

# INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Junio 2013 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

**MEDICINA**

Avances en  
reparación  
de tejidos

**MEDIOAMBIENTE**

Gestión  
de reservas  
marinas

**ASTRONÁUTICA**

Misiones  
espaciales  
de bajo coste

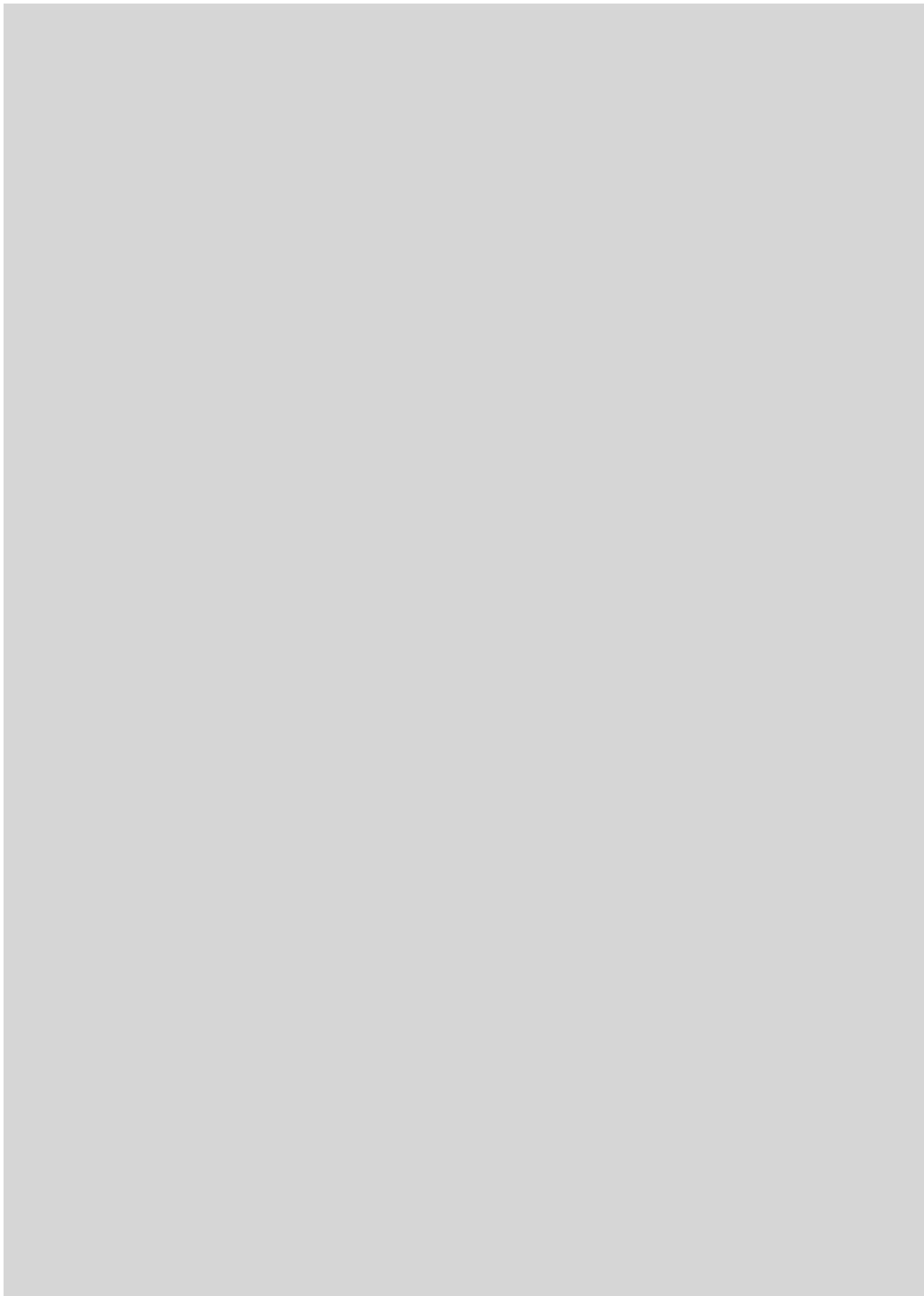
# Partículas fantasmales

La naturaleza exótica  
de los neutrinos amplía  
los horizontes de la física



6,50 EUROS







76

## ARTÍCULOS

### FÍSICA DE PARTÍCULAS

#### 16 Mensajeros fantasmales de nueva física

Las exóticas propiedades de los neutrinos podrían aportar las pistas necesarias para ir más allá del modelo estándar. *Por Martin Hirsch, Heinrich Päs y Werner Porod*

#### 22 Un secreto escrito en el cielo

*Por Sudeep Das y Tristan L. Smith*

### ZOOLOGÍA

#### 24 El jaguar: genes y conservación

La historia poblacional del gran felino americano revelada por el ADN. *Por Manuel Ruiz García*

### INFORME ESPECIAL: ¿QUÉ ES LA INFORMACIÓN?

#### 32 Información y significado

En la teoría clásica de la información no hay lugar para la atribución de significado. Sin embargo, los humanos insistimos en ello. ¿Cómo reconciliar ambas posturas? *Por Peter J. Denning y Tim Bell*

#### 42 Hacia una teoría universal

Las sucesivas aplicaciones de la teoría de la información a nuevos campos, como la biología, revelan una disciplina joven que aún debe superar numerosos retos. *Por Jérôme Segal*

### SALUD

#### 56 Avances en medicina regenerativa

El futuro de la reparación tisular. *Por VV. AA.*

### ENERGÍA

#### 66 El coste real de los combustibles fósiles

El encarecimiento del petróleo exige buscar procesos en los que la inversión de energía consiga un óptimo rendimiento. *Por Mason Inman*

### EXPLORACIÓN ESPACIAL

#### 70 Investigación espacial de bajo coste

Los vuelos privados al espacio no serán solo para turistas adinerados. Una naciente industria promete revolucionar las misiones científicas. *Por S. Alan Stern*

### CONSERVACIÓN

#### 76 Reservas marinas y población local

Los habitantes del archipiélago indonesio de Raja Ampat lideran los esfuerzos para proteger los arrecifes de coral de los estragos de la pesca. Con ello intentan defender también su propia subsistencia. *Por Brendan Borrell*

### PALEONTOLOGÍA

#### 82 El apareamiento de los dinosaurios

Se ha empezado a resolver el indescifrable misterio de la copulación en los enormes reptiles. *Por Brian Switek*

# INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

## SECCIONES

### 3 Cartas de los lectores

### 4 Apuntes

Destino: el agujero negro del centro de la galaxia. Nuevos mundos más allá de Plutón. Rémoras. Tecnología puntera para aprovechar la luz natural. Bombillas de estado sólido. Un bosque tropical que agoniza.

