

## NOVEDADES CIENTÍFICAS EN 2018

## EN FÍSICA

## PREMIO NOBEL EN FÍSICA

Este año 2018, la Fundación Nobel ha premiado a Ashkin, Mourou y Strickland por sus trabajos, que han permitido desarrollar nuevas herramientas que han revolucionado la física del láser para poder observar objetos extremadamente pequeños y procesos físicos enormemente rápidos. Con ellas se están abriendo nuevas áreas de investigación y aplicaciones en la industria y en la medicina.

Las pinzas ópticas de Arthur Ashkin usan la presión de radiación de la luz láser y, mediante conjuntos de rayos láser enfocados, atrapan pequeñas partículas y átomos. A partir de 1986, también pueden capturarse, y manipularse sin daño, virus y células vivas

En 1985, Gérard Mourou y Donna Strickland, como parte de la tesis doctoral de Strickland, fueron capaces de crear pulsos láser más cortos e intensos que nunca, pulsos ultracortos de alta intensidad que no destruyen el material amplificador de luz. Mediante un proceso pausado de descompresión, amplificación y compresión, empaquetaron más densamente el pulso y consiguieron que su intensidad aumentara de manera considerable. Entre otras aplicaciones, esa técnica se ha convertido en estándar para los láseres de alta intensidad que actualmente se aplican a millones de cirugías oculares correctivas.

## SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

El 16 de noviembre de 2018, la 26ª Conferencia General de Pesas y Medidas aprobó la redefinición en función de constantes universales de cuatro unidades del SI (kilogramo, amperio, kelvin y mol). Ya en 1983 se redefinió el metro en términos de la velocidad de la luz. En 2018 el kilogramo pasa a estar definido en términos de la constante de Planck. De hecho, lo que la comunidad científica ha hecho es asignar a la constante de Planck el valor exacto de  $h = 6,62607015 \times 10^{-34}$  J·s (ya no tiene, pues, sentido “medir” la constante de Planck).

Queda a partir de ahora fuera de uso el Prototipo de Kilogramo Internacional, el famoso cilindro de platino e iridio guardado en el Pabellón de Breteuil (París), y creado en 1889. A partir del 20 de mayo de 2019, Día Mundial de la Metrología, entrará en vigor el nuevo sistema.

Sin embargo, a pesar de que seguramente la redefinición del kilogramo ha tenido más eco popular, se producirá un cambio mayor en las medidas eléctricas, ya que el amperio cambia a una nueva definición basada en la carga eléctrica elemental, paso que permitirá la calibración más precisa de los mejores amperímetros de la actualidad y garantizará la de instrumentos futuros.

Estas definiciones afectan a dos parámetros de la física de la materia condensada, la constante de Josephson y la constante de von Klitzing, ya que los valores de ambos números se establecerán de manera precisa a través de la constante de Planck y la carga elemental. Klaus von Klitzing, Premio Nobel de Física en 1985 por el efecto Hall cuántico, indicó en la Conferencia que estaba feliz de sacrificar “su” constante a cambio de definir todas las unidades sobre una base universal. Von Klitzing también citó a Max Planck (véase el artículo sobre él en este mismo número) y sus esfuerzos para reformular los sistemas de medida basándolos en constantes de la naturaleza. La motivación de Planck era tener unidades científicas que “conserven su importancia para todas las culturas”.



Figura 1. El prototipo de platino e iridio que ha sido el estándar del kilogramo desde 1889.

## EL UNIVERSO

La mayor parte de la materia en el Universo es oscura, y su composición sigue siendo un misterio. Tras la detección de las ondas gravitacionales producidas por colisiones de agujeros negros (LIGO-Virgo, Premio Nobel de 2017), hay gran controversia acerca de la relevancia que pueda tener un posible candidato en la materia oscura: los agujeros negros “primordiales”, que se habrían formado mucho antes que las estrellas, y en grandes cantidades, en el universo temprano. La razón es que las masas de los agujeros negros que colisionaron para que generaran las ondas gravitacionales medidas por LIGO-Virgo se estima en unas 30 masas solares, mayores de lo que esperaban los modelos estelares (y también con frecuencias de rotación más lentas).

