

EL NACIMIENTO DEL AMAZONAS • GRANDES TELESCOPIOS DEL FUTURO

# INVESTIGACION *y* CIENCIA

JULIO 2006  
6,00 EUROS

Edición española de  
**SCIENTIFIC  
AMERICAN**

## LOS PRIMEROS MICROSEGUNDOS

COMPUTADORES DE ADN

FULGURACIONES  
SOLARES

ENFERMEDAD  
DE ALZHEIMER

HISTORIA  
DE LA REGLA  
DE CALCULO

FLUCTUACIONES  
CLIMATICAS



3

**HACE...**

50, 100 y 150 años.

4

**APUNTES**

Cosmoquímica...  
Microbiología...  
Parasitología...  
Astronomía...  
Neurología...  
Física y sociedad.

30

**CIENCIA Y SOCIEDAD**

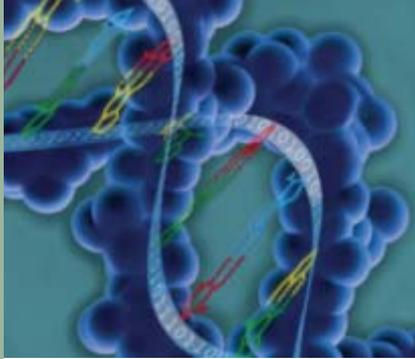
La transferencia de electrones...  
Nuestro entorno estelar...  
La nuez de Brasil...  
La proteína PLZF.



36

**DE CERCA**

El sexto sentido.



14

## Computadores de ADN

*Ehud Shapiro y Yaakov Benenson*

El potencial computador de las moléculas biológicas da origen a máquinas diminutas que hablan el lenguaje de la célula.

22

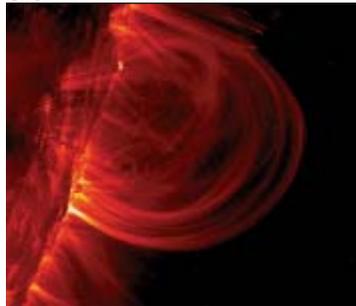
## El nacimiento del Amazonas

*Carina Hoorn*

A través del estudio de la formación del mayor río del mundo nos es dado conocer las razones de la extraordinaria abundancia de vida vegetal y animal en la pluviselva amazónica.



38



## El origen de las fulguraciones solares

*Gordon D. Holman*

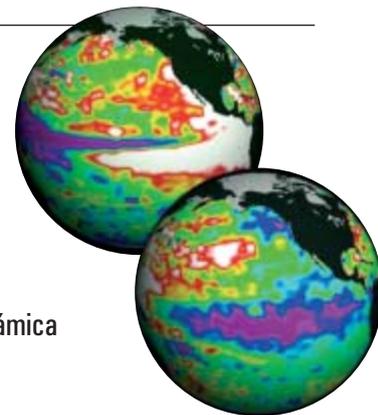
La astronomía de observación comienza a desentrañar los mecanismos que causan estas inmensas erupciones de la atmósfera del Sol.

46

## Los efectos ecológicos de las fluctuaciones climáticas

*Mauricio Lima*

Para entender las interacciones entre el clima y los ecosistemas, no basta la mera descripción de correlaciones entre cambios demográficos y circunstancias meteorológicas. A la teoría de la dinámica de poblaciones le corresponde un papel esencial.



54



## Desactivar la enfermedad de Alzheimer

*Michael S. Wolfe*

La investigación reciente sugiere estrategias para bloquear los procesos moleculares que conducen a este trastorno neurodegenerativo.

## 6 Los primeros microsegundos

*Michael Riordan y William A. Zajc*

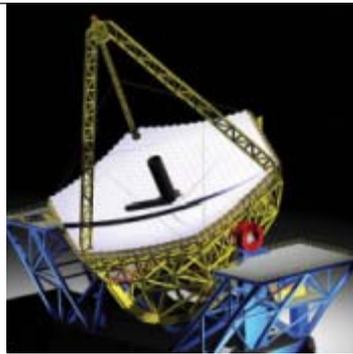
Con ingeniosos experimentos se han reproducido las condiciones del universo naciente.



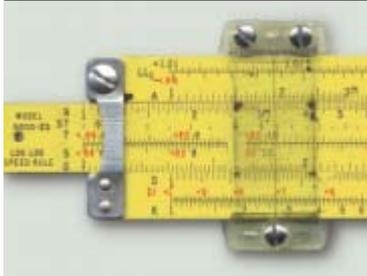
## 62 Los grandes telescopios del futuro

*Roberto Gilmozzi*

La versión astronómica de la ley de Moore establece que los telescopios doblan su tamaño cada pocas décadas. Pero los ingenieros creen que podrán construir un telescopio tres, cinco e incluso diez veces mayor de aquí a diez años.



## 70



## Historia de la regla de cálculo

*Cliff Stoll*

Antes de la llegada de las calculadoras electrónicas, científicos e ingenieros se servían de la regla de cálculo.

## 78 Orígenes de la teoría de nudos

*Daniel S. Silver*

Las investigaciones sobre nudos surgieron del esfuerzo de tres físicos escoceses de la época victoriana por aplicar ese conocimiento a las cuestiones fundamentales del universo.



## 86 CURIOSIDADES DE LA FÍSICA

Círculos de piedras,  
por Jean-Michel Courty  
y Edouard Kierlik



## 88 JUEGOS MATEMÁTICOS

Otras formas de contar,  
por Juan M.R. Parrondo



## 90 IDEAS APLICADAS

Radiografía digital,  
por Mark Fischetti



## 92 LIBROS

Revolución científica,  
Vísperas newtonianas.



