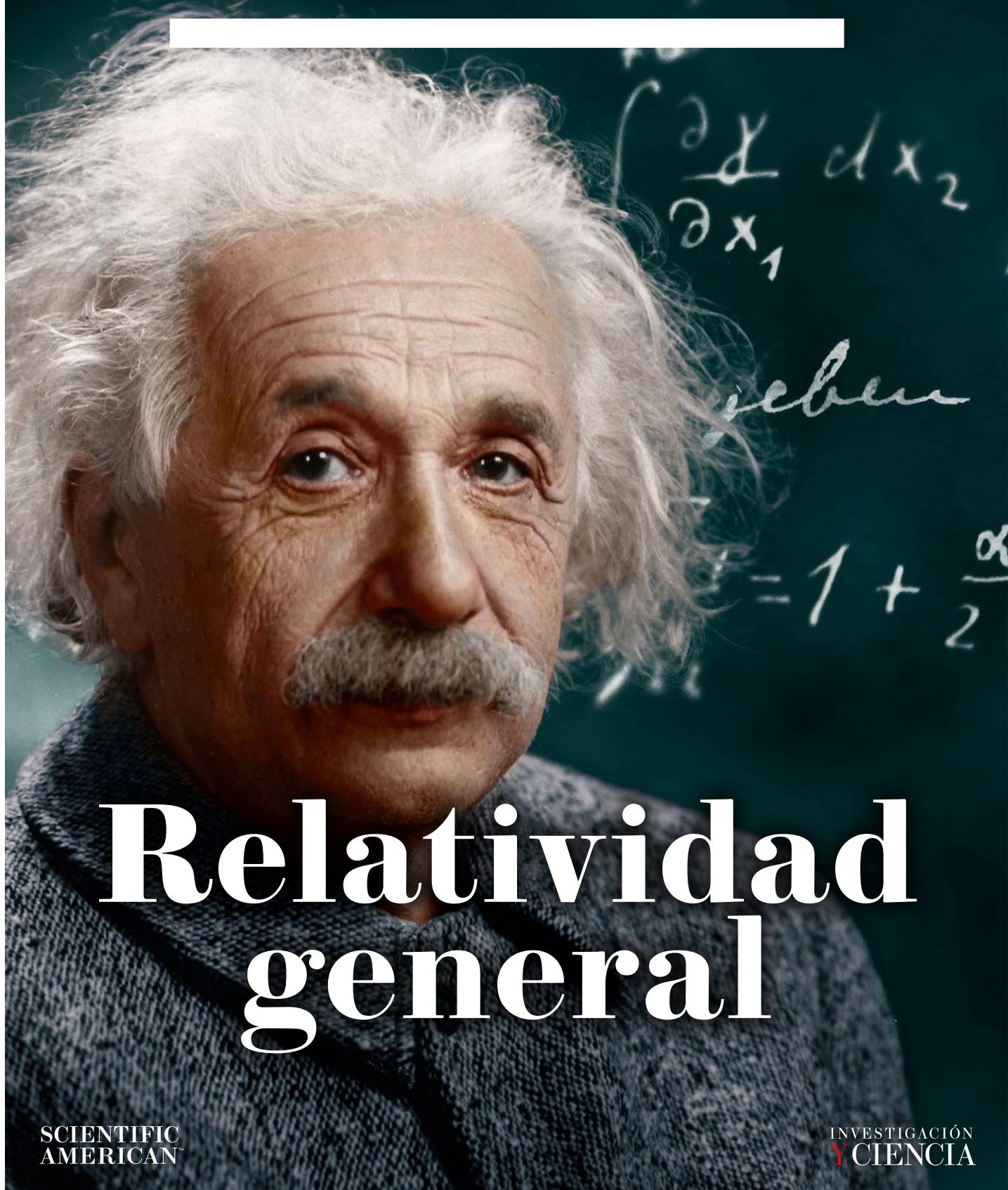


ESPECIAL

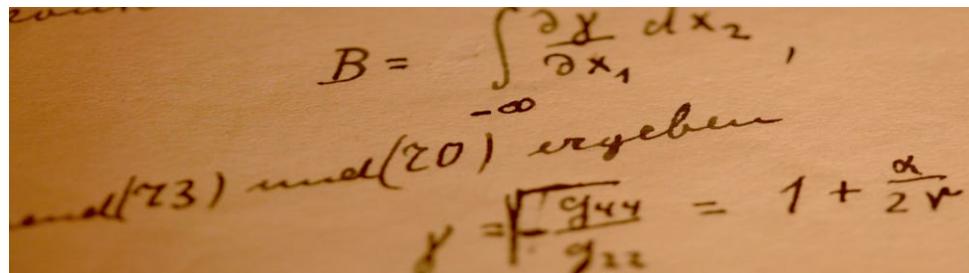


Relatividad general

ESPECIAL

Relatividad general

CONTENIDO



Una selección de nuestros mejores artículos para ahondar en la ciencia de la **relatividad general**.

Espacio, tiempo y gravitación

Silvio Bergia
Temas de IyC, abril/junio 2005

Einstein, Hilbert y la teoría general de la relatividad

Leo Corry
Investigación y Ciencia, noviembre 1998

Aventuras en el espaciotiempo curvo

Eduardo Guérón
Investigación y Ciencia, octubre 2009

El universo de Georges Lemaître

Dominique Lambert
Investigación y Ciencia, abril 2002

La constante cosmológica

Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner
Investigación y Ciencia, noviembre 2004

Los sonidos del espaciotiempo

Craig J. Hogan
Investigación y Ciencia, marzo 2007

Singularidades desnudas

Pankaj S. Joshi
Investigación y Ciencia, abril 2009

Agujeros negros y muros de fuego

Joseph Polchinski
Investigación y Ciencia, abril 2015

INCLUYE EL ARTÍCULO

¿Fuego en el horizonte?

Roberto Emparan

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1^a, 08021 Barcelona (España)
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

Copyright © Prensa Científica, S.A. y Scientific American, una división de Nature America, Inc.

ESPECIAL n.º 14 ISSN: 2385-5657

En portada: Modificado a partir de una fotografía de Oren Jack Turner/The Library of Congress/dominio público | Imagen superior: Thinkstock/David Silverman

Espacio, tiempo y gravitación

En el decenio de 1910, una feliz inspiración y unas nuevas matemáticas llevan a Einstein hasta su teoría relativista de la gravitación

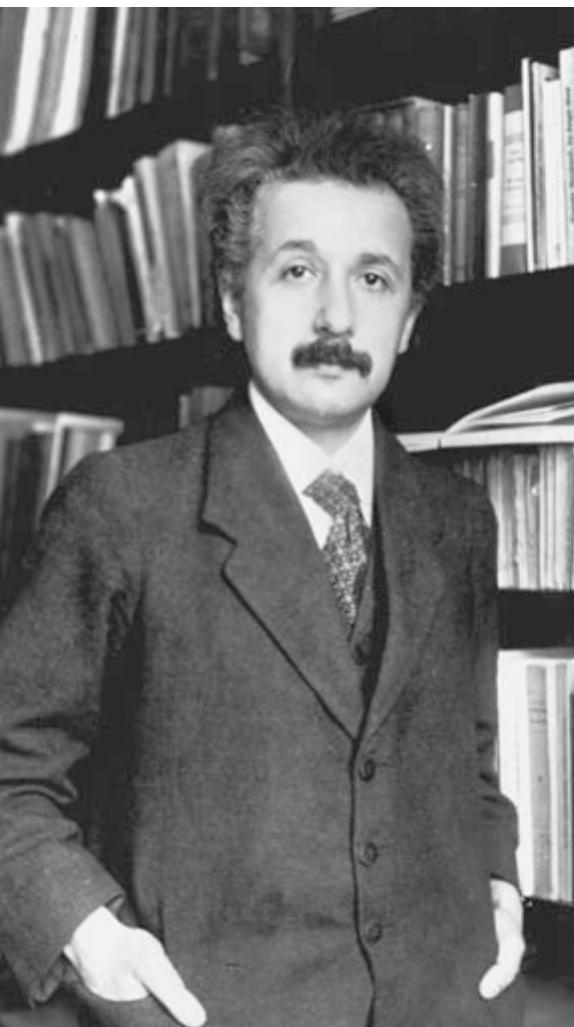
Al repasar las consecuencias directas y el desarrollo de los trabajos de 1905, así como las contribuciones de Einstein entre 1905 y 1911, hemos dejado de lado las investigaciones que desembocaron en la que quizás sea su obra más importante y personal: la teoría de la relatividad general. Abordemos este tema y sigamos al mismo tiempo el hilo de los cambios ocurridos en la vida privada de Einstein entre 1911 y 1919. En 1911 dejó la plaza de profesor asociado en Zúrich y aceptó una cátedra en la universidad alemana de Praga, donde no se quedó más que año y medio. En enero de 1912 recibió la oferta de un contrato similar, de nuevo en Zúrich, de diez años de duración. Al comienzo del curso académico siguiente, en octubre de 1912, regresó a Suiza, pero Planck y Nernst estaban intentando ya que le diesen una plaza en Berlín.

Durante el verano de 1913, ambos visitan a su joven colega en Zúrich para exponerle su propuesta. Se le iba a elegir miembro de la Academia de Ciencias de Prusia, a la edad de 34 años, con un estipendio. Por otro lado, se le nombraría director del departamento de ciencias del recién fundado Instituto Káiser Guillermo, sin ninguna carga docente, lo que le permitiría consagrarse todo su tiempo y energías a la investigación, en estrecha colaboración con los mejores físicos alemanes.

No se puede negar el atractivo de una oferta así. Que Einstein aceptara es, de todas formas, algo sorprendente, pues en su adolescencia había decidido —por razones que le parecían categóricas— abandonar Alemania para siempre. Pero como dijo el rey Enrique IV de Francia, París bien vale una misa, y eso debió de pensar Einstein, aunque exigió expresamente que no se le obligase a recuperar su nacionalidad alemana. Entre tanto, su matrimonio se había deteriorado sin remedio. Disponemos de las cartas que le envió a Mileva en esta época, en las que se expresa con una dureza de sentimientos inhabitual, que no le dejan en muy buen lugar. El mensaje es inequívoco: si quieras quedarte cerca de mí, arréglatelas para no suponerme una carga. A pesar de todo, cuando se traslada a Berlín en 1914 se lleva con él a su familia, pero ya al verano siguiente Mileva parte con sus hijos a Zúrich. Es el fin del matrimonio, al que pone término oficialmente un divorcio de común acuerdo en 1919. El mismo año, Einstein se casa con su prima segunda Elsa, a su vez divorciada y con dos hijas de un matrimonio anterior.

Huelga decir que el traslado a Berlín tiene lugar en una situación muy especial. Lo que en el mes de julio no era sino una guerra balcánica, se convierte en agosto de 1914, en un conflicto mundial. Un episodio que concierne a Einstein esclarece sus reacciones frente a los problemas políticos. Durante la primera fase del conflicto, las personalidades alemanas más eminentes redactan un manifiesto donde declaran, entre otras cosas, que la cultura alemana y el militarismo son una sola y única realidad. Este manifiesto celebra igualmente la hondura de la ciencia alemana, que contrasta con la ligereza y la superficialidad de la ciencia francesa y anglosajona. En este clima, que cuando menos habría que calificar de enrarecido, Einstein apoya la iniciativa de un cole-

1. ALBERT EINSTEIN en 1916.



ga que prepara una contradeclaración pacifista, el *Manifiesto a los europeos*. Einstein es uno de los escasos firmantes, lo que provoca su aislamiento en los medios académicos alemanes.

Comentó la invitación a Berlín en estos términos: “Los berlineses especulan conmigo como si fuera una gallina ponedora de primera clase, ¡pero yo no sé todavía si soy capaz de poner huevos!” Este temor no está de ningún modo justificado, pues desde 1907 trabaja sobre un tema de gran calado.

La relatividad general tiene fama, todavía hoy, de ser extremadamente difícil, tanto desde el punto de vista de los conceptos sobre los que se basa como por el formalismo utilizado. Lo que no se dice es que la manera en que el propio Einstein llegó a esta teoría lo complica todo aún más. El camino está plagado de ambigüedades, de trampas y de cuestiones sin resolver. Intentaremos seguir la misma trayectoria de Einstein, paso a paso y por orden.

Caída libre

Einstein empieza a reflexionar sobre una teoría relativista de la gravitación en 1907. En un congreso celebrado en Kioto a finales de 1922, contó lo siguiente:

Estaba sentado en mi silla de la Oficina de Patentes de Berna cuando, de repente, tuve una idea: una persona en caída libre no siente su propio peso. Me quedé atónito. Esta simple experiencia imaginaria me produjo una honda impresión y me condujo a la teoría de la gravitación.

En un manuscrito inédito de 1919, hablará de “la inspiración más feliz” de su vida. Engarzaba en él una serie de consideraciones; las retomaremos aquí para intentar desbrozar la cadena de razonamientos que transformaron una observación que parecía banal en una idea tan “feliz”.

Examinemos previamente la afirmación de Einstein: “La caída libre anula el peso.” ¿Qué se quiere decir cuando se afirma que un objeto pesa una cierta cantidad de determinadas unidades? La física se limita, y así debe ser, a dar a este tipo de preguntas respuestas operativas. Un físico colgaría un dinamómetro del techo de su laboratorio y del mismo suspendería el objeto, o bien —de modo aún más simple— lo colocaría sobre el platillo de una balanza afianzada en el suelo. Para seguir el ejemplo de Einstein, un objeto en un ascensor con el cable roto, o en un satélite artificial (al que se puede considerar en caída libre en el campo gravitatorio terrestre), no tiene ningún peso, pues no provoca elongación alguna en el dinamómetro, sea cual sea la pared de la que penda. De la misma manera, el objeto no desplazará el indicador de la balanza, se la coloque donde se la coloque. La condición de la carencia de peso adquiere así una significación clara y práctica.

Si nos detenemos aquí, no habremos aún abierto el camino hacia algo nuevo. Pero probemos a darle a la ausencia de peso toda su importancia. En esas circunstancias, sobre un objeto ingravido no actúa ninguna fuerza. ¿Por qué empeñarse en ver en una caída la acción de una fuerza? ¿Por qué no dar primacía a las indicaciones operativas? ¿Por qué no considerar la ingravidez como un movimiento libre de toda restricción? Veamos a dónde lleva esta idea.

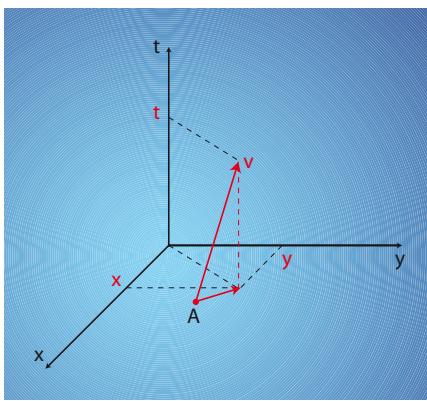
A primera vista, parece absurda: un satélite artificial no se mueve libremente porque está sometido a la gravedad terrestre. Además, su trayectoria es curva; su movimiento se halla sujeto a aceleraciones. Si está sujeto a aceleraciones, ¿cómo no va a sufrir el satélite una fuerza? Para entender la nueva idea, hay que cambiar de golpe la visión global del problema, algo más frecuente de lo que pueda parecer en física. Aquí, la alternativa consiste en suponer que la gravitación no es una fuerza: los movimientos inducidos únicamente por la gravitación resultan entonces movimientos libres, en un sentido que debe-



2. EINSTEIN, SU SEGUNDA ESPOSA ELSA (1876-1936) y su hijastra Margot, en 1929.

3. EN ESTAS SILUETAS que Einstein recortó para la fiesta de Navidad de 1919, se representó a sí mismo, a Elsa, y a las dos hijas de ésta, Ilse y Margot.





4. LA VELOCIDAD A LA QUE UN PROYECTIL es propulsado en el plano (x, y) a partir de un punto A se representa aquí por dos coordenadas espaciales y una coordenada temporal: la flecha en el plano (x, y) representa la parte espacial del vector y la línea roja punteada su componente temporal. El vector constituye un elemento del espaciotiempo, definido por las coordenadas (x, y, t) .

5. EL MATEMÁTICO MARCEL GROSSMANN (1878-1936), en 1920.



mos explorar, y los movimientos libres no son ya necesariamente rectilíneos o uniformes.

Podemos concretar estas ideas (de modo cualitativo y aproximado, por el momento) en el planteamiento la siguiente: el efecto de la gravedad que ejerce un cuerpo (por ejemplo, el Sol) consiste en una modificación de la geometría del espacio que lo circunda. El movimiento de un cuerpo (la Tierra, digamos) sigue una línea “recta” (en el sentido de que es la distancia más corta entre dos puntos) en la geometría así modificada. Charles Misner, Kip Thorne y John Wheeler acuñaron una formulación retórica de esta idea en su obra *Gravitation*: “El espacio actúa sobre la materia y le indica cómo se debe desplazar. Recíprocamente, la materia actúa sobre el espacio y le indica cómo debe curvarse”.

Hemos aquí en el núcleo mismo de una nueva teoría de la gravitación, donde el movimiento de los cuerpos queda enteramente determinado por la geometría del espacio. Un requisito de la teoría es que el movimiento no dependa de la masa; según nuestros conocimientos actuales, se satisface. Sin embargo, aparece una notoria dificultad: según la mecánica clásica, la trayectoria de un cuerpo que parte de un punto dado está definida por su posición y su velocidad iniciales. Entiéndase bien: se trata de la velocidad y no sólo de la dirección inicial del movimiento: además de una dirección, la velocidad consta también de una magnitud. En esta nueva teoría de la gravitación, el movimiento del cuerpo quedaría determinado por la geometría del espacio resultante de la acción de otras masas. La dirección de la velocidad, dada por la tangente a la trayectoria del cuerpo en un punto, pertenece a la geometría del espacio, pero su magnitud (o módulo) depende, al igual que la masa, del cuerpo, y no del espacio. Mas la trayectoria del cuerpo es función no solamente de la dirección de la velocidad, sino también del valor inicial de ésta... con lo que volvemos al punto de partida: nuestra tentativa de enunciar la gravedad como un problema de geometría espacial ha fracasado.

La curvatura es la gramática de la gravedad

Felizmente, existe una solución: considerar que la gravedad actúa en un continuo que posee una dimensión suplementaria, el tiempo. En este “espacio” (las comillas indican que hablamos a partir de ahora en un sentido lato), la velocidad de propulsión de un proyectil a partir de un punto dado en una dirección del plano x, y posee una componente de tiempo, que se representa en un sistema de coordenadas espaciotemporal (véase la figura 4). ¿Cuál es la geometría de este “espacio” sobre el cual, recordemos, actúa la gravedad? Minkowski aclaró que el espaciotiempo, tal como se ha definido, posee propiedades geométricas pseudoeuclídeas. Supondremos con Einstein que el continuo cuya geometría ha modificado la gravitación es el espaciotiempo de Minkowski.

La hipótesis cambia, pues; la formulación de Misner, Thorne y Wheeler debe rectificarse para que rece así: “El espaciotiempo actúa sobre la materia y le indica cómo se debe desplazar. Recíprocamente, la materia actúa sobre el espaciotiempo y le indica cómo debe curvarse”.

Desde este momento, la geometría ya no determina las trayectorias de los cuerpos (en el sentido de su movimiento en el espacio habitual de tres dimensiones), sino “trayectorias” en el espaciotiempo denominadas “líneas de universo”. Las líneas de universo descritas por los cuerpos en caída libre corresponden a las “rectas” de la geometría del espaciotiempo, determinada por las masas. A estas rectas las llamaremos “geodésicas”.

La relevancia de esta modificación se despliega en toda su amplitud cuando nos representamos el movimiento de un cuerpo, así el movimiento de un planeta en torno al Sol. Según la primera hipótesis (un espacio curvado por la gravedad), podemos pensar que la órbita del planeta en torno al Sol es una

geodésica. Esta geodésica dibujaría, por tanto, una elipse que, según nuestra intuición, encontraríamos fuertemente curvada. Según la segunda hipótesis, la correcta (un espaciotiempo curvado por la gravedad), la geodésica es una línea de universo en el espaciotiempo, tal como la representada en la figura 6. La órbita corresponde a la proyección de la geodésica, para un intervalo de tiempo igual a una revolución, en un plano perpendicular al eje del tiempo. Entra ahora dentro de lo razonable que la curvatura del espacio en sí sea muy pequeña.

Hay otro aspecto a subrayar: si este programa se puede llevar a cabo, no sólo se engloba la gravitación a la geometría, no sólo se “geometriza la gravedad”, sino que se formula también una teoría *relativista* de la gravedad.

¿Cuál es, por otra parte, la relación entre la teoría de la relatividad restringida y la teoría de la relatividad general? Se puede definir, en un entorno espaciotemporal infinitamente pequeño en derredor de cada punto, o mejor, de cada suceso, un sistema de referencia en el que las leyes de la física toman la forma prevista por la teoría de la relatividad restringida. La geometría de esta ínfima porción de espaciotiempo se ajusta a la descripción dada por Minkowski: como los campos de fuerza no son uniformes en general, la geometría se ve modificada de un dominio finito a otro del espaciotiempo.

La relatividad restringida es una teoría del continuo espaciotemporal en ausencia de la gravitación; la relatividad general, una teoría del continuo espaciotemporal en presencia de la gravedad. Esta última engloba la relatividad restringida, en el sentido de que conserva su validez local.

No hay relatividad general sin matemáticas

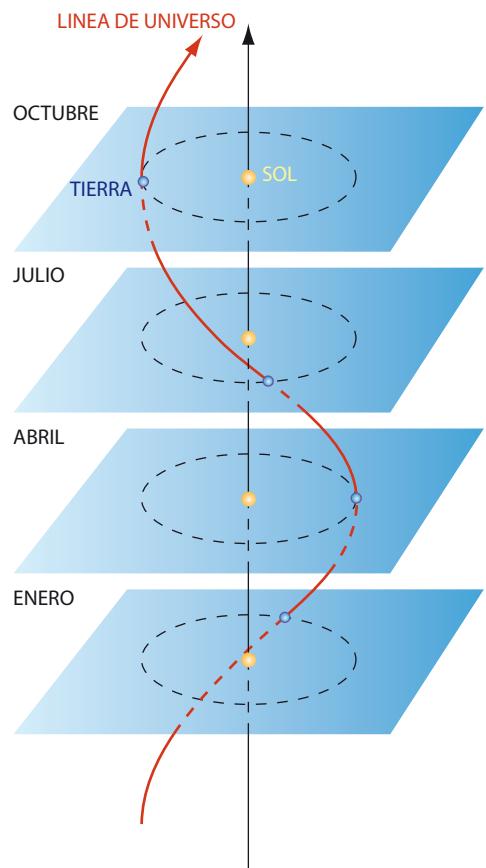
De las nociones recogidas hasta aquí se desprende un programa de trabajo: 1) determinar, a partir de una geometría dada del espaciotiempo, las líneas de universo del cuerpo estudiado; 2) determinar, a partir de una distribución dada de materia en un dominio del espaciotiempo, la geometría que se induce en éste.