Ya en 1974 Stephen Hawking propuso la idea de que los agujeros negros podrían contener parte de la materia faltante del Universo. Para algunos cosmólogos, los agujeros negros resuelven varios problemas abiertos en la cosmología, como explicar la materia oscura, mientras que otros investigadores apuntan a observaciones astronómicas que restringen su número, y piensan que no podrían resolver dichos problemas. El debate está haciendo que los investigadores revisen con cuidado los datos disponibles.

Por una parte, los agujeros negros primordiales podrían haberse formado en el Universo muy temprano en regiones con una densidad aproximadamente igual al doble de la densidad promedio del Universo; la gravedad se encarga entonces de formarlos. Pero el Universo temprano parece haber sido muy uniforme, al menos en las grandes escalas que los astrónomos pueden observar con el fondo cósmico de la radiación de microondas (CMB).

Algunos teóricos, sin embargo, han propuesto modelos del Universo temprano que pueden tener grandes fluctuaciones de densidad en escalas pequeñas, al mismo tiempo que sus resultados también coinciden con las observaciones CMB. Por ejemplo, un modelo de García-Bellido (UAM) [<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.92.023524>] que propone que el Universo primitivo generó una gran cantidad de agujeros negros primordiales con masas que cubren un amplio rango de valores. El modelo sugiere que en la Vía Láctea podría haber un billón de agujeros negros, si bien tan separados que la probabilidad de que un agujero negro se acerque a nuestro Sistema Solar es muy pequeña.

Las cinco detecciones de fusiones de agujeros negros hechas hasta ahora por LIGO-Virgo son evidencia de una población notable de agujeros negros, pero está en debate si esa población es o no suficientemente grande como para constituir parte importante de la materia oscura. El problema es que hay cálculos recientes que muestran que si la materia oscura estuviera formada por agujeros negros que pesan entre 10 y 300 masas solares, entonces LIGO debería haber detectado muchas más fusiones, por lo que esos agujeros negros representarían alrededor del 1% de la materia oscura.

Sigue habiendo también dudas sobre qué cantidad de materia oscura podrían contener los agujeros negros. Se piensa que un agujero negro, cuando pasa por delante de una supernova, actúa como una lente convergente y la supernova aumenta su brillo dependiendo de la masa del agujero negro. Pero un estudio de Zumalacárregui y Seljak (UC, Berkeley), que utiliza más de mil supernovas, suponiendo agujeros negros de masas desde 0.01 hasta varios miles de veces la masa de nuestro Sol, concluyó que la masa acumulada de estos agujeros negros puede representar como máximo el 40% de la materia oscura del Universo.

Como vemos, la cosa está aún poco clara, y conviene recordar, además, que no hay motivos para suponer que la naturaleza vaya a tener un único tipo de materia oscura.

## FÍSICA CUÁNTICA E INFORMACIÓN CUÁNTICA

### Construyendo una molécula átomo a átomo

El conocimiento más común acerca de las reacciones químicas proviene de experimentos con un número muy elevado de moléculas: esto proporciona promedios de distintos parámetros globales, como las velocidades de reacción, pero olvida detalles como que la dinámica de la reacción es distinta según se considere uno u otro de los estados cuánticos de la molécula.

Investigadores de la Universidad de Harvard [<http://science.sciencemag.org/content/360/6391/900>] han logrado reducir una reacción química a sus componentes mínimos, ya que son capaces de atrapar átomos y moléculas enfriados por láser mientras controlan con precisión las posiciones y los estados cuánticos, y han “construido” una molécula a partir de dos átomos que atraparon y unieron con pinzas ópticas (véase el apartado del Premio Nobel al principio del artículo). Primero se enfriaron átomos de sodio (Na) y cesio (Cs) por debajo

de 100 K, temperatura que es lo suficientemente baja como para manipular los átomos con pinzas ópticas, atrapando después un átomo de cada especie en pinzas separadas. Cruzaron las pinzas con Cs y las pinzas con Na y, mediante un láser infrarrojo, se les comunicó energía suficiente como para formar una molécula de NaCs.

Se prevén aplicaciones en física y química fundamental, pero también en computación cuántica, ya que sería posible almacenar información en dos niveles hiperfinos de la molécula, que son robustos a perturbaciones. La información podría transferirse entonces a los estados de rotación de la molécula. Como el NaCs es una molécula dipolar, e interacciona con otras moléculas dipolares, el acoplamiento podría usarse para enviar información almacenada en un estado rotacional excitado de una molécula de NaCs a otra molécula en su estado fundamental, y eso permitiría realizar operaciones lógicas.