# INVESTIGACION CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.<sup>a</sup> Valderas Gallardo  
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella  
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez  
Laia Torres Casas

PRODUCCIÓN M.<sup>a</sup> 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.<sup>a</sup>  
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 John Sargent

## 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.<sup>a</sup>  
08021 Barcelona

## PUBLICIDAD

### Madrid:

MOSAICO COMUNICACION, S. L.  
Santiago Villanueva Navarro  
Tel. y fax 918 151 624  
Móvil 661 472 250  
mosaicocomunicacion@yahoo.es

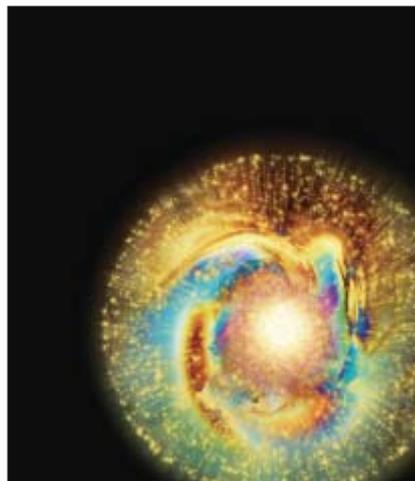
### Cataluña:

QUERALTO COMUNICACION  
Julián Queraltó  
Sant Antoni M.<sup>a</sup> Claret, 281 4.º 3.<sup>a</sup>  
08041 Barcelona  
Tel. y fax 933 524 532  
Móvil 629 555 703

## COLABORADORES DE ESTE NUMERO

### Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *Los primeros microsegundos*; Joandomènec Ros: *El nacimiento del Amazonas*; M.<sup>a</sup> Rosa Zapatero: *El origen de las fulguraciones solares*, *Los grandes telescopios del futuro*; Juan Manuel Gonzalez Mañas: *Desactivar la enfermedad de Alzheimer*; Luis Bou: *Historia de la regla de cálculo*, *Orígenes de la teoría de nudos*; J. Vilardell: *Hace....*, *Apuntes*, *Curiosidades de la física e Ideas aplicadas*



Portada: Jean-Francois Podevin

## SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.  
Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup>  
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 © 2006 Prensa Científica S.A. Muntaner, 339 pral. 1.<sup>a</sup> 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

**UN OJEJO AL ÁTOMO.** «Hasta los colegiales más retrasados saben hoy de la existencia de los átomos. Saben incluso qué aspecto tienen. La imagen de un pequeño núcleo esférico envuelto en una nube de electrones constituye la imagen distintiva de nuestros tiempos. En 1951 el autor comenzó a pensar en otro modo de examinar los núcleos. La idea era bombardearlos con electrones ultraveloces y observar cómo éstos se desviaban, o, en el lenguaje de los físicos, se dispersaban. En 1951, en la Universidad de Stanford se estaba construyendo un gran acelerador lineal capaz de generar haces de electrones con energías cercanas a los mil millones de electronvolt. Las correspondientes longitudes de onda serían del orden de unos pocos fermi, lo bastante cortas para revelar con un detalle considerable la estructura nuclear. —Robert Hofstadter.» [Nota de la redacción: en 1961, Hofstadter recibió el premio Nobel de Física por este trabajo.]

**ALEGRÍA COMUNISTA.** «A los catorce físicos estadounidenses y a los siete británicos que el mes pasado asistieron en Moscú a la conferencia sobre física de altas energías les impresionó la amabilidad de sus anfitriones, así como la ausencia de secretismo. La atmósfera relajada parecía deberse, al menos en parte, a los cambios políticos dentro de la Unión Soviética. Informó Victor F. Weisskopf, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, que las investigaciones soviéticas ya se estaban beneficiando del regreso a las universidades e institutos de numerosos científicos que habían estado internados en campos de trabajo. La liberación de presos, afirmó, ha contribuido a eliminar el ambiente de temor en la Unión Soviética.»

## ...cien años

**UNA GALERA ROMANA IMPERIAL.** «Sepultadas bajo las aguas del lago Nemi yacen dos galeras de recreo, que pertenecieron a los emperadores Tiberio y Calígula. Contienen tesoros de arte codiciados desde hace quinientos años. De su tamaño poco común (las galeras de guerra eran mucho menores) se deduce que debieron de emplearse como barcas de recreo. A partir de los descubrimientos realizados por los buzos podemos hacernos una idea de la constitución de las embarcaciones, aun cuando no podamos todavía ofrecer una reconstrucción absolutamente exacta [ilustración].»

**CALDERAS RADIATIVAS.** «La Tierra ya no se considera una esfera inmensa de materiales líquidos o semilíquidos rodeada de una corteza sólida de espesor indeterminado, sino un globo más bien sólido. Si descartamos la idea de que las bolsas de lava no constituyen sino efusiones de una masa central fundida (porque tales efusiones se habrían solidificado hace millones de años), el paso siguiente consistirá en averiguar la causa del calor interno

de la lava. El mayor Clarence F. Dutton sostiene que el calor debe de generarse dentro o alrededor de la lava fundida. Es algo admitido que nuestro planeta contiene radio o minerales radiactivos. Se han efectuado cálculos, aproximados, desde luego, pero aun así lo bastante precisos, que sugieren que el calor desarrollado por el radio subterráneo es mucho mayor del que puede radiarse al espacio.»