La geometría buscada es, por regla general, la geometría de un espaciotiempo “curvo”. Como debe precisarse qué se entiende por curvatura, los instrumentos matemáticos necesarios para la elaboración de esta nueva teoría han de buscarse en las matemáticas de la geometría no euclídea; en efecto, el espacio de la geometría euclídea es plano y la curvatura nos aparta de ella.

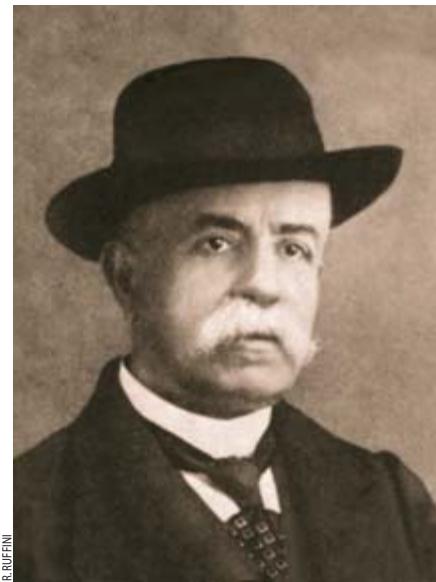
Este capítulo de las matemáticas fue escrito a lo largo del siglo XIX por Karl Gauss, Nicolaï Lobatchevski, Janos Bolyai y, sobre todo, Bernhard Riemann. El problema consiste en trasladar al espaciotiempo los resultados obtenidos por Riemann para superficies puramente espaciales: la geometría minkowskiana pseudoeuclídea reemplaza a la geometría euclídea como geometría de base que la gravitación modifica.

Persisten, empero, dificultades. Las ecuaciones de la teoría son ecuaciones diferenciales. Se requiere, por ende, definir un cálculo diferencial para una variedad espaciotemporal no euclídea. Este capítulo esencial de las matemáticas también se había desarrollado con anterioridad. El adelantado en este campo fue el matemático italiano Gregorio Ricci-Curbastro, quien —entre 1887 y 1888— sentó los cimientos de lo que denominó “cálculo diferencial absoluto”. Otros científicos, haciendo hincapié en la naturaleza de los tensores, entes matemáticos que se manejan en este tipo de cálculo, lo llamaron “cálculo tensorial”. Ricci-Curbastro escribió en 1902, en colaboración con su alumno Tullio Levi-Civita, un detallado artículo en francés sobre el tema.

En 1912, Einstein llegó más o menos a dicha conclusión. Percibe cuál es el tipo de problema geométrico-matemático que debe resolver, pero sólo cuenta con vagas nociones sobre la manera de continuar. Desesperado, le



6. MOVIMIENTO DE UN CUERPO en el continuo del espaciotiempo einsteiniano: la figura muestra la línea de universo de la Tierra en su movimiento alrededor del Sol. Las superficies azules indican la posición de la Tierra a lo largo de los meses.



R. RUFENAU

7. GREGORIO RICCI-CURBASTRO (1853-1925, arriba) se dedicó a los nuevos problemas de geometría, de geometría diferencial, de física matemática y, en particular, al cálculo tensorial. Einstein utilizó el “tensor de Ricci” en su teoría de la relatividad general. Contrariamente a Ricci-Curbastro, Tullio Levi-Civita (1873-1941, abajo) trabajó en el desarrollo del cálculo diferencial (que había previamente enunciado en forma geométrica) en el marco de la teoría de la relatividad general. A este respecto, mantuvo una extensa correspondencia con Einstein.



confía a su antiguo compañero de clase, el matemático Marcel Grossmann: “Grossmann, tienes que ayudarme o acabaré loco”. Así, Grossmann inicia a Einstein en los arcanos del cálculo tensorial. Las matemáticas utilizadas por Einstein hasta ese momento no iban más allá de las asignaturas impartidas —entonces como ahora— en los primeros años de carrera. En una carta que dirige a Sommerfeld ese mismo año, Einstein escribe:

El problema de la gravitación me tiene totalmente ocupado, y ahora creo que voy a superar todas las dificultades con ayuda de un amigo matemático de aquí [Grossmann]. Al menos hay una cosa segura, y es que nunca en mi vida había trabajado tan duro. He adquirido un gran respeto por las matemáticas, cuyas sutilezas, en mi inocencia, ¡consideraba hasta ahora un lujo superfluo! Al lado de este problema, la primera teoría de la relatividad es un juego de niños.

Estas frases, que deben tomarse al pie de la letra, atestiguan un cambio radical en la actitud de Einstein frente a las matemáticas. No sólo consagra enormes energías a profundizar en su conocimiento, hasta el punto de desarrollar incluso un cierto aprecio por las matemáticas, sino que revoluciona también su manera de concebir la investigación en física teórica.

Una ardua labor

Un diario de trabajo, el *Cuaderno de notas* de Zúrich, que escribió desde el verano de 1912 hasta la primavera de 1913, estudiado no hace mucho, refleja vívidamente la energía que empleó Einstein en iniciarse en las matemáticas de la geometría no euclídea. El resultado de sus esfuerzos es un artículo firmado por Einstein y Grossmann en 1914. El texto, conocido como “el esbozo” por la primera palabra de su título, consta de dos partes: una parte matemática de Grossmann y una física de Einstein. El párrafo relativo a la física contiene el andamiaje formal completo de la teoría de la gravitación, incluidas las ecuaciones del movimiento de los cuerpos; pero las “ecuaciones de campo”, que dan la métrica (la geometría) en función de la distribución de la materia, no aparecen aún en su forma correcta. Einstein concluiría su creación después de su traslado a Berlín, cuando comprende que ha seguido un camino equivocado. Ciertas hipótesis son incorrectas; en su teoría, la precesión del perihelio de Mercurio (véase la figura 9) vale la mitad que en los datos experimentales.

Mientras tanto, imparte durante el verano del año 1915 en Gotinga una serie de conferencias sobre la gravitación. El matemático David Hilbert, interesado por el tema, asistió y escribió un artículo en el que aparecían las ecuaciones de campo de la relatividad general. Aparecería casi una semana antes de que Einstein publicase a su vez esas ecuaciones. Esta publicación enturbiaría brevemente las relaciones entre ambos científicos. Las ecuaciones de campo no figuran en el manuscrito original de Hilbert, hallado recientemente. El matemático las añadió tras la fecha de aceptación del artículo, sin que se indique cuál fue la fecha de la revisión. Hilbert aportó, en la versión publicada de su artículo, las ecuaciones de campo finales, a las que llegó tras conocer los resultados de Einstein, como más tarde reconoció él mismo.

La teoría de la relatividad general comprende dos elementos esenciales: por una parte, las ecuaciones que determinan la geometría del espacio-tiempo en función de la distribución de la materia (las ecuaciones de campo) y, de otra parte, las ecuaciones que, a partir de esta geometría, establecen el movimiento de los cuerpos (las ecuaciones de movimiento). El esquema de cálculo que determina las líneas de universo de un cuerpo es el siguiente: se resuelven las ecuaciones de campo, dadas en función de la distribución de las fuentes de gravitación, para cada componente del tensor métrico del espacio-tiempo; a partir de esos componentes se obtienen los “coeficientes de conexión”. Estos determinan las geodésicas de la geometría calculada con las

ecuaciones de campo y se incorporan a las ecuaciones de movimiento, cuya integración establece la línea de universo del cuerpo. A punto de terminar su elaboración, Einstein escribió:

Quien haya comprendido realmente esta teoría no puede sustraerse a su magia; representa un verdadero triunfo del método del cálculo diferencial general fundado por Gauss, Riemann, Christoffel, Ricci y Levi-Civiter [sic].

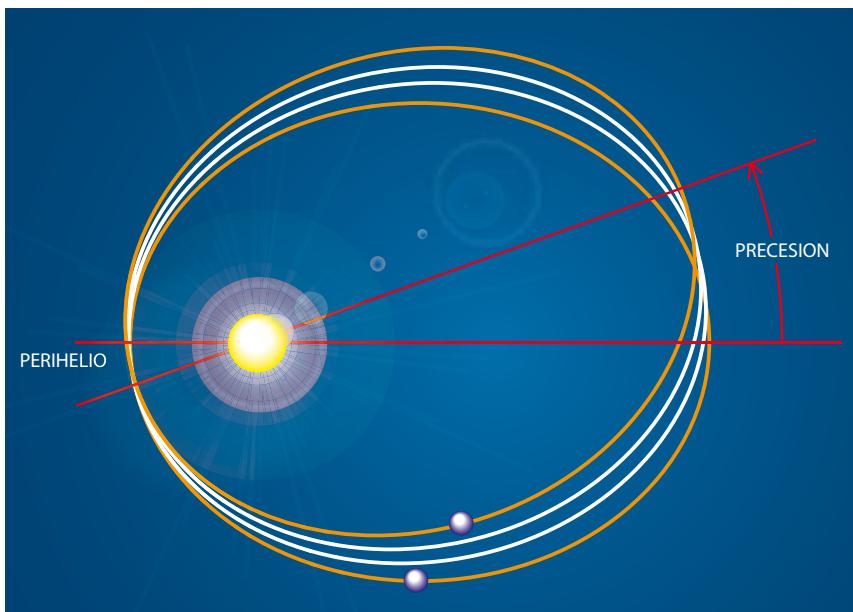
Al final, una vez convencido de la coherencia interna de la teoría, declara:

A la luz de los conocimientos ya adquiridos, lo que finalmente se ha descubierto parece casi evidente y todo estudiante inteligente lo comprende con facilidad. Pero los años de tanteos ansiosos en la oscuridad, la intensidad del deseo de rematarlo, las alternancias de confianza y de agotamiento, y finalmente el desembocar en la luz, todo eso, todo eso hay que vivirlo en primera persona para comprenderlo.

Este segundo extracto, donde aflora la componente emocional del autor, no exige mayor comentario. Por el contrario, la primera cita merece un examen más detallado: con la aparición de la teoría de la relatividad general, las geometrías no euclídeas y el cálculo diferencial absoluto que llevan asociado, capítulos legítimos de las matemáticas en cuanto ciencia racional, adquieren una dimensión empírica. Los filósofos han subrayado este aspecto que, en su opinión, representa un triunfo sobre la concepción de Kant (quien sostenía que la geometría precedía a la experiencia).

La anomalía de Mercurio

Tras haber elaborado los fundamentos teóricos de la relatividad general, Einstein estudia dos problemas. El primero, que se plantea de forma natural, concierne al movimiento de los planetas en el campo gravitatorio creado por el Sol. El cálculo de las órbitas lleva a la extraña conclusión de que, a diferencia de lo acontecido en el marco de la gravitación newtoniana, las trayectorias de los planetas no se cierran. Este efecto corresponde a la precesión del perihelio de los planetas (la variación de la posición del punto orbital más próximo al Sol). El ángulo de precesión predicho por Einstein, proporcional a la constante de gravitación G y la masa del Sol, es mayor para semiejes mayores de las órbitas menores y excentricidades mayores. Mercúrio, que tiene el menor semieje y, salvo Plutón, aún no descubierto por entonces, la mayor excentricidad de todos los planetas, constituía el candidato



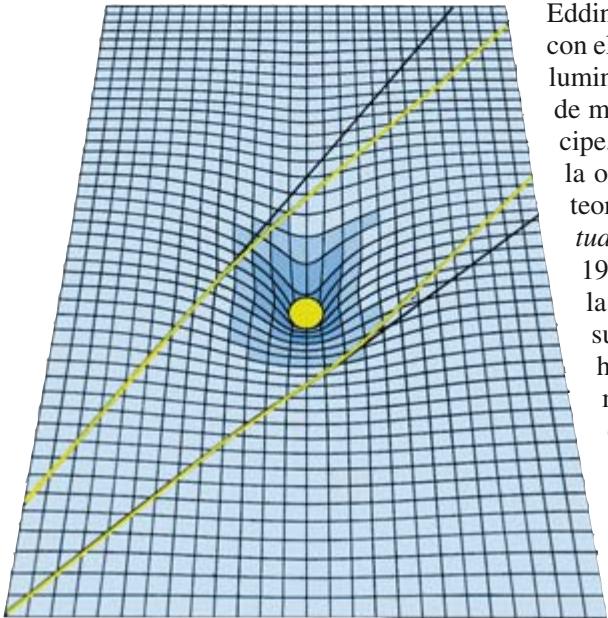
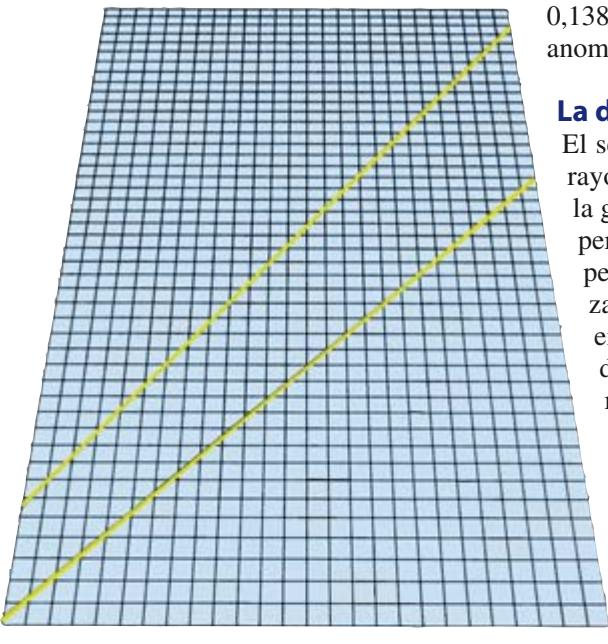
Bei Grundlage der allgemeinen Rechtsverhältnisse
A. Parergelle Beziehungen zum Recht der Rechtsordnung
B. Die spezielle Rechtsverhältnisse.

Da im Nachfolgenden dargestellte Theorie ist die ausführliche mathematische Ableitung der hier aufgestellten Theorie in *Mathematical Foundations of the Theory of Relativity* von Eddington enthalten. Die hier gegebene Theorie ist eine vereinfachte Form der allgemeinen Relativitätstheorie, welche die mathematischen Methoden der Theorie der absoluten Differentialgeometrie, welche auf den Untersuchungen Gauss', und Riemann's und Christoffel's über sogenannte Riemannsche Geometrie beruht und von Ricci und Levi-Civita in einer verallgemeinerten Form auf Riemannsche Theorie übertragen und ausgearbeitet wurde. Ich habe in Abschnitt 8 die entsprechenden allgemeinen Theoreme der absoluten Differentialgeometrie nicht als bekannt vorausgesetzt, sondern habe sie in dem Abschnitt 7 zusammen mit den entsprechenden Begriffen und Bezeichnungen erläutert und erläutert, sodass ein Studium dieser Theorie für das Verständnis des vorliegenden Abschnittes nicht erforderlich ist. Allerdings ist es in diesem Abschnitt schwieriger, die entsprechenden Begriffe nicht nur das Studium der absoluten Differentialgeometrie, sondern auch die hier benutzten Methoden der Quantentheorie zu verstehen.

8. INTRODUCCIÓN DEL MANUSCRITO titulado *Los fundamentos de la teoría de la relatividad general*, redactado en 1915.

9. LA PRECESION DEL PERIHELIO de la órbita de Mercurio, anormalmente elevada (43 segundos de arco por siglo), halla explicación sólo en el marco de mediante la relatividad general. Las proporciones de las diferentes dimensiones han sido exageradas para mayor claridad.

10. EN AUSENCIA DE UN CUERPO que produce un campo gravitatorio, la luz se propaga en línea recta (*arriba*). Cuando pasa cerca de un cuerpo de masa considerable, su trayectoria se desvía por la curvatura del espacio-tiempo. Aquí sólo se representa la curvatura del espacio (*abajo*).



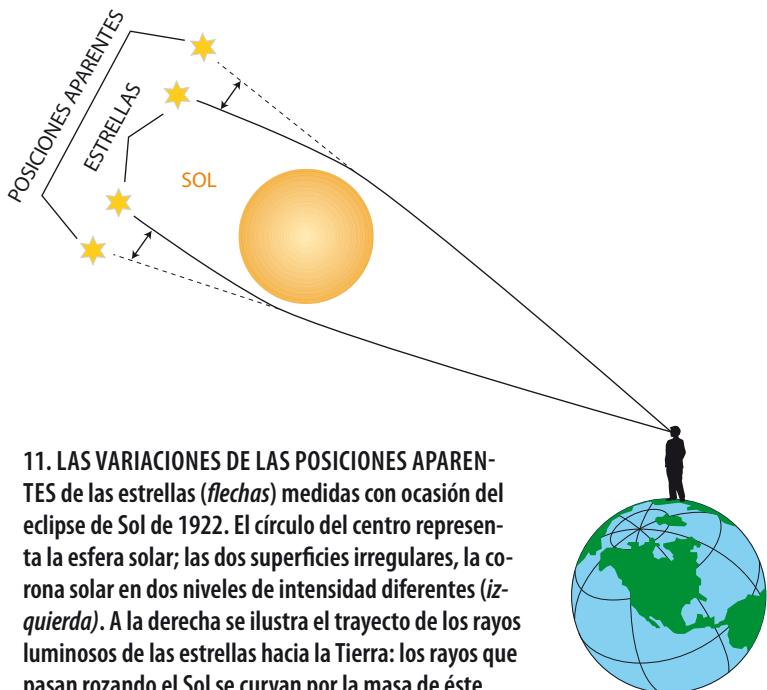
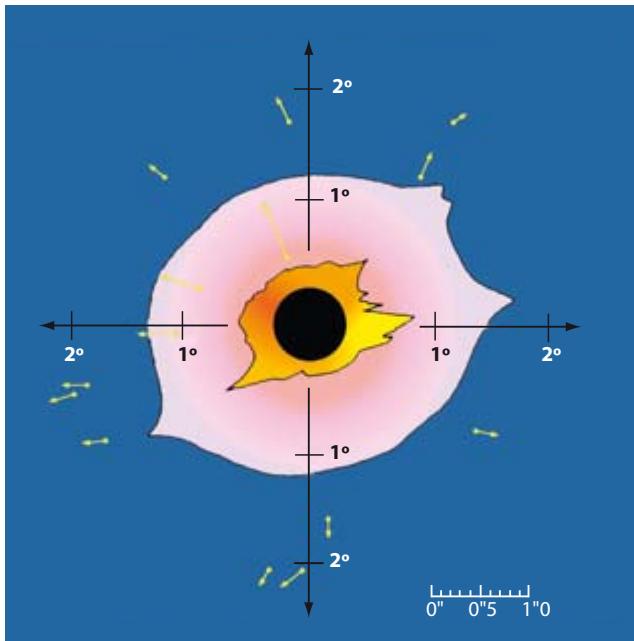
ideal para verificar la predicción (más tarde, se estudiaría también el planeta Icaro, que presenta una excentricidad todavía mayor). Desde hace casi 80 años, se sabe que el perihelio de Mercurio efectúa una precesión anómala, un avance de unos 43 segundos de arco por siglo, que no puede explicarse por efecto de la perturbación debida a otros planetas. El cálculo de Einstein predice un ángulo de precesión de Mercurio de 0,138 segundos de arco por revolución. Teniendo en cuenta que en un siglo Mercurio da 415 vueltas en torno al Sol, el ángulo de precesión de Mercurio para un siglo es de unos $0,138 \times 415 \approx 43$ segundos de arco. Así pues, la teoría de Einstein explica la anomalía de Mercurio.

La desviación de los rayos luminosos

El segundo problema abordado por Einstein atañía a la desviación de los rayos luminosos que atraviesan la vecindad del Sol. La modificación de la geometría del espaciotiempo inducida por el Sol en sus cercanías debe perturbar la trayectoria de los rayos luminosos que pasen rasando la superficie solar. ¿Cómo se comprueba este efecto? Las líneas amarillas trazadas sobre el esquema de la figura 10 representan los rayos luminosos emitidos por una estrella lejana. Según la teoría de Einstein, un observador de la Tierra tendrá la impresión, en presencia del Sol, de que estos rayos provienen de otra dirección distinta de la que se percibe en el cielo nocturno. Ahora bien, desde la Tierra no se ven a la vez el Sol y las estrellas. Sólo un eclipse total de Sol permite esa observación. Así, el efecto sólo se verifica comparando, sobre una placa fotográfica de una sección del cielo, las posiciones relativas de las estrellas en presencia y en ausencia (meses más tarde) del Sol eclipsado en esa misma zona del cielo. El ángulo de desviación que predice la teoría de Einstein mide 1,75 segundos de arco, un valor muy pequeño.

Entre tanto, la Primera Guerra Mundial había interrumpido los contactos internacionales. El astrónomo holandés Willem de Sitter consiguió enviar una copia de los trabajos de Einstein a su colega inglés Arthur Eddington. Este, profundamente impresionado, preparó, en colaboración con el astrónomo Frank Dyson, la verificación de la desviación de los rayos luminosos estelares aprovechando el eclipse total de Sol previsto para el 29 de mayo de 1919. La aldea de Sobral, en Brasil, y la pequeña isla de Príncipe, en la costa atlántica de África, parecían dos lugares favorables para la observación. En Príncipe, las placas fotográficas confirmaron la nueva teoría (*la figura 11 representa los resultados de una nueva medición efectuada en 1922 con ocasión de otro eclipse de Sol*). El 6 de noviembre de 1919 se celebró en Londres una reunión histórica, en la que participaron la Royal Society y la Royal Astronomical Society. El anuncio de los resultados de Eddington suscitó una viva impresión; se diría que Newton hubiera caído de su pedestal. La noticia se difundió de inmediato. La humanidad, convulsionada y atónita por los horrores de la guerra, busca nuevas verdades que la ciencia naciente parece dispuesta a brindarle. Surge el mito de Einstein, que se convierte en una leyenda viva, un oráculo venerable aunque incomprendible. El aura de Einstein se extenderá muy pronto a toda la comunidad de los físicos.

La Segunda Guerra Mundial, el proyecto Manhattan e Hiroshima pondrán a la física nuclear en el candelero, y los físicos, esos nuevos aprendices de brujo, serán tenidos en mayor consideración, a pesar del juicio moral negativo que lastra sus trabajos. Con Hiroshima, se llegará a decir que “la física ha perdido su inocencia”. Significativo contraste: tras la Primera Guerra Mundial, Einstein y Eddington habían hecho brotar la esperanza de encontrar, a través de la física, la inocencia perdida de la humanidad.



