

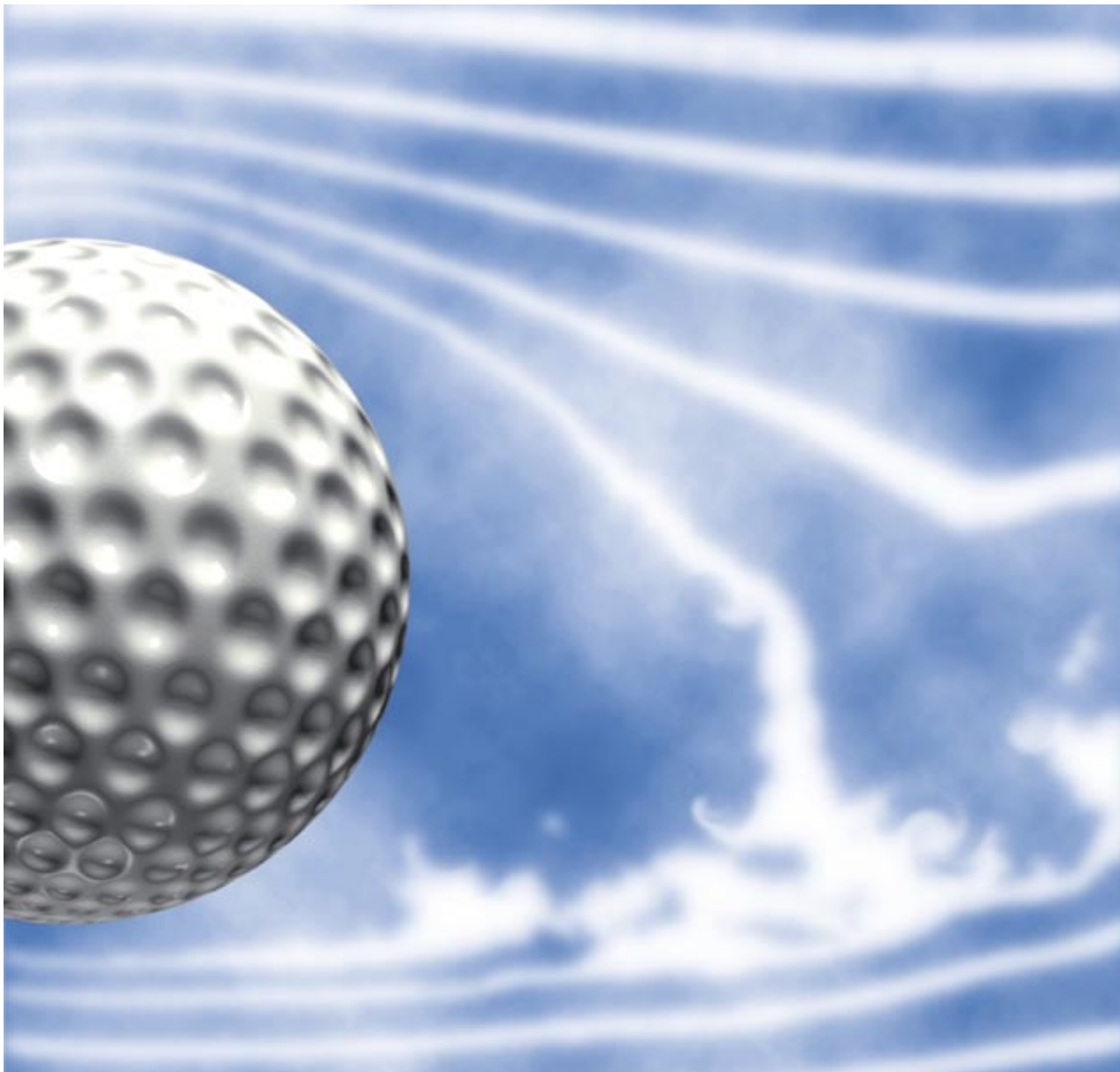
INVESTIGACION *y* CIENCIA

LA ENFERMEDAD DE PARKINSON

ASI DIBUJAN LOS CIEGOS

RENDIMIENTO DE LAS GRANJAS TRANSGENICAS

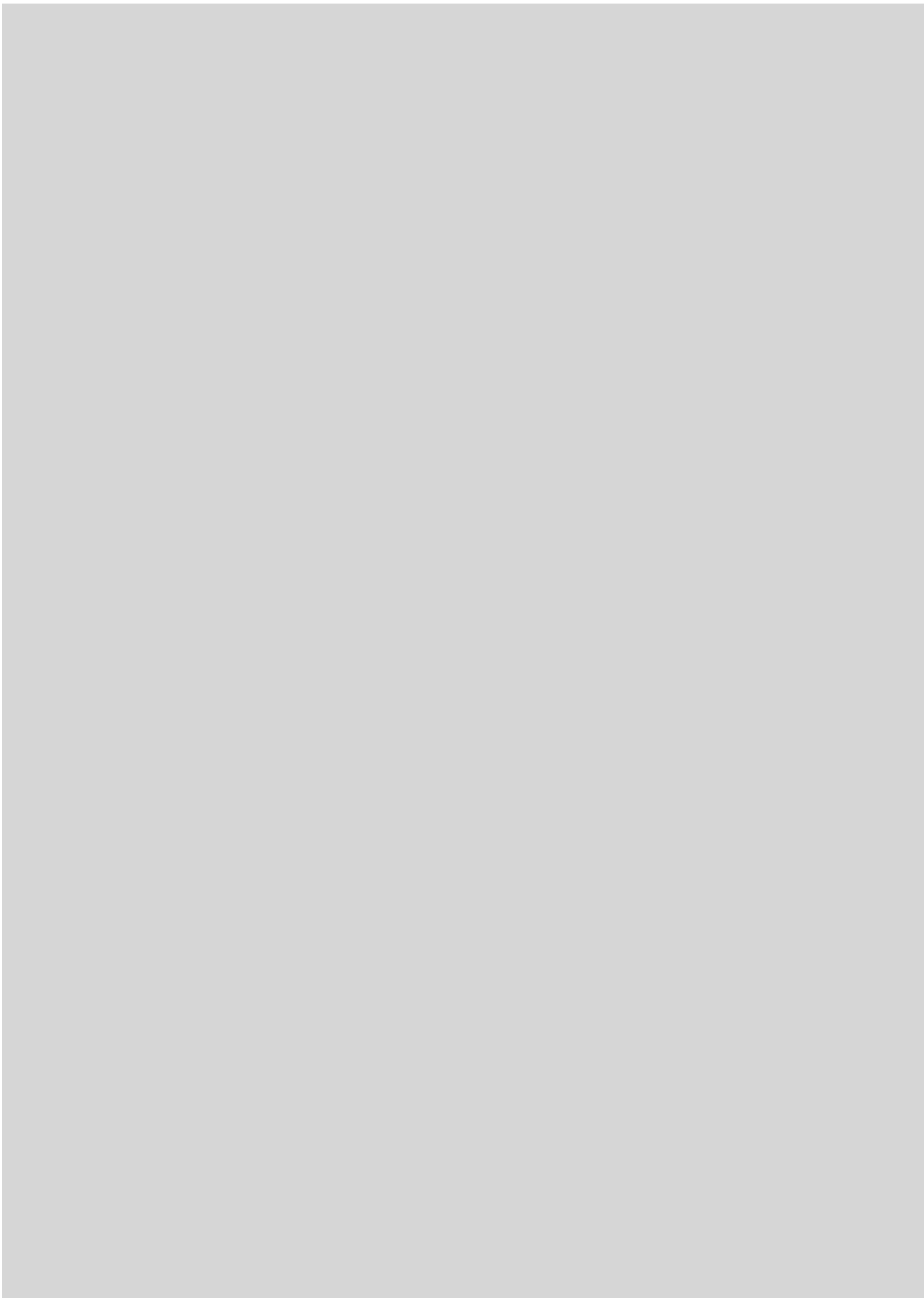
Edición española de
**SCIENTIFIC
AMERICAN**