## ...ciento cincuenta años

**FERROCARRILES PELIGROSOS.** «Ni en seguridad ni en confort pueden nuestros ferrocarriles, ni los ingleses, compararse con los prusianos. Durante el año pasado ni una vida se perdió en Prusia por negligencia de sus responsables; en conjunto, se produjeron sólo dos desgracias fatales. A fin de cuentas, hay cosas en los gobiernos absolutistas que merecen imitarse; tal es sin duda el caso de la gestión de los ferrocarriles. Lo nuestros son más seguros que hace algunos años; pero podrían ser mejores. Por ahora, parece que nuestros transportes públicos no conceden sino escaso valor a la vida de los ciudadanos republicanos.»

**NABUCODONOSOR.** «El *Atlas*, de Londres, publica que el coronel Rawlinson acaba de hallar una momia que se cree corresponde a la de Nabucodonosor. La cara, de belleza notable, está cubierta con una máscara de oro. Esperemos que no sea un fiasco.»



Barcaza de tiempos antiguos, reconstruida, navegando en el lago italiano Nemi, 1906.

## COSMOQUIMICA

### Un nuevo origen de los elementos

Durante decenios, se ha creído que las supernovas, los restos explosivos de las estrellas gigantes, desencadenan reacciones en las que se crea la mayoría de los elementos pesados del universo. Pero esas reacciones no explican la aparición de isótopos poco corrientes de ciertos metales, como el molibdeno y el rutenio, presentes en el Sol y en los meteoritos. Podrían generarlos los antineutrinos, unas partículas evasivas de masa insignificante. En los primeros segundos tras una explosión de supernova aparece una zona, rica en protones, que ciñe al núcleo de la estrella muerta, seguramente convertido en una estrella de neutrones. Los chorros masivos de antineutrinos que manan de la estrella de neutrones podrían irradiar los protones y transformar algunos de éstos en neutrones, que forman isótopos pesados y estables. Semejante proceso explicaría la abundancia sorprendente de ciertos elementos pesados, como el estroncio, en estrellas que se caracterizan por su escasez en metales.

—Charles Q. Choi

Las supernovas podrían generar isótopos metálicos poco comunes.



## MICROBIOLOGIA

### Los antibióticos, las bacterias y las células humanas

Varias maneras tienen los antibióticos de seleccionar las bacterias como blancos que deben destruir sin perturbar las células humanas. La mayoría de las paredes celulares de las bacterias contienen una macromolécula, el peptidoglicano, que las células humanas no generan ni necesitan. La penicilina, por ejemplo, impide la fase final de enlaces cruzados, o transpeptidización, del ensamblaje de la macromolécula. Se forma en consecuencia una pared frágil, que explota y mata a la bacteria. Ciertos fármacos atacan el metabolismo bacteriano. Las sulfamidas son estructuralmente similares al ácido paraaminobenzoico, compuesto necesario para la síntesis del ácido fólico. Las vitaminas se difunden fácilmente en el interior de las células humanas; no pueden, sin embargo, entrar en las células bacterianas. Ello significa que las bacterias deben fabricar sus vitaminas. Las sulfamidas, al inhibir una enzima fundamental del proceso impiden la proliferación bacteriana. Otro antibiótico,

la tetraciclina, se interpone en el desarrollo de las bacterias al detener la síntesis proteica. Las células, tanto las bacterianas como las humanas, sintetizan las proteínas en los ribosomas, estructuras constituidas por ARN y proteína. La tetraciclina se une a un lugar del ribosoma y bloquea una interacción clave del ARN, cortando así el crecimiento de la cadena proteínica. En las células humanas, la tetraciclina no se acumula en cantidades suficientes para frenar la síntesis proteínica. Otro proceso celular, imprescindible de las bacterias a los organismos superiores, es la replicación del ADN. La ciprofloxacina, un antibiótico, puede dirigirse específicamente contra la ADN-girasa, una enzima esencial para las bacterias. Pero ese antibiótico no afecta a las ADN-girasas humanas.

—Harry Mobley

Depto. de Microbiología e Inmunología,  
Universidad de Michigan

## PARASITOLOGIA

### Islas de resistencia

Cuando se habla de detener la malaria, se calibra, entre otras, la posibilidad de introducir en los mosquitos un gen que les confiera resistencia al parásito de la malaria, *Plasmodium falciparum*, transmitido por esos insectos de una persona a otra. ¿Se nos ha adelantado la naturaleza? Se recogieron miles de mosquitos en las cabañas de Mali y se hizo que parte de su descendencia se alimentara de sangre de una persona infectada. De 101 linajes, 22 no mostraron vestigios de *Plasmodium*. Un resultado, en verdad, sorprendente. La resistencia parece tener su origen en un gen o genes situados en un segmento de cromosoma, o "isla de resistencia al *Plasmodium*". Para combatir la malaria podrían seleccionarse como diana los insectos portadores de la variante génica que confiere vulnerabilidad. Valdría para ello un hongo letal recién descubierto: parece mostrar preferencia por los mosquitos henchidos de *Plasmodium*.

—J. R. Minkel

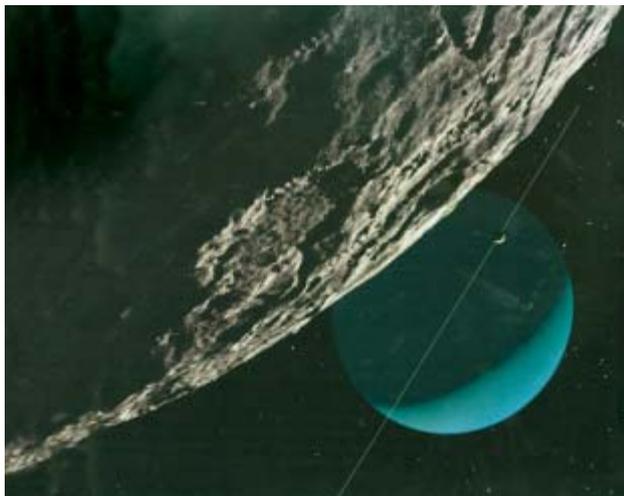


Protozoos de la malaria (arriba derecha) junto a células sanguíneas.

