

LA EDAD OSCURA DEL UNIVERSO • VIRUS PARA MOVILES

INVESTIGACION *y* CIENCIA

30
años aniversario

Edición española de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

NEURONAS ESPEJO Y AUTISMO

RECUPERACION
DE ZONAS MUERTAS

VER CON SUPERCONDUCTORES

SISTEMAS
CUASIBIDIMENSIONALES

EL ORIGEN
DE LAS CONSTELACIONES
GRIEGAS

SISTEMAS PLANETARIOS
EXTRASOLARES



ENERO 2007
6,00 EUROS

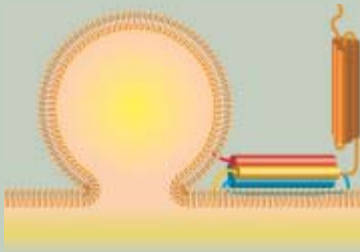
3 HACE...

50, 100 y 150 años.

4 APUNTES

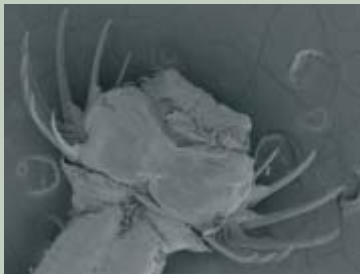
30 CIENCIA Y SOCIEDAD

Proteínas SNARE...
La dinámica de la Bolsa.



34 DE CERCA

Saetas de mar.



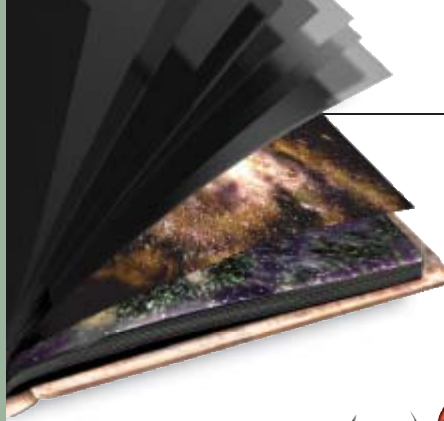
36 DESARROLLO SOSTENIBLE

Estados de bienestar,
más allá de la ideología,
por Jeffrey D. Sachs

La edad oscura del universo

Abraham Loeb

Faltan hojas del álbum de imágenes del universo primigenio. Los astrónomos se afanan en encontrarlas.



38 Virus para móviles

Mikko Hypponen

Los virus informáticos se propagan ahora por radio. Infechan a teléfonos móviles en todo el mundo. Las empresas de seguridad informática, las operadoras de telefonía móvil y los fabricantes de equipos se aprestan a erradicar estas amenazas antes de que campen sin control.



Recuperación de zonas muertas

Laurence Mee

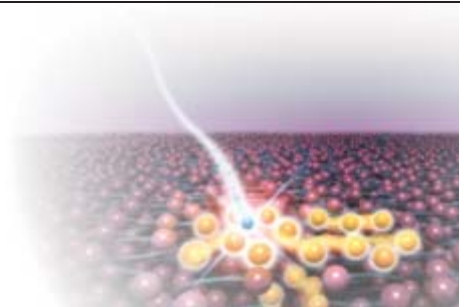


¿Cómo podemos restaurar los mares costeros devastados por el crecimiento incontrolable de algas y plantas que provoca la actividad humana?

54 Ver con superconductores

Kent D. Irwin

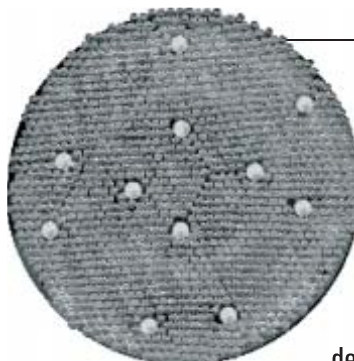
Con material superconductor se construyen minúsculos y magníficos sensores de fotones y otras partículas. Están revolucionando la investigación y la técnica.



62 Sistemas cuasibidimensionales

Jordi Ignés Mullo

La agregación de la materia en un número restringido de dimensiones impide la existencia de orden cristalino. En cambio, favorece la aparición de estructuras con un orden parcial. Podrían resultar muy útiles para la fabricación de nanodispositivos.



14

Neuronas espejo

Giacomo Rizzolatti, Leonardo Fogassi y Vittorio Gallese

Un tipo especial de células cerebrales reflejan el mundo exterior. Vehiculan nuestra capacidad de imitar, aprender y comprender las acciones e intenciones ajenas.

22

Espejos rotos: una teoría del autismo

Vilayanur S. Ramachandran y Lindsay M. Oberman

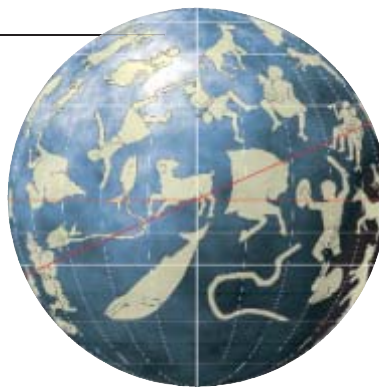
Los estudios del sistema neuronal especular podrían ayudar a determinar las causas del autismo. Con ello facilitarían el desarrollo de nuevas vías de su diagnóstico y tratamiento.

72

El origen de las constelaciones griegas

Bradley E. Schaefer

Astronomía y arqueología, coordinadas, han descifrado el origen de las figuras de estrellas y establecido su uso por distintas culturas a través de los tiempos.

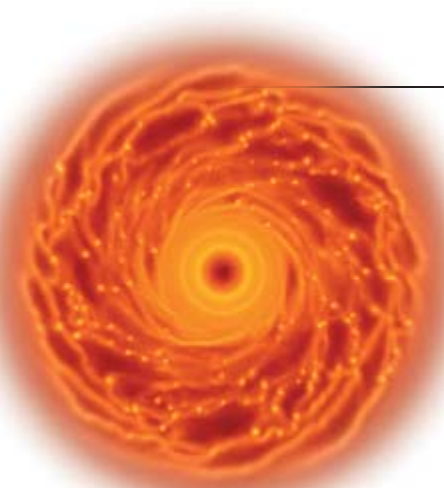


78

Sistemas planetarios extrasolares

Gregory P. Laughlin

Gracias a la observación de estos mundos lejanos vamos conociendo mejor la formación y evolución de los sistemas planetarios.