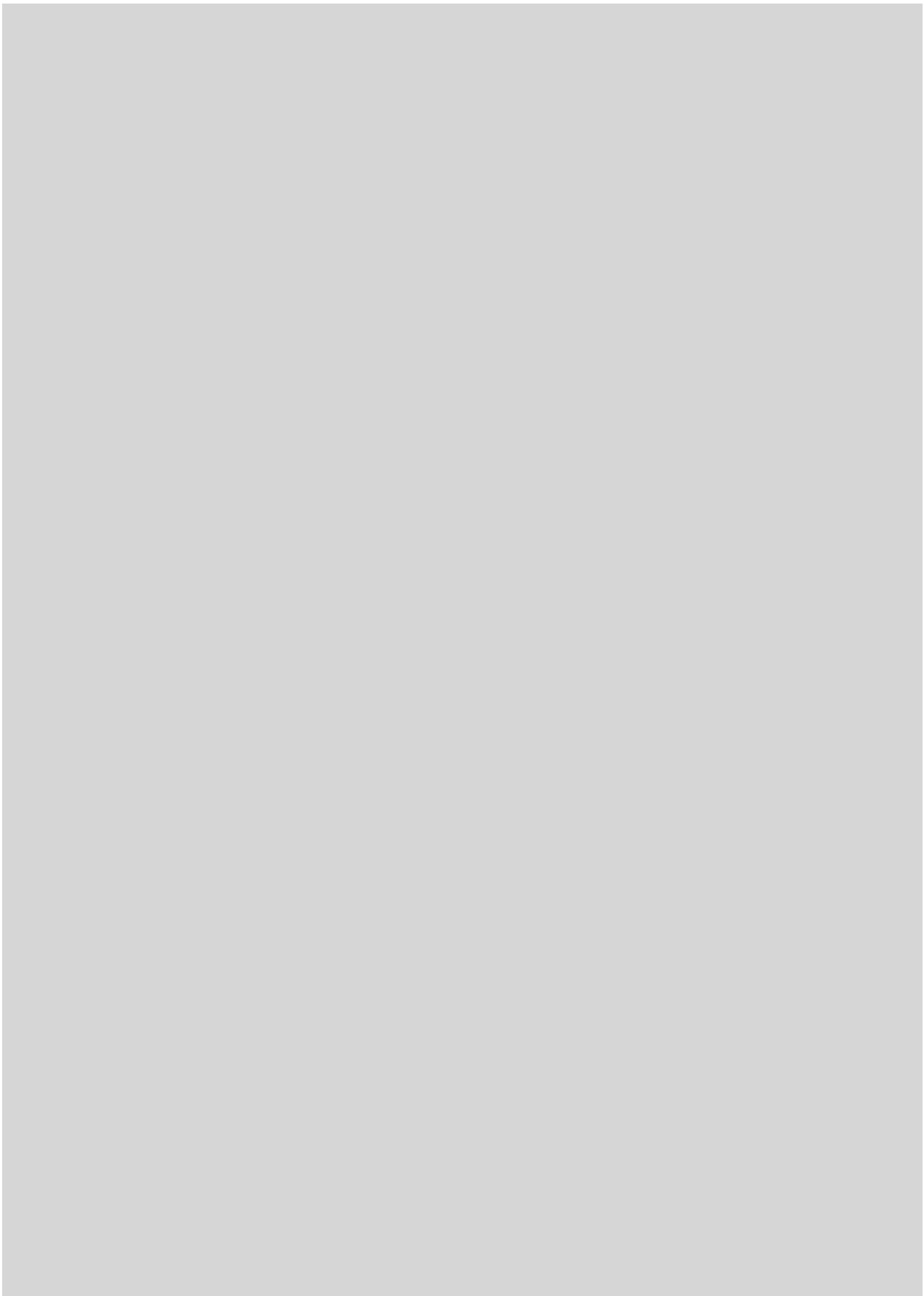


9 770210 136004 00246

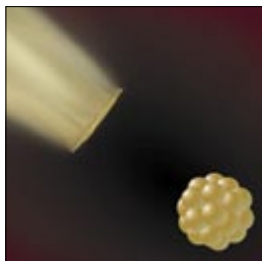
DOMINIO DE LA TURBULENCIA

MARZO 1997
800 PTAS.