MARK GARLICK Photo Researchers, Inc. (arriba); Photo Researchers, Inc. (abajo)

## ASTRONOMIA

### La huella de la gravedad



Inclinación axial de Urano visto desde Umbriel, una de sus mayores satélites.

Cuando no saben explicar alguna extraña característica del sistema solar, los astrónomos suelen recurrir a las colisiones. Tritón gira alrededor de Neptuno en sentido contrario a las otras lunas del planeta. Hasta ahora se suponía que llegó de muy lejos y expulsó de un golpe a una luna anterior. Pero, según se aduce en el número de *Nature* del 11 de mayo, de un par de objetos ligados gravitatoriamente que pasase ante Neptuno, el que más lento se moviera con respecto al planeta podría haber quedado atrapado por su gravedad y haberse puesto a girar a su alrededor. El más rápido continuaría su trayectoria. En los últimos años se han encontrado en la periferia del sistema solar numerosos pares de cuerpos celestes que remedan el fenómeno de marras. Análogamente, la gravedad podría explicar mejor que un impacto de refilón de un protoplaneta la inclinación axial de 98 grados de Urano y sus lunas con respecto al plano orbital del planeta. Fundándose en las trayectorias que se les suponen a los planetas gaseosos gigantes en sus primeros tiempos, una simulación, publicada también en *Nature*, indica que la oscilante rotación de Saturno alrededor de sí mismo podría haberle dado a Urano un ligero empujón, en alguno de sus encuentros.

—J. R. Minkel

## NEUROLOGIA

### ¿Para qué sirve una neurona nueva?

En recintos espaciosos, con juguetes y ruedas giratorias, los roedores adultos crean más neuronas de lo normal. Se ha supuesto, fundados en tal observación, que la formación de neuronas, o neurogénesis, atempera la ansiedad y refuerza la capacidad de aprendizaje y la memoria ligadas a un entorno variado. A fin de comprobar esta relación, en la Universidad de Columbia se inutilizó con radiación la región del hipocampo donde los ratones generan las neuronas nuevas. El resultado no fue el esperado: situados en un entorno enriquecido, los ratones irradiados se comportaron en las pruebas de aprendizaje espacial igual que los ratones sin irradiar; además, unos y otros se mostraron bastante tranquilos. Parece, pues, que la neurogénesis no es la razón de los efectos de un entorno ameno, al menos en los ratones. El estudio plantea cuestiones particularmente sugestivas sobre la función de la neurogénesis en los humanos, pues según algunas investigaciones habría que tenerla en cuenta en el tratamiento de la depresión.

—J. R. Minkel

Es posible que la neurogénesis no rebaje la ansiedad ni favorezca el aprendizaje.



## FISICA Y SOCIEDAD

### Átomos por la paz

A lo largo del siglo XX los físicos han intervenido en cuestiones militares. Recuérdese su papel determinante en la fabricación de las bombas que cayeron sobre Hiroshima y Nagasaki. Edward Teller, uno de los creadores de la bomba de hidrógeno, fue un decidido partidario del armamento nuclear, pero otros físicos que intervinieron en el advenimiento de la era atómica, como Albert Einstein, Leo Szilárd, Robert Oppenheimer o Hans Bethe, combatieron después la carrera de armamentos.

Jorge Hirsh, especialista en superconductores y creador del número  $h$ , que mide la influencia de un científico a través de la repercusión de sus artículos, acaba de dirigirse una carta al presidente norteamericano contra la posibilidad de emplear armamento nuclear en el marco de la tensión creada por el enriquecimiento de uranio en Irán. Al texto se han sumado, entre otros físicos eximios, Edward Witten, Philip Anderson, Anthony Leggett, Leo Kadanoff, Frank Wilczek y David Gross.

# Los primeros microsegundos

Experimentos recientes han reproducido las condiciones del universo naciente, con resultados inesperados

Michael Riordan y William A. Zajc

**D**urante los últimos cinco años, centenares de científicos han estado utilizando un nuevo y potente destructor de átomos, el Colisionador de Iones Pesados Relativistas (RHIC), en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, para reproducir las condiciones que existieron en el inicio del universo. Ese acelerador hace chocar frontalmente dos haces de núcleos de oro que viajan próximos a la velocidad de la luz. Las colisiones resultantes entre esos pares de núcleos atómicos generan chorros extraordinariamente calientes y densos de materia y energía que simulan lo que sucedió durante los primeros microsegundos tras la gran explosión. Estas breves “pequeñas explosiones” ofrecen una imagen muy aproximada de instantes muy cercanos a la creación.