### 7 Agenda

### 8 Panorama

Cuarenta años de libertad asintótica.

*Por Antonio González Arroyo*

Ornitología participativa. *Por Hillary Rosner*

Información desde el vacío. *Por Carlos Sabín Lestayo*

### 50 De cerca

Briófitos en arroyos de montaña. *Por Javier Martínez Abaigar y Encarnación Núñez Olivera*

### 52 Historia de la ciencia

El nacimiento de la cristalografía de rayos X.

*Por John Meurig Thomas*

### 54 Foro científico

Historia de dos Internets. *Por Michael Fertik*

### 55 Ciencia y gastronomía

Desnatados, pero menos sabrosos. *Por Hervé This*

### 86 Curiosidades de la física

Mecánica celeste con rozamiento.

*Por Norbert Treitz*

### 90 Juegos matemáticos

Dilemas cooperativos e inducción hacia atrás.

*Por Alejandro Pérez Carballo*

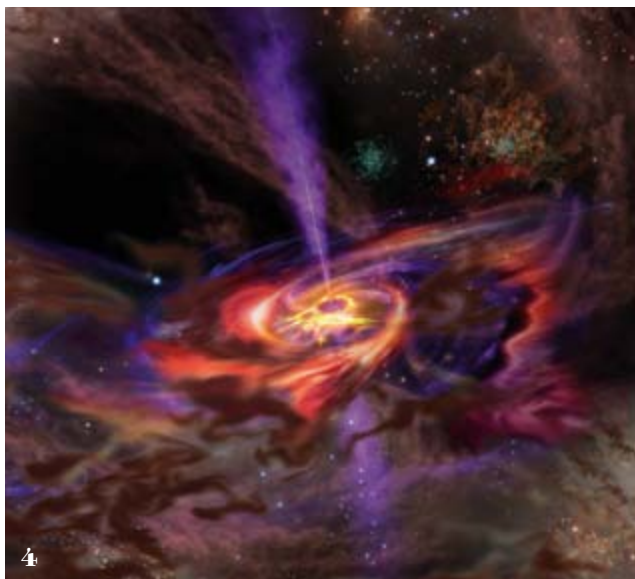
### 92 Libros

Técnicas ópticas y tintoriales. *Por Mercè Durfort*

Biología sintética. *Por Luís Alonso*

### 96 Hace...

50, 100 y 150 años.



## EN PORTADA

Las extrañas propiedades de los neutrinos llevan más de ochenta años asombrando a los físicos. Numerosos experimentos en todo el mundo intentan averiguar los detalles del mecanismo por el cual estas partículas adquieren su exigua masa, así como su enigmática relación con la antimateria. Las respuestas podrían proporcionar pistas clave para ampliar el modelo estándar de la física de partículas. Imagen de Vault49.







Febrero 2013

**LOS NOMBRES DEL WOLFRAMIO**

En «Creación de una metaloteca» [por Marc Boada; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2013], el autor menciona varias veces el «tungsteno». El elemento 74 de la tabla periódica fue aislado en otoño de 1783 por los hermanos riojanos Fausto y Juan José de Elhuyar, quienes hallaron, en un mineral llamado wolframita, un ácido que coincidía con el «ácido túngstico» predicho, pero no aislado, por Carl W. Scheele. Más tarde describieron su hallazgo en «Análisis químico del wólffram y examen de un nuevo metal que entra en su composición». Es decir, sus descubridores le dieron el nombre de *wólffram*, o wolframio, por lo que creo que debería respetarse.

De hecho, la RAE incluye en su diccionario las voces *wólffram*, *volframio* y *tungsteno*, todas las cuales remiten a *wolframio*. Y su símbolo químico es W, no Tg o algo semejante.

JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ PONS  
*Doctor en química  
 y licenciado en física  
 Madrid*

RESPONDE PASCUAL ROMÁN POLO, catedrático de química inorgánica de la Universidad del País Vasco: *En 2005, junto con Pilar Goya, del Instituto de Química Médica del CSIC, publicamos en Chemistry International (vol. 27, n.º 4, págs. 26-27) la sugerencia de mantener en inglés los nombres tungsten y wolfram para el elemento químico de número atómico 74. Ture Damhus, en representación de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), nos respondía que en inglés el único nombre aceptado por la IUPAC era tungsten, pero dejaba la puerta abierta a que en otros idiomas se empleasen tungsteno, wolframio o sus voces derivadas.*

*En castellano el nombre más apropiado es wolframio por varias razones. El elemento fue aislado por vez primera en 1783 en Vergara (Guipúzcoa) por Juan José y Fausto Delhuyar a partir del mineral wolframita. En la página 88 de su artículo «Análisis químico del volfram, y examen de un nuevo metal, que entra en su composición; por D. Juan José y D. Fausto de Luyart, de la Real Sociedad Bascongada» (grafía original), publicado ese mismo año, los autores reivindicaban el nombre de wolframio. Una práctica común a finales del siglo XVIII era nombrar los elementos químicos a partir del mineral de procedencia; en este caso, el volfram, o wolframita. Los hermanos Delhuyar escribieron: «Daremos á este nuevo metal el nombre de volfram, tomándolo del de la materia, de la qual lo hemos sacado, y miraremos ésta como una mina, en que este metal está combinado con el hierro y la alabandina, como queda probado».*

*¿Por qué no defender en castellano la voluntad de sus descubridores? Desde hace muchos años, ilustres investigadores españoles han abogado por el uso de wolframio frente al de tungsteno. Por último, el símbolo del elemento reconocido por la IUPAC es W, que, evidentemente, procede de wolfram y no de tungsten.*

**CEREBRO MULTISENSORIAL**

En el artículo sobre el cerebro multisensorial [«Dependencia y cooperación entre los sentidos», por L. D. Rosenblum; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2013] se destaca que «varios estudios de psicología y de neurociencia realizados en los últimos treinta años han revelado que el cerebro es un órgano multisensorial, que conjuga sin cesar los datos que le envían los diversos sentidos». Quizá pueda interesar a los lectores de lengua hispana que los primeros estudios cuantitativos que pusieron al descubierto esa faceta multisensorial de diversas zonas de la corteza cerebral fueron realizados hace más de 60 años por el neurocientífico Justo Gonzalo (Barcelona, 1910 — Madrid, 1986).

