

# INVESTIGACION *y* CIENCIA

JULIO 1999  
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de  
**SCIENTIFIC  
AMERICAN**

***TSUNAMI***

**AGUJEROS NEGROS  
EN LA VIA LACTEA**

**REGENERACION  
DE NEURONAS**



## SECCIONES

4

### HACE...

50, 100 y 150 años.

34

### PERFILES

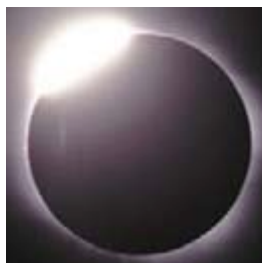
George D. Lundberg:  
el ominoso abuso del poder  
contra la libertad  
de expresión.



36

### CIENCIA Y SOCIEDAD

Europa a media luz...  
Variación estacional  
de nutrientes... Relojes  
circadianos... Bancos  
de semillas... Colaboración  
eurohispanoamericana...  
Consumo de cocaína.



44

### DE CERCA

Medusas urticantes.



24

## Tsunamis

Frank I. González

En la última década,  
los tsunamis se han  
cobrado la vida  
de miles de personas.  
Los avances técnicos  
en su detección  
y seguimiento  
podrían reducir  
el número de  
víctimas.



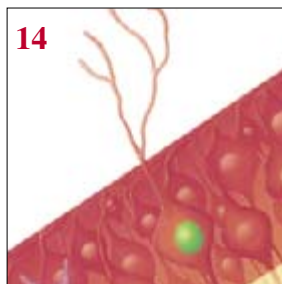
## La huella de los agujeros negros

Jean-Pierre Lasota

Hasta hace poco no había sino pruebas circunstanciales de la existencia de los agujeros negros. Distinguirlos de otros cuerpos es por su propia naturaleza complicado. Pero los astrónomos disponen ahora de una prueba directa: la energía desaparece de volúmenes de espacio sin dejar rastro.



14



## Regeneración de las células nerviosas en adultos

Gerd Kempermann y Fred H. Gage

En contra de lo que se creía, en el cerebro humano adulto se forman nuevas neuronas. El descubrimiento podría ayudar a desarrollar tratamientos para patologías cerebrales irreversibles, como son la enfermedad de Parkinson, la de Alzheimer o el accidente cerebrovascular.

46



**Canguros asesinos y otros marsupiales sanguinarios**

*Stephen Wroe*

Los mamíferos australianos no fueron siempre koalas cautivadores. Durante millones de años, el continente fue el hogar de feroces lobos y leones marsupiales que aterrorizaban a sus pequeñas presas.

54 **Ada y la primera computadora**

*Eugene Eric Kim y Betty Alexandra Toole*

Augusta Ada King fue condesa de Lovelace e hija de Lord Byron, el poeta. Más importante, empero, fue su labor matemática. Generalizó el trabajo de Charles Babbage sobre el Ingenio Analítico y publicó el primer artículo de calado sobre la programación de máquinas computadoras.



60



**Aborígenes de las islas Andamán**

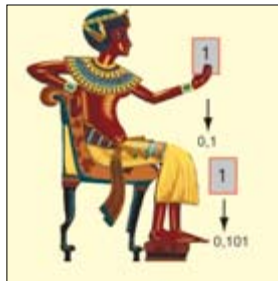
*Sita Venkateswar*

Otrora temidos, estos cazadores-recolectores han habitado las islas Andamán, en el golfo de Bengala, desde hace por lo menos 2000 años. Pero su singularísimo modo de vivir, degradado bajo los gobiernos inglés y de la India corre peligro de desaparecer.

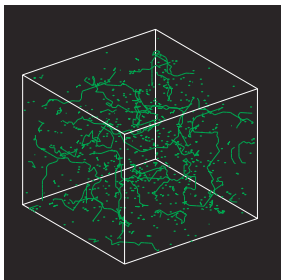
67 **Juegos infinitos y conjuntos grandes**

*Jean-Paul Delahaye*

No todos los juegos son como el ajedrez y las damas, es decir, finitos, de información completa y con empates. En los infinitos se esconden relaciones insospechadas con los sistemas informáticos y la teoría axiomática de conjuntos.



74



**Cuerdas cósmicas conductoras**

*Alejandro Gangui y Patrick Peter*

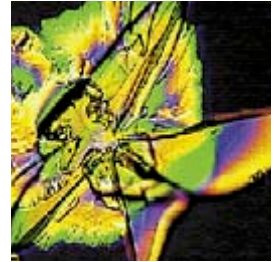
Fruto de la unión entre la física de las partículas elementales y la cosmología, las cuerdas cósmicas conductoras podrían encerrar la clave del progreso de la astrofísica, que nos permita algún día conocer el origen de la materia oscura.

**SECCIONES**

84

**TALLER Y LABORATORIO**

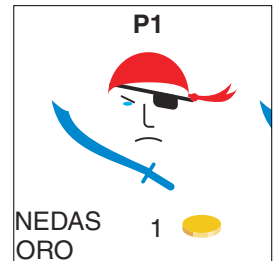
Formaciones cristalinas en el microscopio, por Shawn Carlson



86

**JUEGOS MATEMÁTICOS**

Piratas en apuros, por Ian Stewart



88

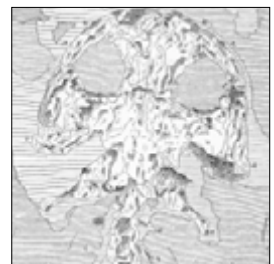
**NEXOS**

Entente cordiale, por James Burke

90

**LIBROS**

Genética... La Tierra... Caos.