En esos primeros momentos, la materia era un caldo sumamente caliente y denso de quarks y gluones, que vagaban a gran velocidad y chocaban entre sí al azar. Algunos electrones, fotones y otras partículas elementales ligeras sazonaban la sopa. Esta mezcla tenía una temperatura de billones de grados, más de 100.000 veces la del núcleo del Sol. Pero la temperatura descendió bruscamente a medida que el cosmos se expandía, igual que un gas ordinario de hoy cuando se expande rápidamente. Gracias al consiguiente frenado, empezó a haber uniones efímeras de quarks y gluones. Transcurridos unos 10 microsegundos, las interacciones fuertes que había entre ellos los ligaron permanentemente, quedando

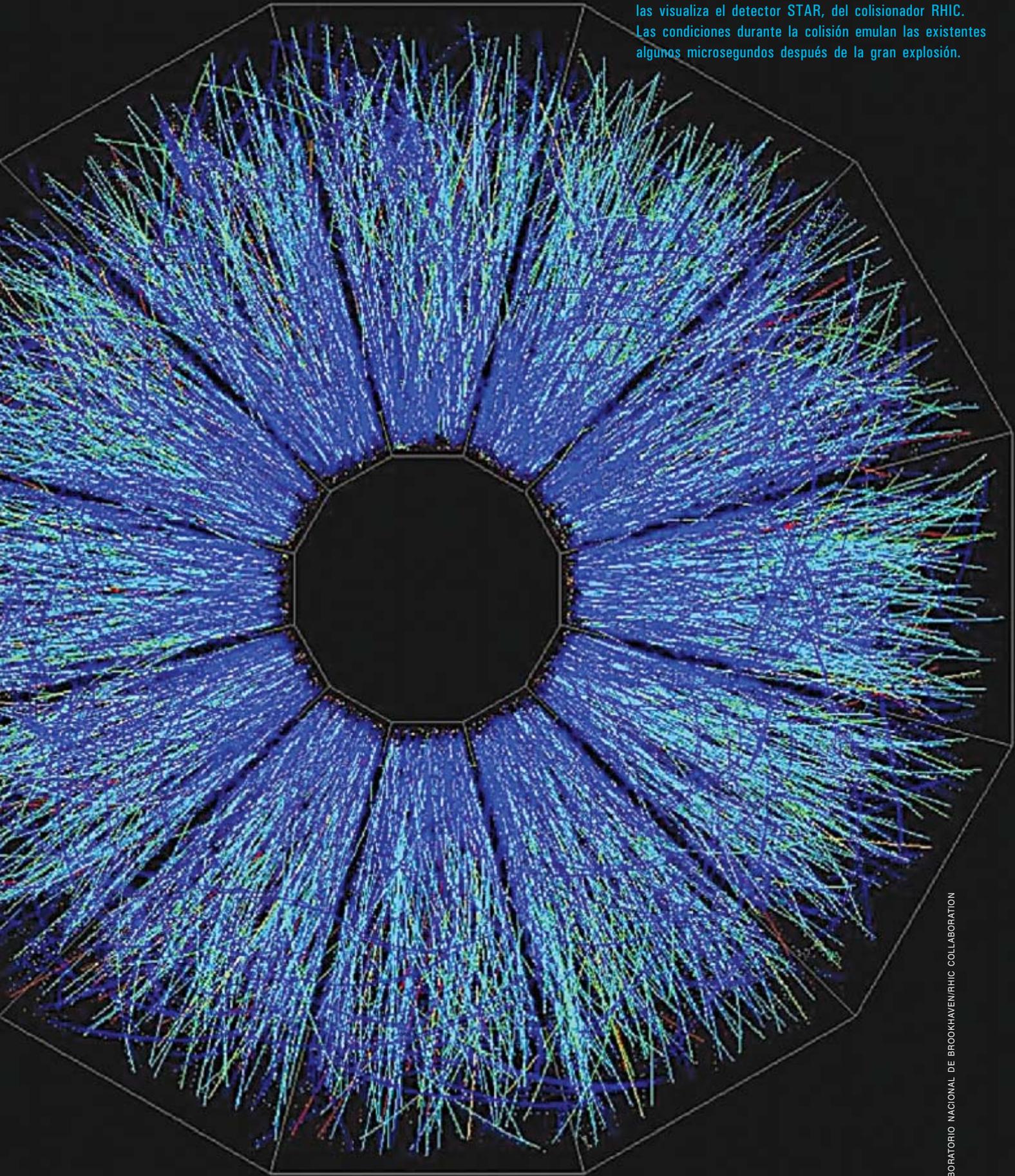
atrapados dentro de protones, neutrones y otras partículas que interactúan fuertemente; a estas partículas compuestas se las llama “hadrones”. Un cambio repentino en las características de un material recibe el nombre de transición de fase (como el agua líquida cuando se congela). La transición de fase cósmica que convirtió la mezcla original de quarks y gluones en los protones y neutrones actuales es de gran interés lo mismo para quienes quieren saber cómo adquirió el universo su estado actual, tan estructurado, que para quienes desean entender mejor las fuerzas fundamentales.

Los protones y los neutrones que hoy forman los núcleos de cada átomo son gotitas residuales de aquel mar primordial, minúsculas celdas subatómicas donde, encadenados para siempre, se agitan los quarks. Incluso en colisiones violentas, cuando los quarks parecen estar a punto de escapar, se forman nuevas paredes para mantenerlos confinados. Aunque muchos lo han intentado, nunca se ha observado un quark solitario en un detector de partículas.

El RHIC ofrece una excelente oportunidad de observar quarks y gluones liberados de protones y neutrones, en un estado colectivo casi libre, evocador de los primeros microsegundos del mundo. En un principio se llamó a esa mezcla “plasma de quarks y gluones”, porque se esperaba que se comportara como un gas ultracaliente de partículas cargadas (es decir, un plasma), similar a la parte interna de un relámpago. El RHIC, al aplastar unos núcleos pesados contra otros y



1. MILES DE PARTICULAS que salen de una colisión de ultraalta energía entre dos núcleos de oro, tal y como las visualiza el detector STAR, del colisionador RHIC. Las condiciones durante la colisión emulan las existentes algunos microsegundos después de la gran explosión.