Desde 1938, Gonzalo estudió a multitud de pacientes con lesiones cerebrales y caracterizó un síndrome multisensorial de afección bilateral simétrica en sujetos con lesión cortical unilateral. Los fenómenos de interacción multisensorial, como

la mejora en la percepción de un estímulo por la presencia de otro de diferente naturaleza, fueron interpretados sobre bases fisiológicas. Gonzalo propuso un sistema de gradientes funcionales a lo largo de la corteza cerebral que daría cuenta del carácter multisensorial de cada una de sus partes, el cual se ajustaba a sus observaciones y a las descritas en la bibliografía. Esta investigación fue publicada por el Instituto Cajal del CSIC en dos volúmenes en 1945 y 1950, así como en 1952 en la revista del centro. A pesar de estar redactados en español, dichos trabajos gozaron en su momento de una notoria acogida internacional.

Esos estudios han sido recopilados en una reciente edición facsímil con suplementos: *Dinámica cerebral* (Justo Gonzalo; Red Temática en Tecnologías de Computación Artificial/Natural, Universidad de Santiago de Compostela, 2010). La versión digital íntegra es de libre acceso y se encuentra disponible en el repositorio electrónico de dicha universidad: [dspace.usc.es/handle/10347/4341](https://dspace.usc.es/handle/10347/4341).

ISABEL GONZALO FONRODONA  
*Facultad de ciencias físicas  
 Universidad Complutense de Madrid*



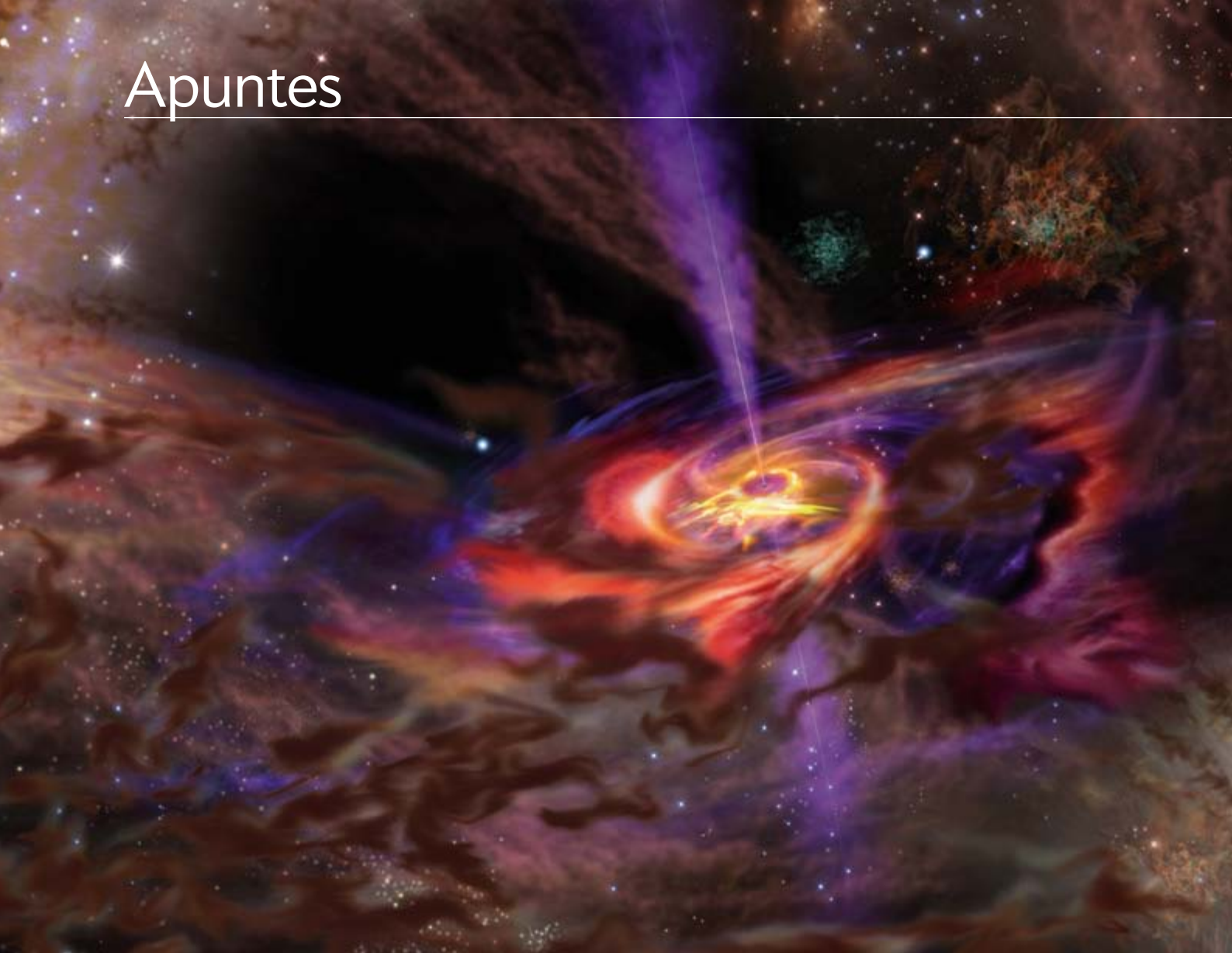
Marzo 2013

CARTAS DE LOS LECTORES

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

Prensa Científica, S.A.  
 Muntaner 339, pral. 1.º, 08021 BARCELONA  
 o a la dirección de correo electrónico:  
[redaccion@investigacionyciencia.es](mailto:redaccion@investigacionyciencia.es)

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. INVESTIGACIÓN Y CIENCIA se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



## ASTRONOMÍA

### Destino: el agujero negro del centro de la galaxia

**Hace tiempo** que los astrónomos sabían que sucedería. En algún momento del verano —tal vez este mismo mes—, una gran nube de gas y polvo se adentrará en la región central de la Vía Láctea, donde habita un agujero negro supermasivo de cuatro millones de masas solares. Se cree que la nube podría incluso albergar una estrella joven en su interior.

El espectáculo que se avecina debería revelar todo tipo de información sobre el misterioso núcleo galáctico, una zona difícil de estudiar debido a la gran cantidad de polvo que la rodea y la enorme distancia a la que se encuentra. Los expertos llevan tiempo preguntándose por qué, a diferencia de lo que ocurre con los agujeros negros supermasivos de otras galaxias, el de la Vía Láctea se muestra tan calmado. No parece engullir la materia circundante al ritmo que cabría esperar.