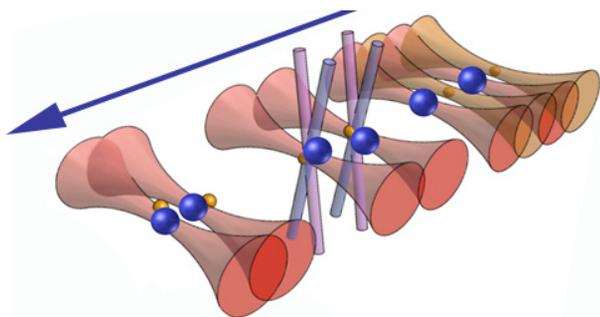


Figura 2. Molécula formada juntando dos átomos con pinzas ópticas.

### Imágenes y video enviados con codificación cuántica segura

En las *Novedades en Física 2017*, se citó que se había conseguido comunicar estados cuánticos entre un satélite geostacionario a 38.000 km sobre la Tierra y una estación terrestre en el Observatorio del Teide en Tenerife, abriendo la posibilidad de comunicaciones cuánticas seguras por satélite.

Este año, investigadores de la Universidad de Ciencia y Tecnología de China (USTC, Hefei) en colaboración con el grupo de Zeilinger (Universidad de Viena) han utilizado un satélite para el envío de información a una distancia de 7.600 km mediante el proceso QKD (que mantiene seguro el mensaje codificado, ya que resulta imposible que los qubits transmitidos sean interceptados y leídos sin que remitente y receptor lo adviertan, incluso si el mensaje se envía sin un protocolo cuántico). El remitente utiliza una clave para cifrar los datos que hace llegar

al satélite, y el satélite incluye esa clave en la señal, cifrada con una clave diferente, que envía a la estación receptora.

Esta seguridad augura la posibilidad de una “Internet cuántica” para la protección de datos global, que parece más factible después de que estos investigadores compartieran de manera segura tanto imágenes como una conexión de video (de 75 minutos, que requirió 2 gigabytes de datos) entre estaciones en China y Austria.

### El principio de Landauer pasa la prueba cuántica

El borrado de información, aunque sea solo un bit de información, siempre produce calor; y en 1961 Landauer predijo que la cantidad mínima de calor necesaria para borrar un bit clásico es  $k_B T \ln 2$ . Este límite clásico se confirmó hace unos años utilizando partículas coloidales atrapadas del tamaño de un micrómetro, usando un sistema de dos estados confinando las partículas en un potencial de pozo doble, mediante luz láser o campos eléctricos.

En contraste con un bit clásico, un bit cuántico (o qubit) es un sistema de dos niveles que puede estar en una superposición de estados. Utilizando conceptos de la teoría de la información (entropía de Shannon), y utilizando la termodinámica estocástica, se ha demostrado que el principio de Landauer es una consecuencia directa de la segunda ley de la termodinámica.

Un grupo dirigido por Mang Feng (Academia de Ciencias de China, Wuhan) ha verificado el principio de Landauer en un sistema completamente cuántico, en el que tanto el qubit como el baño térmico tienen energías cuantizadas [<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.210601>]. Los investigadores realizaron un experimento en el que el qubit está definido por dos estados de un ion de calcio atrapado. El baño térmico eran los propios modos de vibración del ion, enfriado a unas pocas decenas de microkelvin.

Comparando las poblaciones antes y después de un borrado, el equipo demostró que el principio de Landauer sigue siendo válido en el régimen cuántico. Hay que hacer notar aquí que se supone que el qubit inicialmente no está correlacionado con el baño térmico, lo que es válido en la preparación del qubit que usó el equipo de Feng o cuando la interacción entre el qubit y el baño térmico es débil. Sin embargo, formular la segunda ley para el principio cuántico de Landauer cuando

las condiciones iniciales están correlacionadas siguiendo un campo activo de investigación.

Las ideas del principio de Landauer y, más generalmente, la termodinámica de la información son un tema fundamental. Pero también tienen valor práctico, ya que se puede entender que el límite de Landauer podría ser algo similar a lo que el límite de Carnot es para máquinas de calor: un límite que establece un valor máximo para el rendimiento en las aplicaciones prácticas.