96

**IDEAS APLICADAS**

La aspirina, por R. Michael Garavito





Portada: Heidi Noland

### PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-8	Slim Films
9	Lisa Burnett; fuente: Martin Elvis
10-11	Slim Films
12	Slim Films; fuente: Jeffrey E. McClintock
13	Lisa Burnett; fuente: Kristin Menou
14-15	Tomo Narashima
16	Linda Kitabayashi, Instituto Salk
17	Tomo Narashima
18	James Aronovsky
19	Lisa Burnett
24-25	Ilustración fotográfica: Jana Brenning; fotografías: Robert Beck y Kathleen Norris Cook
26	Palani Mohahn
27	Laurie Grace
28	Paolo Bosio
29	Jennifer C. Christiansen
30	Kioto News Service (arriba), NOAA (abajo)
31	Departamento de Geología e Industrias Minerales de Oregón
32	Corbis (fotografías), Laurie Grace (dibujo)
33	Michele G. Bullock, NOAA Corps
46-47	Roberto Osti
48-49	Roberto Osti y Anne Musser
50	Anne Musser (arriba), Norman O. Tomalin (abajo, izquierda), John Cancalosi (centro) y Erwin y Peggy Bauer (derecha)
51	Stephen Wroe (arriba), Lisa Burnett (abajo)
52	Roberto Osti y Anne Musser
54-55	Retrato: cortesía del Museo Británico; Sello: © Oficina de Correos Británica; Fondo: cortesía de la Biblioteca del Museo de Ciencias de Londres
57	Reimpresión de <i>Scientific Memoirs</i> ; dirigido por Richard Taylor, vol. III, 1843
58	Biblioteca del Museo de Ciencias de Londres
59	Corbis-Bettmann
60	Bourne & Sheperd
61	Madhusree Mukerjee
62-63	Madhusree Mukerjee (fotografías), Laurie Grace (mapa y motivos), fuente: <i>The Jarawa</i> , por Jayanta Sarkar
64-65	Madhusree Mukerjee
66	Sita Venkateswar
68-72	Pour la Science
74-75	Alejandro Gangui y Patrick Peter
76	O. D. Lavrentovich
77	P. Avelino y P. Shellard
78-83	Alejandro Gangui y Patrick Peter
84	Ely Silk
85	Daniels & Daniels
86-87	Bryan Christie
96	George Retseck y Bryan Christie

### COLABORADORES DE ESTE NUMERO

#### Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *La huella de los agujeros negros*; José M.ª Valderas Martínez: *Regeneración de las células nerviosas en adultos y Nexos*; Sònia Ambròs: *Tsunamis*; Joandomènec Ros: *Canguros asesinos y otros marsupiales sanguinarios*; Luis Bou: *Ada y la primera computadora, Juegos infinitos y conjuntos grandes y Juegos matemáticos*; José Manuel García de la Mora: *Aborígenes de las islas Andamán*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio e Ideas aplicadas*

### 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

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, *Senior Associate Editor*; Timothy M. Beardsley y Gary Stix,

*Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler,

*On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Madhusree

Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek y Glenn Zorpette, *Editors*;

Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*

PRODUCTION Richard Sasso

CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

CO-CHAIRMAN Rolf Grisebach

PRESIDENT Joachim P. Rosler

### 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:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta. 52,89 euro	16.000 pta. 96,16 euro
Extranjero	11.150 pta. 67,01 euro	20.700 pta. 124,41 euro

#### Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro

Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados

es el mismo que el de los actuales.

### DISTRIBUCION

#### para España:

#### MIDESA

Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)

28108 Alcobendas (Madrid)

Tel. 91 484 39 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 14

Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

Copyright © 1999 Scientific American Inc., 415 Madison Av., New York N. Y. 10017.

Copyright © 1999 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 fotocopros 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

**TENSIÓN NERVIOSA Y ESQUIZOFRENIA.** «La corteza suprarrenal parece estar implicada en la esquizofrenia y quizás en otros estados de salud mental. Una muestra de pacientes esquizofrénicos reveló una sorprendente incapacidad de reacción mediante un aumento de esteroides en pruebas de tensión psíquica, y ello pese a que su secreción normal de esteroide difería muy poco de los niveles medios de la población. Así pues, en los esquizofrénicos la corteza suprarrenal no puede adaptar su actividad a los cambios de situación. Podría ser que deficiencias químicas de esta índole, acaso de origen genético, dejen a ciertas personas más vulnerables ante las tensiones de la vida.»

**PAISAJE LUNAR.** «La explicación verosímil de los cráteres de la Luna los atribuye a los tremendos impactos de enormes meteoritos. Para sacar una conclusión más definitiva, podemos recurrir al conocimiento acumulado durante la última guerra acerca de los cráteres abiertos en la tierra por bombas de aviación, minas y granadas de artillería. Se evidencia que el único tipo de cráter que se corresponde con los lunares es el sencillo hoyo que se forma por la aplicación de potencia explosiva. Esos hoyos presentan siempre la misma forma general.»

## ...cien años

**FERROCARRILES BAJO TIERRA.** «El Túnel del East River forma parte de las extensas ampliaciones contempladas por el Ferrocarril de Long Island. Desde la estación cercana a la Plaza del Ayuntamiento, en Brooklyn, el túnel llegará hasta la actual estación de Flatbush Avenue, por donde pasará a 5,5 metros por debajo del nivel de la calle (véase ilustración), y hasta la estación de Franklin Avenue. Los coches que se emplearán en el túnel serán más o menos del mismo tamaño que los del Puente de Brooklyn, de unos 15 metros de largo y con una capacidad para 60 viajeros sentados.»