Por desgracia, la región resulta demasiado minúscula y distante como para analizarla en detalle (piense en algo así como pintar la *Mona Lisa* sobre la superficie de una chincheta, enviarla a la Luna e intentar después estudiar su sonrisa). Las imágenes de la zona se muestran muy borrosas, lo que dificulta entender por qué allí no se producen los estallidos de energía que deberían generarse cuando un objeto cuatro millones de veces más masivo que el Sol devora el gas que lo rodea. Por todo ello, el acontecimiento ha suscitado una gran expectación entre los astrónomos.

«Cuando un meteorito atraviesa la atmósfera terrestre podemos ver cómo se consume debido al rozamiento. Ahora presenciaremos algo similar: la interacción entre la nube y las otras masas de gas que se precipitan en espiral hacia el agujero negro», explica Eliot Quataert, astrofísico de la Universidad de California en Berkeley. El resultado será una gran llamarada cósmica cuyos datos mantendrán ocupados a los astrónomos durante los próximos años.

Los investigadores esperan también averiguar el origen de la nube. Algunos creen que podría haberse formado por la colisión de dos masas de gas cerca del centro galáctico, un suceso que se habría llevado parte del momento que las mantenía en órbita en torno a la estrella. Otros piensan que tal vez se trate de un sistema estelar errante, joven y tenue, cuyo polvo aún no habría tenido tiempo de formar planetas.

Pero, con independencia del origen de la nube, su destino no deja lugar a dudas: antes o después traspasará el horizonte de sucesos del agujero negro y perecerá. Pero, antes de que eso ocurra, los astrónomos la estudiarán con todo detalle. Stefan Gillessen, uno de los miembros del equipo que la descubrió en 2011, quiere ver en ello un aspecto positivo: «Es desdichada en el sentido de que será destruida, pero afortunada en el sentido de que pronto se hará muy famosa».

—Michael Moyer

DON DIXON



## Nuevos mundos más allá de Plutón

En julio de 2015, la sonda espacial *New Horizons* dejará atrás el mundo más lejano jamás visitado por la NASA: el misterioso Plutón y sus numerosas lunas. Ahora los expertos de la agencia están planeando el futuro de la nave, a la caza de nuevos astros más allá de Plutón a los que la sonda pueda aproximarse.

Plutón es uno de los dos mayores objetos del cinturón de Edgeworth-Kuiper, una región en la que los astrónomos han descubierto unos 1600 cuerpos celestes. La sonda *New Horizons*, sin embargo, no pasará cerca de ninguno de ellos. Dado que lo último que los científicos desean perder es una buena nave espacial, la búsqueda se centra ahora en nuevos objetos más próximos a la trayectoria de la sonda. «Nos alegraría encontrar al menos uno», explica Alex Parker, astrónomo del Centro Smithsonian de Astrofísica de Harvard. «No digamos ya dos.»

A tal fin, los expertos están empleando telescopios en Hawái y Chile. Se comparan las imágenes tomadas a lo largo de varias noches y se identifican aquellos objetos que se mueven. Hasta el momento, el proyecto ha encontrado docenas de pequeños cuerpos celestes, tres de los cuales estarán a una distancia de entre 15 y 30 millones de kilómetros del itinerario que la sonda recorrerá en 2018. Desde esa distancia, la nave puede buscar satélites naturales, los cuales revelan la masa del cuerpo principal en virtud de su respuesta a la atracción gravitatoria. Parker, sin embargo, desea algo más: objetos que la sonda pueda observar desde una distancia de pocos miles de kilómetros.



La sonda *New Horizons*, en 2006.

Por desgracia, los cuerpos celestes de interés se encuentran ahora en una de las peores regiones del cielo: la constelación de Sagitario, cuya línea de visión desde la Tierra apunta al centro de la Vía Láctea. «Resulta muy difícil vislumbrar objetos pequeños sobre un fondo de miles y miles de estrellas», explica Parker. A pesar de todo, y teniendo en cuenta los astros hallados hasta ahora, Parker se muestra optimista y confía en que, tras dejar atrás Plutón, la sonda continúe atareada durante largo tiempo.

—Ken Crowell

### ¿QUÉ ES ESTO?



Las **rémoras** constituyen una familia de ocho especies de peces tropicales que, durante más de un milenio, han inspirado una mitología casi más extraña que esas pequeñas ventosas que poseen. Las rémoras las utilizan para adherirse prácticamente a cualquier cosa, ya sean otros peces, tortugas, submarinistas o barcos, con lo que logran desplazarse sin ningún esfuerzo.

Un grupo de ictiólogos acaba de descubrir de dónde proviene la ventosa de estos peces. En un estudio publicado en el *Journal of Morphology* en diciembre de 2012, describen cómo inyectaron tinte rojo en los huesos de rémoras y otros peces en estado larvario para observar su crecimiento. Durante cierto tiempo, la aleta dorsal y el esqueleto que la soporta parecieron desarrollarse del mismo modo en ambos tipos de peces. Después, los huesos de la aleta dorsal de las rémoras se expandieron y fueron desplazándose hacia la cabeza. Cuando los juveniles habían alcanzado los 30 milímetros de longitud, ya tenían una ventosa perfectamente formada de dos milímetros de diámetro.

—Becky Crew

## ENERGÍA

## Tecnología puntera para aprovechar la luz natural

**A fin de reducir** su consumo energético, la compañía editora del rotativo *The New York Times* decidió hace un tiempo sacar partido del método de iluminación más antiguo que existe: el sol. Sus oficinas centrales, situadas en un rascacielos de 52 plantas, cuentan con enormes ventanales que llegan hasta el techo y con un sistema de sensores electrónicos que regulan la iluminación interior. Según un estudio reciente del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) en el que se analizaban también otros edificios neoyorquinos, la técnica habría permitido a la compañía reducir su consumo eléctrico en un 24 por ciento.

La energía empleada para iluminar, ventilar y aclimatar los edificios urbanos de todo el mundo representa en torno al 40 por ciento de las emisiones globales de dióxido de carbono, el principal responsable del cambio climático. Sin embargo, aunque aprovechar la luz solar pueda parecer una solución obvia para ahorrar energía, ponerla en práctica no resulta tan sencillo.