## FÍSICA DE ALTAS ENERGÍAS

El descubrimiento del bosón de Higgs en 2012, después de décadas de búsqueda, en colisiones protón-protón en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) en el CERN, abrió un nuevo campo: ¿se tiene la idea correcta de cómo es la interacción del bosón de Higgs con otras partículas? Esas interacciones hacen que el bosón de Higgs sea muy inestable, y que se desintegre en varios estados finales diferentes.

Se esperaba que la desintegración del bosón de Higgs diera lugar a dos quarks *bottom*, ya que tiene un 58% de probabilidad de desintegrarse de esta manera. Sin embargo, ese proceso es mucho más difícil de observar que otros canales de desintegración menos probables. En efecto, en las colisiones protón-protón se producen un enorme número de pares de quarks *bottom*, y por cada par de quarks *bottom* que proviene directamente de una desintegración del bosón de Higgs hay aproximadamente otros  $10^7$  pares (de quarks *bottom*) que no tienen su origen en esas desintegraciones.

En consecuencia, los investigadores de las colaboraciones CMS y ATLAS han tenido que reducir ese enorme ruido de fondo, centrándose en el estudio de las colisiones protón-protón que producen un bosón de Higgs en asociación con un bosón W o Z, conocido como evento VH. Para identificar un evento VH, los experimentadores de CMS y ATLAS utilizan el hecho de que W a veces se desintegra en un leptón cargado y un neutrino y que Z a veces se desintegra en un par de neutrinos o un par de leptones cargados. Estas partículas secundarias sirven para etiquetar un evento VH.

El análisis se ha basado en los datos tomados durante dos ejecuciones experimentales, de 2010 a 2012 y de 2015 a 2017, y ha confirmado la predicción del modelo estándar con una incertidumbre de aproximadamente el 20%.

Sin embargo, casi no existe información experimental sobre los acoplamientos del Higgs con los fermiones más ligeros. Así que las nuevas medidas que se realicen sobre el bosón de Higgs seguirán proporcionando tests del modelo estándar.

## FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA

### Cómo medir la temperatura en sistemas bidimensionales

Para construir dispositivos electrónicos robustos es importante conocer cómo los componentes modifican su tamaño con el calor generado por las corrientes eléctricas. Pero medir la temperatura y las propiedades térmicas de objetos muy pequeños es un desafío: los termómetros convencionales son grandes y alteran la temperatura del objeto si se ponen en contacto con él. Aunque se han desarrollado técnicas menos invasivas, hasta ahora no se ha podido conseguir la resolución espacial necesaria para estudiar transistores y otros componentes de dispositivos en la nanoescala.

En trabajos recientes se ha demostrado que la microscopía electrónica de transmisión (STEM) puede medir la temperatura con una resolución espacial nanométrica [X. Hu et al., Phys. Rev. Lett. (2018)]. Robert Klie y sus colegas (Universidad de Illinois, Chicago) han adaptado este método STEM para medir la expansión térmica en materiales 2D. El equipo investigó el grafeno así como semiconductores 2D con propiedades electrónicas inusuales (los TMD).

Para las mediciones STEM, los investigadores escanearon un haz de electrones a través de cada muestra y registraron la cantidad de energía cinética perdida por los electrones que atraviesan el material. Uno de los principales mecanismos de pérdida es la excitación de plasmones (*oscilaciones colectivas de electrones*), cuya energía depende de la longitud de onda de estas oscilaciones colectivas, que está directamente relacionada con el volumen que ocupan los electrones. Por lo tanto, se pueden conocer los cambios en el volumen del material midiendo la variación de energía del pico del plasmón. Aumentando la temperatura de 373K a 723K los investigadores calcularon el coeficiente de expansión térmica, y encontraron que dependía en gran medida del número de capas atómicas que tuviera la muestra. Parece que las monocapas responden más a los cambios de temperatura porque no están influidas por las interacciones entre capas. Este comportamiento, aún no explicado en su to-

alidad, puede ser relevante para el desarrollo de dispositivos nanoelectrónicos basados en materiales 2D.