**ENSAYOS DE CASCO DE BUQUE.** «El valor de los experimentos basados en el remolque de modelos a pequeña escala de buques, al objeto de deducir la resistencia de una embarcación a tamaño natural, fue puesto de manifiesto, hacia 1870, por Mr. William Froude. La Agencia de Construcción de nuestro Departamento de la Armada ha terminado

un estanque experimental, de más de 140 metros de largo. Se anuncia ahora la finalización y la instalación de las máquinas e instrumentos especiales. Una carro de remolque, accionado por electricidad, transporta el aparato de medida. El aparato dinamométrico se ha diseñado evitando el uso de palancas u otros dispositivos que supongan rozamiento, y aquí también se echa mano de la electricidad. El tambor está dotado con aparatos para registrar tiempos y distancias, mediante los cuales puede determinarse la fuerza de tracción.»

**ABASTECIMIENTO DE MARFIL.** «Es obvio que el marfil africano va a escasear cada vez más. Si no hubiera otra fuente de abastecimiento, este bello material no tardaría en alcanzar precios prohibitivos. Pero en las tundras heladas de Siberia existen reservas que bastan para abastecer el mercado mundial durante muchos años. Ese marfil es producto del mamut (*Elephas primigenius*), una especie emparentada con el elefante indio.»

## ...ciento cincuenta años

**TEMPERAMENTO HUMILDE, MAL OLOR.** «Quienes han visitado las regiones montañosas de Siria, Palestina y la Península del Sinaí saben muy bien que el camello resiste igual los ásperos senderos montañosos que las móviles arenas del desierto. Sus plantas endurecidas soportan el fuego de la arena y los cantos afilados. No hay, pues, razones para que el camello no pueda resultar eficaz auxiliar del hombre en las praderas de Texas y en las montañas de México, Nuevo México y California.» [Nota de la Redacción: En 1855 Jefferson Davis, Secretario de Guerra, fue autorizado a comprar camellos "para usos militares" en un experimento que fracasó.]

**¿ERA DORADA O HIERBA MÁS VERDE?** «Hoy es moda, afirma Macaulay, situar la era dorada de Inglaterra en unos tiempos en que hasta los nobles vivían sin unas comodidades cuya carencia sería intolerable para los modernos lacayos. Nosotros también seremos envidiados. Puede que en el siglo XX un campesino de Dorsetshire se considere miserablemente pagado con 15 chelines por semana; que un obrero esté tan poco acostumbrado a cenar sin carne como ahora lo está a comer pan de centeno; que la policía sanitaria y los descubrimientos médicos hayan añadido algunos años a la duración media de la vida humana.»



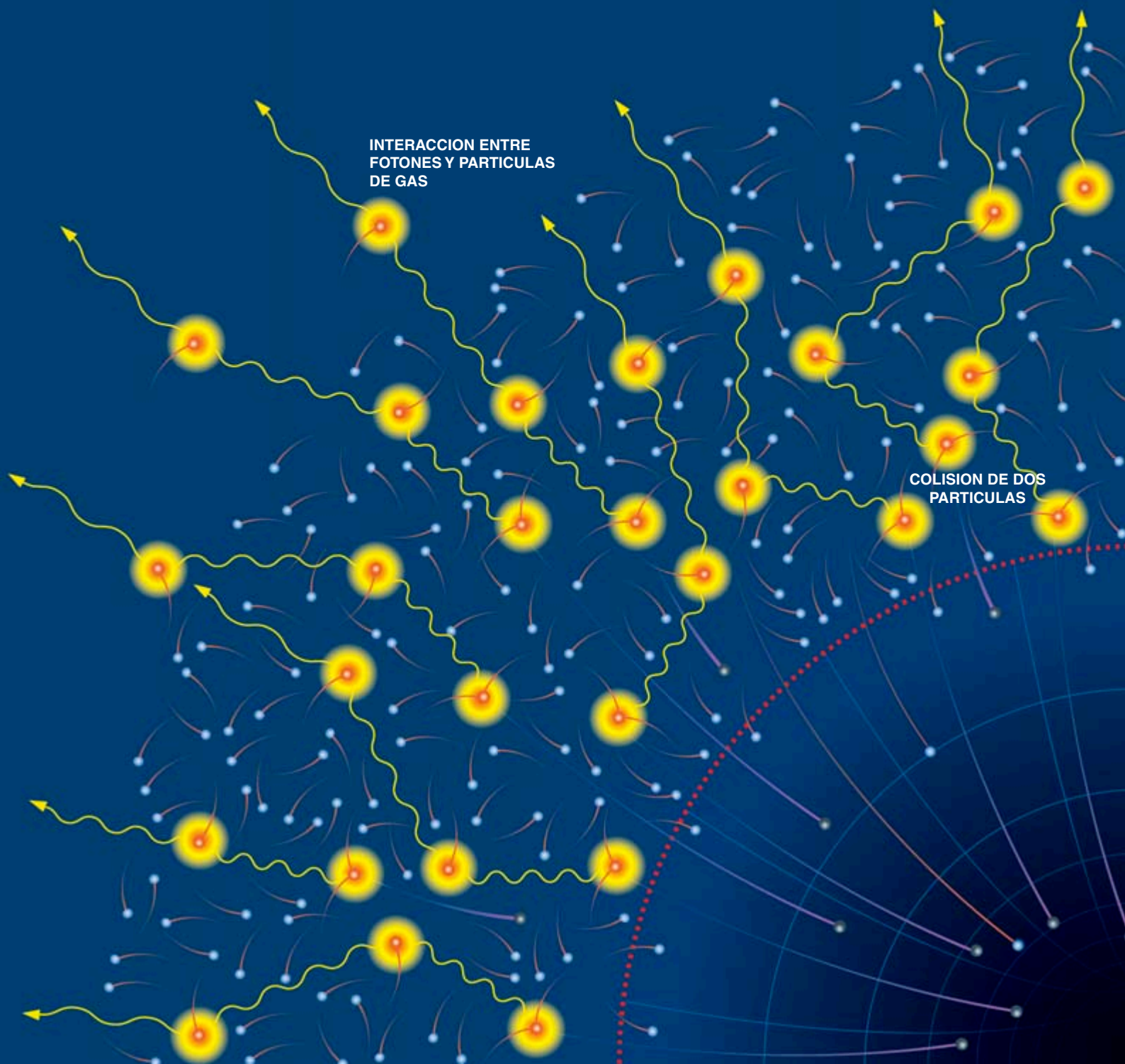
El nuevo tranvía subterráneo de Atlantic Avenue en Brooklyn