6

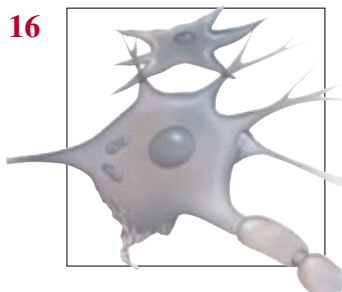


Rayos cósmicos en las fronteras de la energía

James W. Cronin, Thomas K. Gaisser y Simon P. Swordy

Imagínese un fragmento de un átomo que avanza a una velocidad fabulosa, que concentra todo el ímpetu de una roca lanzada con fuerza. No es menor la energía que portan esas partículas a las que seguimos llamando rayos cósmicos. De momento, los astrofísicos sólo pueden especular sobre los cataclismos que crean semejantes haces, aunque parten de sólidos indicios.

16



La enfermedad de Parkinson

Moussa B. H. Youdim y Peter Riederer

Los temblores de la escritura y la inmovilidad que se producen en esta enfermedad se deben a las lesiones que se van acumulando lentamente en una zona del cerebro que regula el movimiento. Los radicales libres de oxígeno son los culpables principales. Muchos investigadores se afanan para encontrar fármacos que puedan defender las células de esta agresión.

26



Simulación de la turbulencia mediante superordenadores

Parviz Moin y John Kim

Predecir los movimientos giratorios del aire, agua y otros fluidos tal vez sea el problema más difícil de la física clásica. Los túneles aerodinámicos acostumbraban ser la mejor herramienta ingenieril para simular la turbulencia. Actualmente los superordenadores satisfacen, de largo, requerimientos más exigentes. Con todo las complejidades de los flujos todavía abruman a las máquinas.

46



Producción de fármacos a través de animales transgénicos

William H. Velandar, Henryk Lubon y William N. Drohan

La ingeniería genética ha llevado la farmacia a la granja. Gracias a los avances en las manipulaciones del ADN, está el camino allanado para obtener cerdos, vacas, ovejas y otros animales cuya leche aporte grandes cantidades de proteínas de interés clínico. El artículo explica el trabajo de diez años de investigación coronados con la producción animal de proteína C humana.

52



Así dibujan los ciegos

John M. Kennedy

Contra lo que pudiera intuirse, cuando los ciegos dibujan objetos tridimensionales usan los recursos convencionales que emplean los artistas que gozan de visión: las líneas representan límites, los escorzos indican la perspectiva y así sucesivamente. De ello parece inferirse que los mundos mentales organizados en torno al tacto y a la vista son muy semejantes.

60

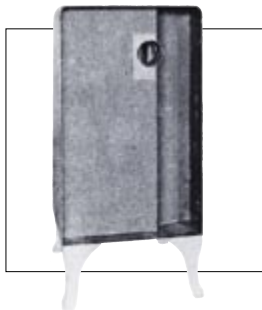


Inundación experimental del Gran Cañón

Michael P. Collier, Robert H. Webb y Edmund D. Andrews

Hace ahora justamente un año, expertos del Servicio de Inspección Geológica de los Estados Unidos abrieron las compuertas del río Colorado y provocaron una gigantesca riada en el tajo del Gran Cañón. Su intención: ver si unas inundaciones artificiales y periódicas mejoraban la calidad del entorno.

68

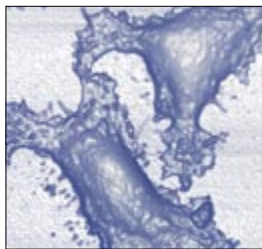


Los refrigeradores de Einstein-Szilard

Gene Dannen

Increíble pero cierto: Albert Einstein y Leo Szilard, dos de los mayores físicos teóricos de este siglo, también fueron inventores. En los años veinte colaboraron para diseñar refrigeradores domésticos que se basaran en nuevos principios. Aquí se explica qué ocurrió con dichos aparatos.

76



Aplicaciones biológicas del microscopio de fuerzas

Carlos Bustamante y Ricardo García

El progreso de la biología ha ido de la mano del avance de la técnica microscópica. A los diez años de la construcción del microscopio de fuerza de barrido, este instrumento, que emplea una punta afilada para sentir y revelar las formas moleculares, ha prestado grandes servicios a la ciencia.

SECCIONES

5 HACE...

34 PERFILES

36



**CIENCIA
Y SOCIEDAD**

Arqueología clásica.

87



**JUEGOS
MATEMÁTICOS**

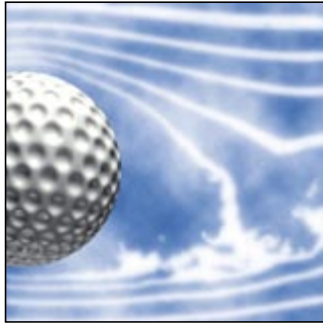
Cuadrados alfabéticos.