11. LAS VARIACIONES DE LAS POSICIONES APARENTEs de las estrellas (flechas) medidas con ocasión del eclipse de Sol de 1922. El círculo del centro representa la esfera solar; las dos superficies irregulares, la corona solar en dos niveles de intensidad diferentes (izquierda). A la derecha se ilustra el trayecto de los rayos luminosos de las estrellas hacia la Tierra: los rayos que pasan rozando el Sol se curvan por la masa de éste.



La creación de la teoría de la relatividad general marca una etapa decisiva en la elaboración de las ideas científicas de Einstein. Se trata, en justicia, de una creación genuina, pues el desarrollo de las ideas de Einstein, desde los comienzos hasta el momento en que vierte sobre el papel la forma correcta de las ecuaciones de campo, no contó nunca, ni siquiera fue inspirado, con ningún resultado experimental que contradijera la teoría soberana de Newton. Las pequeñas anomalías que el conjunto de las observaciones de la época incluía (así, la precesión del perihelio de Mercurio) eran atribuidas a alguna causa menor que había pasado inadvertida y que quedaría al descubierto con un estudio minucioso. Si tuviéramos que condensar en una frase la razón que empujó a Einstein a emprender la empinada senda de la relatividad general, diríamos: faltaba una teoría relativista de la gravitación. La motivación de Einstein era, pues, racional y no empírica. Y el camino que le llevó a buen término, totalmente racional.

Si Einstein había ya hecho gala de creatividad en sus trabajos anteriores, la teoría de la relatividad general, por su calidad, carece de parangón con sus trabajos precedentes. Se trató de un complejo proceso, donde una especialidad desarrollada por otras razones en la geometría, en las matemáticas puras, se trasplantó a la física. Al término de esta ardua labor, largos cálculos permiten predecir lo que ocurrirá en determinadas condiciones; la experiencia corrobora esas predicciones.

"El Señor es sutil, pero no malicioso"

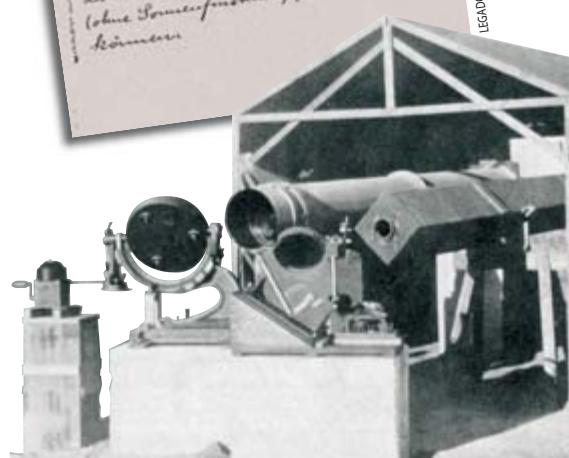
En quien ha recorrido ese camino, ¿no deberá nacer una fe desmesurada? Una fe en la capacidad del espíritu humano de concebir teorías físicas que, apoyadas sobre el mero uso de la razón, predigan el comportamiento del mundo físico en situaciones que yacen tadiavía lejos del alcance de las mediciones experimentales. Lo más sorprendente de la naturaleza, afirmó Einstein en cierta ocasión, es que la podamos comprender.

Sin embargo, una vez sobrepuesta de esta sorpresa, una mente que razona no se contenta con el milagro e intenta penetrar en el porqué de las cosas. Es entonces cuando se da cuenta de que las teorías físicas son "invenciones libres del espíritu humano" y que "el fundamento axiomático de la física teórica no debe deducirse de la experiencia, sino que hay que crearlo libremente".

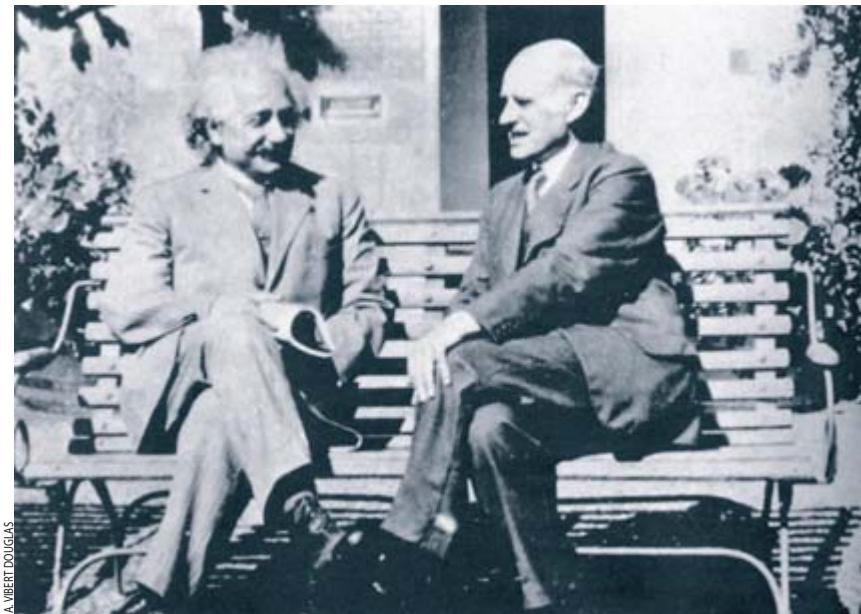
12. EN CARTA A GEORGE HALE en 1913, Einstein se pregunta si será posible observar la desviación de los rayos luminosos en las proximidades del Sol. El valor teórico de esa desviación indicado aquí (0,84 segundos) es incorrecto y se rectificará a 1,75 segundos de arco. Abajo, los instrumentos utilizados en Sobral (Brasil) para observar el eclipse solar de 1919.



LEGADO EINSTEIN / OBSERVATORIO MONTWILSON, INSTITUCIÓN CARNEGIE, WASHINGTON



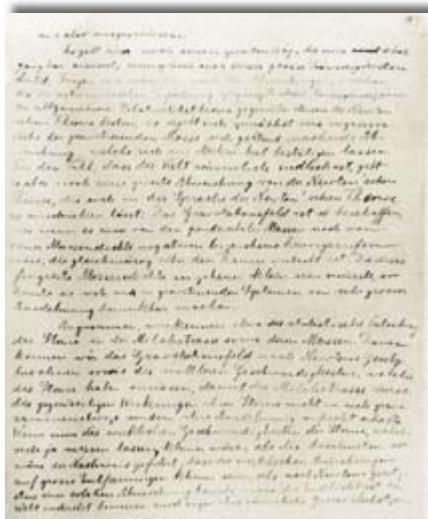
13. ARTHUR STANLEY EDDINGTON (1882-1944)
y Einstein en 1930. Eddington había verificado experimentalmente la desviación de la luz por los objetos de gran masa, predicha teóricamente por Einstein.



te". Y no deja de cuestionarse si se puede, con este fundamento, "esperar encontrar el buen camino". A lo que responde:

A esto, respondo con toda confianza que en mi opinión el camino correcto existe y podemos encontrarlo. La experiencia que hemos adquirido hasta ahora justifica que tengamos la seguridad de que la naturaleza es la realización de lo más sencillo concebible matemáticamente. Gracias a una construcción puramente matemática, pienso que podemos encontrar los conceptos que proporcionan la clave para comprender las manifestaciones de la naturaleza. Los conceptos matemáticos utilizables pueden venir sugeridos por la experiencia, pero en ningún caso ser deducidos de ella. La experiencia sigue siendo, por supuesto, el único criterio de la utilidad física de una construcción matemática, mas el verdadero principio creador reside en las matemáticas. En cierto sentido, creo que la reflexión pura puede aprehender la realidad, como soñaban los antiguos.

14. UNA PAGINA DEL TEXTO de la conferencia *Geometría y experiencia*, pronunciada por Einstein en 1921.



Según Einstein, el protagonismo de la "reflexión pura" parece ser de una importancia preponderante en el estudio de la naturaleza: "realidad" y "realización de lo más sencillo concebible matemáticamente" son las nociones claves de esta cita. Einstein seguirá siendo realista, en el sentido filosófico de la palabra que se opone a "idealista". Para Einstein, existe un mundo *a priori* gobernado por leyes naturales (que el ser humano observa) cuya formulación es de naturaleza matemática (que el hombre puede descubrir). A lo largo de su vida, Einstein considerará un atributo divino esta visión que todo lo abarca, y lo expresará con enunciados vigorosos que se han convertido en proverbiales. Todas las religiones reveladas, decía, tienen en común una representación antropomórfica de Dios. Rechazar esta última no significa pasar por alto "el orden maravilloso" que se manifiesta en la naturaleza. A un rabino que le preguntó si creía en Dios, le respondió:

Yo creo en el Dios de Spinoza, que se revela en la armonía de las leyes de lo que es, y no en un Dios que se ocupa de los destinos y los actos de los hombres.

Einstein dirá de este "Dios de Spinoza": "El Señor es sutil, pero no malicioso". Un Dios "que no juega a los dados", totalmente diferente de ése en el que parecían creer —dirá años más tarde— los creadores de la mecánica cuántica.

Einstein, Hilbert y la teoría general de la relatividad

La formulación casi simultánea por Hilbert y Einstein de las ecuaciones de campo, corazón de la teoría general de la relatividad, dio pie a una interpretación errónea de la prioridad. El error lo ha aclarado el autor

Leo Corry

El 20 de noviembre de 1915, David Hilbert leía una ponencia ante la Real Sociedad de Ciencias de Gotinga. Una más en su largo haber en aquella docta institución. Hilbert (1862-1943) era ya una figura consagrada de la matemática más allá de las paredes de la Sociedad. A primera vista, pues, se trataba de un acontecimiento rutinario.

Pero el tema abordado, así como las circunstancias que rodearon la conferencia y sus consecuencias, tejen un episodio crucial de la historia de la ciencia de la primera mitad del siglo: la formulación casi simultánea —al menos en apariencia— por Hilbert y Albert Einstein de las ecuaciones de campo de covariancia general, que constituyen el corazón de la teoría general de la relatividad (TGR).

Durante ese mismo mes de noviembre, Einstein (1879-1955) presentó cuatro ponencias sobre gravitación y relatividad en sesiones semanales consecutivas de la Academia Prusiana de Ciencias en Berlín. Sólo en la última de ellas, la del 25 de noviembre (es decir, cinco días después de la lección de Hilbert), expuso Einstein lo que vendría a conocerse como la versión definitiva de sus ecuaciones.

LEO CORRY enseña historia de la ciencia en la Universidad de Tel-Aviv. Especialista en historia del álgebra moderna y desarrollo del enfoque estructural, ha estudiado el trabajo de David Hilbert en Gotinga. Ha sido investigador invitado en el Instituto Max-Planck de Berlín y en el Instituto Dibner de Historia de la Ciencia del Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Culminaba Einstein uno de los períodos más excitantes de su carrera científica; un período, iniciado en 1912, erizado de dificultades en su avance hacia la TGR. La formulación de las ecuaciones de covariancia general (es decir, ecuaciones cuya forma se mantiene invariante bajo cualquier tipo de transformación de coordenadas) fue la pieza decisiva para la coronación exitosa de su empeño.

Meses antes, en el verano de 1915, Einstein había visitado Gotinga, invitado por Hilbert, para exponer el estado en que se encontraban sus investigaciones. Quedó impresionado con la personalidad de Hilbert. Con él mantuvo una fluida correspondencia en el intervalo crítico que precedió a la publicación de las ecuaciones. En el mes de noviembre se produjo entre ellos un intenso intercambio de pareceres e ideas, a veces a diario. Ese intercambio resultó decisivo para el respectivo avance hacia la formulación de las ecuaciones.

La ponencia de Hilbert dictada en Gotinga llevaba por título *Die Grundlagen der Physik* (“Los fundamentos de la física”). La pronunció dos días después de que Einstein presentara su tercera comunicación ante la Academia de Berlín.

Dicha comunicación de Einstein encerraba especial interés. Las ecuaciones formuladas en ella aportaron la primera explicación satisfactoria del fenómeno intrigante de las anomalías detectadas en el movimiento periheliano de Mercurio. Einstein consideraba que la resolución de ese viejo enigma astronómico representaba un éxito inegable de su teoría. (Las ecuaciones que allí aparecían sufrieron, sin embargo, algunos retoques más tarde.) En cuanto Hilbert recibió por correo

el borrador de la comunicación se aprestó a escribirle felicitándole por el logro. Lo que no impidió que prosiguieran, cada uno por su lado, en la búsqueda de ecuaciones de campo más adecuadas. Pudieron presentarlas una semana después, primero Hilbert y luego Einstein.

Las ecuaciones de Hilbert se publicaron en marzo de 1916 en el órgano oficial de la Sociedad Científica de Gotinga. Einstein presentó las suyas en la cuarta comunicación ante la Academia Prusiana. Salvo en pequeños detalles, coincidían (*véase recuadro*). Se operó así lo que parece ser un ejemplo asombroso de descubrimiento simultáneo, protagonizado por dos de los más prominentes científicos alemanes de su época; un hallazgo que constituye, por otra parte, uno de los hitos de la ciencia del siglo xx.

El singular episodio no ha dejado de atraer la atención de físicos e historiadores. Nosotros nos ceñiremos al telón de fondo del escenario en que ocurren los acontecimientos; en particular, nos detendremos en un documento revelador que he descubierto en el curso de mi investigación sobre la matemática en Gotinga. Ese documento, que acabo de hacer público, permite responder con pruebas tangibles a la cuestión de la prioridad.

En 1912 Einstein dejaba la Universidad de Praga para retornar a Zurich, donde años atrás había estudiado y obtenido su primer puesto académico en 1909. Desde su retorno a Suiza, se procuró la ayuda de un viejo amigo, el matemático Marcel Grossmann (1878-1936), en su empeño de elaborar una teoría relativista de la gravitación. Esta teoría



1. ALBERT EINSTEIN Y DAVID HILBERT trabajaron en intensa colaboración mientras se proponían obtener separadamente las ecuaciones de campo de covariancia general, núcleo de la teoría general de la relatividad. Einstein, que aparece fotografiado aquí en su visita a la Universidad de Madrid en 1923, fue quien desarrolló la teoría desde un principio. Hilbert (*derecha, abajo*) llegó a ella desde un punto de partida totalmente diferente, y aun cuando intentó derivar las ecuaciones por cuenta propia, nunca puso en duda que la teoría como tal debería ser atribuida en su totalidad al genio de Einstein.

conllevaba la ampliación del grupo de transformaciones bajo las cuales las teorías físicas deberían ser invariantes; la extensión abarcaría un grupo menos restringido que el de las "transformaciones de Lorentz", grupo que Einstein había adoptado como base de la teoría especial de la relatividad, formulada en 1905.

Grossmann le indicó a Einstein que el lenguaje matemático adecuado para emprender esa generalización podría tomarse de la teoría de los espacios riemannianos, así como del cálculo tensorial desarrollado hacia fines del siglo XIX por Gregorio Ricci-Curbastro (1853-1925).

Visto en retrospectiva, el requisito de covariancia general ha venido a considerarse el sello que identifica la teoría general de la relatividad. En su afán de hallar una formulación correcta de la teoría, Einstein se guió por diversos principios y exigencias fundamentales. La importancia que Einstein confería a cada uno de ellos pasó por múltiples avatares a lo largo de los años.

En las fases iniciales de su búsqueda, el requisito de covariancia general venía demandado por la voluntad de Einstein de imponer un principio físico que, en su opinión, constituía la base sobre la que descansaban los demás: el principio de equivalencia entre masa inercial y masa gravitatoria. El asumir este principio como válido para todos los fenómenos de la física —mecánica, electrodinámica, etcétera— implica la abolición de la distinción entre marcos de referencia acelerados y sin acelerar.

Ahora bien, esa distinción tiene cabida en la teoría newtoniana y en la teoría especial de la relatividad. Por tanto, Einstein concluyó lo siguiente: si tomamos el principio de equivalencia por clave de bóveda de una teoría relativista de la gravitación, entonces dicha teoría deberá generalizar el principio (especial) de relatividad formulado en 1905 para marcos de referencia inerciales (es decir, no acelerados). Una tal generalización debería ser válida para al menos algún tipo de



marcos acelerados; eso significa que sólo queda por establecer el rango preciso del tipo de transformaciones de coordenadas a las cuales debería extenderse la relatividad. La adopción del lenguaje tensorial ayudó a Einstein a resolver esa cuestión, aunque a través de una vía larga y penosa.

Las ecuaciones de campo de Hilbert y sus varias versiones

La ponencia de Hilbert ante la Sociedad Científica de Gotinga tuvo lugar el 20 de noviembre de 1915. Su contenido se publicó en las *Transacciones de la Sociedad* en marzo del año siguiente, incluyendo las ecuaciones de campo de covariancia general:

$$\sqrt{g} (K_{\mu\nu} - \frac{1}{2} K g_{\mu\nu}) = -\frac{\partial \sqrt{g} L}{\partial g^{\mu\nu}}. \quad (*)$$

Aquí, $K_{\mu\nu}$ representa el tensor de Ricci, K es la curvatura de Riemann y L es una función que depende de los potenciales electromagnéticos q_s , y de sus derivadas q_{sk} así como de los potenciales gravitatorios $g_{\mu\nu}$ (pero no de sus derivadas).

Hilbert afirmaba que estas ecuaciones de gravitación "parecían corresponder" a las de Einstein. Naturalmente, al leer la versión publicada de la ponencia de Hilbert, uno piensa en comparar las ecuaciones que allí aparecen con las ecuaciones definitivas de Einstein, es decir, con las que presentó cinco días después ante la Academia de Berlín:

$$K_{\mu\nu} = -\kappa (T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T). \quad (**)$$

Y en efecto, aunque Hilbert no lo hizo en detalle, es posible derivar, a partir de (*), la ecuación

$$K_{\mu\nu} - \frac{1}{2} K g_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu},$$

que resulta ser equivalente a (**).

Es necesario notar aquí, sin embargo, que el tensor de energía de tensión $T_{\mu\nu}$ no tiene una auténtica contrapartida en la teoría de Hilbert, ya que esta última se basa en la teoría de Mie, en la cual la materia es considerada

en términos puramente electrodinámicos. Pero si suponemos, como Hilbert, que este tensor queda totalmente determinado por variaciones en la función lagrangiana L , y si esta última depende tan sólo de la gravitación, obtenemos entonces que

$$T_{\mu\nu} = \frac{\partial L}{\partial g^{\mu\nu}}.$$

Esta última expresión permite establecer la equivalencia entre las ecuaciones de Hilbert y las de Einstein.

Pero las pruebas de imprenta fechadas el 6 de diciembre de 1915 indican que al dictar su charla en Gotinga Hilbert no tenía aún las ecuaciones (*). Las ecuaciones que Hilbert presentó no eran de variancia general; de hecho, ellas no mostraban explícitamente la expresión del componente gravitatorio. Su forma era:

$$[\sqrt{g} K]_{\mu\nu} + \frac{\partial \sqrt{g} L}{\partial g^{\mu\nu}} = 0,$$

donde

$$[\sqrt{g} K]_{\mu\nu} = \frac{\partial \sqrt{g} K}{\partial g^{\mu\nu}} - \sum_k \frac{\partial}{\partial \omega_k} \frac{\partial \sqrt{g} K}{\partial g^{\mu\nu}} + \sum_{k,l} \frac{\partial^2}{\partial \omega_k \partial \omega_l} \frac{\partial \sqrt{g} K}{\partial g^{\mu\nu}} \quad (\mu, \nu = 1, 2, 3, 4).$$

Aparentemente, fue sólo después de haber visto la ponencia de Einstein, publicada el 2 de diciembre, cuando Hilbert reformuló las suyas según (*). En las galeras, obviamente, Hilbert tampoco menciona la aparente correspondencia entre sus ecuaciones y las de Einstein. En la versión que se publicó en marzo de 1916, Hilbert justificó la forma explícita de las ecuaciones con un argumento matemático que resultó ser incorrecto. Esto no se corrigió hasta 1924.

En 1913 Einstein y Grossmann publicaron el *Esbozo de una teoría generalizada de la relatividad y de una teoría de la gravitación*, donde se representaba el campo gravitatorio por medio del tensor métrico, $g_{\mu\nu}$, que simultáneamente denotaba la estructura del espacio-tiempo. Por primera vez, la estructura del espacio-tiempo aparecía, no como un ente dado *a priori*, sino como entidad sujeta a ecuaciones dinámicas y dependiente del campo gravitatorio mismo y de sus fuentes. Este cambio radical de concepción fue otro de los pasos fundamentales que debían tomarse en la vía hacia la TGR.

Al generalizar el dominio de validez del principio de relatividad, lo ideal sería no imponer de entrada ningún tipo de limitaciones, sino establecer ecuaciones de covariancia general. Por otro lado, como la teoría newtoniana había demostrado con creces su eficacia descriptiva de los procesos gravitatorios, parecería razonable bus-

car ecuaciones de campo que generalizaran la de esta teoría, es decir, la ecuación de Poisson: $\Delta\phi = 4\pi\kappa\rho$, donde Δ representa el operador laplaciano, κ es una constante y ρ es la densidad de masa.

La generalización tensorial de la teoría newtoniana sugeriría que el término gravitatorio (miembro izquierdo de la ecuación) habría de involucrar derivadas segundas de la métrica, lo que supondría una generalización relativista del potencial gravitatorio newtoniano, mientras que en la fuente (miembro derecho de la ecuación) debería aparecer el tensor de energía de tensión, que sería la generalización relativista de la masa newtoniana.

La aportación de Grossmann en la generalización consistió en indicar a Einstein que el tensor de curvatura de Riemann era el único tensor que podía formarse a partir del tensor métrico y de sus derivadas primeras y segundas; manifestó, además, que la contracción

de ese tensor, es decir, el tensor de Ricci, podría ser el único candidato de covariancia general a ocupar el lugar del término gravitatorio.

Pero entre 1912 y 1915 Einstein rechazó ese posible candidato para sus ecuaciones de campo; desechó, por ende, la covariancia general como requisito básico de su teoría. Y así, en la doctrina presentada en el *Esbozo* de 1913, igual que en las versiones elaboradas hasta 1915, las ecuaciones son invariantes sólo bajo el grupo de las transformaciones lineales, con todo clase más general que la del grupo de Lorentz.

Los motivos que indujeron el rechazo del requisito de covariancia general se les escapaban a físicos e historiadores. Sólo la investigación reciente ha aclarado ese interesante capítulo de la historia de la ciencia. Los trabajos de John Norton, Jürgen Renn, John Stachel, Tilman Sauer y otros han desbrozado el camino. Ellos han estudiado, clasificado y comen-

tado la ingente cantidad de material manuscrito que nos ha quedado de aquella época, recreando la evolución del pensamiento de Einstein en este asunto. Reviste particular interés a este respecto el “Cuaderno de Zurich”, un mazo enmarañado de 96 páginas que abarca breves notas, esquemáticos cálculos y crípticas sugerencias; Einstein lo juntó al azar, sin orden ni concierto, sin fechas siquiera, aunque de su contenido se infiere que pertenece a sus días de Zurich, mientras se hallaba enfrascado en el desarrollo de la TGR.