# La huella de los agujeros negros

*Hasta hace poco sólo había pruebas circunstanciales de la presencia de agujeros negros. Pero se ha dado ya con un indicio inequívoco: la existencia de volúmenes de espacio donde la energía desaparece sin dejar ni rastro*

Jean-Pierre Lasota



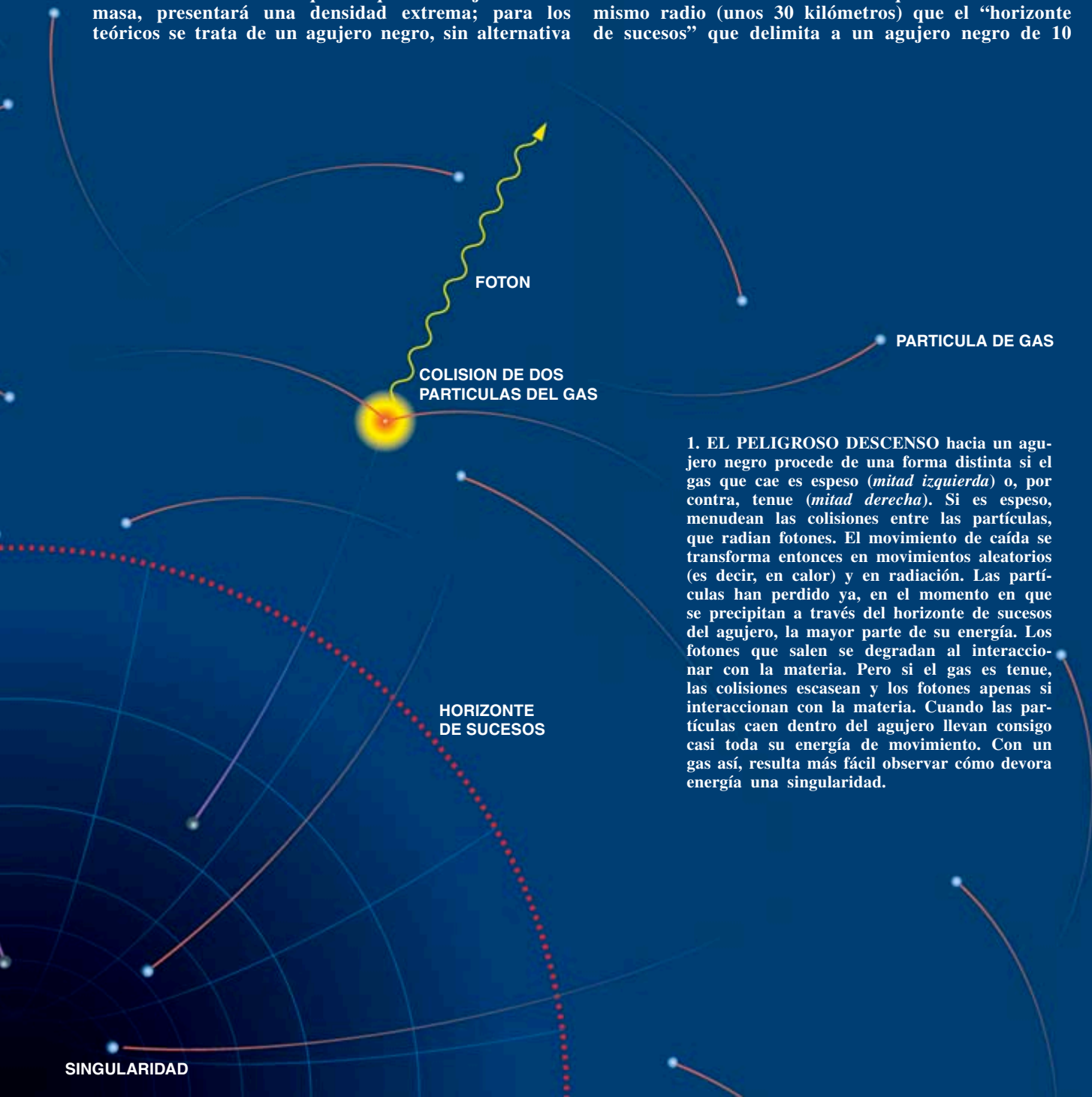


Los astrónomos notan la presencia de los agujeros negros en el universo. Estos cuerpos apasionantes se encuentran en el centro de muchas galaxias (nuestra Vía Láctea entre ellas), forman sistemas binarios con estrellas normales y hasta puede que vaguen solos por el medio interestelar. Se trata de los objetos más compactos del universo y contienen la forma más extrema de materia que conoce la ciencia: la concentración de masas arbitrariamente grandes en un punto matemático casi. Plantean, en consecuencia, grandes dificultades para la observación. A la postre, son negros. No emiten radiación electromagnética, al menos no con una intensidad que podamos esperar detectar alguna vez.