## Los aislantes topológicos

La identificación de nuevas fases de la materia con propiedades inusuales es un objetivo de mucho interés en la física de la materia condensada. Un ejemplo reciente es la predicción teórica de los llamados *aislantes topológicos* (TI), algunos de ellos ya diseñados en el laboratorio.

Los TI de  $d$ -dimensiones son aislantes electrónicos en su interior (en su volumen) pero presentan conducción metálica en sus fronteras ( $d-1$ -dimensionales (en sus superficies). Esto se debe a que estos materiales tienen estados electrónicos en el volumen con una brecha de energía ("gap"), mientras que en sus fronteras los electrones pueden moverse sin penalización energética (sin gap).

Cuando las dimensiones del volumen son mayores que la unidad ( $d > 1$ ), pueden definirse TI de orden superior con fronteras que son TI en sí mismos. Cuatro equipos de investigadores distintos han identificado nuevas clases de TI para esas dimensiones  $d > 1$ .

Por ejemplo, en tres dimensiones, un TI de segundo orden tiene estados sin gap ubicados en "bisagras" 1D entre distintas superficies, mientras que un TI de tercer orden tiene estados sin gap en sus "esquinas" 0D. De manera similar, en dos dimensiones, un TI de segundo orden también tiene estados de "esquina" sin gap. Sin embargo, es importante recalcar que se ha encontrado que no todos los TI de dimensión menor son automáticamente buenos puntos de partida para construir TI de orden superior y, en segundo lugar, que pueden ser necesarias simetrías adicionales para que se den estados de frontera sin gap.

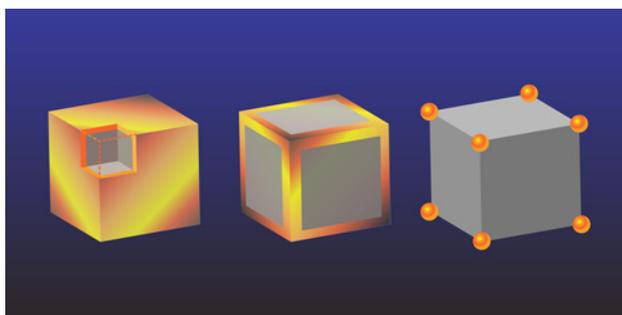


Figura 3. Izquierda: un aislante topológicos 3D conduce a través de estados sin gap en sus superficies 2D, pero son aislantes en su volumen. Los aislantes topológicos 3D de segundo y tercer orden tienen estados sin gap en sus bisagras 1D (centro) o en sus esquinas 0D (derecha), y son nuevas fases topológicas de la materia.

Experimentalmente, ya hay materiales sólidos, así como propuestas específicas para diseñar TI de orden superior utilizando gases atómicos fríos y sistemas fotónicos, y protocolos realistas de detección de los estados de "esquina" y "bisagra".

Desde un punto de vista más aplicado, estos estados de frontera sin gap resultan ser muy robustos frente a la presencia de impurezas, y generan nuevas propiedades cuando los TI se acoplan a imanes o superconductores: así, dotan a los vórtices superconductores de estadísticas cuánticas "no abelianas" que podrían hacer que dichos vórtices sean prácticos para computación cuántica.

## Cómo medir con electrones la dinámica completa de los fonones

Es bien conocido que los átomos en los sólidos están siempre en movimiento, vibrando alrededor de una posición promedio. Sin embargo, se conoce poco de muchos de los detalles de esos procesos vibracionales en tiempo real. Los electrones transfieren energía a las vibraciones, y la energía se distribuye entre los fonones, en escalas de tiempo del orden de femtosegundos ( $10^{-15}$  s). Teniendo estos procesos ultrarrápidos un papel determinante en muchos fenómenos, actualmente el análisis de la dinámica de fonones se apoya mucho en la teoría, a causa de la dificultad de medir los fenómenos vibracionales en escalas de tiempo de femto a picosegundos ( $10^{-12}$  s).

Aunque los láseres de pulsos cortos han permitido extender las técnicas de medida estáticas al dominio del tiempo ultrarrápido, la información experimental está limitada a ciertos rangos de frecuencias o a fonones de un solo tipo (acústicos u ópticos).

