentan la ventaja de no requerir marcadores fluorescentes. Pero quizá la característica más atractiva de estos dispositivos reside en su gran versatilidad. Sus aplicaciones incluyen la detección de gases, la clasificación de microorganismos, la capacidad para distinguir entre secuencias de ADN y la detección de drogas, pesticidas, explosivos y medicamentos. En biología, los logros cosechados por estos sensores han sido más que notables. Entre ellos cabe destacar la detección reciente de más de 50 organismos y sustancias químicas, una lista que previsiblemente aumentará a medida que se sucedan los avances en sensibilidad, reproducibilidad y número de análisis por minuto.

Salto cualitativo

Durante los últimos años, sin embargo, las micropalanca han sido reemplazadas por nanohilos de silicio. Ello no solo ha disparado los umbrales de detección a masas del orden del femtogramo (el equivalente a una hebra de ADN o a una proteína), sino

que ha abierto un camino insospechado en el desarrollo de los biosensores nanomecánicos. Hasta la fecha, estos dispositivos se consideraban sucesores de otros sistemas de medición de masa, como la balanza de cuarzo, sustitutos potenciales de algunas técnicas de inmunoensayo, como el ELISA (ensayo por inmunoabsorción ligado a enzimas), o de las micromatrices de ADN y proteínas. Pero la nueva miniaturización lograda con nanohilos y nanotubos se postula como algo más: el futuro de la espectrometría de masas. Una nueva clase de espectroscopía que permite, además, acceder al estudio de los cambios en las propiedades elásticas de los materiales.

Tal y como propusimos en un artículo publicado junto con otros colaboradores en agosto de 2010 en la revista *Nature Nanotechnology*, empleados como resonadores mecánicos, los nanohilos de silicio acoplados optomecánicamente a una fuente de luz láser han logrado detectar masas del orden del femtogramo, al tiempo que han alcanzado el límite de 0,1 kilopascales por femtogramo en la determinación del módulo de Young, el parámetro que mide la elasticidad de un material. Esto significa que la técnica podría llegar a detectar variaciones de cien