37

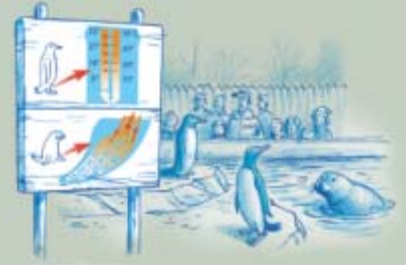
FORUM

La evolución de la prosperidad futura, por Stuart A. Kauffman

88

CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

El calor que vino del frío, por Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik



90

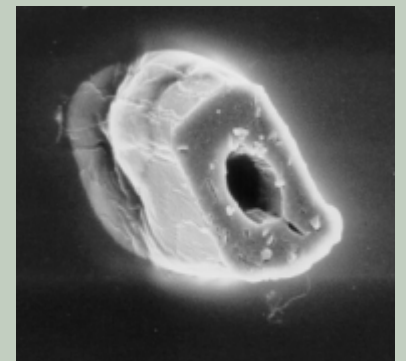
JUEGOS MATEMÁTICOS

Los logaritmos de Briggs, por Juan M.R. Parrondo

92

IDEAS APLICADAS

Reciclado de papel, por Mark Fischetti



94

LIBROS

Historia de la anatomía Óptica medieval.



INVESTIGACION CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.^a Valderas Gallardo

DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella

EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez

Laia Torres Casas

PRODUCCIÓN M.^a Cruz Iglesias Capón

Albert Marín Garau

SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez

ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia

SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado

Olga Blanco Romero

EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.^a

08021 Barcelona (España)

Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413

www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie

EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina

MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting

NEWS EDITOR Philip M. Yam

SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix

SENIOR EDITOR Michelle Press

SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs

EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley,

Graham P. Collins, Steve Mirsky,

George Musser y Christine Soares

PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

GENERAL MANAGER Michael Florek

VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL

Dean Sanderson

PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER

Gretchen G. Teichgraber

CHAIRMAN Brian Napack

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.

Pol. Ind. Polvoranca

Trigo, 39, Edif. 2

28914 Leganés (Madrid)

Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.

Muntaner, 339 pral. 1.^a

08021 Barcelona

PUBLICIDAD

QUERALTO COMUNICACION

Julián Queraltó

Sant Antoni M.^a Claret, 281 4.º 3.^a

08041 Barcelona

Tel. y fax 933 524 532

Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.^a Rosa Zapatero: *La edad oscura del universo y Sistemas planetarios extrasolares*; Luis Bou: *Virus para móviles*; Joandomènec Ros: *Recuperación de zonas muertas*; Ramón Pascual: *Ver con superconductores*; I. Nadal: *El origen de las constelaciones griegas*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes, Curiosidades de la física e Ideas aplicadas*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*



Portada: Richard Marchand

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.^a
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión
controlada

Copyright © 2006 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 2007 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.^a 08021 Barcelona (España)

Reservados todos los derechos. Prohibida la reproducción en todo o en parte por ningún medio mecánico, fotográfico o electrónico, así como cualquier clase de copia, reproducción, registro o transmisión para uso público o privado, sin la previa autorización escrita del editor de la revista. El nombre y la marca comercial SCIENTIFIC AMERICAN, así como el logotipo correspondiente, son propiedad exclusiva de Scientific American, Inc., con cuya licencia se utilizan aquí.

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

...cincuenta años

ABURRIMIENTO. «En esta época de semiautomatismos, en que no sólo el personal militar sino también muchos trabajadores fabriles tienen poco en que ocuparse salvo mantenerse atentos a sus máquinas, se agudiza el problema de la conducta humana en situaciones de monotonía. En 1951, el psicólogo de la Universidad de McGill Donald O. Hebb obtuvo una beca del Comité canadiense de Investigación para la Defensa para realizar un estudio sistemático. La exposición prolongada a un entorno monótono produce sin lugar a dudas efectos nocivos. La persona muestra defectos de raciocinio; exhibe reacciones emocionales pueriles; su percepción visual se perturba; padece alucinaciones; cambia el trazado de sus ondas cerebrales.»

ANSIEDAD. «En el último año y medio, la venta con receta de meprobamato, fármaco tranquilizante más conocido como Miltown y Equanil, ha subido hasta la cifra de 32,5 millones de dólares anuales. Se han vendido más de mil millones de píldoras; la producción mensual de 50 millones de toneladas no cubre la demanda. Algunos farmacéuticos de California anuncian en el escaparate cada nueva remesa con banderines de colores que rezan '¡Sí, hoy tenemos Miltown!'»

...cien años

AUTO CHIC. «Al mejor aspecto de los coches de este año contribuye en gran medida el considerable aumento de la distancia entre ejes que, en el caso de algunas de las máquinas más pesadas, supera ya los tres metros. Además, el motor de seis cilindros ha traído consigo el aumento de la longitud del capó, lo cual contribuye también al aspecto general atrevido y elegante de las máquinas más modernas. Prestando una juiciosa atención a esos detalles, incluso los fabricantes de modelos menos potentes y más baratos han conseguido dotar a sus productos de un estilo del que carecían por completo los modelos anteriores.»

VUELO DEPORTIVO Y VUELO MILITAR. «Siendo ya un hecho consumado el vuelo del avión mecánico, podemos observar ahora que el interés se desvía desde el globo dirigible hacia el aeroplano.

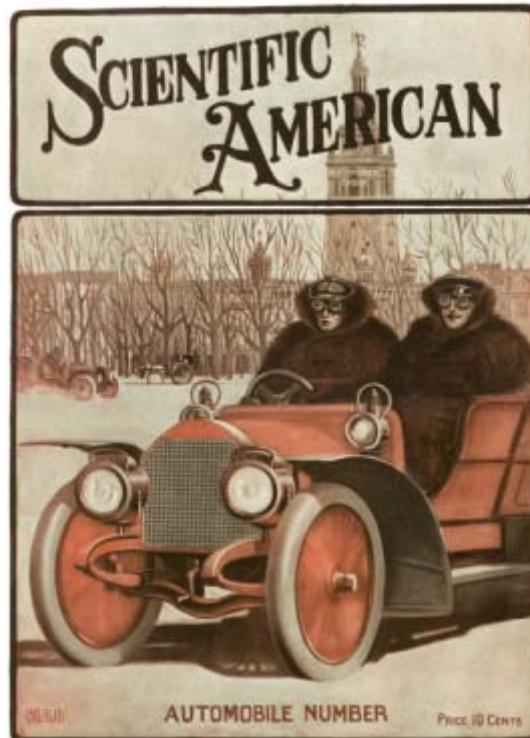
Su campo de aplicación se encontrará principalmente en los ejércitos, donde resultará inestimable para misiones de reconocimiento y para el envío de despachos rápidos. Con toda probabilidad, el principal desarrollo lo tendrá en el ámbito del deporte, donde podría disfrutar de una popularidad igual a la del automóvil.»