Siwick (Univ. McGill, Canadá) ha demostrado [<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.97.165416>] que utilizando electrones energéticos (100 keV) como sonda (en lugar de pulsos de fotones) en paquetes de electrones con duración de femtosegundos se puede medir la dinámica de todos los fonones de un material. Para ello, tienen en cuenta que la información estructural está contenida tanto en los electrones dispersados según un patrón de Bragg de puntos discretos como en los electrones que han sufrido dispersión difusa. A diferencia de las reflexiones de Bragg, la dispersión difusa es debida a las desviaciones en la periodicidad de la red, y eso es lo que hacen los fonones.

Se empleó una película delgada de grafito, un material altamente simétrico hecho de capas de carbono 2D idénticas. Debido a las reglas de selección impuestas por la simetría, la dinámica de los fonones se puede extraer mediante el análisis de puntos particulares en el patrón de dispersión difusa. Después de la excitación producida por los electrones, al analizar los patrones sucesivos de dispersión se obtuvo información de la dinámica y los acoplamientos de los fonones del grafito: fonones ópticos y acústicos, así como transversales y longitudinales.

El acoplamiento electrón-fonón y fonón-fonón es básico para el control del transporte de electrones en materiales, por lo que esta técnica puede ser de mucho interés. Y si se extendiera a cristales con menor simetría que el grafito, podría aplicarse al estudio de cristales moleculares de baja simetría que son prometedores para la fabricación de semiconductores orgánicos.

## VARIOS

### La fricción tiene memoria

Contrariamente a lo que nos enseñan en los cursos básicos, la fricción entre dos superficies no es constante. Para una amplia gama de materiales y tipos de superficie, aumenta con el tiempo, pues las superficies desiguales a nivel microscópico se van deformando y acaban entrando en contacto. Los experimentos han encontrado además que la fricción puede tener memoria, lo que significa que puede depender no solo del estado actual de la interfase, sino también de cómo se llegó allí.

Los modelos tradicionales de “envejecimiento” de la fricción suponen que la fricción depende solo de las condiciones de la interfase y de la duración del contacto. Rubinstein y Dillavou (Universidad de Harvard) [<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.120.224101>] analizaron la validez de esas suposiciones haciendo medidas de la variación de la fricción a un cambio en la fuerza en la interfase. Colocaron dos láminas de plástico transparente, una encima de la otra, con áreas de superficie de 0,5 a 4 cm<sup>2</sup>, en un dispositivo que permite empujar hacia abajo la lámina superior con una fuerza determinada (la “carga”).

El *área de contacto* entre las dos superficies se midió mediante una técnica desarrollada por Rubinstein, que ilumina con luz a ángulo pequeño la superficie superior de la lámina inferior. La luz pasa a la lámina superior en un patrón a parches, ya que atraviesa la interfase solamente por donde hay contacto microscópico.

En un primer paso, se aplicó una carga constante a la lámina superior. El área de contacto creció logarítmicamente con el tiempo, como se esperaba de estudios previos de fricción.

En un segundo paso, se redujo abruptamente la carga después de un tiempo de espera (desde unos pocos segundos hasta casi tres horas). El área de contacto disminuyó repentinamente al principio, ya que muchas regiones pequeñas se separan, para continuar haciéndolo lentamente, antes de reanudar el crecimiento logarítmico del primer paso. La caída y el ascenso implican que la interfase de fricción tiene memoria. El área de contacto toma el mismo valor dos veces, por lo que no depende solo de las condiciones externas, sino que también lo hace del historial de la interfase.

Dillavou y Rubinstein midieron además el *coeficiente de fricción* (la fuerza necesaria para hacer que la interfase deslice, dividida por la carga aplicada). Utilizaron el mismo procedimiento de dos pasos y, después del tiempo de espera y la reducción abrupta de la carga, aplicaron una fuerza lateral creciente a la lámina inferior hasta que deslizó. Los investigadores realizaron miles de tales pruebas para diferentes valores del tiempo de espera y de cargas iniciales.

El coeficiente de fricción también disminuyó, y volvió a aumentar después de la reducción de la carga, pero al comparar con las mediciones del área de contacto se observó que las dos propiedades no varían al tiempo. A veces, el área de contacto aumenta cuando el coeficiente de fricción disminuye, y viceversa. Según los investigadores, la irregularidad del contacto entre las láminas explica este desajuste: el coeficiente de fricción depende principalmente de la parte de la interfase donde el contacto es más fuerte, y si esas áreas se hacen más pequeñas mientras que crece el número de áreas con contacto más débil, el área total de contacto podría aumentar incluso mientras el coeficiente de fricción disminuye (sin embargo, el argumento no es definitivo).