44 DE CERCA

90 LIBROS

84 TALLER Y LABORATORIO

96 IDEAS APLICADAS



Portada: Slim Films

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Michael Goodman
8	G. Kelvin (<i>arriba</i>); B. Bola, (<i>abajo</i>)
9	Jennifer C. Christiansen (<i>arriba</i>); Universidad de Utah (<i>abajo</i>)
10	George Kelvin
11	Steven Peterzen
12	Victoria Fonseca
16	AP/Wide World Photos
17	Carol Donner
18	Laurie Grace (<i>dibujo</i>); Daniel P. Perl, (<i>fotografía</i>)
19	Alfred T. Kamajian (<i>idea</i>); Barry Ross (<i>dibujo</i>)
20	Daniel P. Perl
21	Alfred T. Kamajian; Laurie Grace
22	Alfred T. Kamajian
23	Russ Lee, © Pantheon Books, 1995
26-27	R. Ressemeyer, (<i>foto</i>); P. Buning (<i>simulación</i>); Slim Films (<i>montaje</i>)
28-29	P. Moin y J. Kim (<i>sup. izda.</i>); S. Kline (<i>sup. dcha.</i>); A. Jameson (<i>abajo</i>)
30	Slim Films
31	David Scharf (<i>arriba</i>); Man Mohan Rai y Parviz Moin (<i>abajo</i>)
32	(<i>de arriba a abajo</i>) H. Choi, P. Moin y J. Kim; Slim Films; W.-E. Reif
46-47	B. L. Williams (<i>izda.</i>); John Horner Architectural Photography (<i>dcha.</i>)
48	R. Osti (<i>animales</i>); JSD (<i>diagrama</i>); Stephen P. Butler (<i>microfotografía</i>)
49	Jared Schneidman Design
50	Robert M. Akers
52	Abraham Menashe
53-57	Cortesía de John M. Kennedy
58-59	Lola Bardisa
60-61	Michael P. Collier
62	J. C. Christiansen (<i>arriba</i>); Michael P. Collier (<i>abajo</i>)
63	M. P. Collier (<i>arriba</i>); R. Osti (<i>abajo</i>)
64	M. P. Collier (<i>fotos</i>); J. C. Christiansen, fuente: C. E. Johnston (<i>abajo</i>)
65	Michael P. Collier
66	Estudios Medioambientales del Glen Canyon
67	Michael P. Collier
68-69	(<i>de izda. a dcha.</i>) Leo Szilard Papers; cortesía de Albert Korodi, © A.E.G.
70-71	Gene Dannen (<i>izda.</i>); cortesía de Albert Korodi, © A.E.G. (<i>resto dcha.</i>)
72	Leo Szilard Papers, U. C. S. D.
73	Carol Gram Paulson
77	C. Bustamante (<i>arriba</i>); X. Zhu (<i>electromicrografía</i>)
78	C. Bustamante (<i>arriba</i>); J. Tamayo y R. García (<i>abajo</i>)
79	H. G. Hansma (<i>arriba</i>); D. Keller (<i>abajo</i>)
80	R. García, J. Tamayo, M. Valle y J. L. Carrascosa (<i>izda.</i>); C. Bustamante (<i>dcha. y abajo</i>)
81	C. Bustamante y M. Guthold
82	C. Bustamante y M. Guthold (<i>arriba</i>); Jan Ho (<i>abajo</i>)
84	H. Mikuz (<i>izda.</i>); T. Puckett
85	Bryan Christie
87	Victoria & Albert Museum, Londres

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Victoria Fonseca González: *Rayos cósmicos en las fronteras de la energía*; Esteban Santiago: *La enfermedad de Parkinson*; Miguel A. Gómez Tierno: *Simulación de la turbulencia mediante superordenadores*; Santiago Torres: *Producción de fármacos a través de animales transgénicos*; José M. García de la Mora: *Así dibujan los ciegos*; Manuel Puigcerver: *Inundación experimental del Gran Cañón*; Antoni Malet: *Los refrigeradores de Einstein-Szilard*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio e Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén

EDICIONES José María Valderas, *director*

ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*

PRODUCCIÓN M.^a Cruz Iglesias Capón

Bernat Peso Infante

Carmen Lebrón Pérez

SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez

EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.^a - 08021 Barcelona (España)

Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie

BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*;

Ricki L. Rusting y Timothy M. Beardsley, *Associate Editors*;

John Horgan, *Senior Writer*; Corey S. Powell, *Electronic Features Editor*;

W. Wayt Gibbs; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek;

David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Glenn Zorpette;

Marguerite Holloway, *Contributing Editor*

PRODUCTION Richard Sasso

PUBLISHER Joachim P. Rosler

CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.^a
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	9.700	17.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas

Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

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

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.^a - 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad

Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 - Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:

Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.^a
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada

Copyright © 1997 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 1997 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

Filmación y fotogramas reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «El problema de dar a las circulares de reproducción automática esa apariencia de escrito mecanografiado lo ha resuelto la Impresora Automática Flexowriter. Esta máquina funciona con una cinta de papel de 22 mm de ancho. Consta de una máquina de escribir eléctrica, una perforadora automática y una impresora automática. Al preparar la circular, el usuario teclea la fecha y el nombre y la dirección del destinatario. Luego, acciona un conmutador y entra en juego la impresora, controlada por la cinta preparada de antemano.»

«El deslustre de los objetivos y otros componentes ópticos de los instrumentos que se emplean en los trópicos fue, hasta hace poco, un problema grave, particularmente en zonas del Pacífico. Se revela ahora cómo se salvó el obstáculo. Se trata papel metálico con compuestos de radio sometiéndolo a una emisión de rayos alfa equivalente a unos 2,3 microgramos de radio por centímetro cuadrado y se montan tiras estrechas de ese papel alrededor de los objetivos.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «En una conferencia reciente que pronunció ante la Sociedad Geográfica Americana, el señor Heli-Chatelain hizo algunas revelaciones asombrosas acerca del alcance y los horrores del comercio de esclavos en Africa. Que nadie suponga que el comercio de esclavos en Africa sea cosa del pasado. En aquel enorme continente, que las potencias europeas se han repartido a placer, aún impera. La llaga abierta del mundo, como denominaba Livingstone el tráfico de esclavos, realmente infernal, dentro de Africa, prosigue tan repulsivo como siempre.

De los 200 millones de africanos, 50 millones viven esclavos. Sólo en las islas de Zanzíbar y Pemba, bajo administración británica, hay 260.000 personas sometidas a esclavitud. Se dice que, por cada esclavo que llega a su destino final, ocho o nueve perecen durante el viaje, por lo que el abastecimiento de 7000 esclavos que anualmente se contrabandean a Zanzíbar representa el asesinato de unas 60.000 personas.»

«Las abejas domésticas recolectan, con gran avidez, la savia de arce de los comederos en los “arbustos dulces”. Una vez recogido el líquido, la faena de las abejas aún está por la mitad; todavía hay que “cocerlo”, por así decir, para reducirlo hasta una consistencia adecuada, y las alas son el único medio por



Máquina parlante

el que se lleva a cabo ese arduo proceso. Lo mismo que, a falta de papel secante, soplamos sobre una hoja recién escrita para provocar la evaporación, merced a las vibraciones de sus alas las abejas hacen que circulen corrientes de aire por encima de la miel y consiguen el mismo resultado.»