Entre otras medidas, en un edificio de oficinas como el del *Times* deben instalarse cristales especiales que controlen los reflejos y las sombras, y que bloqueen una parte de la luz solar, a fin de que los empleados puedan trabajar sin molestias en la pantalla del ordenador. También se

necesitan lámparas autorregulables duraderas, económicas y fáciles de mantener, así como todo un sistema informático que las controle. Según el informe del LBNL, equipar con todo ello los 20 pisos de oficinas del *Times* supuso la mayor adquisición directa de tecnología puntera en iluminación de todo EE.UU.

Hace ya 35 años que Stephen Selkowitz, reputado experto del LBNL en técnicas de construcción, comenzó a abogar por un mejor aprovechamiento de la luz solar. Hasta ahora, sin embargo, la tendencia ha sido la opuesta. Selkowitz explica que las lecciones aprendidas en un edificio o una urbe no se han extrapolado a otros inmuebles ni a otras ciudades. El rascacielos del *Times* proporciona un buen ejemplo. La empresa ocupa casi la mitad de los 150.000 metros cuadrados de oficinas del edificio, pero no todos los arrendatarios adoptaron la técnica, cuyo precio de instalación puede ascender a entre 20 y 100 dólares por metro cuadrado de oficina.

Con todo, Selkowitz calcula que la inversión ha permitido a la compañía economizar unos 13.000 dólares en electricidad por año y por planta de oficinas. La empresa necesitó tres años para amortizar el gasto, pero desde entonces ha estado ahorrando dinero.

Ahora, debido a la construcción de nuevos edificios al norte y al oeste, la



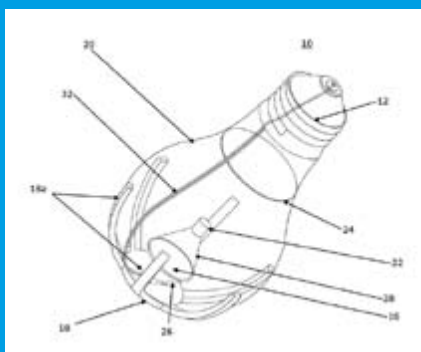
compañía deberá reajustar el sistema informático para evitar el brillo procedente de sus ventanas. Selkowitz reconoce que, aunque parezca fácil, aprovechar de manera eficiente la luz natural no es coser y cantar.

—David Biello

## PATENTES

**Bombillas de estado sólido:** Los diodos emisores de luz (LED) emplean mucha menos energía que las bombillas incandescentes, su vida útil tal vez llegue a superar algún día los diez años y, a diferencia de los fluorescentes compactos, no contienen mercurio. Sin embargo, adolecen de sus propias desventajas. Para prolongar su vida durante tanto tiempo, los LED necesitan permanecer relativamente fríos. Y si desean reemplazar a las bombillas actuales, deberían emitir luz en todas las direcciones. Un buen número de los que se comercializan en la actualidad no lo hacen, sino que radian en una sola dirección, como una linterna.

En la patente número 8.292.468 de la oficina estadounidense, Nadarajah Narendran, profesor y jefe de investigación del Instituto Politécnico Rensselaer, en Nueva York, y sus coinventores han descrito una bombilla LED que soluciona ambos problemas. «El calentamiento constituye uno de los problemas de los LED, ya que puede echar a perder la larga duración del dispositivo», explica Narendran. Algunas bombillas incluyen un disipador térmico de metal en la base o en su parte trasera, pero ello produce sombras y crea un efecto similar al de una linterna.



El dispositivo de Narendran invierte el diseño habitual. La fuente LED y el disipador térmico se sitúan en la parte frontal de la bombilla, donde la exposición al aire es mayor, lo que revierte en una mejor disipación del calor. Además, las paredes interiores de la bombilla reflejan y refractan la luz de tal modo que su iluminación emula a la de una lámpara incandescente. El resultado es una bombilla de larga duración, pero con una estética muy familiar. «El mundo de la iluminación está transformándose. En muchos casos el aspecto no cambiará —seguirá pareciendo una bombilla—, pero el interior será diferente», concluye Narendran.

—Marissa Fessenden



## Un bosque tropical que agoniza

La **Amazonía occidental** se halla amenazada por una situación a la que nunca antes se había enfrentado: la combinación de calentamiento climático y del crecimiento de la población humana. En los últimos años, la región ha sufrido dos de esas sequías que solo suceden «una vez por siglo», una en 2005 y otra en 2010. Tales eventos podrían hacerse más frecuentes a medida que aumentan las temperaturas en el Atlántico Norte y los humanos siguen quemando miles de kilómetros cuadrados de selva para convertirlos en cultivos.

La reducción de la superficie forestal conlleva un descenso en las precipitaciones. «El 50 por ciento de la lluvia que cae en la selva amazónica es generada por la propia selva a través de la transpiración y la evaporación», afirma Gregory Asner, ecóloga tropical del Instituto de Ciencia Carnegie de la Universidad Stanford, que presentó sus resultados preliminares sobre el daño causado por la sequía en la reunión de la Unión Geofísica de EE.UU., celebrada en San Francisco el pasado mes de diciembre. «La deforestación exagera el problema de la sequía, porque elimina ese mecanismo interno.» Desbrozar campos y pastos también deja más expuestos los márgenes del bosque, con lo que su interior se seca y se quema con mayor probabilidad cuando se descontrola un incendio agrícola.

Ante las condiciones más cálidas y secas, las especies pueden aclimatarse y adaptarse... o bien extinguirse. Una especie vegetal puede ampliar su territorio a una región más fría, pero solo a la velocidad que le permite la dispersión de sus semillas, afirma Kenneth Feeley,

biólogo de la Universidad Internacional de Florida que estudia los árboles de la vertiente oriental de los Andes peruanos. Le sorprendieron los cambios de distribución acaecidos en solo unos años. «Las especies están ascendiendo a zonas más altas; lo hacen a razón de unos tres metros en vertical al año, una velocidad muy grande», señala, aunque añade que podría no ser suficiente. Teniendo en cuenta el cambio climático que se está produciendo, necesitarían ascender nueve o diez metros al año. En las tierras bajas, la deforestación reduce las áreas a las que pueden trasladarse las especies, mientras que las carreteras y zonas de pastos constituyen barreras para la dispersión. Perú cuenta con algunas zonas protegidas extensas, pero los científicos ignoran si son lo suficientemente grandes o si se hallan en el lugar adecuado para permitir la migración de las especies ante un clima que cambia con rapidez.