DINERO TÉ. «El monetario es el más raro y curioso de los usos que en Oriente se ha dado al té en tabletas (hojas de té comprimidas en forma de bloque). Circula aún como medio de intercambio en las ciudades chinas más interiores y en los mercados y bazares de Asia central. Entre la ciudad mongola de Urga y la siberiana Kiatka, circula dinero por valor de medio millón de taeles (unos 600.000 dólares). En la última ese dinero deja de emplearse para entrar en el intercambio de tabletas de té habitual en Siberia y Rusia, donde el ejército ruso, los topógrafos, las compañías teatrales ambulantes y los turistas en general lo practican de forma rutinaria.»

...ciento cincuenta años

LA REALIDAD COMO TEATRO. «La tormenta de la tarde del día 13 del mes pasado supuso una dura prueba para la resistencia del puente colgante sobre las cataratas del Niágara, cuando los cobradores del peaje abandonaron sus puestos en ambas entradas y se agolpó una multitud para verlo desplomarse; sin embargo, resistió como una roca.»

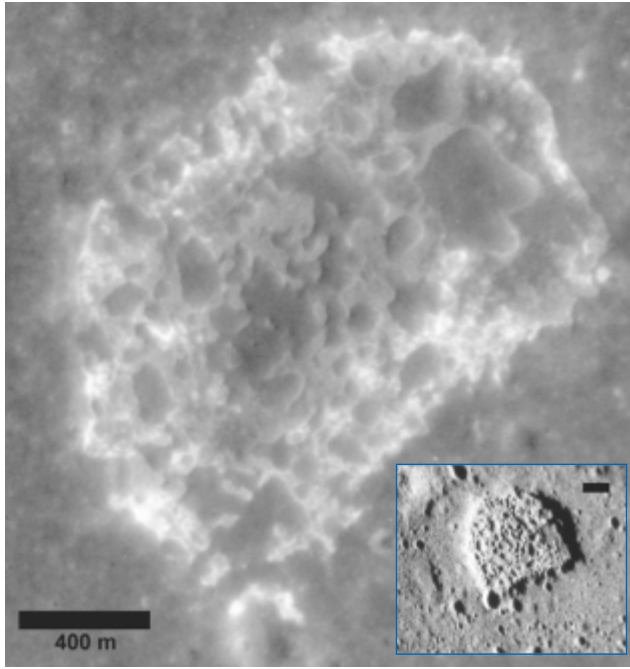
LOS RELATOS DEL DOCTOR LIVINGSTONE. «El afamado viajero doctor Livingstone ha estado dando conferencias desde su regreso a Inglaterra. Durante su inaudita marcha, solo entre salvajes, para quienes una cara blanca era como un milagro, el doctor Livingstone se vio obligado a luchar contra penalidades indescriptibles. Venció la hostilidad de los nativos gracias a su profundo conocimiento del carácter de los mismos y de la lengua bechuana, que está emparentada con la de aquéllos. Vadeó ríos a pie; durmió en las esponjas y lodos de las ciénagas, a menudo tan empapado que se veía obligado a usar la axila a modo de bolsillo para el reloj. Abundaban los leones, adorados por muchas tribus como receptáculos del alma difunta de sus jefes; pero opina que el miedo a los animales salvajes africanos es mayor en Inglaterra que en África.»



Lo último en automóviles, enero 1907

ASTRONOMIA

Gas lunar



La reputación de la Luna de cuerpo frío y quieto pudiera resultar innecesaria. Un nuevo examen de las fotografías tomadas por el Apolo 15 ha puesto de manifiesto, en la formación Ina, elementos del relieve cuya nitidez revela juventud. La escasez de cráteres por impacto de asteroides en el suelo de la estructura nos indica que su edad no supera los 10 millones de años. Los datos espectrales tomados por satélites muestran unas bandas de reflexión minerales en uno de los cráteres de Ina. Con el tiempo se habrían apagado. Parece que, entre hace uno y diez millones de años, se produjo una liberación de gases que expulsó el polvo de la superficie y dejó al descubierto las características juveniles de la formación. Peter Schultz, de la Universidad de Brown, autor del estudio, sostiene que aun cuando haya cesado la actividad volcánica en el astro, sus subproductos continúan llegando a la superficie.

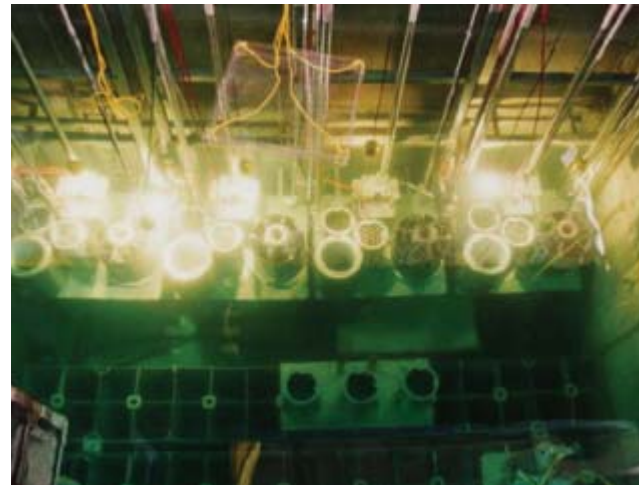
—Nikhil Swaminatham

Ina, estructura de la superficie lunar en forma de D, presenta pocos impactos: debió de remodelarla la actividad volcánica. Las zonas claras son farallones y cascote. Con luz rasante se manifiesta la depresión de Ina (*recuadro*)