...ciento cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Entre todos los inventos y descubrimientos que asombran al mundo, de ninguno tenemos noticias que prometa ser más útil y oportuno, al menos para las señoras, que la “Esencia de Café”, que ahora se ofrece a los amantes de esa bebida. Se trata de la misma sustancia embotellada que se vende a bajo precio. Basta con introducir una cucharadita de té, llena de la sustancia, en una taza con agua que contenga las cantidades habituales de azúcar y leche para conseguir una taza de café de clase superior sin más problemas.»

«Un eminente dentista inglés ha propuesto el caucho, convertido en sustancia suave y viscosa por acción del fuego, como un excelente remedio para empastar dentaduras y aliviar los dolores de la caries. Para ello se funde un trozo de caucho con la llama de una vela y en caliente se le impulsa para que rellene el espacio vacío dentro de la muela. Así, a consecuencia de la viscosidad y adherencia del caucho, se impide que el aire entre en contacto con el nervio descarnado.»

«Nuestro grabado representa la famosa *Máquina parlante* del profesor Faber, actualmente en Inglaterra. El autómatas tiene el aspecto de un turco de tamaño natural. Conectadas a él hay un conjunto de teclas, pedales más bien, que al oprimirlos, según combinaciones variadas, generan sonidos articulados. Lo probamos con las palabras siguientes, que Mr. Faber reprodujo conforme las íbamos proponiendo: “Filadelfia,” “très bien” y “Dios bendiga a la Reina”, última frase que fue rematada con un hurra y luego una fuerte risa. Los principales órganos de articulación están forrados de caucho y un par de fuelles hacen las veces de pulmones.»

Rayos cósmicos en las fronteras de la energía

Estas partículas tienen más energía que ninguna otra del universo. Su origen desconocido podría, sin embargo, hallarse bastante cerca

James W. Cronin, Thomas K. Gaisser y Simon P. Swordy

A una cadencia aproximada de una por segundo, las partículas subatómicas penetran en la atmósfera terrestre portando la energía de una peña arrojada con fuerza. De este fenómeno se infiere que, en algún lugar del universo, hay fuerzas que pueden suministrar a un solo protón 100 millones de veces la energía alcanzable en nuestros aceleradores más potentes de partículas. ¿Dónde se halla esa fuente? ¿De qué modo acontece el proceso?

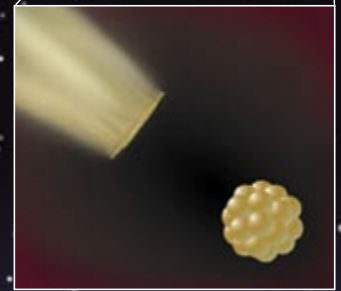
Sobre esas cuestiones vienen interrogándose los físicos desde el descubrimiento de los rayos cósmicos en 1912. (Aunque sabemos ya que tales entidades son en realidad partículas, se las sigue llamando “rayos”.) El medio interestelar contiene núcleos atómicos de todos los elementos de la tabla periódica, que se mueven sometidos al influjo de campos eléctricos y magnéticos. Sin el efecto de apantallamiento de la atmósfera terrestre, los rayos cósmicos constituirían una seria amenaza contra la salud; de hecho, la gente que vive en regiones montañosas o viaja a menudo en avión recibe una apreciable dosis de radiación extra.

Quizás el rasgo más notable de esta radiación sea que los investigadores no han encontrado todavía un límite natural al espectro de rayos cósmicos. La mayoría de las fuentes conocidas de partículas dotadas de carga —pensemos, por ejemplo, en nuestro astro con su viento solar— tienen un límite de energía característico, lo que equivale a decir que no producen partículas con energías por encima de esa cota. Por contra, los rayos cósmicos aparecen, aunque en número decreciente, a energías tan altas como los astrofísicos pueden medir. Los datos escasean a niveles de alrededor de 300.000 millones de veces la energía de la masa en reposo del

protón, porque no se dispone todavía de un detector de magnitud suficiente para obtener muestras de la pequeñísima cifra de partículas incidentes prevista.

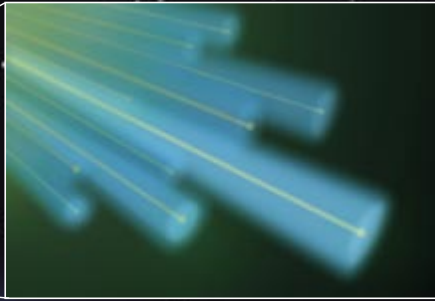
No obstante, con intervalos de años, se han hallado pruebas de la existencia de rayos cósmicos de energía ultra-alta gracias a que dichas partículas, al entrar en la atmósfera, crean miríadas de partículas secundarias (más fáciles de detectar). A este respecto, el 15 de octubre de 1991 el observatorio de rayos cósmicos que Estados Unidos tiene instalado en el desierto de Utah registró una cascada de partículas secundarias procedente de un rayo cósmico de 50 joules (3×10^{20} electronvolt). Aunque el flujo de rayos cósmicos decrece con las energías más altas, el ritmo de disminución cambia por encima de unos 10^{16} eV; ello nos da a entender que los mecanismos responsables de los rayos cósmicos de energía ultra-alta difieren de los mecanismos que están detrás de los rayos de energía más moderada.

En 1960 Bernard Peters, del Instituto Tata de Bombay, sugirió que los rayos cósmicos de energía más baja se producen mayoritariamente en nuestra propia galaxia, mientras que los de energías más altas vienen de fuentes más lejanas. Hay una razón para pensar así: un protón cósmico de más de 10^{19} eV, por ejemplo, no se verá obligado a desviarse significativamente por ninguno de los campos magnéticos generados por una galaxia y, en consecuencia, viajará más o menos en línea recta. Si tales partículas vinieran del interior de nuestra galaxia, deberíamos esperar flujos distintos en direcciones diferentes, por la sencilla razón de que la galaxia no se encuentra distribuida simétricamente en torno a nosotros. Antes bien, la distribución



Los rayos cósmicos —núcleos atómicos que viajan a casi la velocidad de la luz— habitan en un universo, extraña y relativísticamente “contraído”, antes de chocar con los núcleos de los átomos del gas atmosférico a gran altura sobre la Tierra. Una fracción significativa de la energía incidente se convierte en materia en forma de partículas subatómicas, muones inclusive, que a su vez colisionan violentamente con otros átomos en la atmósfera creando una “cascada atmosférica”. También se emiten rayos gamma.