LABORATORIO NACIONAL DE BROOKHAVEN/RHIC COLLABORATION

2. ESTA LINEA CRONOLOGICA COSMICA muestra algunas eras significativas de la primitiva historia del universo. Los experimentos —SPS, RHIC y el futuro LHC— se remontan más y más en el tiempo, hasta los primeros microsegundos, cuando existió el medio de quarks y gluones.



destruirlos en “pequeñas explosiones” que brevemente liberan sus quarks y gluones, sirve como una especie de telescopio en el tiempo que proporciona breves vistas del universo primitivo, del reinado absoluto del plasma ultracaliente y superdenso de quarks y gluones. Pues bien: por ahora, la mayor sorpresa del RHIC es que esa sustancia exótica recuerda mucho más a un líquido, aunque de propiedades muy especiales, que a un gas.

### Liberar los quarks

En 1977, cuando el teórico Steven Weinberg publicó su libro “Los tres primeros minutos” —del universo—, evitó cualquier conclusión definitiva sobre la centésima de segundo inicial. Escribió: “Aún no sabemos lo suficiente de la física de las partículas elementales como para calcular con alguna confianza las características de aquella mezcla. Nuestra ignorancia de la física microscópica es un velo que nos oculta el comienzo genuino”.

Pero los progresos teóricos y experimentales empezaron por aquellos años a levantar ese velo. No sólo se encontró que los protones, los neutrones y demás hadrones contenían quarks. A mediados de los años setenta aparecía una teoría de la fuerza fuerte entre los quarks, la cromodinámica cuántica, o QCD: una cohorte de ocho partículas neutras, los gluones, revolotea entre los quarks y los somete a la fuerza implacable que los confina en los hadrones.

De la QCD intriga especialmente su relación con la distancia: contrariamente a lo que sucede con las fuerzas de la gravedad y el electromagnetismo, la constante de

acoplamiento de la interacción fuerte se debilita cuando unos quarks se acercan a otros. Se ha denominado a este comportamiento que desafía a la intuición “libertad asintótica”: cuando dos quarks están mucho más cerca el uno del otro que el diámetro de un protón (unos  $10^{-13}$  centímetros), sienten una fuerza reducida, que se puede calcular con precisión mediante las técnicas al uso. Sólo cuando un quark comienza a separarse de sus socios la interacción se hace verdaderamente fuerte y tira de la partícula hacia atrás, como la correa del perro.

En física cuántica, las distancias cortas entre partículas se asocian a colisiones de alta energía. Así, la libertad asintótica adquiere importancia a temperaturas elevadísimas cuando las partículas están muy juntas y colisionan a altas energías entre sí, una y otra vez.

La libertad asintótica de la QCD permite levantar el velo de Weinberg para averiguar qué sucedió en los primeros microsegundos. Mientras la temperatura estuvo por encima de unos 10 billones de grados, los quarks y los gluones actuaron con independencia. Incluso a temperaturas más bajas, de hasta dos billones de grados, los quarks vagaban solos, aunque por entonces debían de ir empezando a sentir que la fuerza confinante de la QCD tiraba de ellos.

Para simular tan extremas condiciones en la Tierra, deben recrearse las elevadísimas temperaturas, presiones y densidades de aquellos primeros microsegundos. La temperatura es, básicamente, la energía cinética media de una partícula en un enjambre de partículas similares; la presión aumenta con la densidad de energía del enjambre. Por lo tanto, si se comprime tanta energía como se pueda en el menor volumen posible, se estará más cerca de las condiciones de la gran explosión.

Afortunadamente, la naturaleza proporciona unas cápsulas de materia densísimas: los núcleos atómicos. Si se pudiera juntar un dedal de esa materia nuclear, pesaría 300 millones de toneladas. Tres décadas de experiencia estrellando unos núcleos pesados —de plomo o de oro— contra otros a altas energías han demostrado que las densidades que se generan durante esas colisiones sobrepasan de lejos las de la materia nuclear normal. Y las temperaturas producidas quizás hayan superado los cinco billones de grados.

El choque de núcleos pesados, cada uno con alrededor de 200 protones y neutrones, engendra un infierno mucho peor que el que aparece en las colisiones de protones sueltos (las que se utilizan en otros experimentos de la física de altas energías). En vez de una explosión minúscula con docenas de partículas salientes, en las colisiones de iones pesados se crea una “bola de fuego” formada por millares de partículas, tantas como para que las características colectivas de la bola de fuego —su temperatura, densidad, presión y viscosidad, o resistencia a fluir— sean parámetros úti-

## Resumen/Pequeñas explosiones

- En los primeros 10 microsegundos después de la gran explosión, el universo consistía en un herviente remolino de partículas elementales, los quarks y los gluones. Desde entonces, quarks y gluones han estado encerrados dentro de los protones y neutrones que forman los núcleos de los átomos.
- Durante los últimos cinco años, los experimentos realizados con el Colisionador Relativista de Iones Pesados (RHIC) han recreado el plasma de quarks y gluones a una escala microscópica mediante el choque entre sí de núcleos de oro que se mueven casi a la velocidad de la luz. Para gran sorpresa de los físicos, el medio producido en estas “pequeñas explosiones” se comporta no como un gas, sino como un líquido casi perfecto.
- Los resultados significan que puede que tengan que revisarse los modelos del universo primitivo. Algunas hipótesis que se adoptan para simplificar los cálculos referentes a los quarks y gluones también han de reexaminarse.



les y significativos. La distinción es importante; lo es también la diferencia entre el comportamiento de algunas moléculas de agua aisladas y la conducta de una gota entera.