ARMAMENTO

El ensayo fallido de Corea del Norte

En cuanto Corea del Norte anunció que había efectuado un ensayo nuclear, los expertos percibieron que la explosión había sido mucho menor de lo esperado. En una primera prueba suelen detonarse bombas de entre cinco y veinticinco kilotonnes. (Corea, al parecer, había dicho a China que la suya sería de cuatro kilotonnes; veinte fueron los de la primera bomba nuclear de la historia.) Según los cálculos realizados a posteriori, habría explotado sólo un artefacto de medio kilotón. De lo que no cabe duda es de su carácter nuclear. Las muestras de aire recogidas dos días después contenían isótopos radiactivos de xenón. Por esos y otros indicios, se supone que la primera bomba atómica coreana fracasó. Debaten los expertos sobre el material fisible empleado. A tenor de las muestras de aire, debió de ser plutonio, un elemento que Corea del Norte lo posee en abundancia. No consta que haya enriquecido uranio en la medida necesaria para un arma. El plutonio ha de estar rodeado por una combinación de explosivos lentos y rápidos. A ese recubrimiento ha de dársele una forma muy precisa para que genere una onda de choque perfectamente esférica que comprima el plutonio hasta duplicar su densidad, al menos, o incluso quintuplicarla. Tal condición se requiere para que una masa subcrítica de plutonio se convierta en supercrítica (es decir, capaz de sustentar una reacción en cadena). Las desviaciones de la simetría deformarán la carga y el adensamiento será menos eficaz. Puede fallar también el iniciador, un emisor de neutrones que cebe la reacción en cadena y que ha de

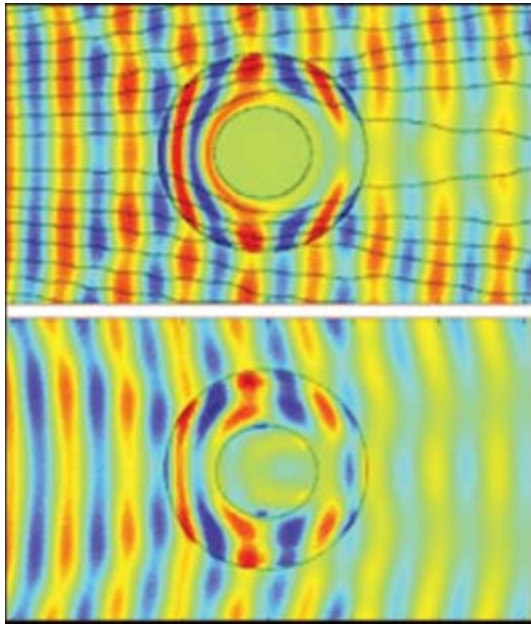


Las barras de combustible agotadas del reactor de Yongbyon debieron de ser la fuente del plutonio 239 para la explosión nuclear ensayada por Corea del Norte el 9 de octubre de 2006

actuar en el momento preciso. Si, además, el plutonio contiene una proporción excesiva del isótopo 240, que emite muchos más neutrones por segundo que el 239, la sobreabundancia de neutrones producirá una predetonación, que no desarrollará toda la capacidad destructiva de la bomba.

—Graham P. Collins

DE "LUNAR ACTIVITY FROM RECENT GAS RELEASE," POR PETER H. SCHULTZ ET AL., EN NATURE, VOL. 444, 9 DE NOVIEMBRE DE 2006 (*Superficie lunar*). ;SYONHAP/AP PHOTO (*reactor*)



FISICA

Invisible

A los pocos meses de demostrar la viabilidad teórica de la idea, David Schurig y David Smith, de la Universidad Duke, han construido un rudimentario sistema invisibilizador. Se trata de unos anillos concéntricos hechos con un material compuesto. Creado con metal y alambre inmerso en fibra de vidrio se configura de suerte tal, que imparte a la luz propiedades insólitas. Los anillos curvan la radiación de microondas en torno al anillo más interno, como el agua que fluye en torno a una piedra. El anillo central absorbe y refleja las microondas en menor cuantía que lo haría en condiciones normales. Se reducen la reflexión y la sombra generadas por el objeto (en microondas, no en otras frecuencias). Esa doble reducción es la característica esencial de un revestido invisibilizador. Lograrlo ha resultado más sencillo de lo previsto, pero de ahí a una verdadera capacidad de volver invisibles los objetos hay un muy largo trecho.

—J. R. Minkel

Desaparición: Un revestimiento en forma de anillo absorbe las microondas directas (azul), produce unas reflexiones débiles (rojo) y crea unas sombras mínimas

SENTIDOS

Receptores del dolor

En el veneno de araña se han identificado tres moléculas que podrían servirnos para sondear el comportamiento de los receptores de las neuronas sensoriales en la generación de dolor. Tras inyectar las toxinas purificadas en las extremidades de ratones, se les hincharon las patas y los animales reaccionaron con contracciones y lamiéndolas. Pero, según el estudio publicado en *Nature*, los ratones transgénicos, que no expresaban los receptores, se mostraron indiferentes a la administración de la toxina. Los péptidos aislados de ciertas tarántulas estimulan el mismo receptor que la capsaicina, el componente que hace picantes a los chiles. Pero, a diferencia de la capsaicina, las toxinas de la tarántula estimulan la zona externa de las neuronas sensoriales; valdrían para estudiar las neuronas sin destruirlas.

—Alison Snyder

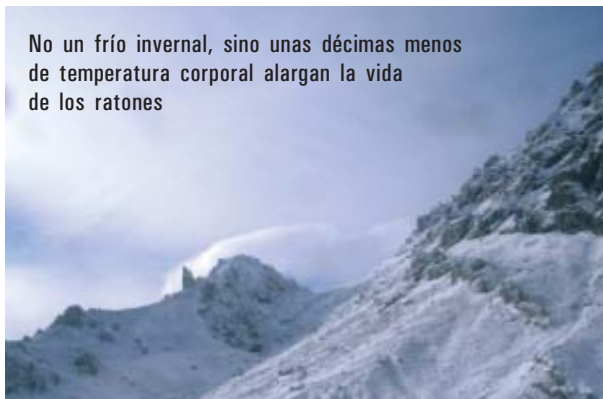


El veneno de las tarántulas y la sustancia que hace picantes a los chiles estimulan los mismos receptores en las neuronas sensoriales