Mediante el estudio del Cuaderno de Zurich y otros documentos, publicados o inéditos, los historiadores han reconstruido los vaivenes que caracterizaron la evolución del pensamiento de Einstein en su avance hacia la TGR. Uno de los aspectos más fascinantes de esa trayectoria tortuosa nos lo ofrece el papel desempeñado por el famoso “argumento del hoyo”. Einstein lo formuló en 1913. De acuerdo con dicho argumento, no se puede describir el fenómeno gravitatorio por medio de ecuaciones de covariancia general, ya que tales ecuaciones, presumiblemente, determinarían de manera *no única* el campo gravitatorio en una región carente de materia (un “hoyo”).

Einstein procedía del modo siguiente: aceptemos la existencia de una distribución de masa tal, que el tensor de energía de tensión $T_{\mu\nu}$ se anule sólo en el interior de dicha región, y supongamos que disponemos de ecuaciones de campo que sean de covariancia general, así como un sistema de soluciones $g_{\mu\nu}$ para cierto sistema de coordenadas x_μ . Para Einstein, la covariancia general podría admitir una segunda solución, $g'_{\mu\nu}$, idéntica a la primera fuera del hoyo, que variara gradual y continuamente desde su frontera hasta llegar a diferir de aquélla dentro de él. Sin embargo, consideraba problemática esta segunda solución, pues contradecía quizás el principio de la causalidad al no poderse determinar de manera unívoca los procesos físicos que acontecen en el interior del hoyo.

Einstein no podía llegar al final de su búsqueda mientras no abandonara el argumento del hoyo y aceptara la posibilidad de ecuaciones de campo de covariancia general. Lo que no sucedió hasta la última semana de noviembre de 1915, tras caer en la cuenta de un aspecto sutil, concerniente al significado físico de las transformaciones de coordenadas.

Einstein venía dando por supuesto que los puntos que se encuentran dentro del hoyo poseían individualidad física, antes incluso de que el tensor métrico quedara especificado en su interior. Con esa premisa, su razonamiento era válido. Pero hacia finales de 1915 advirtió la falacia encerrada en su explicación, al comprender que las propiedades físicas de los puntos del interior del hoyo dependían de la métrica; no existían, pues, antes de especificar ésta.

Durante su estancia en Zurich y posterior traslado en abril de 1914 a Berlín hasta pasado el otoño de 1915, Einstein elaboró varias versiones de las ecuaciones de campo de gravitación, que *no* satisfacían la covariancia general. Adujo que sus ecuaciones eran invariantes bajo la clase de transformaciones más amplia posible y a las que no podía aplicarse el argumento del hoyo.

El escenario cambió durante los meses decisivos de octubre y noviembre de 1915, a raíz de su visita a Gotinga y su intensa correspondencia con Hilbert. ¿Qué hacía mientras tanto Hilbert?

Desde comienzos del siglo XX la supremacía matemática de Gotinga resultaba ya indiscutible. Felix Klein (1849-1925), arquitecto de su prestigio, había traído a Hilbert desde Königsberg en 1895. En 1902 rehusó éste la cátedra que se le ofreciera en Berlín, alterando así definitivamente el equilibrio de fuerzas entre ambas universidades. Hilbert agregó ese

mismo año una tercera cátedra matemática, creada para su amigo Hermann Minkowski (1864-1909). En los años siguientes habrían de sumarse Carl Runge (1856-1927) y Ludwig Prandtl (1875-1953), así como el astrónomo Karl Schwarzschild (1873-1916) y el geofísico Emil Wiechert (1861-1928). En la misma universidad trabajaban Ernst Zermelo, Otto Blumenthal, Max Abraham, Max Born, Ernst Hellinger y otros.

La carrera matemática de Hilbert arrancó con importantes contribuciones a la teoría de los invariantes algebraicos y a la teoría algebraica de los números. En 1899 publicó *Fundamentos de la geometría*, obra clásica sobre cuyo tema central siguió trabajando los primeros años del nuevo siglo. Desde 1903 hasta 1912, se centró en la teoría de las ecuaciones integrales.

Compartía su profesión matemática con un vivo interés por la física contemporánea. Desde 1898 había dictado cursos y seminarios sobre mecánica, mecánica de fluidos, estructura de la materia, teoría cinética de los gases y teoría de la radiación. En 1912 empezó a publicar sobre los fundamentos matemáticos de tales disciplinas.

La verdad es que en Gotinga físicos y matemáticos colaboraron estrechamente. Uno de los frutos más provechosos de esta colaboración fueron los trabajos de Minkowski, entre 1907 y 1909, sobre fundamentación matemática de la teoría especial de

Sutil reconocimiento de Hilbert de la prioridad de Einstein

En el párrafo introductorio del artículo de marzo de 1916 Hilbert reconocía la prioridad: “Los impresionantes problemas formulados por Einstein, los profundos métodos que él desarrolló para resolverlos y las concepciones originales y potentes por medio de las cuales Mie elaboró su electrodinámica, han abierto nuevas vías en la investigación de los fundamentos de la física.”

Pero no era ésa la forma en que Hilbert presentó originalmente los dos componentes de su teoría. En las galeras de diciembre podía leerse: “Las concepciones originales y potentes por medio de las cuales Mie elaboró su electrodinámica, los impresionantes problemas formulados por Einstein y los profundos métodos que él desarrolló para resolverlos, han abierto nuevas vías en la investigación de los fundamentos de la física.”

Al abordar la historia de la relatividad desde la perspectiva de los trabajos de Einstein, la versión publicada en marzo es la que haría más justicia al peso específico de cada uno de los componentes de la teoría de Hilbert. Sin embargo, desde el punto de vista de la evolución de su pensamiento, la versión original refleja con mayor fidelidad su historia personal: al abordar la teoría de la relatividad, Hilbert se fijó primero en la teoría de Mie, donde sus intereses encontraron eco; más tarde prestó atención a la de Einstein.



2. MAX BORN, fotografiado aquí en su época de estudiante, fue el más destacado de los físicos que trabajaron en el círculo cercano a Hilbert en Gotinga. Fue él quien despertó el interés de Hilbert en la teoría de Gustav Mie como una posible base para la fundamentación de la física toda.

la relatividad, que Einstein acababa de formular. Hilbert y Minkowski examinaron a fondo el armazón teórico de la teoría de la relatividad, mientras iba madurando en la mente de Minkowski. Tras la muerte prematura de éste en 1909, Hilbert siguió diseminando sus ideas en los cursos de física que dictó en Gotinga.

A partir de 1911 Hilbert se interesó por la estructura atómica de la materia. En 1912, Gustav Mie (1868-1957), a la sazón en la Universidad de Halle, describió el electrón y sus propiedades físicas como una singularidad en el éter electromagnético. Mie no abrió el surco, pero sí fue probablemente el primero en elaborar una teoría más o menos coherente y con apoyatura matemática. Dicha teoría admitía la

relatividad especial, pero rechazaba la posibilidad de generalizar este principio. La teoría de Mie constituyía una generalización de la geometría plana del espacio-tiempo que Minkowski había desarrollado con anterioridad.

Max Born (1882-1970) elaboró algunas ideas de Mie en el año 1913 y logró entusiasmar a Hilbert con ellas. Durante 1914 y 1915 Hilbert estudió a fondo la teoría y sus consecuencias. Y la adoptó como esquema modular de un programa unificado de fundamentación de la física, donde los distintos fenómenos de la naturaleza se consideraran expresiones de una sola realidad electromagnética subyacente.

En las reuniones de la sociedad matemática de Gotinga, presididas

siempre por Hilbert, se pasó revista a los recientes trabajos de Einstein; se comentó, en particular, el *Esbozo de una teoría de gravitación*, escrito con Grossmann. Incidentalmente, Mie se propuso, sin conseguirlo, incorporar en su teoría los fenómenos gravitatorios. En diferentes ocasiones a lo largo del año 1914, Mie y Einstein se enzarzaron en agria disputa sobre las ventajas y desventajas de sus respectivas teorías a la hora de considerarlas posibles generalizaciones relativistas de la teoría newtoniana de la gravitación.

Por tanto, al ser invitado Einstein a Gotinga en el verano de 1915, el ambiente estaba preparado para que Hilbert se aplicara a la solución de los problemas planteados por la TGR. Hilbert pensaba elaborar con mayor rigor las ideas avanzadas por Mie y resolver los problemas que éste había dejado pendientes.

Mas, a sugerencia de Born, Hilbert pensó que las ideas desarrolladas por Einstein le ofrecerían los medios adecuados para alcanzar su meta, que no era otra que hallar una teoría unificada de campo, una "fundamentación de la física". La combinación de las teorías de Mie con las de Einstein iba a servirle de base para lograrlo.

Einstein arribó a Gotinga en junio de 1915. Dictó seis conferencias sobre el estado de sus investigaciones en torno a la teoría general de la relatividad. Quedó gratamente impresionado por la recepción que le fue otorgada y, en particular, por la actitud de Hilbert. "En Gotinga he tenido el placer de ver que mis ideas fueron totalmente entendidas, hasta los últimos detalles", escribió a Sommerfeld, a su retorno a Berlín. Y añadía: "Especial entusiasmo me ha causado Hilbert. ¡Una personalidad impresionante!"

No hay datos que revelen la versión de su teoría que expuso Einstein en Gotinga. Parece verosímil que defendiera, modificada, la desarrollada con Grossmann, donde postulaba la invariancia de las ecuaciones gravitacionales bajo transformaciones lineales. Ni Klein ni Hilbert, que se separa, objetaron la argumentación restrictiva de Einstein, en particular, el argumento del hoyo.

Llegado octubre, el entusiasmo de Einstein con sus resultados reforzado con su visita a Gotinga empezó a debilitarse. En carta del 7 de noviembre, confesaba a Hilbert que desde hacía algunas semanas estaba convencido del fallo de los métodos usados en sus

demostraciones. Desde ese momento, Hilbert y Einstein se enzarzaron en un amistoso reto intelectual: formular las ecuaciones del campo gravitatorio definitivas; ese duelo se reflejó en una correspondencia, a veces diaria, que les permitía seguir sus avances respectivos.

De las cuatro versiones que Einstein expuso ante la Academia de Berlín, la tercera, presentada el 18 de noviembre, constituyó un éxito. La teoría relativista de la gravitación daba cuenta precisa de las misteriosas anomalías encontradas desde 1859 en el movimiento perihélico de Mercurio. (La teoría newtoniana nunca había podido explicar el fenómeno.) Con todo, la tercera versión de la teoría no abandonaba aún las limitaciones autoimpuestas por Einstein sobre la clase de transformaciones admitidas.

La ponencia de Hilbert ante la Sociedad Científica de Gotinga tuvo lugar dos días después. Se publicó en el número de marzo del año siguiente en la revista de la Sociedad, con inclusión de las ecuaciones de campo de covariancia general. Hilbert agregaba que sus ecuaciones de gravitación "parecían corresponder" con las de Einstein. ¿Hasta qué punto se parecen con las ecuaciones definitivas de Einstein? En muchísimo (*ver recuadro*), salvo que la teoría de Hilbert se basa en la teoría de Mie, que considera la materia desde un enfoque exclusivamente electrodinámico.

Hilbert y Einstein terminaron por formular ecuaciones del campo gravitatorio que satisfacían el requerimiento de covariancia general. El curso de los eventos aquí descritos instó, inevitablemente, a preguntarse por la prioridad en el descubrimiento. Hilbert, digámoslo cuanto antes, nunca puso en duda la prioridad de Einstein. Siempre que habló de la teoría general de la relatividad no dejó de atribuir a Einstein "uno de los mayores logros jamás conseguidos por el espíritu humano".

No ocurrió lo mismo con sus contemporáneos Klein, Wolfgang Pauli (1900-

1958) y Hermann Weyl (1885-1955), quienes en algunas publicaciones y cartas otorgaron a Hilbert la prioridad en la derivación de las ecuaciones de campo. La reacción de Einstein en diciembre de 1915 parecería apoyar este punto de vista. En carta a un amigo de Zurich, junto a la confesión de la indecible alegría que siente por haber coronado su teoría, se quejaba (en alusión a Hilbert) de que "sólo un colega ha entendido cabalmente la teoría, y éste ha tratado de manera muy astuta de 'coapropiársela'".

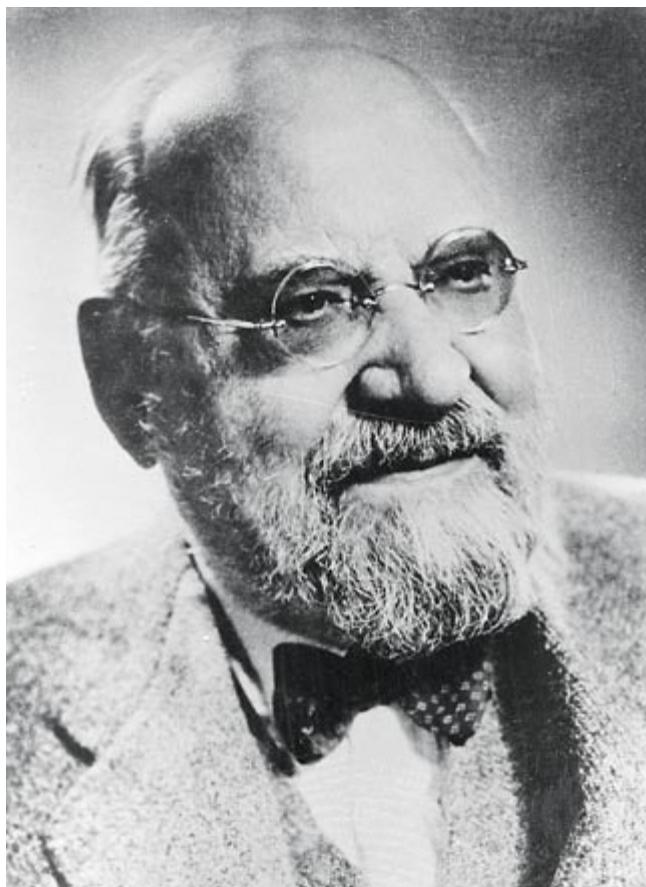
Por si no estuviera claro le escribía a Hilbert con fecha del 20 de diciembre: "Ha habido últimamente entre nosotros un enfriamiento de las relaciones cuyas razones no quisiera analizar. Yo he tenido que luchar en mi interior contra todo resentimiento, y he conseguido vencerlo. De nuevo puedo volver a pensar en usted con sentimiento de amistad y le ruego que tenga para mí esa misma disposición. Sería una lástima que dos hombres como nosotros, cuyo trabajo los ha colocado por encima de este

vil mundo, no se rindieran mutuo reconocimiento."

Los historiadores de la ciencia han venido repitiendo que Hilbert y Einstein llegaron casi simultáneamente a las ecuaciones de campo correctas, atribuyendo al primero su formulación correcta. Se ha sugerido incluso que fue Einstein quien "se coapropió" de los resultados de Hilbert, al identificar en una de las cartas de éste el crucial término de la traza, $-\frac{1}{2}g_{\mu\nu}K$, agregado por Einstein sólo en su tercera ponencia del 18 de noviembre. Esta posibilidad queda descartada en cuanto vemos la enrevesada complejidad matemática del artículo de Hilbert. Einstein hubiera tardado muchísimo tiempo en entenderlo, si es que podía comprender las sutilezas de su contenido. Pese a todo, se seguía insistiendo en que Einstein desarrolló la teoría y Hilbert logró la prioridad en la formulación correcta de las ecuaciones cruciales.

En mis buceos en los archivos de Hilbert, conservados en la Universidad de Gotinga, di con un documento inédito, cuya información nos obliga a reinterpretar el curso de los acontecimientos arriba descritos. Se trata de las galeradas originales del artículo de Hilbert publicado en marzo de 1916. Un sello estampado en la primera página de estas cuartillas de prueba revela la fecha en que las recibió de la imprenta: 6 de diciembre de 1915, es decir, dos semanas después de dictar la ponencia.

El artículo publicado y las galeradas indican que leyó la ponencia el 20 de noviembre de 1915. Ahora bien, entre las pruebas de imprenta y el artículo finalmente impreso existen sustanciales diferencias que dejan ver de manera nítida las correcciones introducidas por Hilbert. En particular, las galeradas nos revelan sin ambigüedad que la disputa sobre prioridad carece ya de sentido: en la ponencia del 20 de noviembre ante la Sociedad Científica de Gotinga, Hilbert no incluyó ecuaciones de campo gravitatorio de covariancia general.



3. GUSTAV MIE desarrolló en detalle matemático una teoría electromagnética de la materia, esperando explicar a través de ella todos los fenómenos físicos, incluyendo la gravitación. Los físicos contemporáneos no le atribuyeron ningún interés a su teoría desde un principio.

En su versión publicada Hilbert hace referencia a la cuarta ponencia de Einstein, del 25 de noviembre, que apareció publicada el siguiente 2 de diciembre. Hilbert pudo haber introducido los cambios necesarios en su artículo después de haber leído el de Einstein.

Para explicar con exactitud las diferencias entre el contenido original de la ponencia de Hilbert y el de su versión impresa deberíamos discutir todos los detalles del trabajo, algo que sobrepasa el presente marco. Me limitaré, pues, a señalar algunos puntos generales que le permitan al lector hacerse una idea de lo sucedido.

En las galeras, Hilbert afirmaba expresamente que su teoría *no podía* satisfacer la covariancia general. Para que no quedaran dudas del punto de referencia pertinente, Hilbert razonaba la necesidad de agregar a las diez ecuaciones diferenciales —que corresponden en su teoría a los fenómenos gravitatorios y que son de covariancia general— otras cuatro ecuaciones para los procesos electromagnéticos, de covariancia más limitada, ya que de lo contrario se estaría violando el principio de causalidad. En otras palabras, a estas alturas Hilbert está todavía aceptando en su totalidad las consecuencias del argumento del hoyo de Einstein.

En la versión publicada en marzo, por contra, Hilbert abandonó este argumento. Y en la segunda parte de su trabajo, publicada en 1917, dio una nueva definición de la causalidad dentro de una teoría de covariancia general, definición que se sigue utilizando todavía hoy. Más aún, en esa oportunidad Hilbert recordaba que Einstein postuló, en las versiones anteriores de su teoría, ecuaciones de covariancia limitada.

La correspondencia entre Hilbert y Einstein nos manifiesta que abandonaron el argumento del hoyo y sus consecuencias de manera casi simultánea, por mutua influencia. Pero las galeras nos demuestran que Hilbert no lo hizo antes de ver los resultados definitivos de Einstein.

Otra diferencia de interés es la siguiente: en las galeras Hilbert presentó un lagrangiano que incluye el término gravitatorio, e indicó que el componente gravitatorio de las ecuaciones aparece como una derivada variacional del término gravitatorio con respecto a la métrica $g_{\mu\nu}$, tal y como debe serlo en la teoría.

Sin embargo, él no presentó de manera alguna la forma explícita de este componente gravitacional. Por contra, en la versión publicada las ecuaciones aparecen de forma explícita, según hemos mencionado.

Y lo que reviste mayor interés: Hilbert explica que las ecuaciones se justifican directamente, sin ningún cálculo adicional, debido a que el tensor de Ricci que aparece en ellas, $K_{\mu\nu}$, es el único tensor de segundo orden (fuera de $g_{\mu\nu}$), mientras que la traza K es el único invariante que puede construirse a partir de los $g_{\mu\nu}$ y de sus derivadas primeras y segundas. Pero este argumento es matemáticamente incorrecto; lo advirtió Hilbert, quien, al republicar estos trabajos en 1924, reformuló el argumento, introduciendo una explicación general del cálculo apropiado del término gravitatorio.

Hilbert nunca comentó explícitamente los cambios que introdujo en las varias versiones de su teoría. Junto con eso, terminó por comprender la mayor profundidad y generalidad de la teoría einsteiniana y siempre le concedió el crédito que se merecía.

Otro punto de interés concierne al significado de los problemas físicos involucrados y el enfoque con que uno y otro los afrontaba. Según hemos señalado, la complejidad de los problemas y de su interrelación con los formalismos matemáticos desarrollados para explicarlos eran un punto de interés crucial para Einstein; en su solución invirtió Einstein esfuerzo y tiempo. Lo admite en carta a Hilbert del 18 de noviembre: "No tuve ninguna dificultad en encontrar las ecuaciones de covariancia general para los $g_{\mu\nu}$. Eso es fácil con ayuda del tensor de Riemann. Lo que es en verdad difícil es reconocer que esas ecuaciones constituyen una generalización; más aún, una generalización simple y natural de las leyes de Newton." Este tema, tan importante para Einstein, nunca fue mencionado por Hilbert, quien pasó muy por encima de esos problemas y es probable que ni siquiera conociera el significado real de todos.

Cometeríamos una grave injusticia histórica si dejásemos nuestra exposición en la denuncia del plagio. La verdad reclama un planteamiento de más vuelo. Hemos recordado el peculiar estilo de investigación que caracterizó a la escuela de Gotinga en la época de Hilbert y Klein;

un estilo y un ambiente de trabajo donde el eje central de la actividad académica lo constituía la interacción entre profesores y alumnos.

En ese medio, la investigación realizada por uno contaba con el concurso de ideas, técnicas y problemas aportados por otros y que pasaban directamente a formar parte del patrimonio común. A veces, se comentaban ideas nacidas en otros centros, se reformulaban y desarrollaban según los intereses locales. En esa atmósfera no siempre es fácil distinguir la paternidad y la deuda intelectual. De ahí el término "coapropiarse" que Einstein menciona en su carta, y que atribuía a Max Abraham, quien había trabajado anteriormente en Gotinga. Un término que no es sinónimo de plagio.

Quizá no lleguemos nunca a saber con certeza las motivaciones y las circunstancias que llevaron a Hilbert a introducir los cambios en la corrección de las pruebas de su ponencia. Pudo haber, en dosis variables, malicia, ambición, ingenuidad y reconocimiento auténtico. Lo cierto es que desde un comienzo no cabía la posibilidad de que se arrogara la prioridad del desarrollo de la teoría einsteiniana. Ni lo necesitaba. Hilbert gozaba ya de sólida fama en la comunidad científica. Queda, además, su producción posterior: en sus conferencias, cursos y publicaciones, nunca cesó de atribuir la teoría general de la relatividad a Einstein, ni dudó tampoco en calificarla como "la creación más notable del espíritu humano".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HOW EINSTEIN FOUND HIS FIELD EQUATIONS. J. Norton en *Einstein and the History of General Relativity*, dirigido por D. Howard y J. Stachel, págs. 101-159; Birkhäuser, Boston, 1989.