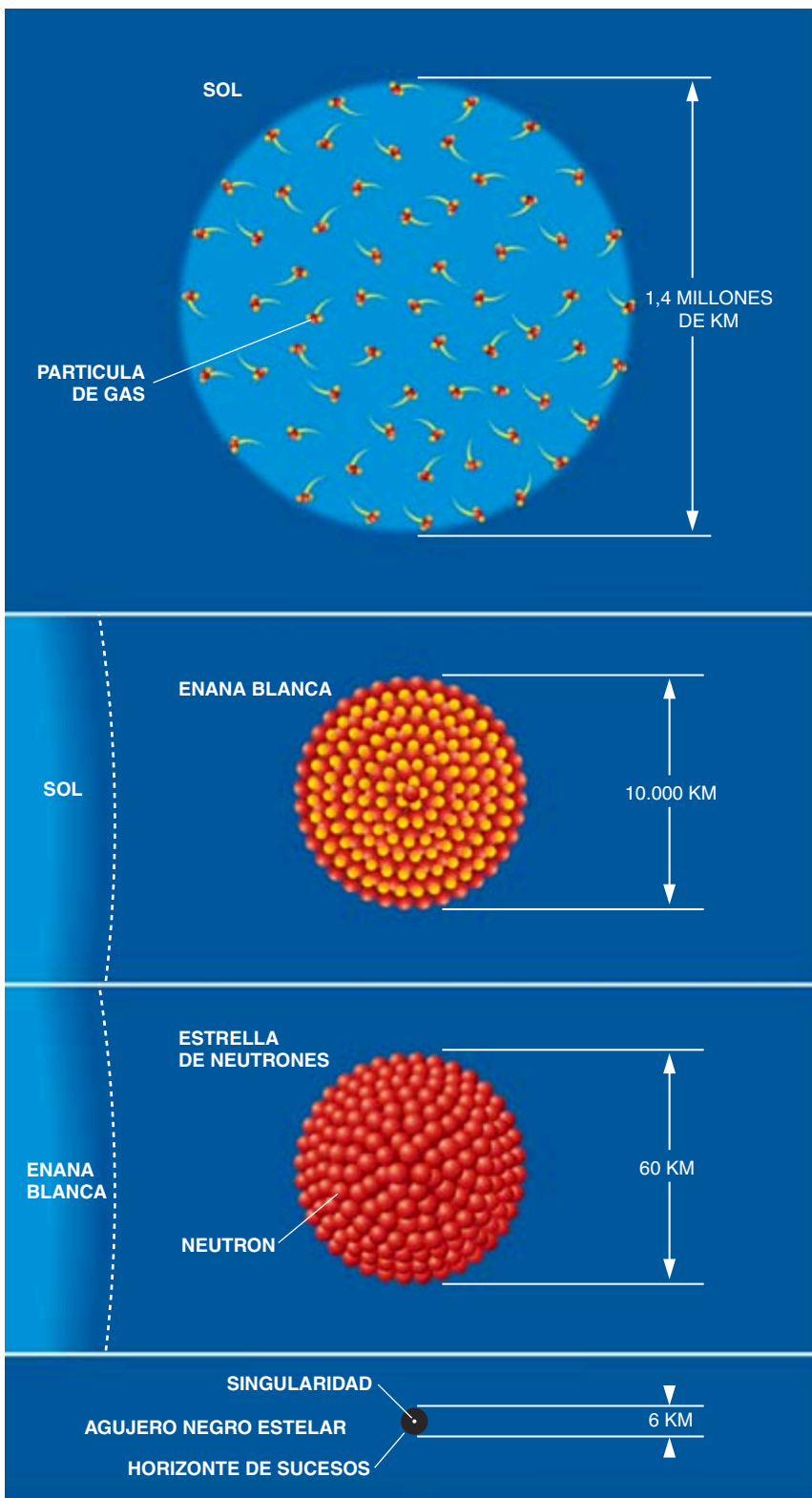
Para inferir su existencia hay que basarse en dos líneas de argumentación indirectas. Cerca del centro de una galaxia las estrellas se mueven a tal celeridad, que escaparían de la galaxia si no las sujetase la gravedad de una masa inmensa, de hasta un millón de veces la solar. Cualquiera que sea objeto de tal masa, presentará una densidad extrema; para los teóricos se trata de un agujero negro, sin alternativa

posible. En segundo lugar, muchos centros galácticos y sistemas estelares binarios emiten radiación y materia a un ritmo descomunal. Para ello requieren un proceso extraordinariamente eficaz de generación de energía. En teoría, no hay máquina más eficaz que un agujero.

Con todo, esas pruebas reunidas sólo demuestran la existencia de algún tipo de cuerpo compacto. No permiten declarar que nos hallamos ante agujeros negros en razón de alguna de sus notas distintivas. Se infiere por defecto la presencia de un agujero negro. La identificación resulta harto espínosa en los sistemas binarios, al existir otro cuerpo compacto que comparte con los agujeros algunas propiedades, la estrella de neutrones. Esta forma extrema de la materia —comprimida por la gravedad hasta adquirir una densidad colosal— es, en esencia, un núcleo atómico del tamaño de una ciudad, donde acaban su vida muchas estrellas de masa grande. Una estrella de neutrones de la misma masa que el Sol tendrá el mismo radio (unos 30 kilómetros) que el “horizonte de sucesos” que delimita a un agujero negro de 10



1. EL PELIGROSO DESCENSO hacia un agujero negro procede de una forma distinta si el gas que cae es espeso (*mitad izquierda*) o, por contra, tenue (*mitad derecha*). Si es espeso, menudean las colisiones entre las partículas, que radian fotones. El movimiento de caída se transforma entonces en movimientos aleatorios (es decir, en calor) y en radiación. Las partículas han perdido ya, en el momento en que se precipitan a través del horizonte de sucesos del agujero, la mayor parte de su energía. Los fotones que salen se degradan al interactuar con la materia. Pero si el gas es tenue, las colisiones escasean y los fotones apenas si interaccionan con la materia. Cuando las partículas caen dentro del agujero llevan consigo casi toda su energía de movimiento. Con un gas así, resulta más fácil observar cómo devora energía una singularidad.