BIOLOGIA

Fría perduración

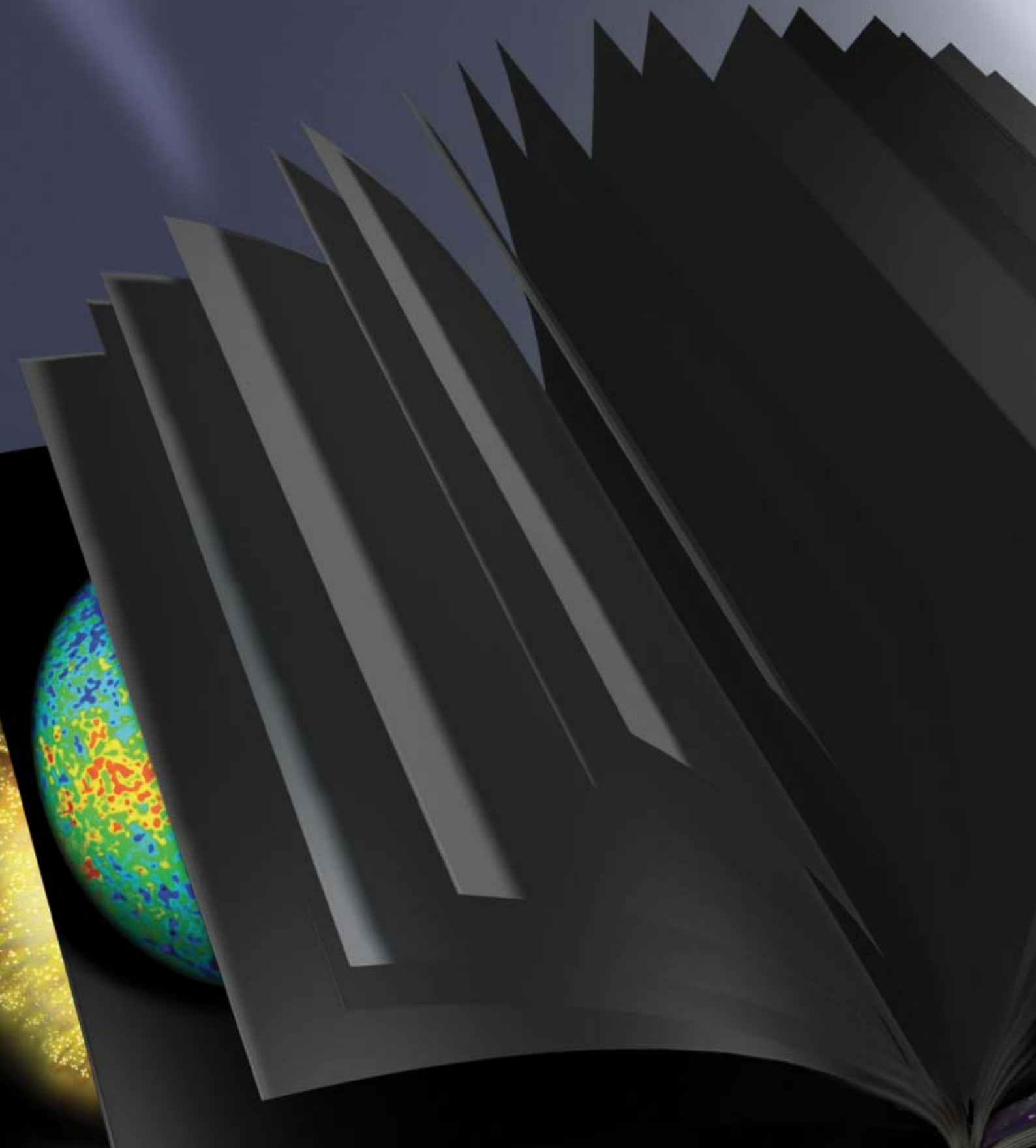
No un frío invernal, sino unas décimas menos de temperatura corporal alargan la vida de los ratones



Los animales de sangre caliente sometidos a una dieta baja en calorías viven más tiempo, pero también pasan más frío. Basta con rebajar la temperatura corporal de los ratones para alargar su vida. Se ha engañado a los cerebros de ratones transgénicos para que percibiesen una temperatura ambiente excesiva y redujeran su temperatura corporal unas fracciones de grado. Podían entonces consumir cuanto les apeteciera. Los fríos ratones transgénicos vivieron unos tres meses más que los individuos control, una prolongación del orden de un tercio de la aportada por las dietas bajas en calorías. Algunas empresas de biotecnología se han interesado por el desarrollo de un dispositivo inductor de pequeño tamaño que pudiera instalarse en los cerebros de las personas y gobernase la zona neuronal que regula la temperatura del cuerpo.

—Nikhil Swaminatham

LA EDAD OSCURA



del universo

Faltan hojas del álbum de imágenes del universo primigenio.
Los astrónomos se afanan en encontrarlas

Abraham Loeb

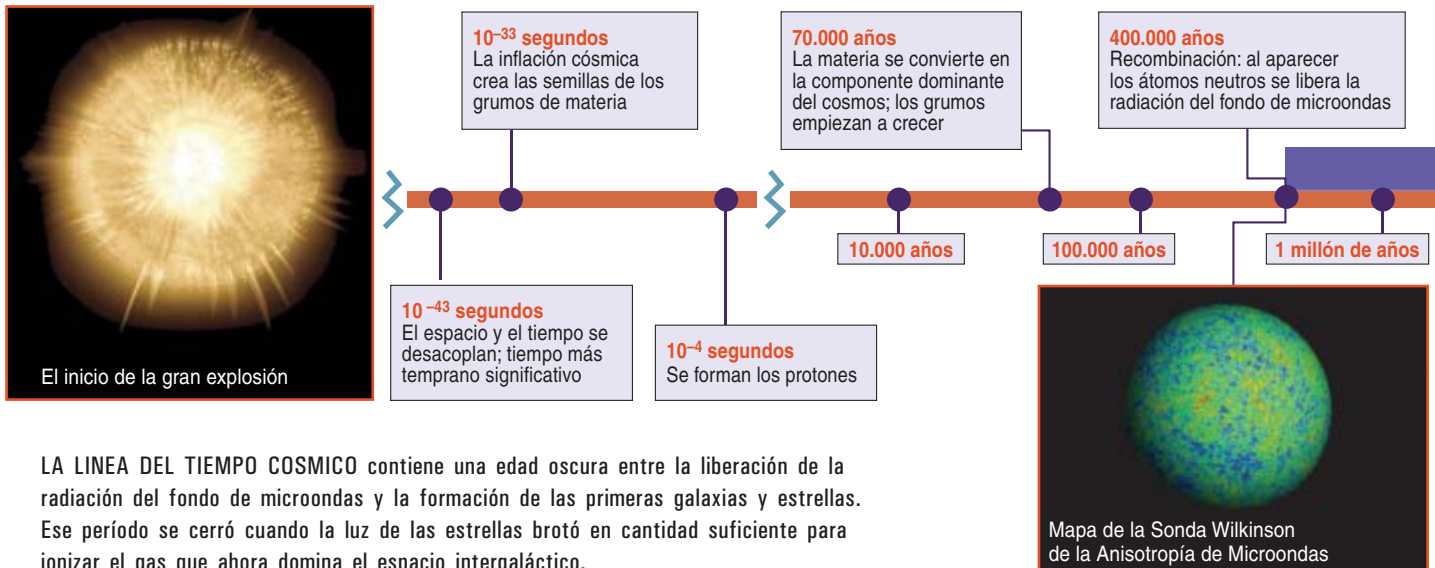
Cuando miro al cielo por la noche me pregunto si los seres humanos no nos ocupamos demasiado de nosotros mismos. En el universo hay mucho más de lo que nuestros ojos alcanzan a ver desde la tierra. Como astrofísico tengo el privilegio de que me paguen para pensar sobre el tema y ordenar las cosas en perspectiva. Si no, habría realidades que me turbarían, como mi propia muerte. Todos moriremos, pero cuando observo el universo como un todo, me entra una sensación de longevidad. El “gran panorama” me aparta de mí mismo.