### Los experimentos del RHIC

El RHIC, costado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos y del que se encarga Brookhaven, es la instalación más reciente para el estudio de las colisiones de iones pesados. Los anteriores aceleradores nucleares lanzaban haces de núcleos pesados sobre blancos metálicos inmóviles. En el colisionador RHIC, en cambio, dos haces de núcleos pesados chocan entre sí. Las colisiones frontales resultantes generan energías mucho mayores para la misma velocidad de las partículas, porque toda la energía disponible se dedica a la creación de subproductos. Recuerda lo que sucede cuando dos coches chocan de frente a gran velocidad. Su energía de movimiento se convierte en energía térmica aleatoria de las partes y fragmentos desprendidos, que salen disparados en todas las direcciones.

A las energías altamente relativistas que les imparte el RHIC, los núcleos viajan a más del 99,99 por ciento

de la velocidad de la luz; cada protón o neutrón de su interior alcanza una energía de hasta 100 gigaelectronvolt (GeV). (Un GeV viene a equivaler a la masa de un protón inmóvil.) Dos series de 870 imanes superconductores refrigerados por toneladas de helio líquido conducen los haces de núcleos por dos anillos entrelazados de 3,8 kilómetros de longitud. Chocan en los cuatro puntos donde los anillos se cruzan. Cuatro detectores de partículas, BRAHMS, PHENIX, PHOBOS y STAR, registran los restos subatómicos que salen disparados en las violentas colisiones que suceden en dichas intersecciones.

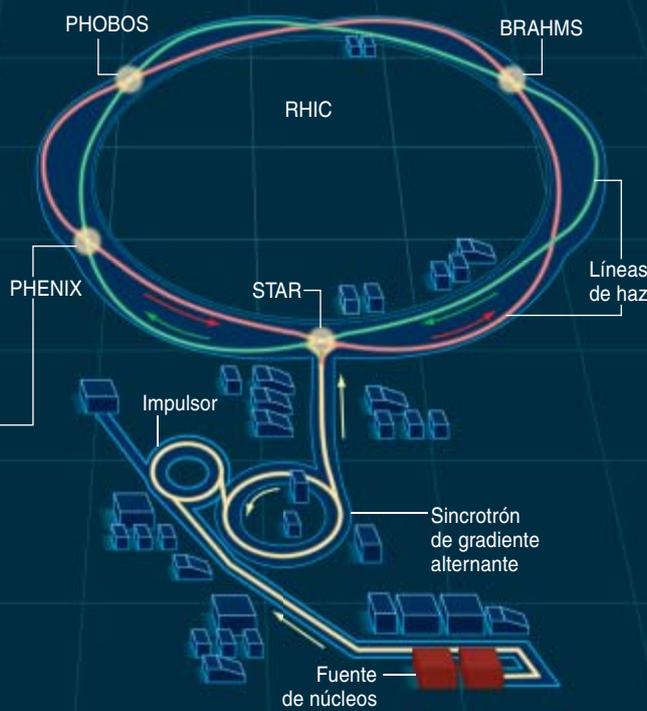
Cuando dos núcleos de oro chocan de frente a la energía más alta alcanzable en el RHIC, descargan más de 20.000 GeV en una bola de fuego de apenas una billonésima de centímetro de diámetro. Los núcleos y sus protones y neutrones constituyentes se funden y, a partir de toda esa energía disponible, se crean muchos más quarks, antiquarks (la antimateria de los quarks) y gluones. Más de 5000 partículas elementales se liberan brevemente. La presión generada en el momento de la colisión alcanza unas  $10^{30}$  veces la presión atmosférica. En el interior de la bola de fuego, la temperatura se eleva a billones de grados.

## COLISIONES Y DETECCIÓN DE PARTICULAS

El RHIC consiste esencialmente en dos anillos de 3,8 kilómetros (rojo y verde), o líneas de haz, que aceleran oro y otros núcleos pesados a 0,9999 veces la velocidad de la luz. Las líneas de haz se cruzan en seis lugares. En cuatro de estas intersecciones, los núcleos chocan de frente, produciendo "pequeñas explosiones" que emulan las condiciones existentes durante la gran explosión que creó el universo. Los detectores BRAHMS, PHENIX, PHOBOS y STAR analizan los restos que salen de las colisiones.



El experimento PHENIX (que se muestra aquí parcialmente desmontado durante el mantenimiento) busca ciertas partículas producidas muy al principio de las pequeñas explosiones.