Para ayudar a responder a esa cuestión, Asner vuela en un avión equipado con un sistema de captación de imágenes por láser y un espectrómetro que identifica las señales químicas de las plantas con un 80 por ciento de precisión, lo suficiente como para crear un mapa de diversidad de las especies del dosel arbóreo en la zona occidental de la Amazonía, de Colombia a Bolivia. Ello proporcionará información de partida con la que se podrán realizar comparaciones y determinar variaciones futuras. Por su parte, Asner prevé que observará grandes cambios en la configuración básica de la Amazonía durante su vida. «Tengo 44 años. Si tuviese la suerte de llegar a los 80, podría ser testigo de ello.»

—Barbara Fraser



GREGORY G. DIMIJIAN. PHOTO RESEARCHERS, INC. (left); © MUSEO AMERICANO DE HISTORIA NATURAL DE NUEVA YORK/DENIS FINNIN (exposición)

### CONFERENCIAS

4 de junio

#### Origen y evolución de la humanidad

Francisco J. Ayala, Universidad de California en Irvine  
Fundación Ramón Areces, Madrid  
www.fundacionareces.es

19 de junio

#### La lucha contra el cáncer, nuevos avances: el ejemplo de los biomarcadores en cáncer y de la medicina personalizada

Jaume Reventós, Hospital Vall d'Hebrón  
Ciclo «Desafíos del siglo XXI»  
La voz de la medicina, III»  
Residencia de Investigadores del CSIC  
Barcelona  
www.residencia-investigadors.es

### EXPOSICIONES

#### Microvida. Más allá del ojo humano

Cosmocaixa, Barcelona  
www.obrasocial.lacaixa.es

#### Darwin. El viaje de un naturalista

Producción del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York  
Museo Marítimo de Barcelona  
www.mmb.cat



### OTROS

12 de junio - Debate

#### ¿Qué son y para qué sirven las colecciones de historia natural? Presente y futuro de un patrimonio frágil

Hèctor Botella, Museo de Geología de la Universidad de Valencia  
Jesús Català, Universidad Cardenal Herrera-CEU  
Anna Omedes, Museo de Ciencias Naturales de Barcelona  
Octubre Centro de Cultura Contemporánea Valencia  
www.octubre.cat

Del 9 al 12 de junio

#### XII Congreso nacional de virología

Universidad de Burgos  
cab.inta-csic.es/congresovirologiasev2013

13 de junio – Cafè científico

#### Estrategias de conservación y gestión de la biodiversidad

Santi Mañosa, Universidad de Barcelona  
Bar de Ca l'Estruc, Sabadell  
www.icp.cat

## Cuarenta años de libertad asintótica

La peculiar historia de la teoría de las interacciones fuertes

El 4 de julio de 2012 pasará a los anales de la física por ser el día en que se anunció el descubrimiento de una nueva partícula de propiedades coincidentes con las del esperado bosón de Higgs. Aquella pieza era la última que faltaba para completar el modelo estándar, la teoría con la que los físicos describimos las partículas elementales y sus interacciones. Resulta difícil contener la admiración que despiertan los pioneros que contribuyeron a formularla. Su construcción, sin embargo, no siguió un curso lineal. Repasar los momentos que mediaron entre el desconcierto y la comprensión constituye un ejercicio muy útil, que nos enseña mucho sobre la naturaleza del descubrimiento científico y sobre la siempre cambiante sociología del colectivo de investigadores.

Este mes nos brinda la ocasión para recorrer ese camino, ya que en él se cumplen 40 años de la publicación de dos artículos que marcaron un hito en la construcción del modelo estándar. Ambos aparecieron de forma contigua en el número de *Physical Review Letters* del 25 de junio de 1973. Uno de ellos estaba firmado por David J. Gross y Frank Wilczek, por aquella época en la Universidad de Princeton; el otro, por H. David Politzer, por entonces en Harvard. En 2004, los tres investigadores recibieron el premio Nobel por la aportación que aquellos trabajos hicieron a uno de los pilares de nuestro modelo actual de la naturaleza: la teoría de las interacciones fuertes.

### El vacío como un medio

Hacia los años cincuenta del siglo xx la física de partículas había comenzado a desgajarse de la física nuclear. Se aceptaba que ciertas partículas elementales representaban los constituyentes últimos de la materia y que, en última instancia, todos los fenómenos de la naturaleza se debían a las cuatro interacciones que mediaban entre ellas: la gravitación, el electromagnetismo, las interacciones débiles y las interacciones fuertes.

Fue también en aquella década cuando se culminó el primer eslabón del modelo estándar: la electrodinámica cuántica, o QED, por sus siglas en inglés. Según

su versión clásica, formulada en el siglo xix por James Clerk Maxwell y Hendrik A. Lorentz, las partículas dotadas de carga eléctrica se atraían o repelían por acción de un vehículo llamado campo electromagnético. Este se propagaba por el espacio, de forma análoga a como las ondas acústicas lo hacen en un medio. En el caso de las ondas electromagnéticas, el equivalente a dicho medio recibió el nombre de éter. Con la llegada de la QED el concepto de éter fue sustituido por el de *vacío*; pero, en numerosos aspectos, su similitud con un medio material continúa vigente.

En la nueva teoría cuántica la distinción entre partícula y campo desaparece. Las partículas se conciben como estados físicos del campo. Y, del mismo modo que los fotones corresponden a estados excitados del campo electromagnético, el resto de las especies de partículas, como los electrones, poseen también su propio campo asociado.

La teoría predecía nuevos fenómenos que pronto fueron confirmados por los experimentos. Aunque realizar cálculos en QED no era tarea sencilla, resultaba posible gracias al pequeño valor de la intensidad de la interacción. Como muestra de ello, valga mencionar que la contribución electromagnética a la masa de un átomo es minúscula: unas 37.000 veces menor que la energía en reposo del electrón.

La QED predice la posibilidad de crear pares de partículas (electrones y positrones) desde el vacío; tantas como permita el principio de conservación de la energía. Esta propiedad nos lleva a imaginar el vacío como un gran recipiente de partículas y a establecer ciertas analogías con algunos medios materiales, como los dieléctricos.

Como toda sustancia ordinaria, dichos materiales constan de un gran número de protones y electrones, si bien en conjunto son eléctricamente neutros. Las cargas que componen un dieléctrico poseen cierta libertad de movimiento, por lo que, al incorporar un electrón en el seno del material, este tiende a atraer hacia sí densidades de carga positiva. Como resultado, a partir de cierta distancia, la

carga del electrón añadido parece menor de lo que realmente es. Decimos entonces que el medio se polariza y apantalla dicha carga.