**2. LAS ESTRELLAS, VIVAS O MUERTAS,** son campos de batalla donde se enfrentan la gravedad y una u otra forma de presión hacia fuera. El equilibrio de fuerzas determina el tamaño de la estrella. (Los tres objetos representados debajo del Sol tienen la misma masa que él.) En una estrella viva ordinaria, el Sol por ejemplo, la presión es gaseosa y se alimenta en última instancia de las reacciones nucleares del núcleo. En una enana blanca —el cadáver denso y encendido de una estrella similar al Sol— la presión se debe a la “degeneración” cuántica, creada al estar los electrones apretadamente empaquetados. En una estrella de neutrones, residuo de la cremación explosiva de una estrella de gran masa, los átomos están machacados y sus núcleos se apiñan. En un agujero negro no hay presión hacia fuera; nada contrarresta la gravedad y la estrella se derrumba hasta convertirse en un punto matemático casi, dentro de una superficie de no retorno, el horizonte de sucesos.

**masas** solares. Las propiedades observables, la temperatura de la materia que cae es una, no permiten distinguir entre ambos objetos. En la investigación sobre agujeros negros ocupa un lugar central la cuestión de cómo distinguirlos de las estrellas de neutrones.

**E**n los últimos años se ha encontrado una manera de hacerlo. Se basa en una diferencia notable que separa de las estrellas de neutrones a los agujeros negros: aquéllas tienen superficies duras donde puede acumularse la materia; los segundos, en cambio, se tragan la materia que cae en ellos y hacen que desaparezca para siempre. Esa disparidad comporta una distinción sutil en la radiación emitida en la vecindad de cada tipo de cuerpo. Apoyados en ello, se muestra que los objetos más extraños del cosmos no son pura entelequia.

Los agujeros negros deben la eficacia de su mecanismo a una intensísima gravedad. Del horizonte de sucesos no puede escapar nada, ni aunque se mueva a la velocidad de la luz. Esa superficie atrae a los objetos a una velocidad también muy alta; de camino puede que choquen con otros y se destruyan. En consecuencia, en la vecindad del agujero la materia se calienta. Puesto que los objetos se mueven casi a la velocidad de la luz, la energía cinética disponible para su transformación en calor es comparable a la encerrada en su masa en reposo ( $E = mc^2$ ). Para que un objeto regresase a su punto de partida, lejos del agujero, habría de prescindir de una parte considerable de su masa, convertida en energía pura. En este sentido, los agujeros negros transforman masa en reposo en energía térmica.

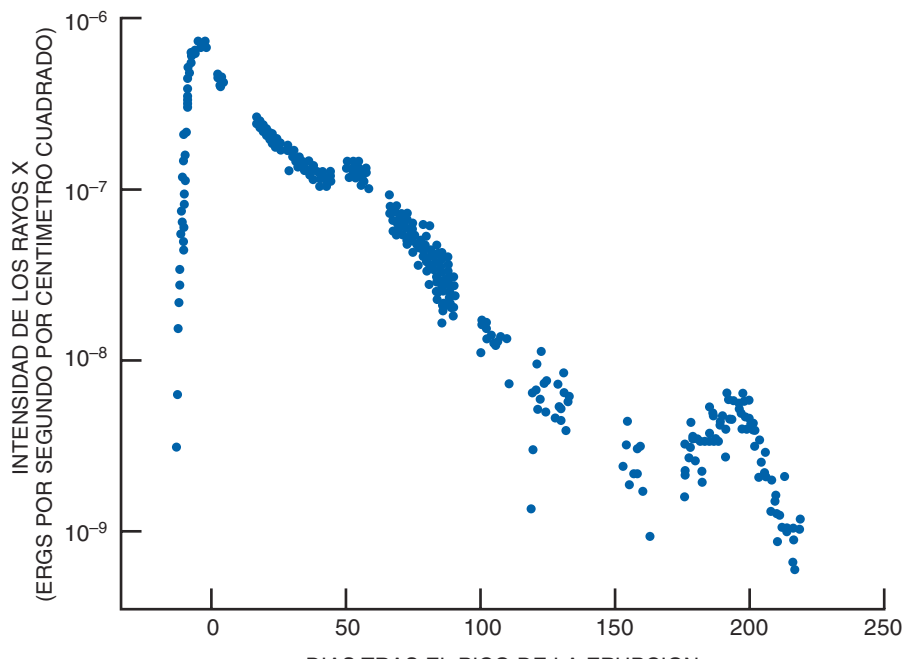
La eficacia de esta conversión depende de la velocidad a la que rote el agujero negro. El momento angular es una de las contadas propiedades de la materia que no se pierde cuando se incorpora a un agujero negro. Aunque no se puede ver directamente la rotación del agujero, provoca que, en la vecindad del horizonte, se deforme el espacio-tiempo. Pero un agujero negro no puede girar alrededor de sí mismo a una velocidad arbitrariamente grande. Por encima de determinado valor, su superficie dejaría de existir. Un agujero que girase casi a su velocidad máxima convertiría el 42 por ciento de la masa que le cayese en energía; uno estático, sólo el 6 por ciento. Por mor de comparación, la eficacia de la fusión termonuclear

de las estrellas es de un 0,7 por ciento; la de la fisión del uranio, el 0,1 por ciento.

Si las partículas que rodean el agujero comparten entre sí su energía —mediante colisiones, por ejemplo—, la temperatura que alcanza la materia en su caída hacia el agujero resulta difícilmente imaginable. La temperatura típica de un protón que esté justo más acá del horizonte corresponde a la conversión de buena parte de su masa en energía pura, unos  $10^{13}$  grados. A una temperatura así, la materia debería ser un ascua de rayos gamma. Pero aunque es fácil calentar los protones (y los iones en general), no son buenos radiadores de energía; en las colisiones transferirán su energía a mejores emisores, en particular a los electrones, que expiden fotones de menores energías, de rayos X por ejemplo. Debería verse, pues, procedente de una espesura de electrones, una intensa emanación de rayos X.