Los cosmólogos abordan algunas de las cuestiones fundamentales que durante siglos pertenecieron al dominio de la filosofía. Hoy nos basamos en observaciones sistemáticas y métodos cuantitativos. Quizás el mayor logro del siglo pasado haya sido la concepción de un modelo del universo que se apoya en un número ingente de datos. No suele apreciarse el valor que el modelo tiene para nuestra sociedad. Cuando cada mañana leo el periódico, me encuentro con conflictos por fronteras, posesiones o libertades. Las noticias de hoy se olvidan con rapidez en los días siguientes. Pero al abrir textos antiguos que se vienen leyendo desde hace mucho, como la Biblia, ¿qué es lo primero que vemos? Una descripción de la creación de los constituyentes del universo: la luz, las estrellas, la vida.

Aunque los seres humanos se vean inmersos en problemas terrenales con mucha frecuencia, sienten también curiosidad por el “panorama global”.

Como ciudadanos del universo nos preguntamos por el nacimiento de las primeras fuentes de luz, la aparición de la vida y la existencia de otras especies inteligentes en la vastedad del espacio. Nadie se ha encontrado mejor situado que los astrónomos del siglo XXI para responder estas cuestiones cruciales.

La cosmología moderna es una ciencia empírica. Podemos ver, entiéndase al pie de la letra, el pasado. Cuando miramos nuestra imagen reflejada en el espejo a un metro de distancia, nos vemos tal y como éramos seis nanosegundos antes, el tiempo que le



LA LINEA DEL TIEMPO COSMICO contiene una edad oscura entre la liberación de la radiación del fondo de microondas y la formación de las primeras galaxias y estrellas. Ese período se cerró cuando la luz de las estrellas brotó en cantidad suficiente para ionizar el gas que ahora domina el espacio intergaláctico.

lleva a la luz ir al espejo y regresar. De igual forma, los cosmólogos no tienen que hacer cálculos sobre la evolución del universo; la contemplan a través de los telescopios. Puesto que todas las direcciones del universo parecen estadísticamente idénticas, lo que apreciamos a una distancia de miles de millones de años-luz es, probablemente, una justa representación de nuestra propia región del espacio tal y como fue hace miles de millones de años.

La cosmología observacional persigue captar la historia completa del universo, una visión ininterrumpida de lo que nos ha precedido, empezando por un gas amorfo de partículas subatómicas. Tenemos una instantánea del universo a los 400.000 años tras la gran explosión: la radiación del fondo cósmico de microondas. Mil millones de años más tarde, contamos ya con imágenes de galaxias. A mediados de la próxima década, la NASA lanzará el Telescopio Espacial James Webb. Este ingenio estará capacitado para observar las primeras galaxias,

que, según predicen los teóricos, se generaron cuando el universo tenía unos cientos de millones de años.

Queda, pues, un gran hueco. Entre la emisión del fondo de microondas y los primeros rayos de luz estelar hubo un período en el que el universo era oscuro y el fondo de microondas no llevaba ya inscrita la distribución de materia. Parecerá una época sombría y letárgica, un intermedio aburrido entre las secuelas inmediatas de la gran explosión y el bullicioso cosmos de hoy día. Sin embargo, algo fundamental sucedió en esa edad oscura: la sopa primordial evolucionó hasta convertirse en el zoo variopinto de cuerpos celestes que hoy observamos. En la oscuridad, las fuerzas gravitatorias ensamblaron los objetos del cosmos.

La situación que se les presenta a los astrónomos recuerda al álbum de fotos que pasara de las primeras imágenes en ultrasonido de un feto a las fotografías de su adolescencia y madurez. Si se intenta averiguar a partir de las fotografías lo acontecido entre ambas fases, se podría incurrir en grandes errores. Un niño no es un feto a mayor escala, ni un adulto a menor escala. Lo mismo sucede con las galaxias. No siguieron un desarrollo lineal a partir de los grumos incipientes de materia perceptibles en el fondo de microondas. Las observaciones nos hablan de una transición compleja la experimentada por el universo durante la edad oscura.

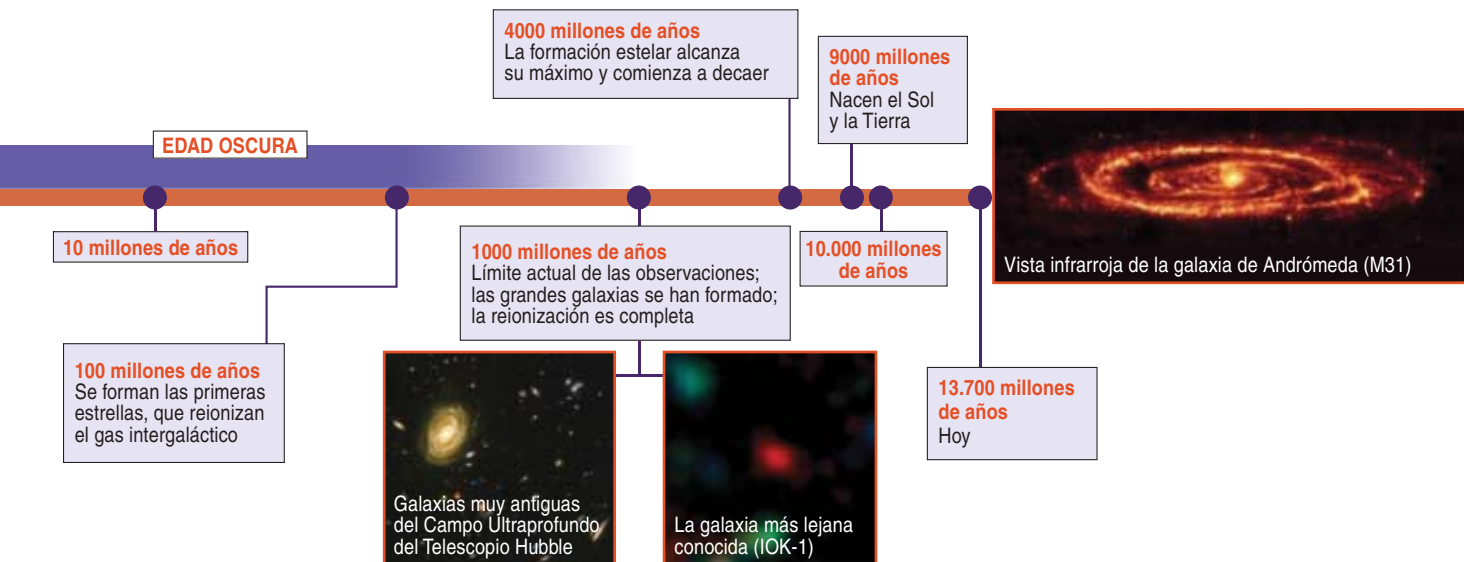
Los astrónomos buscan ahora las páginas perdidas del álbum fotográfico cósmico, que corresponden a la evolución del universo durante su infancia y a la formación de los constituyentes de las galaxias, entre ellas la Vía Láctea. Hace unos diez años, cuando empecé a trabajar en este campo, había muy pocos interesados. La cuestión concita en estos días la mayoría de los proyectos de futuras observaciones y promete convertirse en una de las fronteras de la cosmología más apasionantes.