En el vacío de la QED ocurre un fenómeno muy similar, denominado polarización del vacío. No obstante, existe una diferencia fundamental con el caso de los dieléctricos: el vacío cuántico se comporta como un depósito inagotable de partículas. Por tanto, dado que la carga del electrón que medimos en el laboratorio resulta finita, su «verdadero» valor debería ser infinito.

Ese resultado condujo a algunos de los físicos más brillantes de la época, como Lev D. Landau, a concluir que, a pesar de su excelente acuerdo con los experimentos, la QED debía ser errónea. Para la mayoría de los físicos, sin embargo, lo más importante era que, a la escala de distancias que los experimentos eran capaces de resolver, la teoría permitía calcular resultados correctos gracias a la pequeña intensidad de la interacción.

### Cristales y quarks

Pero ¿qué ocurría con la interacción fuerte, la responsable de mantener unido el núcleo atómico? Todos los intentos de seguir un guion parecido al de la QED habían fracasado. Tanto fue así que, durante los años sesenta y principios de los setenta, se llegó a dudar de que existiera un campo cuántico asociado a las interacciones fuertes. Al igual que hoy, la mayoría de los experimentos consistían en hacer colisionar partículas a grandes velocidades. Pero, lejos de revelar los constituyentes últimos del protón, estos no hacían sino producir más y más partículas nuevas de vida efímera.

Además de la carga eléctrica habitual, dichas partículas poseían otros tipos de cargas conservadas. Pero estas no aparecían de forma independiente: si se las representaba en un plano, conformaban un patrón similar a una pequeña red cristalina. Y, al igual que ocurre con cualquier cristal, todos los puntos de esa red podían obtenerse a partir de las combinaciones de unos pocos vectores básicos.

Así aparecieron los quarks. Estos fueron propuestos en 1964 por Murray



Gell-Mann y George Zweig como los hipotéticos portadores de las cargas asociadas a dichos vectores básicos. Las cargas del protón y el neutrón, por ejemplo, se obtenían al sumar tres de esos vectores. Curiosamente, unos diez años antes Chen N. Yang y Robert Mills habían formulado una teoría de campos similar a la QED para ese tipo de cargas (en jerga técnica, una teoría gauge no abeliana), pero su intento de aplicarla a las interacciones fuertes no tuvo mucho éxito.

A finales de los años sesenta se llevaron a cabo nuevos experimentos en el acelerador de Stanford en los que se hacían chocar electrones contra protones. Una manera sencilla de interpretar los resultados era suponer que en el interior del protón había ciertos constituyentes que interactuaban con los electrones de forma puramente electromagnética. Estos recibieron el nombre de partones. Su existencia planteaba numerosas paradojas. ¿Guardaban alguna relación con los quarks? Y, si no se hallaban sometidos a la interacción fuerte, ¿por qué no escapaban del protón? ¿Cómo era posible que una partícula que sí experimentaba la interacción fuerte estuviese formada por otras que no lo hacían?

A la resolución de esos dilemas contribuyeron de manera fundamental los artículos cuyo cuadragésimo aniversario celebramos este mes. Los trabajos de Gross, Wilczek y Politzer demostraban que, a diferencia de lo que ocurre en QED, existe una clase de teorías en las que la intensidad de la interacción aumenta con la distancia. Dicha propiedad recibió el nombre de libertad asintótica porque, a distancias infinitamente pequeñas, las partículas no experimentan fuerza alguna y se comportan como partículas libres.

Si las interacciones fuertes pertenecían a esa familia, podía entenderse por qué, a las pequeñas longitudes exploradas por el electrón, los partones (que, en efecto, no eran otros que los quarks) parecían no experimentar fuerza alguna. En cambio, a escalas mayores, como las correspondientes al tamaño del protón, la intensidad aumentaría y las interacciones fuertes harían honor a su nombre.

Para hacernos una imagen intuitiva del fenómeno, podemos imaginar que

los tres quarks que forman un protón se encuentran unidos por un muelle o cuerda elástica. Cuando dos de ellos se encuentran muy próximos, no notarán su tensión. Pero cuando un quark se intenta separar de sus compañeros, la goma se tensa y la fuerza incrementa su magnitud. Ello explica también por qué los quarks no pueden extraerse del protón. Lo máximo que conseguiremos —si disponemos de la energía suficiente— será «romper la cuerda». Pero esto solo producirá dos nuevos quarks en los extremos rotos.



**Un principio para unirlos a todos:** Este mes se cumple el aniversario del descubrimiento de la libertad asintótica. El hallazgo resultó clave para entender la fuerza que mantiene ligados a los quarks en el interior del protón.

Liberarlos resulta tan imposible como separar el polo norte y el polo sur de un imán: al seccionarlo solo obtenemos dos nuevos imanes, cada uno con sus respectivos polos norte y sur.

Con anterioridad a los trabajos de Gross, Wilczek y Politzer las teorías asintóticamente libres suscitaban todo tipo de dudas. Algunos investigadores creían que no podían existir teorías razonables con dicha propiedad. Tanto en electrodinámica cuántica como en las demás teorías conocidas, la carga efectiva siempre decrecía con la distancia, al igual que en

los materiales dieléctricos. ¿Cómo podía tener lugar una *anti*apantallamiento de la carga? Pocos repararon en que, en algunas sustancias (los materiales paramagnéticos), los efectos del medio tienden a reforzar la intensidad del campo, en vez de reducirla.

### Juntar las piezas

En 1972 se celebró una conferencia en Marsella, organizada por mi antiguo colaborador Chris Korthals Altes. En ella, el físico Kurt Symanzik se preguntó durante su charla si las teorías propuestas años atrás por Yang y Mills podrían ser asintóticamente libres. Animado por Chris, un joven investigador holandés y futuro premio nóbel, Gerard 't Hooft, se levantó y replicó que sí. Ni Symanzik ni 't Hooft sabían que, poco antes, el físico soviético Iosif B. Jriplóvich había obtenido el mismo resultado.

Pese a que todas las piezas estaban disponibles, faltaba un trabajo científico que las ensamblara. Presumiblemente, porque los pocos investigadores que sabían que las teorías de Yang y Mills eran asintóticamente libres no eran conscientes de sus implicaciones para interpretar los experimentos de Stanford.

El descubrimiento, pues, cruzó el charco. Finalmente, fueron tres investigadores estadounidenses procedentes de dos instituciones rivales quienes lo publicaron en los trabajos que conmemoramos hoy.