Para explicar el comportamiento de ambos parámetros, Dillavou y Rubinstein utilizaron un modelo empírico que supone que sistemas desordenados, como los vidrios, pueden describirse mediante un conjunto de microsistemas que evolucionan temporalmente de manera distinta. En el caso de la fricción, los microsistemas podrían ser pequeñas regiones que sufren deformaciones o adherencias en la interfase, de manera que aquellos de rápida evolución alcanzan el equilibrio durante el tiempo de espera, mientras que los más lentos aún están

cambiando. Cuando la carga se reduce abruptamente, estos grupos evolucionan de manera diferente a medida que van hacia el nuevo equilibrio, con lo que se produce el comportamiento observado.

Los hallazgos apuntan a la existencia de posibles conexiones entre la fricción y el comportamiento de vidrios y otros sistemas desordenados. Además, a largo plazo pueden influir en el enfoque de la fricción en la maquinaria industrial y las micromáquinas, así como en la fricción que se introduce para el estudio de terremotos.

### Relación entre los fallos en redes de transmisión eléctrica y las fluctuaciones del tiempo atmosférico

La generación de energía a partir de fuentes renovables como la energía eólica y solar, que suele ser muy variable o intermitente, puede poner a prueba la fiabilidad de una red eléctrica extensa, con la aparición de fallos que no se entienden aun completamente. Nesti (CWI, Holanda) y sus colegas [<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.120.258301>] han utilizado conceptos de la física estadística para predecir el modo en que las redes eléctricas pueden responder a aportes fluctuantes de energía.

El modelo de redes de energía que usaron los investigadores incluye información sobre la capacidad de la red y su topología, así como datos históricos sobre las cargas de la red y la generación de energía. Hicieron uso de un modelo matemático, que analiza eventos raros y la forma en que ocurren, para predecir fallos potenciales en la red, y clasificaron qué líneas tienen más probabilidades de fallar para un conjunto de parámetros operativos de la red y de condiciones meteorológicas. Para validar sus hallazgos teóricos, el equipo utilizó datos reales de una red de transmisión de energía en Alemania.

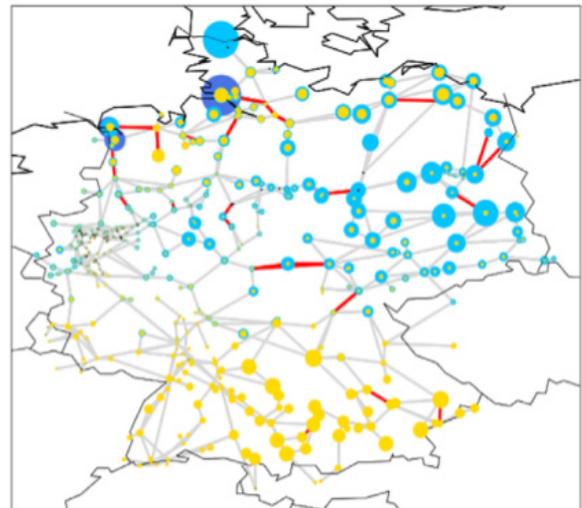


Figura 4. En rojo, el 5% de las líneas eléctricas de la red con mayor probabilidad de fallo.

Los investigadores estimaron inicialmente las correlaciones de las aportaciones variables de energía que son consecuencia de las fluctuaciones del tiempo meteorológico. Utilizaron esas correlaciones para identificar aquellos patrones de producción de energía que más probablemente inducen fallos en una línea dada. Un hallazgo clave es que los fallos no resultan ser necesariamente el resultado de grandes fluctuaciones en las aportaciones de energía, sino que más bien aparecen por la “suma” de muchas pequeñas fluctuaciones en toda la red. También encontraron que los fallos se propagan de manera tal que un fallo inicial en una línea perturba e incluso provoca fallos en otras líneas, aunque éstas se encuentran lejos del punto original de fallo. Y todo ello depende del diseño de la red y de las correlaciones inducidas por el tiempo meteorológico.

José Enrique Alvarelos Bermejo  
Dpto. de Física Fundamental