EINSTEINS ZÜRICHER NOTIZBUCH. J. Renn y T. Sauer en *Physikalische Blätter*, vol. 52, págs. 865-872; 1996.

BELATED DECISION IN THE HILBERT-EINSTEIN PRIORITY DISPUTE. L. Corry, J. Renn, y J. Stachel en *Science*, vol. 278, págs. 1270-1273; 14 de noviembre, 1997.

HERMANN MINKOWSKI AND THE POSTULATE OF RELATIVITY. L. Corry en *Archive for History of Exact Science*, vol. 51, n.º 4, págs. 273-314; 1997.

Aventuras en el espaciotiempo curvo

La posibilidad de “nadar” y “planear” en un espacio curvo y vacío muestra que, pasados más de noventa años, la teoría de la relatividad general de Einstein sigue sorprendiendo

Eduardo Guéron

CONCEPTOS BASICOS

- En la teoría general de la relatividad de Albert Einstein, la gravedad surge de que el espaciotiempo se curva. Hoy, 90 años después de que Einstein desarrollara las ecuaciones de la teoría, los físicos siguen descubriendo en ellas nuevas sorpresas.
- Por ejemplo, en un espacio curvo un cuerpo puede, tal parece, desafiar la física básica y “nadar” por un vacío sin necesidad de empujar contra nada ni de ser empujado por nada.
- El espaciotiempo curvo permite una suerte de planeo gracias al cual un cuerpo puede frenar su caída incluso en el vacío.

En una famosa serie de historias escrita en los años cuarenta, el físico George Gamow relataba las aventuras de un tal señor C. G. H. Tompkins, humilde empleado de banca, que tenía vívidos sueños de mundos donde la vida cotidiana se topaba con extraños fenómenos físicos. En uno de estos mundos, la velocidad de la luz era de 15 kilómetros por hora; pedaleando, se ponían de manifiesto los singulares efectos de la teoría especial de la relatividad de Einstein.

No hace mucho, conocí, en sentido figurado, a un nieto del señor Tompkins, el señor E. M. Everard, filósofo e ingeniero que prolonga la tradición de su antepasado. Me contó una extraordinaria experiencia que había tenido. Guardaba relación con algunos aspectos recientemente descubiertos de la teoría de la relatividad general de Einstein. Voy a compartirlos con el lector mientras narro su sorprendente historia, plagada de espacios curvos, gatos que se contorsionan en el aire y astronautas en

apuros que nadan como un perro a través del vacío; quizás hasta puede que estuviese por allí Isaac Newton, revolviéndose en su tumba.

Curvas peligrosas

En una lejana región del cosmos, el señor Everard había salido de su nave espacial para reparar una antena averiada. Observó que las hermosas luces de las estrellas lejanas parecían distorsionadas, como si las estuviera viendo a través de una gruesa lente. Sintió también que algo estiraba suavemente su cuerpo. Suspechando que sabía de qué se trataba, tomó un puntero láser y un tubo de crema de afeitar del equipo de supervivencia que llevaba en el cinturón, y encendió la mochila cohete para comprobar su hipótesis.

Con el rayo láser sirviendo de guía, avanzó en línea recta 100 metros, giró a la izquierda para avanzar varias docenas de metros en esa dirección y regresó al punto de partida; el triángulo que así recorría lo dibujaba mientras



con la crema de afeitar, como en las acrobacias aéreas con la estela de humo del avión. Luego, midió los ángulos de los vértices de su triángulo con un transportador y los sumó. El resultado fue de más de 180 grados.

Lejos de sorprenderse de esta aparente violación de las reglas de la geometría, el señor Everard recordó con afecto un travieso incidente no euclídeo de su infancia, cuando dibujó triángulos en el globo terráqueo del estudio de sus padres. Allí también sumaban los ángulos más de 180 grados. Llegó a la conclusión de que el espacio que le rodeaba debía de ser curvo como la superficie de aquel globo de hacía tanto y a tantos años luz de distancia. La curvatura explicaba, además, la distorsión de la luz de las estrellas y la sensación un poco desagradable de que le estiraban.

Así pues, el señor Everard comprendió que estaba experimentando los efectos de la relatividad general que se cuentan en los libros de texto. Experimentos bastante más refinados

que su juego con la crema de afeitar los habían confirmado hacia mucho: la materia y la energía curvan el espacio y el tiempo, curvatura del espaciotiempo que hace que la materia y la energía (como su rayo láser y la luz de las estrellas) sigan trayectorias curvas. Sus pies y su cabeza “querían” seguir curvas ligeramente diferentes; la discrepancia producía la sensación de estiramiento.

Mientras pensaba en todo eso, el señor Everard apretó el botón para encender de nuevo la mochila cohete y volver a la nave espacial, pero no pasó nada. Alarmado, vio que el indicador de combustible marcaba cero, y eso estando a unos buenos (o más bien malos) 100 metros de la seguridad de su cabina. Peor aún: el triángulo de espuma y él mismo se estaban alejando de la nave a una velocidad constante.

Sin perder tiempo, arrojó el transportador, el láser y el tubo de espuma y cuanto llevaba

ESPAZOTIEMPO CURVO

Según la relatividad general, la gravedad surge de la curvatura del espaciotiempo. Pero, ¿qué significa para el espaciotiempo ser curvo y cuáles son algunas de las consecuencias?

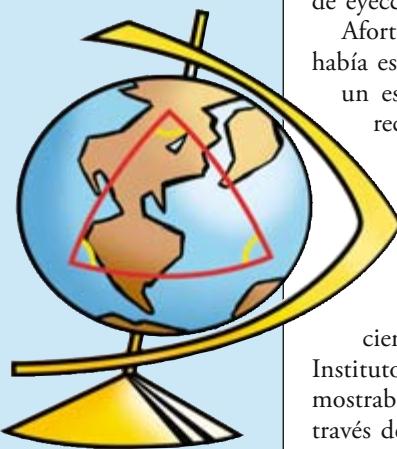


ESPACIO PLANO

La geometría que se enseña en la escuela es euclídea, la geometría del espacio "plano". En un tal espacio, los ángulos de un triángulo suman 180 grados. Una superficie bidimensional plana, la superficie de una mesa de billar, es un espacio plano. Así es también, en una muy buena aproximación, el mundo tridimensional que nos rodea: si se "dibuja" un triángulo en el aire con tres rayos láser para marcar los lados, los ángulos sumarán 180 grados en cualquier lugar que se dibuje.

ESPACIO CURVO

La superficie de una esfera constituye un ejemplo de superficie bidimensional curvada. En una esfera, los ángulos de un triángulo suman más de 180 grados, característica propia de una región de curvatura positiva. Los lados del triángulo nos pueden parecer curvos a nosotros, en tres dimensiones, pero le resultarían perfectamente rectos a una hormiga que circulase por la esfera.



CURVATURA NEGATIVA

La superficie de una silla de montar tiene curvatura negativa: los ángulos de un triángulo suman menos de 180 grados.

LA GRAVEDAD SE DEBE A LA CURVATURA

Según la relatividad general, las concentraciones de masa y energía curvan a su alrededor el espaciotiempo. Esta curvatura hace que los objetos, es el caso de la Tierra en órbita alrededor del Sol, sigan trayectorias curvadas y caigan unos hacia los otros. En la mayoría de los casos, las trayectorias son muy similares a las predichas por la ley de la gravedad de Newton, calculada en un espaciotiempo plano. Se ilustra a menudo el concepto representando el espacio como si fuera una hoja elástica curvada (*abajo*), pero esta imagen es incompleta; en ella no figura cómo se deforma el tiempo a la vez que el espacio. Esta deformación hace que el tiempo pase ligeramente más despacio en lo más profundo del pozo gravitacional. Conocer cómo el tiempo se deforma es esencial para determinar las trayectorias correctas.



en el cinturón, en la dirección contraria a la de su nave espacial. De acuerdo con el principio de conservación del momento, con cada lanzamiento retrocedía un poco en la dirección opuesta, hacia la nave. Incluso se desprendió de la mochila cohete y lanzó ese peso muerto tan fuerte como pudo. Desgraciadamente, cuando ya no tenía nada más para lanzar, se encontró con que había hecho sólo lo suficiente para contrarrestar el movimiento inicial que le alejaba de la nave. Estaba ahora flotando inmóvil con respecto a la nave, aunque lejos de ella. La situación podía parecer desesperada: su profesor de física del bachillerato le había inculcado que no es posible acelerar un cuerpo sin una fuerza externa o alguna clase de eyeción de masa.

Afortunadamente, nuestro amigo a la deriva había establecido antes que se encontraba en un espacio curvo. Sabía lo bastante para recordar que algunas leyes de conservación de la física operan en un espacio curvo de una forma diferente de su modo de actuar en el espacio plano newtoniano (sin curvatura).

En particular, recordó la lectura de un trabajo del 2003 en el que un científico planetario, Jack Wisdom, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, demostraba que un astronauta podría moverse a través de un espacio curvado de una manera que resultaba imposible según las leyes del movimiento de Newton: moviendo brazos y piernas de forma adecuada. En otras palabras: podía nadar. No se requería ningún fluido contra el que empujar; nadaría en el vacío como un perro en el agua.

El truco de Wisdom se parece bastante al modo en que un gato soltado panza arriba gira el cuerpo y contrae y extiende las patas para darse la vuelta y caer sobre ellas. Las leyes de la mecánica newtoniana permiten que el gato cambie de orientación sin necesidad de empujar algo o de ser empujado por nada; en cambio, impiden que modifique su velocidad.

Los astronautas, por ejemplo los que están a bordo de la Estación Espacial Internacional, aplican una versión del truco de la torsión del gato para girar en la ingravidez, sin necesidad de agarrarse a un asidero.

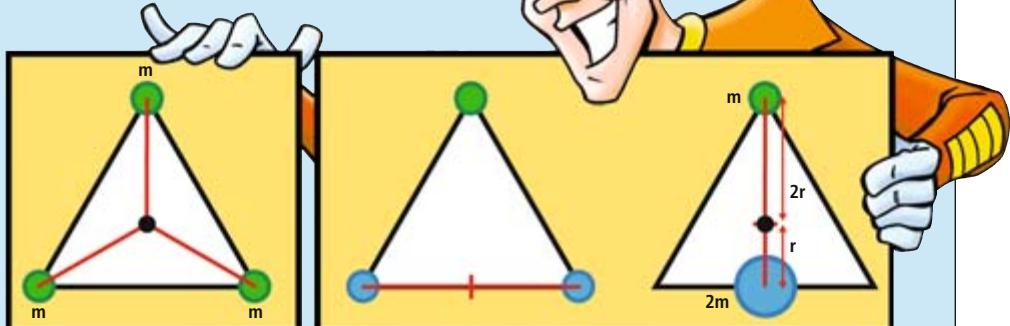
En el espacio curvo de la relatividad general, un gato o un astronauta pueden realizar las acrobacias más impresionantes. Nuestro héroe retrocedió hasta su nave espacial en algo más de una hora; aunque no ba-

¿POR QUÉ LA CURVATURA PERMITE MOVIMIENTOS INUSUALES?

En el espacio plano, un sistema aislado en reposo no puede mover su centro de masas, pero el espacio curvo tiene un resquicio para eludir esa restricción.

EL CENTRO DE MASAS ESTÁ BIEN DEFINIDO EN UN ESPACIO PLANO

Tres bolas de igual masa, m , en los vértices de un triángulo equilátero tienen su centro de masas en el centro geométrico del triángulo (*punto negro*). Esta posición se puede calcular como el punto que es equidistante de las tres esquinas (izquierda), pero también se puede calcular en dos etapas (derecha).



EL CENTRO DE MASAS ESTÁ MAL DEFINIDO EN UN ESPACIO CURVO

Ahora imaginemos que las tres bolas se encuentran en un espacio curvo, el de la superficie de una esfera por ejemplo, y se encuentran colocadas en lugares correspondientes a Dakar, Singapur y Tahití en la Tierra. Calcular el centro de masas de las bolas mediante la búsqueda de un punto equidistante da un punto cerca del Polo Norte (izquierda). Calcular el centro de masas en dos etapas, sin embargo, da un punto cerca del ecuador (derecha). Esta ambigüedadacerca del centro de masas hace que sea posible "nadar" a través de un espacio curvo.



tió un récord olímpico, esa velocidad bastó y sobró para que sobreviviese y emprendiera más aventuras.

Lecciones de natación

¿Cómo funciona exactamente el fenómeno de Wisdom? ¿Cómo pudo el señor Everard nadar en el espacio? En un espacio plano, del tipo supuesto por la mecánica newtoniana, y también por la relatividad especial, el centro de masas de un sistema aislado (por ejemplo, el astronauta más la mochila) nunca se acelera. Supongamos que el señor Everard hubiera atado una larga cuerda a su mochila antes de lanzarla y que, a continuación, la recuperara de nuevo. Durante el ejercicio, como la mochila y el astronauta primero se alejarían y luego se reunirían de nuevo, el centro de masas habría permanecido inmóvil. Al final, el astronauta y la mochila volverían a la posición inicial. Más en general, Everard no podría moverse modificando cíclicamente su forma o estructura y, a continuación, recuperándola de nuevo.

En el espacio curvo, la situación cambia. Para entender por qué, imagínese una criatura con dos brazos y una cola que se pueden extender y retraer (véase el recuadro "Natación

en la esfera"). Para simplificar la discusión, imagínese que prácticamente toda la masa del alienígena se concentra en los extremos de sus tres partes, una cuarta parte de la misma en cada brazo y la otra mitad en la punta de la cola. Si flota en el espacio *plano*, este alienígena no podrá ni avanzar ni retroceder. Si extiende la cola, digamos, dos metros, las manos avanzarán un metro y la punta de la cola retrocederá un metro: el centro de masas no se moverá. La retracción de la cola colocará de nuevo al alienígena entero en su posición de partida, igual que el señor Everard y su inseparable mochila. Una cosa parecida sucederá, si intenta extender los brazos. Sea cual sea la combinación o secuencia de extensiones y retracciones de las extremidades que lleve a cabo, su centro de masas seguirá igual. Lo máximo que podrá hacer es el truco del gato (extender las extremidades, girarlas, retraerlas y girarlas de nuevo) para cambiar la dirección en que esté apuntando.

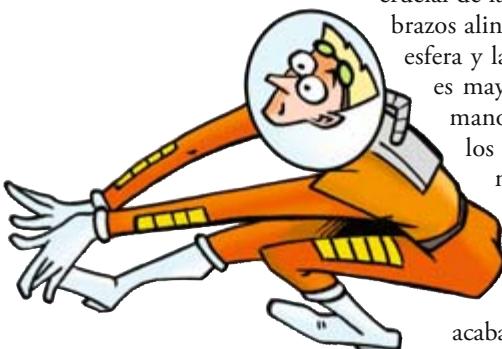
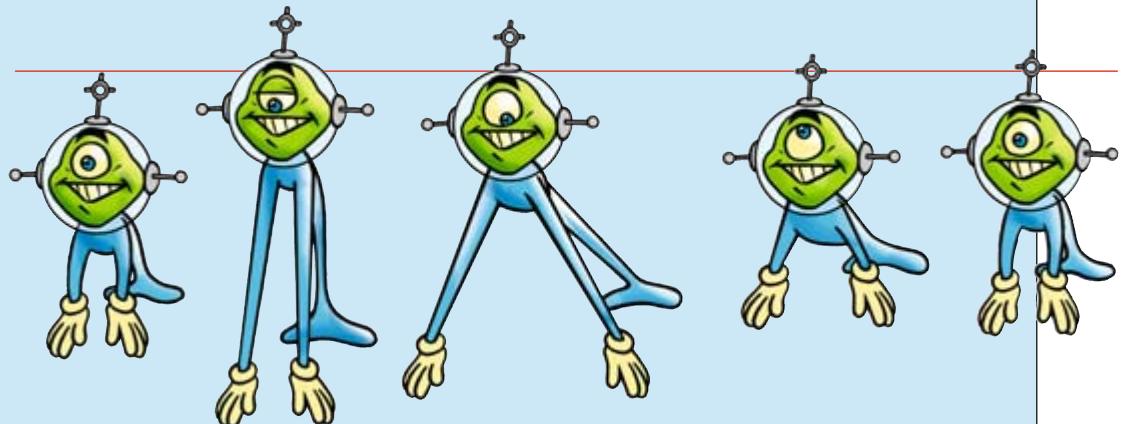
Pero ahora imaginemos que este alienígena vive en un espacio curvo, con una forma como la superficie de una esfera. Para ayudar a imaginarlo, me valdré de términos geográficos para describir las posiciones y direcciones

El autor

Eduardo Guérón es profesor asociado de matemáticas aplicadas en la Universidad Federal de ABC, en Brasil (la "Región ABC" limita con la ciudad de São Paulo). Guérón obtuvo su doctorado en la Universidad estatal de Campinas, en Brasil, en 2001, y fue científico visitante en el Instituto de Tecnología de Massachusetts de 2003 a 2004. Estudia la gravedad, los sistemas dinámicos y problemas fundamentales en física general.

NADADOR EN UN ESPACIOTIEMPO CURVO

Una máquina o una criatura alienígena con forma de trípode podría nadar a través de espaciotiempos vacíos pero curvos al extender, abrir, retraer y cerrar las piernas cíclicamente. Cada ciclo de cuatro acciones mueve el trípode a través del espacio —aquí una pequeña distancia hacia la parte superior de la página—, a pesar de que no expulsa ninguna sustancia propulsora y de que ninguna fuerza externa actúa sobre él.



El espaciotiempo está sólo muy ligeramente curvado, excepto cerca de un agujero negro. Por lo tanto, en la práctica, una persona tendría que nadar miles de millones de años antes de trasladarse un milímetro.

sobre la esfera. El alienígena parte del ecuador de la esfera, con la cabeza apuntando hacia el oeste y brazos y cola contraídos. Extiende ambos brazos, uno hacia el norte y otro hacia el sur. A continuación, alarga la cola mientras mantiene los brazos extendidos perpendiculares al cuerpo. Al igual que en el espacio plano, si la punta pesada de la cola se mueve un metro hacia el este, las manos se moverán un metro al oeste. Aquí está la diferencia crucial de la esfera: el alienígena mantiene los brazos alineados con líneas de longitud de la esfera y la distancia entre ese tipo de líneas es mayor en el ecuador. Así, cuando las manos del extraterrestre (más cerca de los polos norte y sur de la esfera) se mueven un metro hacia el oeste, sus hombros (en el ecuador) se mueven más de un metro. Ahora, cuando contrae los brazos a lo largo de las líneas de longitud, acaba con las manos desplazadas más de un metro hacia el oeste. Cuando retrae la cola y recupera la configuración original del cuerpo, ¡se encontrará a una pequeña distancia hacia el oeste, a lo largo del ecuador, de su posición original!

Repitiendo cíclicamente esos movimientos, el alienígena avanza a lo largo del ecuador. La punta de la cola y manos, insólitamente pesadas, no son esenciales para la natación, pero resulta más fácil ver en qué medida los brazos se mueven en respuesta a la contracción de la cola, si toda la masa se concentra en esos tres puntos. Si las especies alienígenas dependieran de la natación en el espacio curvo para su supervivencia, no sería tan raro que evolucionaran de modo que tuvieran pesadas masas en las extremidades, porque así mejorarían la eficiencia de su natación. Al fin y al cabo, la masa situada en los codos no llegaría

tan lejos en la curvatura de la esfera como las manos y, por lo tanto, no produciría tanto desplazamiento adicional del cuerpo.

Una esfera es una superficie bidimensional, pero el mismo principio funciona en el espaciotiempo cuadridimensional curvo: también en él, los cambios cíclicos en la configuración de un sistema pueden dar lugar a un desplazamiento neto. El nadador propuesto por Wisdom era un trípode de patas telescópicas. Las piernas podían retraerse o extenderse en longitud; el ángulo entre ellas, abrirse o cerrarse. El trípode nadaba extendiendo las patas, abriendolas, contrayéndolas y cerrándolas. Cuanto mayor sea la curvatura del espaciotiempo del trípode, más lejos se desplazará mediante esa secuencia de movimientos.

¿Violación de las leyes del movimiento?

Aunque resulte sorprendente en un primer momento, la natación es una consecuencia directa de las leyes básicas de conservación, no una violación de las mismas. La natación funciona porque el propio concepto de centro de masas no está bien definido en un espacio curvo.

Supongamos que tenemos tres bolas de un kilogramo situadas en los vértices de un triángulo equilátero. En una superficie plana, su centro de masas es el centro geométrico del triángulo. Hay varias maneras de calcular dónde se encuentra el centro de masas; todos los métodos conducen al mismo resultado. Se puede encontrar el punto que está a igual distancia de las tres bolas. O bien, se pueden reemplazar dos de las bolas con una sola bola de dos kilogramos situada a medio camino entre ellas y, a continuación, calcular el centro de masas de dicha bola y la tercera bola (el punto que está a un tercio del camino según la

línea que va a la tercera bola). El resultado será el mismo. Este hecho geométrico repercute en la dinámica del sistema: el centro de masas de un sistema aislado nunca se acelera.

Sobre una superficie curva, sin embargo, los cálculos de métodos diferentes pueden no dar el mismo resultado. Consideremos un triángulo formado por tres bolas de igual masa situadas en Singapur, Dakar y Tahití, en la vecindad del ecuador las tres. Un punto equidistante a las tres bolas se hallaría cerca del Polo Norte. Sin embargo, si se sustituyen las bolas de Singapur y Dakar por otra más pesada situada entre ellas y, a continuación, se calcula la posición que está a un tercio del camino a lo largo del círculo máximo que une esa bola y la de Tahití, la respuesta caerá cerca del ecuador. Por lo tanto, el “centro de masas” sobre una superficie curva es ambiguo. Merced a ese fenómeno geométrico, un sistema podrá moverse en un espacio curvo aun cuando esté aislado de cualquier influencia externa.

No acaban ahí las sutilezas. Un ejercicio común en los cursos de física consiste en sumar las fuerzas que actúan sobre un cuerpo para determinar la fuerza resultante. Las fuerzas se expresan en notación vectorial, con flechas (o negritas). Para sumar dos vectores, se deslizan las flechas de manera que la base de una flecha coincida con la punta de la otra. En un espacio curvo, este procedimiento tiene problemas: la dirección de un vector puede cambiar cuando se desliza por una trayectoria cerrada. El procedimiento para calcular la fuerza total sobre un cuerpo en un espacio curvo es, por lo tanto, considerablemente más complicado y puede dar lugar a rarezas tales como la natación en el espaciotiempo.