Cabe preguntarse cómo, después de tanto tiempo, un hallazgo de tal calibre pudo producirse de forma casi simultánea. El lector puede consultar la extensa bibliografía sobre los prolegómenos del descubrimiento, entre la que destacan los discursos pronunciados por los propios autores en la ceremonia de entrega del Nobel (disponibles en [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org)). En todo caso, ambos trabajos se complementaban a la perfección: mientras que el de Politzer abundaba más en los detalles del cálculo, el de Gross y Wilczek se centraba en las consecuencias para la teoría de las interacciones fuertes.

Después los acontecimientos se precipitaron y, en muy poco tiempo, se llegó a la formulación moderna de la teoría de las interacciones fuertes, conocida como

cromodinámica cuántica. Esta incluye quarks y campos de Yang-Mills, cuyas correspondientes partículas llamamos gluones. Las cargas vectoriales no son las que en un principio consideraron Yang y Mills, sino otras que denominamos cargas «de color». Tanto ese nombre (que no guarda ninguna relación con los colores de la luz) como la teoría de Yang-Mills basada en tales cargas ya habían aparecido en algunas publicaciones previas a los trabajos de Politzer, Gross y Wilczek. La aceptación generalizada no se demostró mucho más; a ella contribuyó en gran parte la «revolución de noviembre» de

1974, asociada al descubrimiento de un nuevo tipo de quark.

El cálculo de las predicciones de la nueva teoría se vio facilitado por las técnicas concebidas en 1971 por 't Hooft y su entonces director de tesis, el también premio nóbel Martinus Veltman, *Tini*, quien años más tarde se convertiría en profesor a tiempo parcial de nuestro departamento de la Universidad Autónoma de Madrid. Los sucesivos resultados de la teoría fueron corroborados a la perfección por los experimentos de los aceleradores; una vivencia que tuve la suerte de experimentar en primera persona.

A medida que los datos y nuestra capacidad de cálculo han ido ampliándose, los éxitos de la cromodinámica cuántica se han mostrado apabullantes. Resulta muy difícil señalar a un investigador como padre único o principal de la teoría. Lo mismo cabe decir sobre el momento exacto en que se produjo su descubrimiento. No obstante, los artículos que hoy conmemoramos bien pueden considerarse el hito principal en dicha historia.

—Antonio González-Arroyo  
Instituto de Física Teórica UAM/CSIC  
Universidad Autónoma de Madrid

CIENCIA CIUDADANA

## Ornitología participativa

Una modesta tentativa de enrolar en un proyecto de investigación a observadores de aves aficionados ha generado una riada de datos y contribuye a replantear las normas de la actividad científica

**T**ras los ventanales de la oficina de Steve Kelling, en casi 60 hectáreas de bosque, 50 especies de pájaros (vireos gorjeadores, piquigruños, ampelis americanos), casi todas paseriformes, han ido llegando de un día para otro. Estamos a comienzos de mayo, empieza a caer la tarde, y sus trinos y llamadas resuenan clamorosas por todo el bosque. Una colosal cacofonía. Es un milagro que en el laboratorio de ornitología de la Universidad Cornell, en Ithaca, N.Y., Kelling, o cualquier otra persona, logre concentrarse en su trabajo.

Su trabajo, desde luego, está al otro lado del ventanal. Kelling activa en su portátil una animación: un mapa de EE.UU. perfilado en blanco sobre fondo negro. Al pie del mismo, una barra va señalando el paso del tiempo, un año en total. Al principio nada ocurre. Súbitamente, hacia abril, aparece en California del Sur un fogonazo anaranjado, que se expande como un incendio hacia el norte y el este, hasta que todo el tercio occidental estadounidense está como en llamas, destellando y fluctuando en varios matices de blanco y naranja. Después, el fenómeno se invierte: el color se va esfumando de norte a sur, hasta que, hacia noviembre, todo el mapa queda otra vez oscuro. Acabamos de observar la migración anual y la estancia de la tangara (*Piranga ludoviciana*).

Se dispone ya de mapas migratorios para más de 300 especies, generados a partir de datos recopilados por eBird, un proyecto de ciencia ciudadana nacido

hace diez años, que Kelling, en calidad de director de información científica del laboratorio, supervisa. El proyecto tiene en México una versión en español, aVer-Aves, creado en colaboración con la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Hace poco, a lo largo de un mes, unos 11.000 ornito-aficionados subieron más de tres millones de avistamientos a la base de datos de eBird, que supera ya los 110 millones de registros. En esta empresa han participado en total unas 90.000 personas, y el número de registros aumenta cada año en torno a un 40 por ciento.

Los observadores de aves son famosos por lo compulsivo de su dedicación y la meticulosidad con que registran sus avistamientos. Sin embargo, hasta hace poco, la compartición de sus datos ha venido siendo más bien azarosa y, en gran medida, sin relación con los trabajos de los científicos. La situación está cambiando. Kelling y sus colegas se cuentan entre los precursores en la nueva «ciencia participativa» o «ciencia ciudadana». Los medios técnicos (Wi-Fi, teléfonos inteligentes, capacidad de procesamiento) han revolucionado lo que la ciencia puede hacer con los datos suministrados por profanos; gracias a tales medios, se está reclutando un ejército de aficionados ansiosos de tomar parte en la investigación auténtica.

No son los ornitólogos los únicos en beneficiarse de este fenómeno. Científicos de campos tan diversos como la ecología, la antropología o la sanidad pública han

empezado a explotar esta vía de comunicación que la tecnología les ha abierto, y a conectar con personas dispuestas a colaborar por el mero gozo de hacerlo, o por el fruto de los resultados. Los hallazgos de eBird ponen de relieve cuán valiosa puede resultar la participación pública en un campo de investigación concreto.

El gran alcance que puede lograr esta forma de trabajar señala un cambio en la consideración que científicos y público general otorgan a la empresa que llamamos ciencia. Está plasmándose una nueva era de ciencia ciudadana, justo cuando la sociedad va a necesitarla más, por tener ante sí problemas que, como el cambio climático, requieren tanto un gran acopio de datos como la implicación activa de la población.

### De vuelta a las raíces

A Steven Mlodinow, médico de familia en Longmont, Colorado, y ávido observador de aves, la participación en eBird le hace sentirse un poco como un Linneo moderno, el naturalista sueco del siglo xvii tenido por padre de la taxonomía moderna. «Si se mira el pasado —opina Mlodinow—, todos los naturalistas fueron personas sin formación específica previa, y la ciencia avanzó, sobre todo, gracias a individuos autodidactas o con escasa formación universitaria.»

Los aficionados siempre han tenido un lugar en la ciencia. Thomas Jefferson recopiló datos meteorológicos durante 50 años; Henry David Thoreau registró