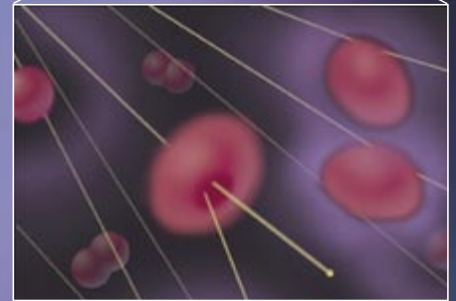
La vida de un rayo cósmico



En los estados iniciales de la cascada de colisiones, las partículas viajan tan rápido que pueden exceder la velocidad de la luz en la tenue alta atmósfera (que es apenas inferior a la velocidad de la luz en el vacío) y emiten por tanto radiación de Cherenkov, el análogo óptico de un estampido sónico.



A medida que las partículas creadas en la colisión inicial colisionan con núcleos atmosféricos, su energía puede crear partículas adicionales y radiación de alta energía. En virtud de la conservación del momento, la mayor parte de la materia creada viaja en la misma dirección que el rayo cósmico inicial, pero los fotones pueden emitirse en todas las direcciones.



Los muones y otros restos de rayos cósmicos que quedan al final de una cascada atmosférica han disipado suficiente energía como para que sus interacciones con la atmósfera den lugar a luz ultravioleta procedente de la perturbación de las capas de energía electrónicas. Esta luz pueden detectarla fotomultiplicadores sensibles. En sucesos de singular intensidad, algunas de las partículas de la cascada llegarán al suelo, donde también pueden detectarse.

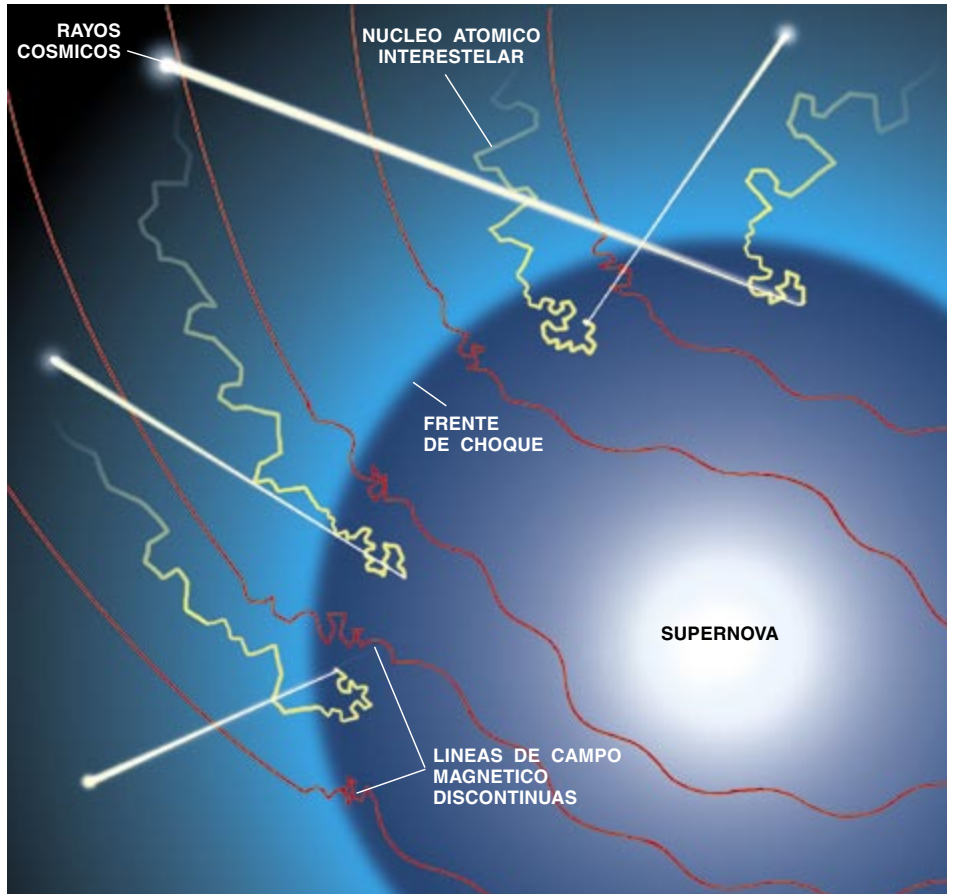
1. CREACION DE UN ACELERADOR DE rayos cósmicos tras la explosión de una supernova. Así lo ven los astrofísicos, quienes creen que los núcleos atómicos que atraviesan el frente de choque de la supernova absorberán energía de los campos magnéticos turbulentos existentes en el choque. Una partícula puede verse obligada a desviarse de tal manera que atraviese el borde del frente cientos o incluso miles de veces, recogiendo más energía en cada paso hasta que escapa constituida en rayo cósmico. La mayoría de las partículas viajan según las trayectorias que resultan de aceleraciones bastante pequeñas, dando cuenta de la forma general del espectro de energías de rayos cósmicos (*recuadro de la derecha*), que disminuye a altas energías. La “rodilla”, o doblez, que aparece en la curva, sugiere que la mayoría de las partículas se aceleran en un mecanismo incapaz de impartir más de unos 10^{15} electronvolt. El exceso relativo de partículas de ultra-alta energía indica una fuente adicional de aceleración cuya naturaleza seguimos ignorando.

es esencialmente isótropa, como la de los rayos de energías más bajas, cuyas trayectorias se dispersan.