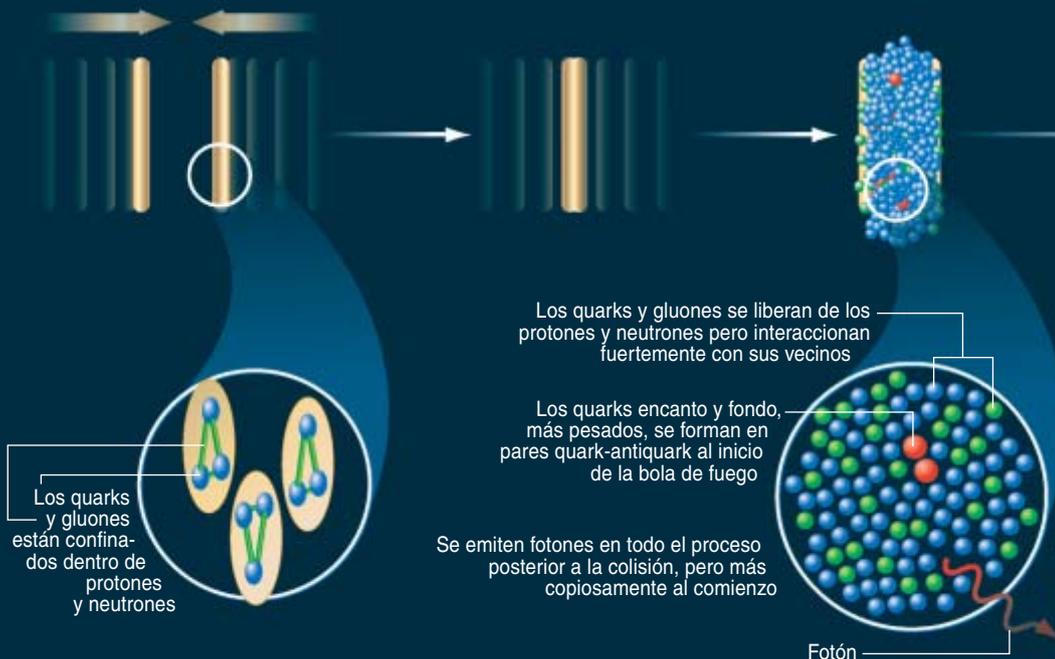
## UNA "PEQUEÑA EXPLOSIÓN", DEL PRINCIPIO AL FIN

El RHIC genera condiciones similares a las de los primeros microsegundos posteriores a la gran explosión al lanzar núcleos de oro unos sobre otros a casi la velocidad de la luz. Cada colisión, o "pequeña explosión", pasa por una serie de etapas, produciendo brevemente una bola de fuego que se expande, formada por gluones (verde), quarks y antiquarks. Los quarks y antiquarks son, sobre todo, de los tipos arriba, abajo y extraño (azul); sólo algunos pertenecen a las especies más pesadas, encanto y fondo (rojo). La bola de fuego, finalmente, explota en hadrones (plata), que se detectan junto con fotones y otros productos de la desintegración. De las propiedades de estas partículas detectadas se deducen las características del medio de quarks y gluones.

Núcleos de oro moviéndose a 0,9999 veces la velocidad de la luz aplanados por efectos relativistas.

Las partículas de los núcleos colisionan y se cruzan, dejando en su estela una región muy excitada de quarks y gluones.

Tras  $0,7 \times 10^{-23}$  segundos, el plasma de quarks y gluones está plenamente formado y a una máxima temperatura.



Pero unas 50 billonésimas de billonésima ( $5 \times 10^{-23}$ ) de segundo después, todos los quarks, antiquarks y gluones se recombinan en hadrones que salen disparados hacia los detectores circundantes. Ayudados por potentes computadoras, los detectores registran tanta información como sea posible sobre los millares de partículas que les llegan. Dos de ellos, BRAHMS y PHOBOS, son más bien pequeños y se concentran en la observación de características específicas de los residuos. Los otros dos, PHENIX y STAR, están montados alrededor de dispositivos enormes, de uso más general, que llenan sus hangares experimentales de tres pisos de alto, con miles de toneladas de imanes, detectores, absorbentes y blindajes.

Los cuatro experimentos del RHIC han sido diseñados y construidos por distintos equipos internacionales, que engloban entre 60 y más de 500 científicos. Cada grupo ha empleado una estrategia diferente para abordar la complejidad de los sucesos del RHIC. La colaboración BRAHMS se centra en los remanentes de los protones y neutrones originales que salen en direcciones próximas a las de los núcleos del oro que chocan. PHOBOS observa partículas en el intervalo angular más amplio posible y estudia las correlaciones entre ellas. STAR se construyó alrededor de la "cámara digital", la mayor del mundo: un enorme cilindro de gas que proporciona imágenes tridimensionales de todas las partículas cargadas emitidas en una gran apertura que rodea el eje del haz (véase la figura 1). Por último, PHENIX busca determinadas partículas, producidas muy al comienzo de las colisiones,

que pueden emerger incólumes de la caldera hirviente de quarks y gluones y proporcionan una especie de retrato en rayos X del interior de la bola de fuego.

### Una auténtica sorpresa

De los cuatro aparatos emerge una misma y sorprendente historia: los quarks y los gluones rompen el confinamiento y adquieren un comportamiento colectivo, aunque sólo de manera transitoria; pero esta mezcla caliente actúa como un líquido, no como el gas ideal que los teóricos habían anticipado.

Las densidades de energía alcanzadas en las colisiones frontales entre dos núcleos de oro son fantásticas. Centuplican las de los propios núcleos. En gran parte se debe a un efecto relativista, que hace que en el laboratorio, justo antes de su encuentro, se vea aplanados a ambos núcleos, como discos finísimos de protones y neutrones. Su energía se concentra en el momento del impacto en un volumen mínimo. Se calcula que la densidad de energía resultante multiplica por 15 la necesaria para liberar los quarks y los gluones. Estas partículas avanzan de inmediato en todas las direcciones, chocando repetidamente unas con otras y reajustando así sus energías en una distribución más térmica.

La prueba de la rápida formación de este medio caliente y denso viene de un fenómeno llamado "templado de chorros" (*jet quenching*). Cuando dos protones chocan a alta energía, algunos de sus quarks y gluones se topan casi frontalmente y rebotan, dando por resultado dos