Y eso es, en efecto, lo que se observa en ciertos sistemas de rayos X binarios. El primero se descubrió en 1962. Desde entonces se han identificado cientos. Se trata de las fuentes de rayos X más brillantes del cielo, formadas, según se cree, por un objeto que no se ve y una estrella ordinaria que gira a su alrededor. Algunos emiten radiación sin cesar, otros, llamados sistemas transitorios de rayos X, lo hacen sólo de vez en cuando y durante unos meses cada vez; la mayor parte de su vida la pasan silentes, emitiendo muy pocos rayos X o ninguno. En su mayoría sólo se han avistado en una ocasión. Emiten de  $10^{30}$  a  $10^{31}$  watts en forma de rayos X, es decir, hasta 100.000 veces la producción total del Sol.

La distribución de energía de esta radiación se acerca a la dibujada por la radiación del cuerpo negro. Es similar a los espectros que emiten objetos tan dispares como el Sol, un carbón encendido y el cuerpo humano, sólo que mucho más intensa. El espectro de cuerpo negro lo producirá un medio “ópticamente espeso”, lo bastante



**3. LAS ERUPCIONES DE RAYOS X** de esta fuente transitoria llegaron al máximo el 13 de agosto de 1975. En unas semanas la intensidad (*eje vertical*) se multiplicó al menos por 10.000. Esta fuente de rayos X, la A0620-00, de la constelación del Unicornio era la más brillante que se hubiese visto. Se había observado una erupción de luz visible en la misma región 58 años antes; mas por entonces no había detectores de rayos X.

denso como para que los fotones no puedan abandonarlo sin sufrir muchas colisiones con los electrones. Las colisiones dispersan, destruyen y crean electrones, oscurecen la fuente original de la radiación y promedian los detalles de cada interacción. El espectro resultante depende sólo de la temperatura y tamaño de la superficie emisora. En un gas “ópticamente tenue” los fotones apenas si experimentan interacciones antes de escapar de él; el espectro dependerá de las propiedades concretas de esa materia.

Se ha inferido que la temperatura de los rayos X de las binarias es de  $10^7$  grados, compatible con la esperada para un agujero negro. Para generar la emisión que se observa el agujero tendría que absorber de  $10^{-9}$  a  $10^{-8}$  masas solares al año, lo que concuerda con los cálculos de la velocidad a la que pierden masa las estrellas ordinarias que los acompañan. Por tanto, las binarias de rayos X podrían ser la mejor prueba de que existen agujeros negros con una masa del orden de la de una estrella.

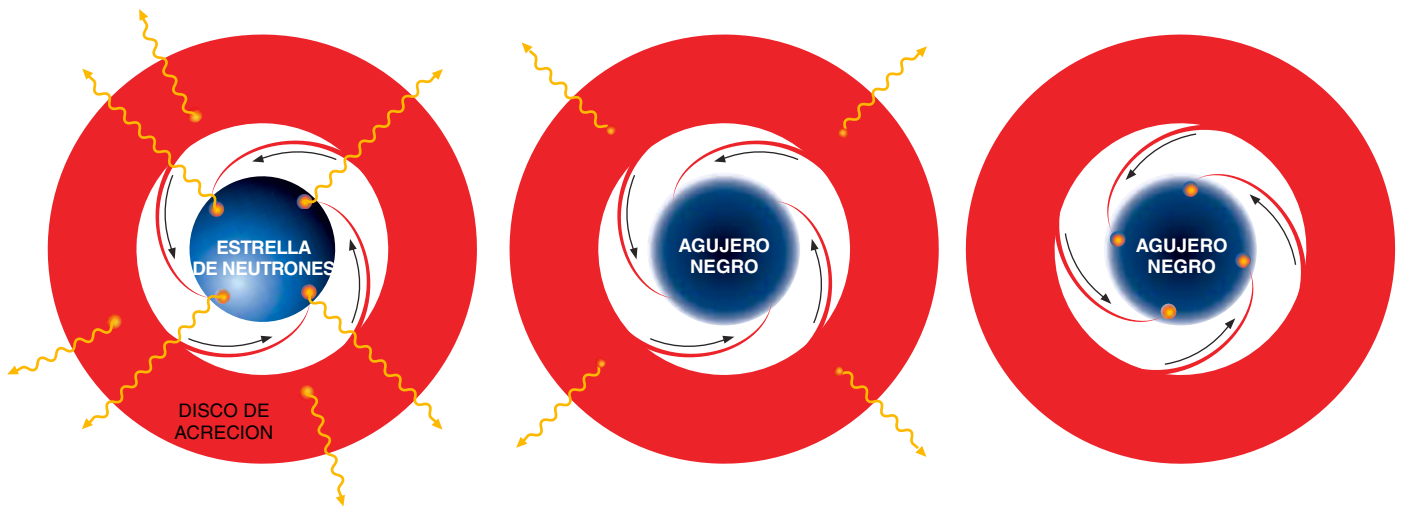
Pero esos mismos argumentos se esgrimen también a propósito de las estrellas de neutrones. Aunque menos poderosas que un agujero negro no dejan de ser unas máquinas formidables. La materia se estrella contra su

superficie a la mitad de la velocidad de la luz y se convierte en energía con una eficacia del diez por ciento, no muy lejos de la de un agujero típico.