Bombas supernova

Deduciones tan endebles revelan cuán poco se conoce a ciencia cierta sobre el origen de los rayos cósmicos. Los astrofísicos han elaborado modelos plausibles sobre su verosímil formación, pero carecen de respuestas tajantes. Esta situación puede ser el resultado de la casi inimaginable diferencia entre las condiciones en la Tierra y las que rigen en las regiones donde se crean los rayos cósmicos. El espacio que media entre las estrellas contiene sólo aproximadamente un átomo por centímetro cúbico, una densidad mucho menor que la que hoy en día podemos crear con los mejores vacíos artificiales. Además, tales volúmenes están llenos de inmensos campos eléctricos y magnéticos, íntimamente ligados a una población difusa de

2. UN DETECTOR DE CASCADAS atmosféricas observa las trazas de los rayos cósmicos que penetran en la parte más alta de la atmósfera. Los fotodetectores pueden registrar ráfagas de luz causadas por partículas que interaccionan con las moléculas de aire y determinar la energía e identidad probable del rayo incidente. El detector Ojo de Mosca (*un primer plano a la derecha*) está instalado en Utah.

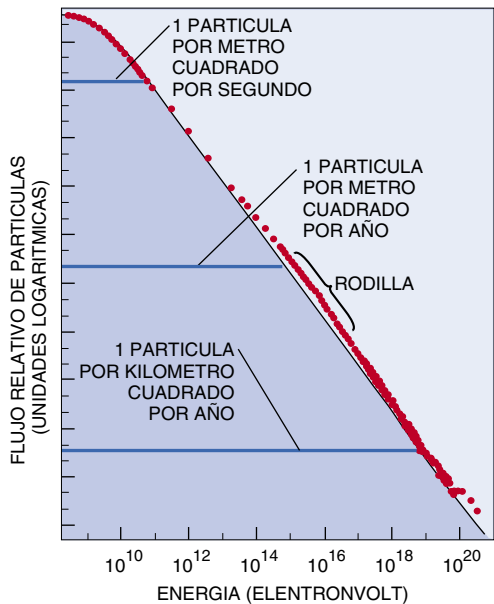


partículas dotadas de carga y menos numerosa incluso que la constituida por átomos neutros.

El espacio interestelar dista muchísimo de ser el lugar apacible que cabría esperar. Las bajas densidades allí reinantes permiten que las fuerzas eléctricas y magnéticas actúen a grandes distancias y escalas de tiempo, y operen así de una forma que, en

un medio con las densidades a que estamos acostumbrados en la Tierra, quedaría de inmediato amortiguada. El espacio galáctico se encuentra, pues, lleno de un plasma turbulento y energético de gas parcialmente ionizado en un estado de violenta actividad. Debido a la inmensidad de las distancias astronómicas, cuesta a menudo observar, a escalas de





tiempo humanas, el movimiento; no obstante, esas mismas distancias permiten, incluso a fuerzas moderadas, producir resultados impresionantes. Una partícula podría atravesar un acelerador terrestre en unos pocos microsegundos, pero tardaría años, si no milenios, en recorrer el acelerador cósmico análogo. (Además, las escalas de tiempo sufren una mayor complicación a causa del entorno donde habitan los rayos cósmicos, un medio extraño y sujeto a las distorsiones de que da cuenta la teoría de la relatividad. Si pudiéramos observar una de estas partículas durante 10.000 años, semejante intervalo temporal correspondería a sólo un segundo desde el punto de vista de la partícula.)



Desde hace tiempo, los astrónomos han acariciado la idea de que el grueso de los rayos cósmicos galácticos, es decir, aquellos cuya energía no alcanza los 10^{16} eV, se originan en las supernovas. Basan su tesis en una razón poderosa: la energía necesaria para mantener el suministro de rayos cósmicos observado en nuestra galaxia, la Vía Láctea, es sólo ligeramente menor que el promedio de energía cinética liberada al medio galáctico por las tres explosiones de supernova que suelen registrarse cada siglo. Con tanta cantidad de energía no hay en nuestra galaxia muchas fuentes más, si es que llega a haber alguna.

Cuando una estrella dotada de gran masa se desploma sobre sí misma ("se colapsa"), las regiones exteriores de la estrella explotan a velocidades de hasta 10.000 kilómetros por segundo. Se libera una cantidad similar de energía cuando una enana blanca se desintegra por entero en una detonación termonuclear. En ambos tipos de supernova, el material expulsado se expande a velocidades supersónicas, originando una fuerte onda de choque en el medio circundante. Se supone que tales ondas de choque aceleran los núcleos del material a través del que se expanden, transformándolos en rayos cósmicos. Debido a que los rayos cósmicos se hallan dotados de carga, siguen unas trayectorias muy complicadas a través de los campos magnéticos interestelares. Por esa razón las direcciones que toman, vistas desde la Tierra, no nos ayudan a conocer de qué fuente brotaron.

Observando la radiación de sincrotrón que a veces acompaña a los restos de supernova, se han encontrado pruebas más directas de que las supernovas se comportan a modo de aceleradores. La radiación de sincrotrón es característica de los electrones de alta energía que se mueven en un intenso campo magnético del tipo que podría actuar como un acelerador de rayos cósmicos; además, la presencia de rayos X de sincrotrón en algunos restos de supernova nos remite a energías muy altas. (En los aceleradores construidos por el hombre, la emisión de sincrotrón limita la energía que puede alcanzar una partícula, porque el ritmo de emisión aumenta a medida que la partícula se mueve más deprisa; llegado a cierto punto, la radiación extraerá energía de la partícula acelerada con la

JAMES W. CRONIN, THOMAS K. GAISSER y SIMON P. SWORDY trabajan en la teoría sobre la formación de rayos cósmicos y en los problemas prácticos inherentes a su detección y análisis. Cronin, profesor de física en la Universidad de Chicago desde 1971, compartió en 1980 el Nobel con Val L. Fitch por su investigación sobre violaciones de la simetría en la desintegración de mesones. Gaisser, docente de la Universidad de Delaware, se ha concentrado en la interpretación de las cascadas atmosféricas de rayos cósmicos. En 1995 Gaisser pasó dos meses en la Antártida preparando detectores de rayos cósmicos. Swordy, profesor en Chicago, se ha dedicado a la medición de rayos cósmicos desde 1976.

misma rapidez con que la suministra.) Recientemente, el *Asca*, satélite japonés de rayos X, tomó imágenes de la envoltura de la supernova 1006, que explotó hace 990 años. En contraste con la radiación del interior del resto de supernova, la radiación X de la envoltura presenta las notas distintivas de la radiación de sincrotrón. Según cálculos de los astrofísicos, los electrones se aceleran allí hasta 10^{14} eV (100 TeV).