Algunos efectos de la gravitación de Newton pueden parecer, a primera vista, similares a nadar en el vacío. Por ejemplo, un astronauta en órbita alrededor de la Tierra podría alterar su órbita al extenderse y ovillarse en diferentes etapas. Pero estos efectos newtonianos son distintos de la natación en el espaciotiempo, ya que se producen debido a que el campo gravitatorio varía de un lugar a otro. El astronauta no puede cambiar su órbita newtoniana con sólo repetir rápidamente movimientos muy pequeños; sí puede nadar de ese modo a través del espaciotiempo curvo.

Que la posibilidad de la natación en el espaciotiempo pasara inadvertida durante casi 90 años nos recuerda cuánto queda por aprender de las teorías de Einstein. A pesar de que es poco probable que construyamos un cohete nadador a corto plazo, el premio Nobel de física Frank Wilczek, también del MIT, ha sostenido que el trabajo de Wisdom abre in-

NATACION EN LA ESFERA

La natación a través de espaciotiempos curvos puede entenderse mejor con el ejemplo de un nadador alienígena bidimensional más simple, que vive en la superficie de una esfera.

PREPARADO PARA EMPEZAR A NADAR

El nadador encara el oeste con los brazos apuntando al norte y al sur y la cola al este. Para simplificar la discusión, imaginemos que toda la masa del nadador está concentrada en el final de sus extremidades, un cuarto en las manos y la mitad en la punta de la cola.



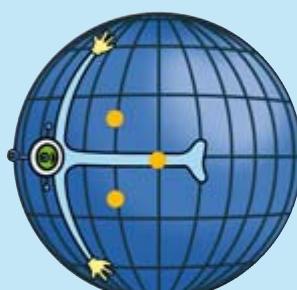
BRAZOS FUERA

Los brazos se extienden al norte y al sur (las bolas de color naranja marcan dónde estaban las manos al principio). Los movimientos iguales y opuestos mantienen el momento equilibrado.



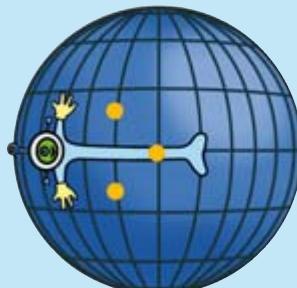
ESTIRAR LA COLA

Ahora la cola se extiende hacia el este. Para equilibrar el momento, las manos se mueven hacia el oeste. Al estar cerca de los polos de la esfera, las manos cruzan varias líneas de longitud, mientras recorren la misma distancia que la pesada punta de la cola; los “hombros” se mueven un extenso camino hacia el oeste a lo largo del ecuador.



BRAZOS DENTRO

Los brazos se retraen a lo largo de las líneas de longitud (que son en la esfera el equivalente de una recta). Las manos se hallan ahora mucho más lejos, hacia el oeste, de sus puntos de partida; mucho más de lo que lo está la punta de la cola, hacia el este, del suyo.



RETRAER LA COLA

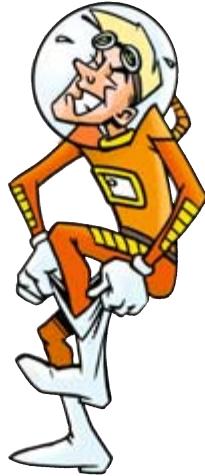
Cuando la cola se retrae de nuevo, las manos se mueven hacia atrás, hacia el este, para equilibrar el momento. El ciclo de acciones ha movido al nadador en su conjunto una corta distancia hacia el oeste, debido a la distancia “extra” en que se han movido las manos.



En una forma de silla de montar, que tiene curvatura negativa, las mismas acciones moverían al nadador hacia el este. Consultese <http://physics.technion.ac.il/~avron> para ver animaciones de los dos ejemplos.

"No puedes levantarte a ti mismo tirando de tus botas, pero sí con la ayuda de tus pies."

—Jack Wisdom, MIT



terrogantes profundos sobre la naturaleza del espacio y del tiempo.

En particular, los hallazgos de Wisdom nos llevan a la vieja cuestión de si el espacio es un objeto material por derecho propio (una posición conocida como sustancialismo) o un mero dispositivo conceptual conveniente para expresar las relaciones entre los cuerpos (una posición conocida como relacionalismo) [véase "Filosofía del tiempo" por George Musser; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2002].

Para ilustrar estos puntos de vista, imaginemos que el señor Everard está flotando en un universo vacío. No tiene estrellas o galaxias que le sirvan de puntos de referencia para juzgar su movimiento. Ernst Mach, un relacionalista, argumentó en 1893 que el movimiento no tendría sentido en esa situación. Sin embargo, incluso un espacio completamente vacío puede ser curvo, en cuyo caso el señor Everard podría nadar en él. Por lo tanto, parece que el espaciotiempo actúa como un fluido virtual con respecto al cual puede definirse el movimiento de un cuerpo aislado.

Incluso el espacio completamente vacío tiene una estructura geométrica determinada, otro punto a favor del sustancialismo. Al mismo tiempo, sin embargo, la materia (o cualquier otra forma de energía) es lo que da al espaciotíempo su estructura geométrica, de manera que el espaciotíempo no es independiente de su contenido, un punto a favor del relacionalismo. Este debate, que irrumpió en los intentos de desarrollar una teoría unificada de la física, sigue sin resolverse.

En las alas del tiempo

Agotado por el esfuerzo de nadar de vuelta a su nave espacial, el señor Everard descansaba en el interior de la cabina mientras el piloto automático planeaba un itinerario para regresar a casa. De repente, la alarma se accionó y las luces rojas empezaron a parpadear: la nave espacial estaba cayendo hacia un planeta gigante. A Everard le encantó esta oportunidad de nuevos e interesantes descubrimientos, pero el aterrizaje en el planeta no iba a ser fácil. La nave carecía de suficiente combustible para un descenso controlado por el motor y en el planeta, privado de atmósfera, el paracaídas resultaba inútil.

Afortunadamente, recordó el trabajo del 2007 que escribimos el físico matemático Ricardo A. Mosna, de la Universidad estatal de Campinas, y yo. Inspirados por el ejemplo de Wisdom, dimos con otra manera de explotar la relatividad general para controlar el movimiento. Nuestro análisis indicaba que un objeto puede frenar su descenso hacia un planeta al estirarse y contraerse repetidamente de manera asimétrica (en el sentido de que el movimiento de extensión sea más rápido que el de retracción). Una nave equipada con un dis-

PARECE UN GIRO

En la vecindad de la Tierra, el espaciotíempo se halla tan cerca de ser plano, que no se puede "nadar" a su través para cambiar de ubicación. Sin embargo, se puede cambiar la orientación sin necesidad de una fuerza externa (de manera muy parecida a como un gato que cae se gira para caer sobre sus pies). Esta es una manera de probarlo:

① Arrodillese o siéntese en una silla giratoria, preferentemente una que no ruede también. Coja un peso en un lado (el peso aumentará el efecto).

② Gire el peso a su alrededor hasta el otro lado, manteniendo el brazo extendido todo el rato. Para conservar el momento angular, la silla (y usted sobre ella) debe girar en la dirección opuesta.

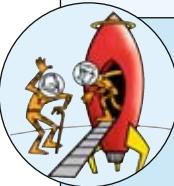
③ Ahora traslade el peso por delante de su cuerpo, manteniéndolo en tanto sea posible en una trayectoria que pase por el eje de la silla.

④ La silla girará en sentido contrario y desandará parte del camino hacia donde partió, pero acabará girada respecto a la posición original. Repitiendo el movimiento se puede girar una circunferencia completa si usted y la silla están bien equilibrados.



MAS ALLA DE NEWTON

La relatividad general predice desde hace mucho tiempo varios efectos que no tienen análogo en la gravitación de Newton, además de los fenómenos recientemente descubiertos de la natación y el planeo por el espaciotiempo.

EFFECTO	EJEMPLO	EXPLICACION	TEORIA	ESTADO ACTUAL	
Dilatación gravitatoria del tiempo		Una persona viaja cerca de un agujero negro; vuelve más joven que su gemela que se quedó en casa	El tiempo pasa más despacio en un campo gravitatorio fuerte	Inferido por Albert Einstein mientras desarrollaba la relatividad general	Se tiene en cuenta en la técnica desarrollada: el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) ha de prever la dilatación del tiempo gravitatorio en la temporización de sus señales para calcular posiciones exactas
Ondas gravitatorias		Ondas de gravedad propagándose desde un sistema estelar binario a la velocidad de la luz	Las ondas gravitatorias son oscilaciones que se propagan de la geometría del espaciotiempo, como si el propio espaciotiempo sufriera vibraciones compresoras y expansoras	De las ecuaciones de la relatividad general se sigue que ha de haber ondas gravitatorias, pero cuesta analizarlas con exactitud	Observadas indirectamente a finales de los años setenta del siglo pasado: el período orbital de un púlsar y una estrella de neutrones que formaban un sistema binario se acortaba con el tiempo, tal como se preveía que ocurriría a causa de la emisión de ondas gravitatorias. LIGO y otros experimentos buscan observaciones directas de ondas gravitatorias
Efecto Lense-Thirring		Un satélite cercano a la Tierra siente una fuerza que tira del mismo en la dirección de la rotación de la Tierra	Al igual que una pelota que girase en una melaza, una masa en rotación arrastra el propio espaciotiempo en torno, en pequeña cuantía	Predicho por Joseph Lense y Hans Thirring en 1918	En febrero de 2009 se anunció que los resultados del satélite Sonda de Gravedad B concordaban con lo predicho dentro de una incertidumbre experimental del 15 por ciento
Agujeros de gusano		Un hipotético atajo conecta dos regiones diferentes del universo	Tipos hipotéticos de energía proporcionarían espaciotiempos negativamente curvos, necesarios para constituir una estructura de agujero de gusano	Ya se habló de ellos en 1916; se demostró en 1988 que las ecuaciones de la relatividad general permiten agujeros de gusano transitables	Aún muy especulativos; la mayoría de los físicos cree que nunca se encontrarán

positivo móvil de este tipo podría actuar como un planeador, incluso en ausencia de aire.

En este caso, el efecto no tiene que ver con las características espaciales, sino con las propiedades temporales del movimiento, que sacan a la luz uno de los aspectos más profundos de las teorías de Einstein: la conexión entre el espacio y el tiempo. En la mecánica newtoniana, se especifica la ubicación de los eventos con tres coordenadas para la posición espacial y una para el tiempo, pero los conceptos de espacio y tiempo siguen siendo distintos.

En la relatividad especial, están indisolublemente entremezclados. Dos observadores con diferentes velocidades pueden no estar de acuerdo en sus mediciones de la distancia o del intervalo de tiempo entre dos sucesos, pero coincidirán en una cierta amalgama de espacio y tiempo. Por lo tanto, los observadores perciben el tiempo y el espacio, considerados por separado, de manera diferente, y sin embargo ven el mismo espaciotiempo.

En la relatividad general, la estructura del espaciotiempo se distorsiona (es decir, se curva), produciéndose así lo que percibimos

como fuerza de la gravedad. Mientras que la gravedad newtoniana implica sólo el espacio, la gravedad relativista implica también el tiempo. Esta distorsión del espacio y del tiempo da lugar a efectos tales como el "arrastre de coordenadas": un cuerpo en rotación (la Tierra, digamos) ejerce en la dirección de su rotación una ligera fuerza sobre otros objetos cercanos (los satélites en órbita, por ejemplo). En palabras llanas: la Tierra en rotación arrastra ligeramente al propio espaciotiempo que la rodea. Más en general, la velocidad de movimiento de una masa influye en el campo gravitacional que produce. Arrastrar las coordenadas y planear son ejemplos de este fenómeno.

El efecto de la natación se debe a la geometría no euclídea. El planeamiento relativista constituye una consecuencia de la indisolubilidad del espacio y el tiempo. Puede que no nos hayamos percatado aún de otros fenómenos afines, sumidos en las inescrutables ecuaciones de la relatividad general. Seguramente le quedan al señor Everard, y a otros discípulos, más aventuras por contar.

Bibliografía complementaria

SPACE, TIME, AND GRAVITY: THE THEORY OF THE BIG BANG AND BLACK HOLES. Robert M. Wald. University of Chicago Press, 1992.

SWIMMING IN SPACETIME: MOTION IN SPACE BY CYCLIC CHANGES IN BODY SHAPE. Jack Wisdom en *Science*, vol. 299, págs. 1865-1869; 21 de marzo, 2003.

SWIMMING VERSUS SWINGING EFFECTS IN SPACETIME. Eduardo Guérón, Clóvis A. S. Maia y George E. A. Matsas en *Physical Review D*, vol. 73, n.º 2; 25 de enero, 2006.

RELATIVISTIC GLIDER. Eduardo Guérón y Ricardo A. Mosna en *Physical Review D*, vol. 75, n.º 8; 16 de abril, 2007.

El universo de Georges Lemaître

Sacerdote y físico, Georges Lemaître fue uno de los fundadores de la teoría de la gran explosión. Algunas de sus intuiciones, que defendió incluso contra el mismo Einstein, se han revelado, cincuenta años más tarde, de una importancia capital

Dominique Lambert

En 1933 Albert Einstein dio una serie de clases en la Fundación Universitaria de Bruselas. Cuando un colega le preguntó si le habían comprendido bien todos los oyentes, respondió: “El profesor De Donder quizás, el canónigo Lemaître sin duda, los demás creo que no”.

Se considera a Georges Lemaître uno de los fundadores de la teoría de la gran explosión (“big bang”), en la que se basa la cosmología moderna. Como fue además hombre de fe, algunos han pretendido que la hipótesis de un cataclismo originario del universo en una fecha determinada del pasado constitúa, en su intención, una justificación científica de la creación bíblica del mundo.

Así, el astrónomo británico Fred Hoyle, partidario, por razones filosóficas, de un modelo de universo eterno, acuñó la expresión peyorativa “big bang” para ridicularizar las ideas desarrolladas por Le-

maître. Ironías del destino, esa expresión se usa hoy, sin connotaciones negativas, para designar una teoría respaldada desde entonces por numerosos hechos experimentales. En cuanto a las convicciones científicas de Lemaître, se fundaban no en su fe (siempre supo evitar toda confusión entre ciencia y creencia), sino en argumentos matemáticos y físicos de sólido fuste. Algunos momentos señalados de su carrera esclarecen la importancia científica de varias de sus intuiciones.

Un sacerdote en Cambridge

Georges Lemaître nació el 17 de julio de 1894 en Charleroi (Bélgica). En 1911 empieza los estudios de ingeniería de minas, por los que muestra poco entusiasmo. A su regreso de la primera guerra mundial, cambia de orientación para seguir la carrera de matemáticas y física, que termina en 1920. Ese mismo año entra en el seminario de Malinas, donde, mientras se prepara para el sacerdocio, continuó estudiando los trabajos que trataban de la relatividad, restringida y general. Redacta una memoria titulada *La física de Einstein*, con la que gana una beca que le permite, tras su ordenación el 22 de septiembre de 1923, partir a Gran Bretaña, para una

estancia de un año en Cambridge. Allí trabaja bajo la dirección de Arthur Eddington, el astrónomo que cinco años antes había confirmado lo que Einstein había previsto: que la fuerza de la gravedad desvía los rayos luminosos que pasan cerca del Sol.

Prosigue sus estudios entre 1924 y 1935 en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y visita algunos de los epicentros de la astronomía mundial, sobre todo el observatorio de monte Wilson, donde se encontraba entonces el mayor telescopio que se hubiese construido. Así el joven experto de las nuevas teorías del espacio-tiempo entra en contacto con la astronomía en el momento mismo en que va a nacer la cosmología científica.

¿En qué “contexto cosmológico” se encontraba Lemaître? A mediados de los años veinte, los astrónomos atribuían al universo observado un tamaño de unas decenas de miles de años-luz, es decir, seis órdenes de magnitud menos que el tamaño que se le concede hoy (del orden de diez mil millones de años luz). Además, por un prejuicio heredado del siglo XIX, no se concebía que este universo evolucionase; menos aún, que tuviese una edad finita.

En cuanto a su contenido, desde el siglo XVIII venían pensando los

El autor

DOMINIQUE LAMBERT, doctor en ciencias físicas y en filosofía por la Universidad Católica de Lovaina, imparte clases de filosofía e historia de la ciencia en el Instituto Superior de Notre-Dame de la Paix, en Namur.

astrónomos que las estrellas visibles del cielo se juntaban en un vasto disco plano, la Vía Láctea, en cuyo seno residía el Sol. Ya en 1785 Immanuel Kant había propuesto que las nebulosas espirales descubiertas por los astrónomos con sus primeros telescopios eran agrupaciones gigantescas de estrellas parecidas a la Vía Láctea. Hoy llamamos galaxias a esos “universos-isla” imaginados por el filósofo alemán. En todo caso, hasta mediados de los años veinte del siglo XX se consideraba que esa hipótesis era dudosa. De ella se seguía que tales nebulosas tenían que en contrarse a millones de años luz y, sin embargo, los astrónomos observaban en ellas explosiones regulares que, si sucedían a semejantes distancias, debían liberar en muy poco tiempo cantidades de energía que ninguno de los mecanismos físicos conocidos por entonces era capaz de producir. Hoy se sabe que se trata de supernovas, de explosiones de estrellas gigantes, en el curso de las cuales las reacciones termonucleares desprenden más luz que miles de millones de estrellas.

Un universo eterno

El universo de los astrónomos de la época, por lejos que observasen, no contenía más que una sola galaxia, la nuestra. ¿Es cerrado y de dimensión finita? ¿Es infinito y, por consiguiente, está casi vacío? A partir de 1916 la cuestión adquiere pleno sentido cuando Albert Einstein publica su teoría de la relatividad general, que permite a los astrónomos construir modelos cosmológicos diferentes a tenor de las hipótesis que se elijan. Einstein mostró que podía considerarse a la gravedad una manifestación de la curvatura del espacio-tiempo. Sus ecuaciones permiten calcular esa curvatura en cada punto del universo, si se conoce la cantidad de materia (o energía) que haya allí. En cuanto a la geometría global del universo, es posible, mediante algunas hipótesis sobre la distribución de la materia y de la energía en su seno, dar de ella una descripción rigurosa.

El primer modelo de universo propuesto por Einstein era una solución de sus ecuaciones en la que el cosmos se reputaba cerrado

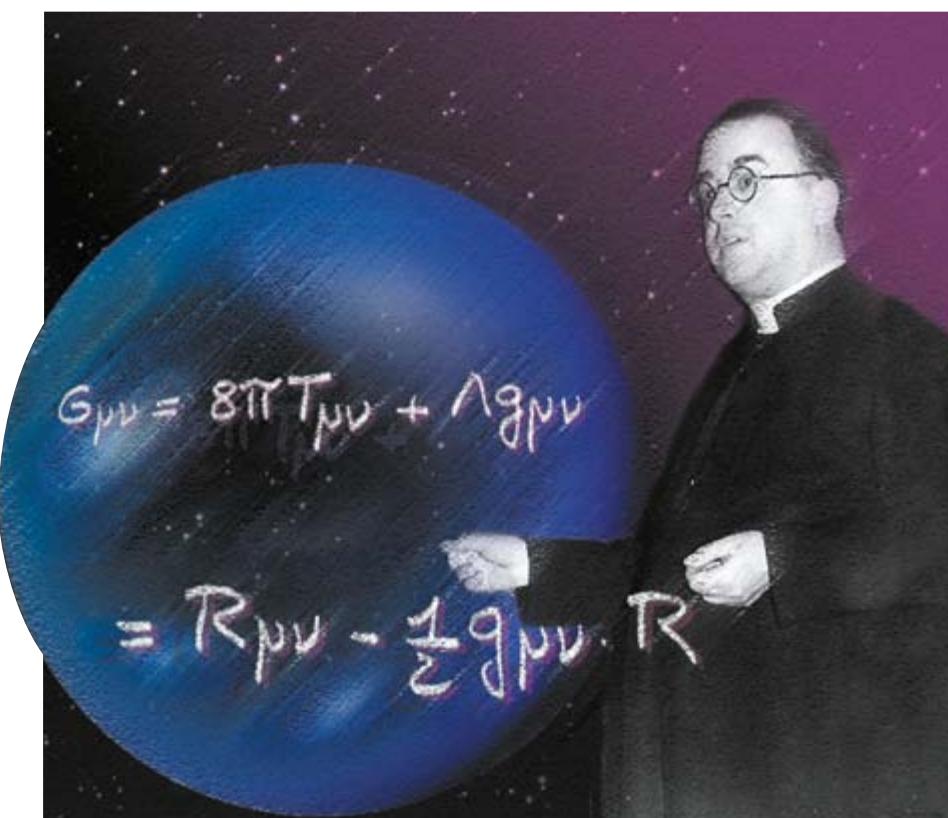
y estático. En ese modelo, el espacio es una “hiperesfera” de radio constante. Lo mismo que una criatura plana que viviese “en” la superficie (bidimensional) de una esfera vería su universo como un espacio curvo, finito aunque sin fronteras, nosotros viviríamos en un espacio tridimensional que sería la “superficie” de una hiperesfera (una esfera en un espacio tetradimensional). Para que el radio de ese universo permaneciera constante (es decir, para que el peso de la materia no provocara su hundimiento sobre sí mismo), Einstein presupuso la existencia de una “fuerza de repulsión”, capaz de contrarrestar los efectos de la gravitación y de mantener el universo en equilibrio. Esa fuerza interviene en las ecuaciones de la relatividad general en forma de una constante, la llamada “constante cosmológica”.

Poco después, el astrónomo holandés Willem De Sitter esbozaba otro modelo de universo, solución igualmente de las ecuaciones de Einstein, donde el espacio es infinito y nula la densidad de materia. Cuando Lemaître empieza a trabajar en los problemas cosmológicos, la comunidad astronómica no se refiere más que a esos dos modelos.

Un universo en expansión

Pero en 1925 el astrónomo estadounidense Edwin Hubble descubre en el observatorio de monte Wilson que la “nebulosa” de Andrómeda dista de nosotros varios millones de años luz; resurge la polémica sobre la naturaleza de las “nebulosas”. Georges Lemaître toma, pues, contacto con la cosmología en el momento mismo

1. GEORGES LEMAÎTRE en noviembre de 1949, delante de las ecuaciones de la relatividad general que ligan la geometría del espacio-tiempo a su contenido de materia y energía. El factor constante Λ significa que el propio vacío está dotado de cierta densidad de energía capaz de acelerar la expansión del universo. Lemaître defendió esta “constante cosmológica” contra Einstein, que la había abandonado muy pronto.