De los iones a los iones

De acuerdo con la teoría de la gran explosión, el universo temprano estaba lleno de plasma caliente: una sopa de protones, electrones y fotones, espolvoreada con otras partículas. Los electrones en movimiento libre interac-

Resumen/La época de la reionización

- En los últimos decenios los cosmólogos han venido prestando atención a la radiación del fondo cósmico de microondas, una visión del universo a la edad de 400.000 años. Pero entre ese momento y la aparición de las primeras galaxias transcurrió un período de casi total oscuridad, apenas rota por débiles emisiones. Las sombras de esa era celan los secretos de la formación de las galaxias.
- Es manifiesta la dificultad de examinar un período que, por su propia naturaleza, resulta poco menos que invisible. Hay que dar con las débiles ondas de radio que el gas de hidrógeno eléctricamente neutro emitía durante su interacción con la radiación del fondo. Se acaba de iniciar la búsqueda.
- El mapa resultante adquirirá un interés harto mayor que el mismo fondo de microondas. Será tridimensional y mostrará, paso a paso la aparición de estructuras a partir de lo amorfo.



tuaban con los fotones mediante la dispersión Thomson, que acopla apretadamente materia y radiación. A medida que el universo se expandía, se fue enfriando. Cuando la temperatura cayó a unos 3000 kelvin, los protones y los electrones se combinaron y formaron átomos eléctricamente neutros de hidrógeno.

Terminó el proceso de dispersión Thomson. Los fotones dejaron de interactuar con la materia de forma tan intensa y se convirtieron en el fondo de microondas. La expansión cósmica siguió enfriando el gas: cabría esperar que el gas cósmico apareciera frío y neutro hoy día. Pero no hubo tal.

Aunque el mundo que nos rodea consta de átomos, la inmensa mayoría de la materia común del universo actual se encuentra en forma de plasma y se sitúa en el espacio intergaláctico. Los espectros observados de los cuásares, las galaxias y las explosiones de rayos gamma más lejanos (y, por ende, más viejos) indican que el hidrógeno cósmico difuso estaba completamente ionizado a la edad cósmica de mil millones de años [véase “Vacíos espaciales”, por Evan Scannapieco, Patrick Petitjean y Tom Broadhurst; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2002]. Una pista tentadora acerca de qué pudo ocurrir se halló hace tres años, cuando la sonda Wilkinson para el Estudio de las Anisotropías de las Microondas (WMAP) confirmó que la radiación del fondo de microondas se halla ligeramente polarizada. El hidrógeno neutro no polariza esta radiación; sólo el hidrógeno ionizado puede hacerlo. La cantidad de polarización sugiere que el gas se ionizó muy temprano, unos pocos cientos de millones de años tras la gran explosión. Por tanto, los átomos debieron de fragmentarse de nuevo en protones y electrones al término de la edad oscura.

Acostumbra asociarse esa reionización a las primeras generaciones de estrellas. Para ionizar un átomo de hidrógeno se requiere una energía de 13,6 electronvolt, cuantía aportada por los fotones de la luz ultravioleta. No se trata de ninguna cantidad desorbitada de energía. Equivale a unos 10^9 joule por kilogramo de hidrógeno, mucho menos que los 10^{15} joule liberados por la fusión nuclear de la misma masa de hidrógeno. Bastaría que

una millonésima parte del gas del universo experimentase la fusión en el interior de las estrellas, para que se generase la energía requerida en la ionización del gas restante.

Otros conjeturan que el material que caía a los agujeros negros fue el origen de la radiación ionizante. La caída hacia un agujero negro libera unos 10^{16} joule por kilogramo; bastaría que cayese una diezmillonésima parte del hidrógeno cósmico en los agujeros negros para ionizar el resto del gas.

Estrellas y agujeros negros se crean dentro de las galaxias, galaxias que debieron constituirse antes de que se produjera la reionización. Suele pensarse que las galaxias no son más que meros conjuntos de estrellas. Para un cosmólogo, en cambio, se trata de aglomeraciones enormes de materia donde las estrellas aparecieron tarde. Las galaxias están formadas sobre todo por materia oscura, un tipo de materia sin identificar caracterizado por su invisibilidad intrínseca. Se cree que una galaxia empezaba a constituirse cuando una región del universo de mayor densidad que la media colapsaba por efecto de su propia gravedad. Aunque en un principio esa región se expandía con el resto del universo, el exceso de gravedad frenaba la expansión e invertía su curso. La región se desplomaba sobre sí misma para crear un objeto ligado: una galaxia.

De acuerdo con los modelos actuales, las galaxias enanas comenzaron a configurarse cuando el universo tenía 100 millones de años. Con el tiempo se fusionaron unas con otras, dando lugar a galaxias de mayor tamaño. Una galaxia moderna, la propia Vía Láctea, es el resultado de la coalescencia de un millón de esos ladrillos. Dentro de las galaxias embrionarias, el gas se enfriaba y fragmentaba para crear estrellas [véase “Estrellas primigenias”, por Richard B. Larson y Volker Bromm; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2002]. La radiación ultravioleta de las estrellas se filtraba al espacio intergaláctico, separaba los electrones de sus átomos y creaba burbujas expansivas de gas ionizado. Cuantas más galaxias se formaban, más burbujas aparecían; el gas intergaláctico se fue asemejando a un queso

de Gruyère. Las burbujas fueron solapándose y con el tiempo cubrieron el espacio entero.