Se sabe que en muchos sistemas binarios el objeto compacto no es un agujero negro. Se cree que los radio-púlsares encontrados en las binarias son, como los púlsares individuales, estrellas de neutrones magnetizadas que rotan velozmente. Los agujeros negros astronómicos no pueden tener campos magnéticos. Apenas si evidencian rasgos distintivos y no pueden generar las pulsaciones regulares observadas en los púlsares. Ni los púlsares de rayos X pueden ser agujeros negros. Una pulsación estable y regular excluye la presencia de un agujero negro. Hasta las explosiones irregulares de rayos X requieren que haya una estrella de neutrones que proporcione una superficie donde se acumule la materia y estalle de vez en cuando.

Pero la recíproca no es cierta. De la ausencia de pulsaciones o explosiones no se sigue que haya un agujero negro. No se espera, por ejemplo, que se produzcan explosiones de rayos X en una estrella de neutrones a la que se agregue materia a un ritmo muy rápido. Como la tasa de acreción varía con el tiempo, caben las sorpresas.

JEAN-PIERRE LASOTA quería de joven estudiar filología e historia. Pero bajo el dominio comunista en su Polonia natal, la docencia de las humanidades estaba impregnada de ideología marxista. Su padre le convenció de que optara por la física. Se ha dedicado a la teoría de los agujeros negros.



**4. TRES FORMAS DE ACRECION** dan tres maneras de desprender radiación. Cuando un gas cae en espiral sobre una estrella de neutrones libera gran parte de su energía al chocar con ella (*izquierda*). Pero el gas que cae dentro de un agujero negro no sufre un impacto; desaparece tras el horizonte, sencillamente. O el gas se

va desprendiendo de su energía antes de alcanzar el horizonte (*centro*) —como ocurriría si su densidad es grande, porque entonces sus átomos chocarán unos con otros— o se la llevará consigo a la tumba (*derecha*). Siguiendo el hilo de la acreción los astrónomos descubren el tipo de objeto involucrado.

Recuérdese que se sospechaba que el sistema Circinus X-1 albergaba un agujero negro hasta que empezó a mostrar explosiones de rayos X.

Los agujeros negros tienen dos propiedades que pueden valer para discernir si cierto sistema binario incluye uno: carecen de superficie dura y no hay límites para su masa. La masa de un agujero está determinada por cómo se formó —en particular, por la masa de la estrella a partir de la cual se desarrolló— y por la cantidad de materia absorbida. Ningún principio de la física señala qué masa llegará a tener un agujero negro. Por otro lado, las estrellas de neutrones no pueden tener una masa arbitrariamente grande.

La masa de cualquier objeto, agujeros negros excluidos, está limitada por la capacidad que manifieste de soportar su propio peso. En las estrellas ordinarias los movimientos térmicos de las partículas —impulsados por la fusión nuclear— producen la presión que impide el derrumbe. Pero las estrellas muertas, como las de neutrones y las enanas blancas, no generan energía. En ellas la presión que se opone a la atracción gravitatoria es el resultado de la degeneración, fuerza pasiva originada por las interacciones mecánicas cuando la densidad es extrema.

Según el principio de exclusión de Pauli, el número de fermiones (clase de partículas elementales que incluye a electrones, protones y neutrones) que pueden embutirse en un espacio dado tiene un límite. En una enana blanca los electrones tienden a ocupar

los niveles de menor energía posible. Ahora bien, en razón del principio de Pauli no todos pueden estar en el nivel más bajo. Sólo puede haber dos electrones en cada estado de energía. Los electrones, pues, se van apilando hasta llegar a un determinado nivel de energía, que depende de la densidad. Este apilamiento crea la presión que contrarresta a la gravedad. (El mismo efecto impide que los niveles electrónicos de los átomos se confundan unos con otros.) Como demostró Subrahmanyan Chandrasekhar en 1930, la masa de una estrella enana blanca ha de ser menor de 1,4 masas solares.

En las estrellas de neutrones se adquiere tal densidad, que ni siquiera la degeneración electrónica puede resistir la gravedad. Los átomos se vienen abajo, los protones y los electrones se mezclan y crean neutrones, los núcleos atómicos se unen. El resultado es una bola de neutrones. Las partículas, al no poder ocupar todas el mismo nivel de energía, se apilan y generan una presión hacia fuera.

Las propiedades de la materia nuclear degenerada se conocen mal porque hay que tomar en cuenta las interacciones fuertes entre los neutrones (y los quarks que los constituyen). Por esta razón no se sabe con seguridad cuál es la masa máxima de una estrella de neutrones, si bien un argumento sencillo impone un máximo absoluto. En una estrella degenerada, la atracción gravitatoria crece con la masa. Para resistir esa atracción aumentada, la materia se vuelve más rígida. Por

encima de cierta masa crítica llegaría a serlo tanto, que el sonido se propagaría a mayor velocidad que la luz, contraviniendo los principios básicos de la relatividad. Esa masa crítica sextuplica la solar. Según un cálculo más detallado efectuado por grupos estadounidenses, franceses y japoneses la masa máxima no llega a las tres masas solares. Ninguna estrella de neutrones que se conozca supera las dos masas solares.

Por eliminación, se llama agujero negro a un objeto compacto cuya masa supere las tres masas solares. La medición de las velocidades de las estrellas, combinada con las leyes de Kepler del movimiento orbital, establece un límite inferior a las masas estelares en un sistema binario. Se conocen hasta siete binarias transitorias de rayos X en las que el objeto compacto satisface este criterio de existencia de un agujero negro. Con algunos supuestos adicionales, se ha calculado que la verdadera masa de estos agujeros varía entre las 4 y las 12 masas solares.

La identificación de esos objetos con los agujeros negros sería más fiable si mostrasen la otra característica que una estrella de neutrones no puede tener: un agujero negro carece de superficie dura. El horizonte de sucesos es una superficie de la que no se vuelve. Todo lo que la atraviesa desaparecerá para siempre de nuestro universo.

Una porción de plasma caliente que caiga en un agujero negro no tendrá tiempo suficiente para radiar toda su energía térmica; su calor