2. UNA CRIATURA BIDIMENSIONAL que viviese en la superficie de esta esfera verificaría que su universo es finito (puede dar una vuelta completa a su alrededor), pero que carece de fronteras. La geometría no es allí euclídea: la suma de los ángulos de un triángulo (azul) es mayor que 180° , y hay "rectas" (el camino más corto entre dos puntos) que, aunque paralelas, se cortan a una distancia finita (por ejemplo, dos perpendiculares al ecuador de la esfera se cortarán en el polo). Pero a pequeña escala la geometría está muy cerca de la geometría euclídea. Muchos modelos de universo estipulan que el espacio, euclídeo a nuestra escala, es la superficie de una hiperesfera, un análogo tridimensional del mundo de la criatura plana.

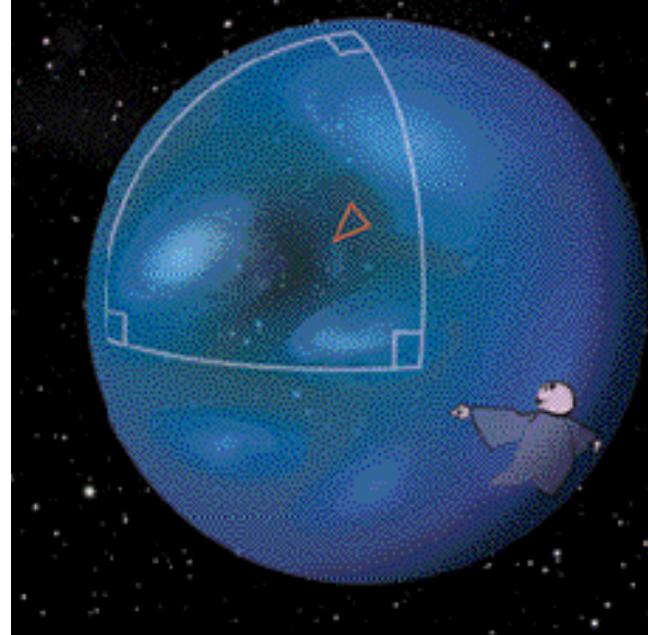
en que torna a emerger la idea de un universo inmenso sembrado de galaxias. Por otra parte, los astrónomos se disponen entonces a establecer que la luz que recibimos de la mayoría de esas galaxias está desplazada hacia longitudes de onda grandes (hacia el rojo), lo que parece indicar que se alejan muy veloces de nosotros.

Así, Lemaître se ve conducido de forma natural a buscar una explicación de esa "recesión" de las galaxias (independientemente del ruso Aleksander Friedman). Propone en 1927 una tercera solución de las ecuaciones de Einstein: el tamaño del universo crecería de manera exponencial y confluiría con los dos grandes modelos de la época en un pasado y un futuro infinitamente remotos. En un tiempo pasado muy distante, ese universo se comportaría como el universo estático de Einstein; en el futuro, el universo de Lemaître tendería —su masa es constante, su tamaño no deja de crecer— hacia

el modelo de De Sitter, totalmente vacío. En el intervalo entre ambos extremos, la expansión del universo explicaría que las galaxias se alejaran unas de otras.

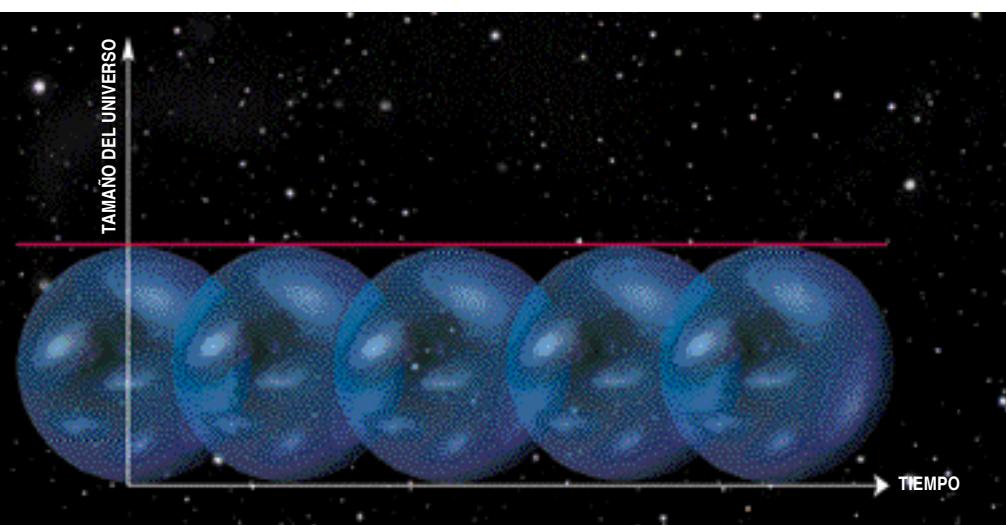
Por medio de esta solución, ya en 1927, Lemaître estableció la ley que gobierna la recesión de las galaxias; estipula que dos galaxias se alejan mutuamente a una velocidad proporcional a la distancia que las separa. A partir de un catálogo de 42 galaxias de las que se conocía un orden de magnitud de las distancias, así como las velocidades de escape, calcula la constante de proporcionalidad en 625 kilómetros por segundo y megaparsec (es decir, dos galaxias distantes entre sí un megaparsec, que es un poco más de tres millones de años luz, se separarían entre sí a 625 kilómetros por segundo). De ese modo, Lemaître es el primero en establecer teóricamente la ley... de Hubble, aunque el valor que le

3. POR UN MODELO donde el universo es eterno apostaba Einstein. En este recuadro el tamaño —finito— del universo es constante. Como este universo tiende a desplomarse sobre sí mismo, porque las masas se atraen por el efecto de la gravedad, Einstein propuso la existencia de una segunda fuerza, de repulsión, que incluyó en sus ecuaciones en forma de una "constante cosmológica". A principios de los años treinta Lemaître mostró que el equilibrio así obtenido era inestable.



da a la constante, llamada también "de Hubble", sea exagerado. El astrónomo estadounidense se llevó los honores de la posteridad porque fue el primero, dos años más tarde, en publicar una compilación detallada de observaciones de las que se desprendía esa ley.

Con el modelo de 1927, Lemaître fue uno de los primeros cosmólogos que concibieron un universo en evolución. Con todo, el universo no tiene todavía un comienzo. ¿Por qué prefería Lemaître —momentáneamente— la idea de un universo con un pasado infinito? Parece que esta elección derivaba de que sobrestimase la constante de Hubble. En efecto, si el universo estaba hoy en una expansión muy rápida, su tamaño, en un pasado bastante reciente, tuvo que ser mucho menor. La inversa de la constante de Hubble da un orden de magnitud del período reciente de la expansión.

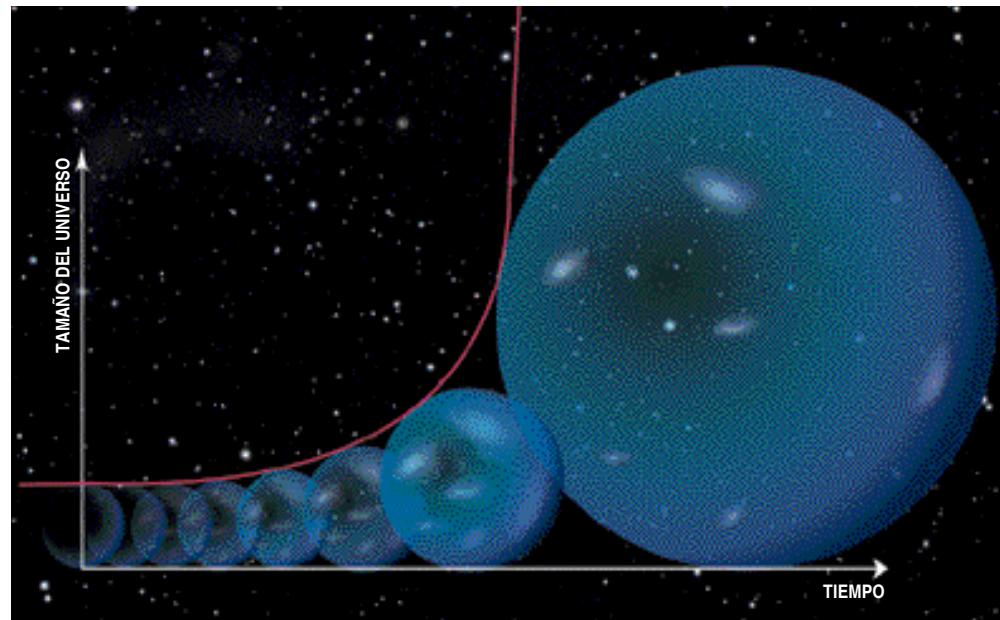


Con un valor del orden de 625 kilómetros por segundo y parsec a Lemaître le sale que el universo tiene menos de mil millones de años, edad inferior a los dos mil millones que se le atribuían a la Tierra en su época. Este resultado se basaba en el estudio de las concentraciones de uranio y plomo en las rocas más antiguas; el valor que se admite hoy es de unos 4500 millones de años.

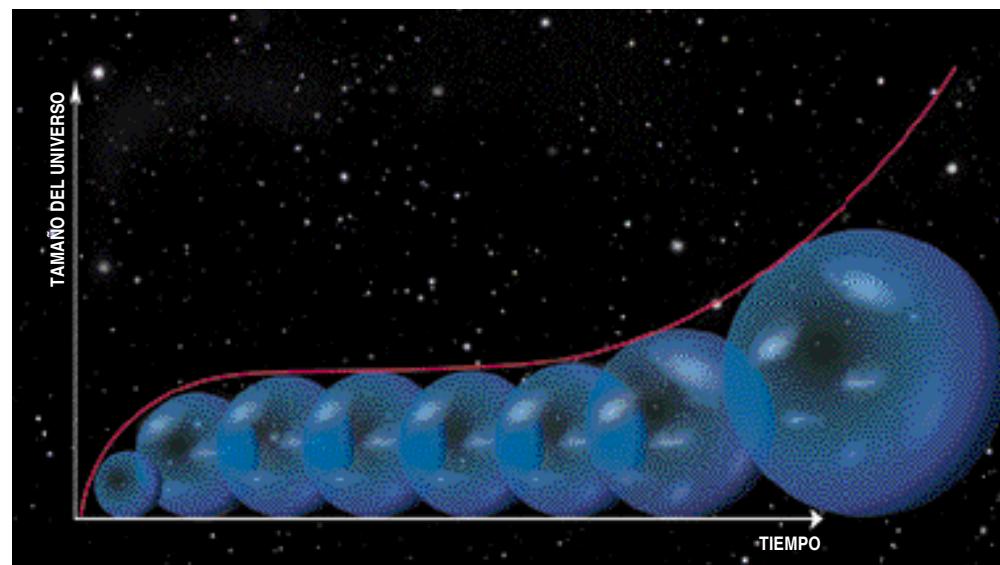
El modelo de universo en que el radio crece de manera exponencial supera la dificultad al dar al universo un pasado infinito donde su tamaño es casi constante y admitir un período de expansión reciente conforme al alejamiento observado entre las galaxias. Hoy se atribuye a la constante de Hubble un valor del orden de 70 kilómetros por segundo y megaparsec (se han mejorado considerablemente las estimaciones de las distancias de las galaxias). Se deduce de ello que el universo tiene unos 14.000 millones de años, edad compatible con los datos geológicos.

La formación de las galaxias

En el marco de sus modelos de universo en expansión Lemaître emprende una primera descripción de la formación de las galaxias. Aprovecha para ello los métodos que elaboró en los años 1924-25 cuando trabajaba en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Eddington llamó entonces su atención sobre una cuestión suscitada por los trabajos del astrónomo alemán Karl Schwarzschild, que había encontrado una solución de las ecuaciones de Einstein que describía el campo gravitatorio en el interior y el exterior de una bola de materia cuya densidad se suponía constante (hipótesis que constituyan un modelo muy simplificado de estrella). La solución obtenida para el interior de la esfera homogénea hacía aparecer una paradoja: al añadirle materia crecía su radio al mismo tiempo que su masa, pero los cálculos mostraban que más allá de cierto tamaño límite (y, por lo tanto, de cierta masa), la presión en el centro de la estrella se volvía infinita. Parecía, pues, que no podía existir ningún



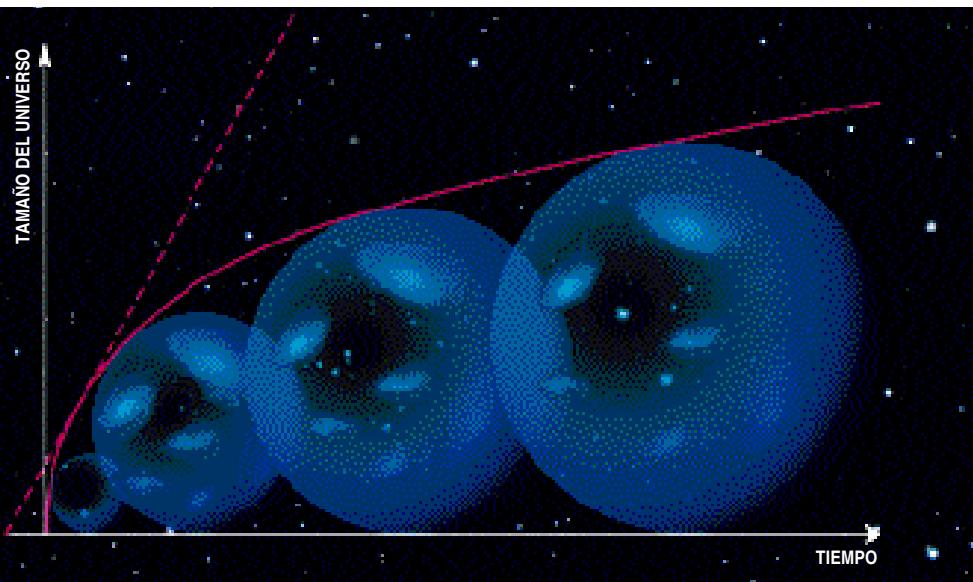
4. UN UNIVERSO EN EVOLUCIÓN PERO ETERNO era el propuesto por Lemaître en 1927. La expansión del espacio explica el hecho de que las galaxias se separen unas de otras a una velocidad proporcional a la distancia que medie entre ellas. En este modelo la constante cosmológica no es nula y la fuerza de repulsión que engendra acelera la expansión de manera exponencial. El comienzo del universo se pierde en un pasado infinitamente lejano, donde acaba por "confluir" con el modelo estático de Einstein. La demostración de que un universo estático es inestable llevó a Lemaître a abandonar este último modelo.



5. DOS FUERZAS ANTAGONICAS se disputan el control del universo en el modelo que Lemaître defenderá hasta el final de su vida. El mundo empieza por una singularidad inicial, en una fecha finita del pasado; luego, la gravitación frena su expansión. Inicialmente muy débil, la fuerza de repulsión, engendrada por la constante cosmológica, llega a igualarse con la gravitación; el universo conoce entonces una fase de cuasiequilibrio que dura más o menos tiempo según el valor de la constante. A continuación, la formación de cúmulos de galaxias rompe el equilibrio y se reemprende la expansión, esta vez acelerada. Nuestro universo se halla en esta tercera fase.

astro más allá de ese límite. Pero, como señaló Eddington, la hipótesis de una densidad uniforme de la materia era poco conforme con el espíritu de la relatividad, pues en esa teoría la densidad de materia

no es una magnitud invariante (la masa puede transformarse en energía y unos observadores en movimiento entre sí no medirán, para los mismos objetos, energías idénticas).

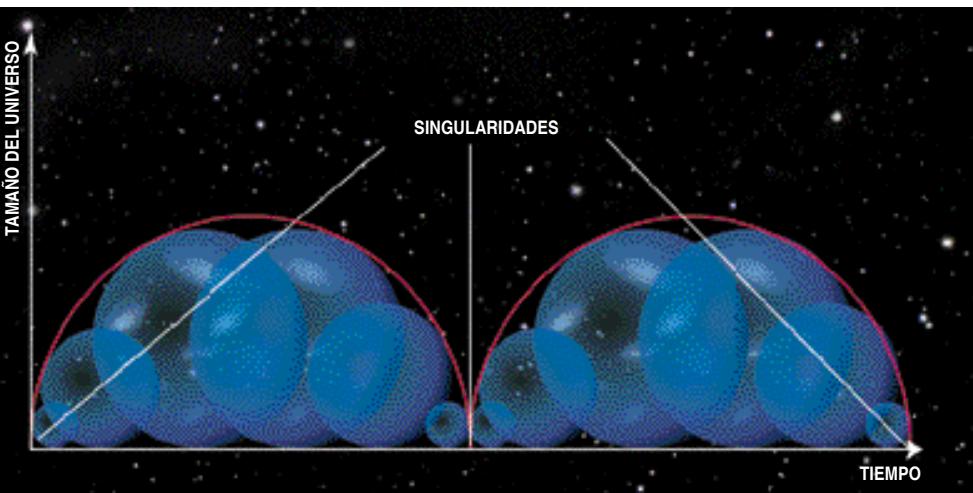


6. CUANDO SOLO LA GRAVITACION determina la evolución del universo la constante de Hubble basta para calcular su edad. La atracción entre las galaxias frena su recíproco distanciamiento y la expansión. Por consiguiente, la constante de Hubble, que es la pendiente de la curva que da el tamaño del universo en función del tiempo, disminuye a medida que el universo envejece. Se calcula fácilmente la edad que tendría el universo si su expansión hubiese sido constante y caracterizada por el valor actual de la constante de Hubble (línea de puntos). Esta edad teórica constituye un límite superior de la edad real del universo.

Lemaître rehizo los cálculos de Schwarzschild abandonando la idea de una densidad constante (sólo consideró constante una magnitud invariante de acuerdo con la relatividad, la "traza del tensor energía-impulso", que combina la densidad de energía y la presión de la materia). Mostró entonces, en contra de lo que esperaba Eddington, que la paradoja descubierta por Schwarzschild subsistía: hay realmente un radio más allá del cual ningún astro podía estar en equilibrio.

Gracias a ese trabajo, Lemaître pudo estudiar espacios de simetría esférica llenos de un fluido cuya densidad no era necesariamente homogénea. En los años treinta, con esa base, propuso un modelo donde las galaxias se formaban a partir de fluctuaciones locales de la densidad de la materia en un universo en expansión. En el marco del modelo las partículas de materia contenidas en el universo se aglutan al azar, obedeciendo a fluctuaciones estadísticas. Aparecen zonas de densidad ligeramente superior a la media, que al derrumbarse bajo su propio peso y atraer la materia circundante dan lugar a las galaxias, reagrupadas luego en cúmulos de galaxias, las mayores estructuras observadas hasta ahora en el universo. Lemaître muestra entonces que el cálculo de los cúmulos de galaxias engendrados conforme a su modelo concuerda con las mediciones tomadas por Hubble para el cúmulo de Coma.

No obstante, hoy se sabe que las fluctuaciones concebidas por Lemaître (fluctuaciones estadísticas en un universo esencialmente homogéneo) no bastan para producir las macroestructuras del universo. La radiación fósil captada por el satélite COBE ofreció una imagen del universo a sus 300.000 años de edad que revelaba la existencia de variaciones de la densidad, origen, así se cree, de las macroestructuras. La idea de que las galaxias y los cúmulos de galaxias se han formado a partir de condensaciones locales de materia sigue siendo hoy la preferida por los astrónomos. Sin embargo, muchos astrofísicos piensan que su origen estuvo más bien en fluctuaciones microscópicas de naturaleza cuántica que se



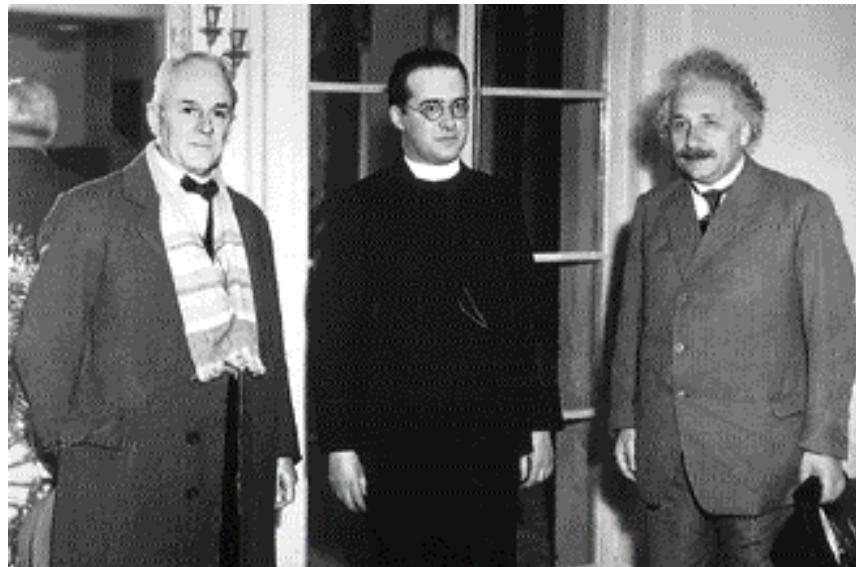
7. EL UNIVERSO FENIX crece, alcanza su tamaño máximo y se desploma sobre sí mismo antes de volver a empezar un ciclo nuevo de expansión y contracción. Hace que aparezcan puntos de densidad infinita, las singularidades, que parecen no tener sentido físico. Einstein se preguntaba si, en caso de que se admitiese que el universo no es rigurosamente isótropo, los cálculos no harían desaparecer las singularidades. Lemaître demostró que no.

amplificaron en el curso de la inflación del universo (una fase de expansión exponencial que habría multiplicado todas las distancias por un factor 10^{50} en unos 10^{-32} segundos).

La edad del universo

A principios de los años treinta Eddington contribuyó de nuevo a orientar el rumbo de los trabajos de su antiguo alumno al despertarle un vivo interés por la cuestión del origen del universo. En 1931 el astrónomo de Cambridge publicó un artículo en la revista *Nature* en el que confesaba: "Desde una óptica filosófica, me repugna la idea de que el presente orden de cosas haya tenido un comienzo". Ante esa declaración de principios, Lemaître reaccionó con la publicación, en la misma revista, de una nota breve en la que mostraba que la termodinámica y la mecánica cuántica podían dar un sentido físico a un comienzo del mundo. En ese artículo describía un estado inicial del universo en el que todos los cuantos de energía se juntaban en uno solo, al que denominaba "átomo primitivo"; fuera de él las nociones de espacio y tiempo carecían de sentido. Ese estado muy "ordenado" era inestable; a partir del átomo primitivo, unas desintegraciones sucesivas, comparables a las desintegraciones radiactivas, engendraban progresivamente la materia, el espacio y el tiempo tal y como los conocemos hoy. Para Lemaître, "semejante comienzo del mundo está suficientemente alejado del presente orden de cosas como para que no resulte repugnante del todo". La hipótesis que anunciaba la moderna teoría de la gran explosión emprendía su camino.