A pesar de que esta secuencia resulta verosímil, hasta ahora sólo consta en la mente de los teóricos. A los cosmólogos experimentales les gustaría tener pruebas directas de la época de la reionización antes de añadir este capítulo perdido a los libros de texto. Es más, sólo las observaciones pueden establecer si fueron las estrellas o los agujeros negros los causantes de la reionización y qué propiedades tenía la materia oscura. Pero, ¿cómo se observa, si, al menos inicialmente, la edad oscura hacía honor a su nombre?

Viendo en la oscuridad

Por fortuna, incluso el hidrógeno frío emite luz. Las partículas subatómicas presentan una orientación intrínseca, el “espín”, que apunta a una de dos direcciones posibles, denominadas convencionalmente “arriba” y “abajo”. El protón y el electrón de un átomo de hidrógeno pueden apuntar en la misma dirección (alineación) o en sentidos opuestos. En este último estado, el átomo presenta una menor energía. Si, por ejemplo, tanto el electrón como el protón apuntan hacia arriba y el electrón pasa a apuntar hacia abajo, el nuevo estado atómico habrá perdido energía y cederá un fotón con una longitud de onda de 21 centímetros. A la inversa, si el átomo absorbe un fotón de esta frecuencia, el electrón volverá a tener el espín hacia arriba.

Un fotón de 21 centímetros es mucho menos energético que los fotones que emite el hidrógeno cuando los electrones saltan de una órbita a otra: podía darse el cambio de espín incluso sin la existencia de estrellas que brillaran. La energía de la radiación del fondo cósmico de microondas y de las colisiones entre átomos bastaba para cambiar el espín de los electrones e inducir un brillo tenue del hidrógeno. El número relativo de átomos con espines paralelos y antiparalelos define la temperatura de espín del gas. Una temperatura de espín alta, por ejemplo, indica que una fracción importante de los átomos porta espines que apuntan en la misma dirección.

La teoría mantiene, por tanto, que la edad oscura viene descrita por tres temperaturas distintas: la temperatura de espín (una medida de la abundancia relativa de átomos con diferentes estados de espín), la temperatura cinética común (una medida de los movimientos de los átomos) y la temperatura de radiación (una medida de la energía de los fotones del fondo). Estas tres temperaturas podrían ser distintas entre sí, dependiendo de los mecanismos físicos que primen.

En un peculiar juego de tres, la temperatura de espín fue primero igual a la temperatura cinética, después a la temperatura de radiación y, finalmente, otra vez a la temperatura cinética. Con la expansión del espacio, lo mismo el gas que la radiación se fueron enfriando. Por sus propios medios el gas se hubiera enfriado más deprisa, pero un pequeño número de electrones libres, el residuo que quedó tras la formación de los átomos de hidrógeno, contrarrestó la tendencia. Los electrones actuaban como intermediarios en la transmisión de energía del fondo de microondas a los átomos e igualaban las tres temperaturas. A los diez millones de años de la gran explosión, sin embargo, los electrones dejaron de desempeñar ese

papel porque el fondo de microondas se había diluido. Se rompió el equilibrio entre gas y radiación. El gas inició un proceso de rápido enfriamiento. Las colisiones atómicas mantuvieron igualadas las temperaturas cinética y de espín. En esta fase, el hidrógeno era un absorbente neto de fotones de 21 centímetros. Extraña energía del fondo de microondas (aunque nunca en la cuantía necesaria para restablecer el equilibrio).

Cien millones de años después de la gran explosión, hubo una segunda transición. La expansión cósmica había enrarecido la densidad del gas hasta el punto de que las colisiones eran ya demasiado infrecuentes para que lograran igualar las temperaturas cinética y de espín. Los espines drenaban energía del fondo de microondas. Cuando la temperatura de espín alcanzó el equilibrio con la temperatura de radiación, el hidrógeno había dejado de ser absorbente y emisor neto de fotones de 21 centímetros. Durante ese período, el gas resultaba indistinguible del fondo de microondas.

Al encenderse las primeras estrellas y agujeros negros, sobrevino una tercera transición. Los rayos X aumentaron la temperatura cinética. El hidrógeno absorbía y reemitía la luz ultravioleta; el consiguiente trasiego de electrones de órbita a órbita derivó en un equilibrio entre las temperaturas cinética y de espín. La temperatura de espín aumentó por encima de la temperatura del fondo de microondas, por lo que el hidrógeno empezó a brillar más que el fondo. El cambio de espín de los electrones requiere menos energía que la ionización, así que las galaxias hicieron que el hidrógeno brillara incluso antes de que lo reionizaran. Con el tiempo, cuando el hidrógeno alcanzó de nuevo el estado ionizado, brillaría a través de otros procesos y se debilitaría la emisión intergaláctica de 21 centímetros.

Tomografía primigenia

Debido a este juego de tres, el cielo de 21 centímetros será más brillante o más oscuro que el fondo de microondas en razón del momento y del lugar. Otro fenómeno a considerar es la dilatación de la longitud de onda de los fotones en virtud de la expansión del universo. Desde el inicio de la edad oscura, el tamaño del universo se ha multiplicado por mil: un fotón de 21 centímetros emitido entonces llega hoy a la Tierra con una longitud de onda de 210 metros; un fotón emitido hacia el final de la época oscura tendría una longitud de onda de uno o dos metros.

Este rango de longitudes cae dentro del intervalo de radio del espectro electromagnético. Se pueden recoger esas emisiones con una batería de antenas de baja frecuencia, parecidas a las que se utilizan para las comunicaciones por radio y televisión. Varios grupos están construyendo conjuntos así. La Red de Campo Ancho de Mileura (MWA), en el oeste de Australia, tendrá 8000 antenas esparcidas por una zona de kilómetro y medio de largo. Detectará longitudes de onda de 1 a 3,7 metros, con una resolución angular de minutos de arco, correspondientes durante la edad oscura a una escala física de unos tres millones de años-luz. Otras baterías de antenas son la Red de Bajas Frecuencias (LOFAR), el Telescopio de Estructuras Primigenias (PaST) y, en un futuro más lejano, la Red del Kilómetro Cuadrado (SKA).