Se ha empleado también el detector EGRET, instalado a bordo del *Observatorio Compton de Rayos Gamma*, para estudiar fuentes puntuales de radiación gamma identificadas con restos de supernova. Las intensidades y los espectros observados (hasta mil millones de electronvolt) se muestran conformes con un origen en la desintegración de piones neutros, partículas éstas que podrían producirse en el choque de los rayos cósmicos procedentes de los restos de la estrella en explosión contra el gas interestelar cercano. Conviene, sin embargo, resaltar la información procedente de otro observatorio, éste afinado en el suelo: en las búsquedas realizadas por el Observatorio Whipple de rayos gamma a energías mucho más altas procedentes de algunos de los mismos restos de supernova no se han detectado señales a los niveles esperables si las supernovas aceleraran partículas a 10^{14} eV, o más.

Para someter a comprobación la vinculación de los rayos cósmicos de alta energía con las supernovas, contamos con un método complementario que utiliza la composición elemental de los núcleos de rayos cósmicos. El tamaño de la órbita de una partícula dotada de carga en un campo magnético es proporcional a su momento

3. GLOBOS DE GRAN ALTITUD lanzados cerca de la base McMurdo en la Antártida. Transportan detectores de rayos cósmicos por encima de la mayor parte de la atmósfera. A 40 km por encima del casquete polar soplan vientos en círculo alrededor del polo, devolviendo el aerostato a las cercanías del punto de partida, diez días después. Los detectores transportados por los globos no son tan sensibles como los colocados a bordo de satélites, pero puede construirse de un tamaño mucho mayor y fletarse sin tanto coste.

total por unidad de carga; significa ello que los núcleos más pesados tienen mayor energía total para un tamaño de órbita dado. Cualquier proceso que limite la aceleración de la partícula sobre la base al tamaño de la órbita (piénsese en una región de aceleración de extensión restringida) conducirá, por tanto, a un exceso de núcleos más pesados a altas energías.

Sin duda nos gustaría ir más lejos y rastrear las huellas elementales de la aceleración en tipos específicos de supernova. Por ejemplo, la supernova de la explosión de una enana blanca aceleraría cualquier núcleo que poblase el medio interestelar local. Por contra, la supernova que surgiera del colapso de una estrella dotada de gran masa aceleraría el viento estelar circundante, propio de las capas externas de la estrella progenitora en los estadios más tempranos de su evolución. En algunos casos, el viento podría incluir una mayor proporción de helio, carbono o incluso núcleos más pesados.

La identidad de los rayos cósmicos de alta energía se pierde del todo cuando interaccionan con los átomos de la atmósfera terrestre y desencadenan una cascada de partículas secundarias. Por tanto, para estar completamente seguros de la composición nuclear, las mediciones deben efectuarse antes de que los rayos cósmicos alcancen la atmósfera densa. Desgraciadamente, para recoger 100 rayos cósmicos de energías cercanas a los 10^{14} eV, se tendría que poner en órbita un detector de 10 metros cuadrados durante tres años. Hoy las exposiciones típicas vienen a ser de un metro cuadrado por tres días.

Pero los investigadores se las han ingeniado para abordar el problema. Así, en la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) se han desarrollado técnicas para poner en órbita grandes cargas útiles (unas tres toneladas) con globos de elevada



altitud durante muchos días. Tales experimentos cuestan sólo una pequeña parte de lo que vale la instalación de un detector en un satélite. Los vuelos realizados con mayor éxito ocurrieron en la Antártida, donde los vientos de la atmósfera superior soplan en un círculo casi constante alrededor del polo Sur.

Una carga útil lanzada desde la base McMurdo, en la costa antártica, viajará en un radio aproximadamente constante alrededor del Polo, para volver de nuevo cerca del sitio de lanzamiento. Algunos globos han dado vueltas al continente durante 10 días. Uno de los autores (Swordy) colabora con Dietrich Mueller y Peter Meyer, de la Universidad de Chicago, en la preparación de un detector de 10 metros cuadrados que podría medir rayos cósmicos pesados de hasta 10^{15} eV en tales vuelos. Se trabaja también en otros empeños con vuelos parecidos cerca del Ecuador, que dilatarían los tiempos de exposición a unos 100 días.

A través del espacio intergaláctico

Para investigar los rayos cósmicos portadores de energías más altas todavía —los producidos por fuentes hasta ahora desconocidas— se requieren grandes detectores terrestres, que superen el problema del bajo flujo mediante la observación en enormes extensiones a lo largo de meses o años. La información, sin embargo,

ha de extraerse de las cascadas de partículas secundarias —electrones, muones y rayos gamma— iniciadas en la parte alta de la atmósfera por los núcleos de los rayos cósmicos incidentes. Ahora bien, más que identificar el número atómico de cada núcleo incidente, con tales métodos indirectos sólo podremos extraer las características generales de la composición de los rayos cósmicos sobre una base estadística.

En el suelo, los millones de partículas secundarias producidos por un rayo cósmico se extienden en un radio de cientos de metros. Ya que no es factible cubrir tan inmensa área con detectores, se muestrean las cascadas atmosféricas en unos cuantos cientos de puntos distintos.

El progreso de la técnica ha posibilitado que tales dispositivos almacenen conjuntos de datos cada vez más depurados, afinando así las conclusiones que podamos luego extraer de cada cascada. Con este propósito, el experimento CASA-MIA-DICE en Utah, en el que intervenimos dos de los autores (Cronin y Swordy), mide las distribuciones de electrones y muones en el suelo. También detecta luz de Cherenkov generada por las partículas de la cascada en diversos niveles de la atmósfera. (La radiación de Cherenkov es un tipo de onda de choque óptica producida por las partículas que avanzan más deprisa que la luz en el medio que las rodea.) Estos datos nos permiten reconstruir la cascada de forma más fidedigna y, por ende, calcular con mayor exactitud la energía e