Por lo demás, a principios de los años treinta Lemaître muestra que el menor cambio en la distribución de la densidad de materia del universo podía dar ventaja sobre la gravedad a la fuerza de repulsión ligada a la constante cosmológica. El equilibrio entre esas dos fuerzas sobre las que reposaba el modelo estático de Einstein era, por consiguiente, inestable; debía bastar para romperlo la formación



8. ROBERT MILLIKAN, GEORGES LEMAÎTRE Y ALBERT EINSTEIN en enero de 1933. Tras su encuentro con Millikan, Lemaître llegó a la convicción de que los rayos cósmicos eran reliquias de la desintegración del átomo primitivo.

de las galaxias a partir de las fluctuaciones de la materia del universo. Así, parece imposible que el universo siga siendo estático indefinidamente.

Tal y como la enuncia Lemaître, la hipótesis del átomo primitivo es más una intuición física que una teoría rigurosamente elaborada. Se corresponde con la elección de un nuevo modelo cosmológico en el que la edad del universo es finita. Se trata de un universo homogéneo, una hipersfera cuya evolución comienza por un estado de densidad infinita, una singularidad, que Lemaître considera el límite impuesto por las leyes clásicas de la relatividad cuando se está cerca de las condiciones exóticas que reinaron en la época del átomo primitivo. La evolución del universo está dominada por dos fuerzas, la gravedad y la "fuerza de repulsión", cuya intensidad viene determinada por la constante cosmológica. Este modelo, que defenderá hasta el final de su vida, comprende tres fases características.

De la importancia de una constante

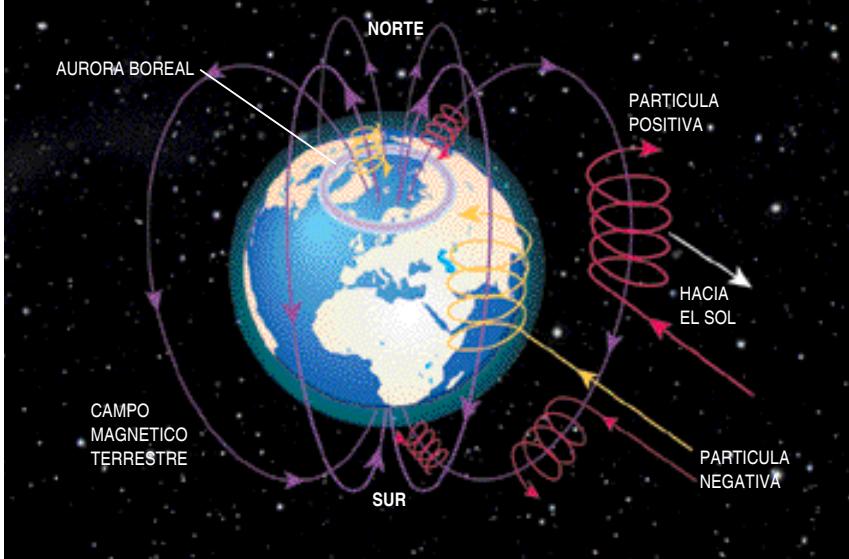
En el curso de la primera fase, que comienza con la singularidad inicial, el universo entra en expansión y el espacio se llena con

los productos de la desintegración del átomo primitivo. La atracción gravitatoria que se ejerce entre las partículas de materia frena progresivamente la expansión.

La segunda fase corresponde a un equilibrio entre la gravedad y la fuerza repulsiva ligada a la constante cosmológica: el radio del universo permanece, momentáneamente, casi constante, como en el universo de Einstein.

La tercera y última fase de la historia del universo según Lemaître incluye la época actual y empieza cuando la formación de macroestructuras y de las galaxias rompe el equilibrio del período quasi-estático y hace que se reanude la expansión acelerada bajo el efecto de la constante cosmológica.

Lemaître concedía mucha importancia a esta constante. Se oponía, pues, a Einstein, que renunció a ella ("es el peor error de mi vida", habría dicho) al mismo tiempo que el descubrimiento del distanciamiento entre galaxias le obligó a abandonar su modelo de universo estático. Visionario, Lemaître prevé que la mecánica cuántica podría un día dar un sentido físico a esa constante que parece significar que el vacío está dotado de cierta densidad de energía. Se piensa hoy que Einstein trató la constante cosmológica con demasiada ligereza



9. LAS AURORAS BOREALES están producidas por las partículas dotadas de carga eléctrica que emite el Sol y que el campo magnético terrestre atrapa. Lemaître estudió los rayos cósmicos suponiendo que adoptan trayectorias semejantes hasta que se acercan a nuestro planeta. Las partículas de carga positiva (*en rojo*) circulan alrededor de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre (*violeta*) en sentido inverso a las de carga negativa (*amarillo*). Por eso llegan al observador en tierra según direcciones próximas al oeste geomagnético (mientras que las partículas negativas llegan por el este). Puesto que se trata de la misma dirección que aquella donde se reciben más rayos cósmicos, Lemaître dedujo que están constituidos por partículas de carga positiva.

y que no es una mera “opción”, sino un elemento fundamental para su teoría a causa de la existencia de una energía del vacío cuántico: la mecánica cuántica dicta que, incluso en un espacio vacío, aparezcan y desaparezcan sin cesar pares de partículas y antipartículas (si no, el valor de todos los parámetros físicos se conocería con una precisión perfecta —serían todos nulos—, lo que contradice el principio de indeterminación de Heisenberg).

Se ha establecido hace poco que es muy probable que la constante cosmológica no sea nula. Por lo demás, Lemaître insistió en que, si se modifica su valor, se modifica la edad del universo. Veía en ello un argumento adicional para conservarla. En efecto, si la evolución del universo no está gobernada más que por la gravitación, basta la constante de Hubble para determinar su edad. Sin embargo, con el valor de la constante de Hubble de que se disponía en los años treinta, esa edad resultaba siempre inferior a la del sistema solar; había que corregir tal anomalía. Ya en 1931, basándose en un límite superior de la constante cosmológica, Le-

maître cifró en diez mil millones de años la edad del universo (un buen orden de magnitud incluso hoy en día).

La ciencia ha abandonado su hipótesis del átomo primitivo y su presentación de la síntesis de los elementos químicos por desintegraciones sucesivas. Además, la geometría espacial del universo parece ser euclídea y no esférica, como Lemaître la concebía siempre. No obstante, diversas observaciones recientes sobre las supernovas lejanas parecen abonar la idea de que el valor de la constante cosmológica no es nulo, sino positivo, y, por consiguiente, que la evolución del universo se caracteriza por las tres fases propuestas por Lemaître.

El problema de las singularidades

A principios de los años treinta se admitía que había galaxias fuera de la nuestra y que el universo se expandía; se deducían de ello modelos del cosmos en evolución permanente, en el curso quizás de una duración finita. Esta idea sigue, sin embargo, chocando con las pre-

ferencias filosóficas de numerosos físicos. No sólo les obliga a aceptar que el universo tuvo un comienzo, sino, también, que ese comienzo consistió en un estado de densidad infinita, en una singularidad donde las leyes de la física pierden todo su sentido.

En enero de 1933 Einstein, que acababa de abandonar Alemania por los Estados Unidos, se encuentra con Lemaître en el Instituto de Tecnología de California. Le pregunta si se podían eliminar las singularidades que aparecían en la historia del “universo fénix”, un modelo que establecía que el universo se expande a partir de una singularidad, alcanza un tamaño máximo y vuelve a caer en una nueva singularidad antes de recomenzar un nuevo ciclo de expansión y contracción. Como todos los modelos concebidos por los astrónomos, es homogéneo e isótropo (sus propiedades son las mismas en todos los puntos del espacio y en todas direcciones). Según Einstein, esa isotropía podría ser la causa de que apareciesen singularidades. Si se admitiese una ligera anisotropía del universo (que estuviera en expansión en dos de las direcciones del espacio y en contracción en la tercera, por ejemplo), quizás no se desplomaría sobre sí mismo (no “se colapsaría”, con el barbarismo al uso) y se evitaría la singularidad. Lemaître probó rápidamente, con la ayuda de un caso particular, que la singularidad no desaparecería, ni siquiera aunque el universo no fuese isótropo. El paso por un estado de radio “nulo” parece realmente obligado para la mayoría de los modelos del universo. Este “experimento matemático” prefigura los teoremas sobre las singularidades de Roger Penrose y Stephen Hawking que demostraron, con métodos globales, que aparecen, de manera inevitable, singularidades físicas en muchos de los modelos posibles del espacio-tiempo.

Los rayos cósmicos

Según Lemaître, una de las consecuencias de la hipótesis del átomo primitivo era la existencia de partículas cargadas de gran energía producidas en las primeras

desintegraciones de ese átomo. Tras un encuentro con Robert Millikan, Lemaître se convenció de que esas partículas eran precisamente los rayos cósmicos que se captan a grandes alturas y cuya naturaleza y origen precisos se ignoraban todavía en los años treinta. La detección y el estudio de los rayos cósmicos presentaban para él una importancia crucial, pues éstos eran, según sus propias palabras, “jeroglíficos” que había que descifrar si se quería conocer los primerísimos instantes del universo.

Lemaître y Manuel Sandoval Vallarta, compañero suyo en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, se pusieron a estudiar las propiedades de las trayectorias de los rayos cósmicos. Varios observadores habían mostrado que la intensidad de la radiación cósmica variaba con la latitud geomagnética (la latitud medida no a partir del polo geográfico de la Tierra, sino del magnético). Fiados de su hipótesis según la cual esos rayos eran partículas dotadas de carga procedentes de la desintegración del átomo primitivo, Lemaître y Sandoval se aplicaron al cálculo de la interacción entre tales partículas y el campo magnético terrestre para explicar, sobre todo, el “efecto de latitud”.

Carl Störmer, de la Universidad de Oslo, había ya abordado un problema similar en 1907. Estudiaba la interacción entre las partículas dotadas de carga, emitidas por el Sol, y el campo magnético terrestre a fin de obtener una teoría completa de las auroras boreales. Se debe la producción de estos fenómenos luminosos a las partículas cargadas emitidas por el Sol. Al acercarse a la Tierra adoptan éstas una trayectoria helicoidal a lo largo de las líneas del campo magnético terrestre y se canalizan hacia los polos. Cuando penetran en la atmósfera, ionizan los átomos de nitrógeno y de oxígeno del aire, que, a su paso, se desexcitan con emisión de luz.

Presuponiendo que los rayos cósmicos —partículas mucho más energéticas que las del viento solar— provienen de todas las direcciones del espacio (y no sólo del Sol), Lemaître y Sandoval completaron el enfoque de Störmer y estudiaron

sus trayectorias en el campo magnético terrestre. Con la ayuda de un ordenador analógico —la “máquina de Bush”— capaz de integrar sistemas de ecuaciones diferenciales y de dar representaciones gráficas de las soluciones, lograron representar y estudiar en el Instituto de Tecnología de Massachusetts millares de trayectorias de rayos cósmicos. Gracias a este trabajo Lemaître y Sandoval Vallarta confirmaron que la cantidad de rayos cósmicos recibida sobre la Tierra tenía que variar con la latitud geomagnética. Además, establecieron que las partículas que constituyen los rayos cósmicos eran, sobre todo, partículas dotadas de carga positiva.

En su investigación de esos “jeroglíficos”, vestigios de los inicios “explosivos” del universo, Lemaître fue uno de los primeros físicos que propusieron la existencia de una radiación fósil que podría dar una base experimental a la cosmología. Qué duda cabe de que la radiación fósil, que se detectó en los años sesenta, es de naturaleza muy diferente de la propuesta por Lemaître; hoy se considera, además, que los rayos cósmicos son partículas de gran energía —protónes y núcleos atómicos ligeros—, producidas mucho más tarde en la historia del universo, especialmente por las supernovas. Con todo, ciertas partículas con una energía del orden de 10^{19} electronvolt no pueden producirse de esa forma; algunos físicos piensan que provienen de la desintegración de partículas exóticas de masa elevada, creadas en los primerísimos instantes del universo. En 1998 un defensor de esta teoría, Michael Hillas, de la Universidad de Leeds, concluía así uno de sus artículos: “Bien puede que Lemaître no estuviese ni mucho menos equivocado.”

Lemaître sentía pasión por el cálculo numérico y las máquinas de cómputo. En Lovaina adquirió toda una serie de máquinas de cómputo mecánicas, luego electromecánicas. En 1958 trajo a la Universidad Católica el primer ordenador que hubo en ella, un Burroughs E101, con el que efectuó cálculos relativos a los modelos de cúmulos de galaxias desarrollados en los años cuarenta y cincuenta a raíz

de sus trabajos sobre las condiciones de materia en el universo en expansión.

De la matemática a la cosmología

Pionero de la cosmología, Lemaître fue igualmente, como muchos de los teóricos de la física clásica, un matemático de primera fila que aportó soluciones originales a ciertos problemas de la mecánica celeste (el problema de los tres cuerpos) o incluso del cálculo numérico (la transformada de Fourier rápida). En su época, otros, más interesados por los prometedores territorios de la mecánica cuántica, se alejaron de ese tipo de problemas, mientras que los matemáticos preferían ceñirse a las estructuras abstractas a la manera Bourbaki. En los medios matemáticos de los años cincuenta pasaba por un marginal. Su pasión por los ordenadores, por el cálculo numérico y la experimentación matemática era, sin embargo, muy moderna, tal y como sus ideas sobre la historia del universo, que defendió a veces contra el mismo Einstein. El reciente descubrimiento de la importancia de la constante cosmológica confirma su intuición y constituye, quizás, el mayor desafío lanzado a los físicos para el siglo que empieza.

Bibliografía complementaria

COSMOLOGY OF LEMAÎTRE. O. Godart y M. Heller, en *History of Astronomy Series*, vol. 3. Pachart Publishing House, Tucson, 1985.

COSMOLOGY AND CONTROVERSY. THE HISTORICAL DEVELOPMENT OF TWO THEORIES OF THE UNIVERSE. H. Kragh. Princeton University Press, 1996.

ESSAI DE COSMOLOGIE. A. Friedman y G. Lemaître. Precedido de *L'invention du Big Bang*, de J. P. Luminet (textos escogidos, presentados, traducidos y anotados por J. P. Luminet y A. Grib). Éditions du Seuil, Collections Sources du Savoir, 1997.

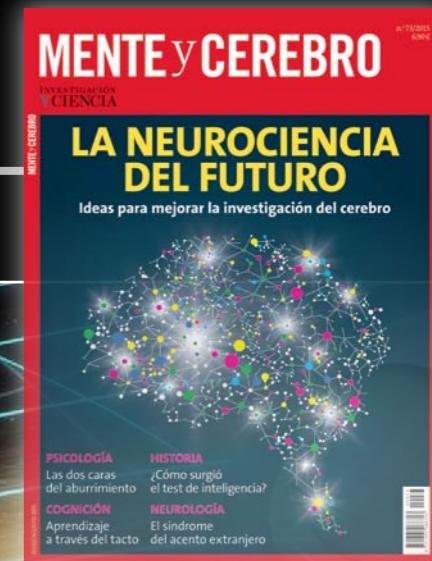
UN ATOME D'UNIVERS. LA VIE ET L'OEUVRE DE GEORGES LEMAÎTRE. D. Lambert. Éditions Racine/Éditions Lessius, 2000.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

MENTE y CEREBRO



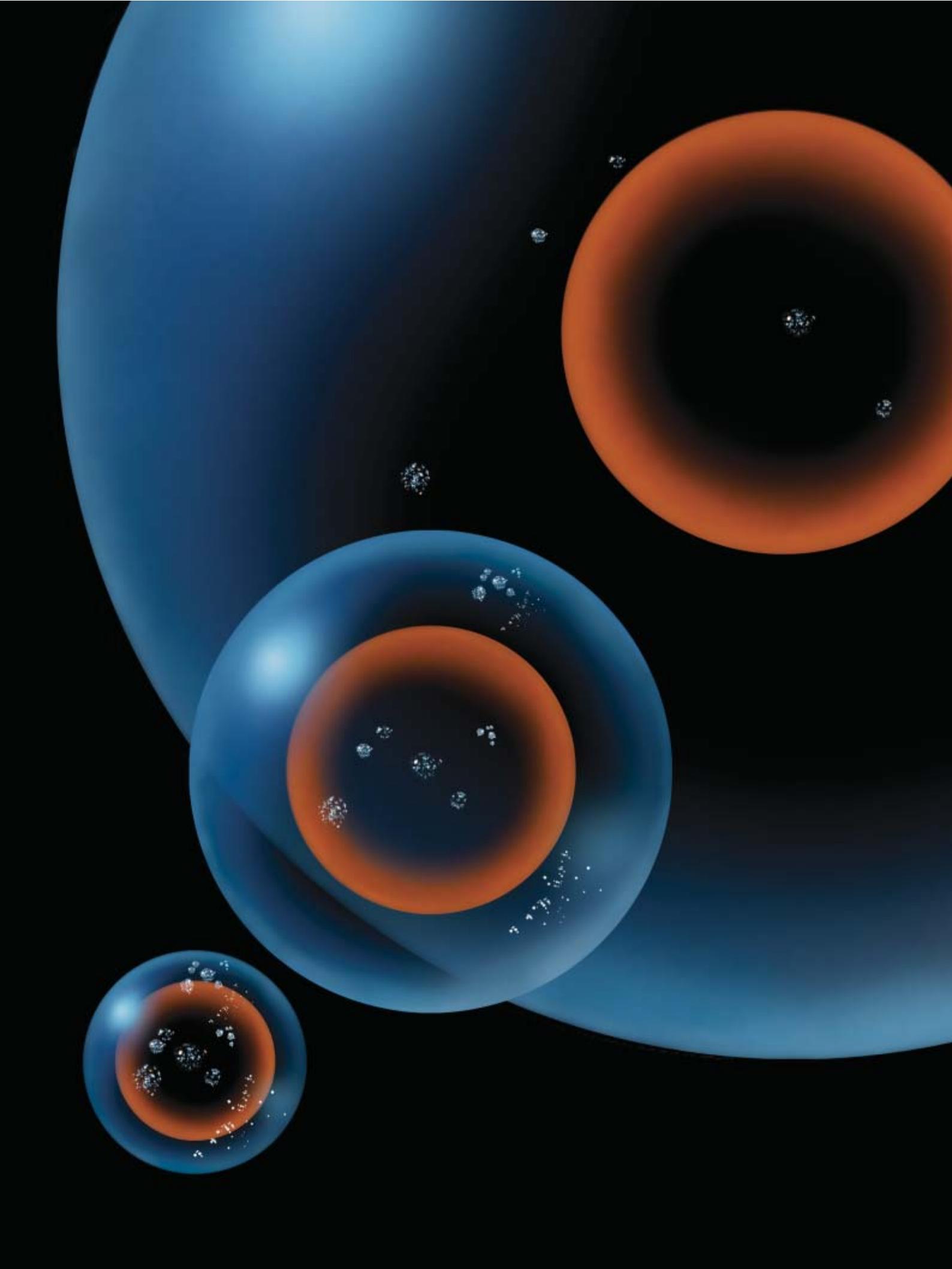
Títulos disponibles en tu quiosco



Suscríbete a la versión **DIGITAL**
de nuestras publicaciones y accede
a la hemeroteca completa (en pdf)*

www.investigacionyciencia.es

* Ejemplares de IyC disponibles desde 1990 y el archivo completo de MyC, TEMAS y CUADERNOS



La constante cosmológica

Una nueva presentación
de la constante cosmológica de Einstein
puede señalar el camino
que lleve a superar la relatividad general

Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner

En 1917, Albert Einstein tenía que conciliar su nueva teoría de la gravedad, la relatividad general, con los limitados conocimientos de que se disponía en aquella época acerca del universo. Como la mayoría de sus contemporáneos, estaba convencido de que el universo debía ser estático —ni expansionarse, ni contraerse—, pero tal estado no era compatible con sus ecuaciones de la gravedad. En una huida hacia adelante, agregó a sus ecuaciones una entidad *ad hoc*, un término cosmológico que compensaba la gravedad y permitía una solución estática.

Pero doce años más tarde Edwin Hubble descubrió que el universo distaba de ser estático. Encontró que las galaxias remotas se alejaban de la nuestra a una velocidad proporcional a su lejanía. No se necesitaba ningún término cosmológico para explicar un universo en expansión. Einstein abandonó la idea. Cuenta George Gamow en su autobiografía que “Einstein, hablando de problemas cosmológicos, me dijo que la introducción del término cosmológico había sido el mayor disparate de su vida”.

Sin embargo, desde los seis últimos años el término cosmológico —ahora conocido como constante cosmológica— ha vuelto a la palestra. Ha resurgido para desempeñar una función central en la física del siglo XXI. En esta segunda vida difiere, no obstante, de la idea original de Einstein. Ahora debe su resurrección a un hallazgo reciente: la expansión del universo se acelera; además, para mayor ironía, arranca de los principios de la mecánica cuántica, rama de la física que, como es sabido, Einstein aborrecía. Muchos confían en que el término cosmológico nos dé la clave para dejar atrás la teoría de Einstein y profundizar en el conocimiento del espacio, el tiempo y la gravedad; quizás, incluso, para descubrir una teoría cuántica que unifique la gravedad con las demás fuerzas fundamentales de la naturaleza. Es demasiado pronto para saber adónde nos llevará, pero cabe pensar que nuestra concepción del universo no permanecerá intangible.

UN UNIVERSO SOLITARIO podría ser nuestro destino si la expansión cósmica sigue acelerándose, impelida quizá por la constante cosmológica. Las esferas anaranjadas representan el universo observable, que crece a la velocidad de la luz; las esferas azules representan una parte del espacio en expansión. A medida que la expansión se acelera, se observan menos cúmulos de galaxias.

Nacimiento de una constante

La relatividad general fue el fruto del trabajo de Einstein durante los diez años que siguieron a su decisiva intuición de 1907: que la gravedad y el movimiento acelerado son equivalentes. De acuerdo con un famoso experimento ideal suyo, la física que se cumplía en el interior de un ascensor en reposo en un campo gravitatorio uniforme de intensidad g era exactamente la misma que la física que operaba en el interior de un ascensor lanzado hacia el espacio vacío con una aceleración uniforme g .

Einstein recibió un influjo poderoso de Ernst Mach. Rechazaba éste la idea de un sistema de referencia absoluto para el espaciotiempo. En la física newtoniana, la inercia refleja la tendencia de un objeto a moverse con velocidad constante a menos que se halle condicionado por una fuerza. La noción de velocidad constante requiere un sistema de referencia inercial, no acelerado. Ahora bien, no acelerado ¿con respecto a qué? Newton postuló la existencia del espacio absoluto, un sistema de referencia inmóvil que definía todos los sistemas iniciales locales. Para Mach, en cambio, la distribución de materia en el universo definía los sistemas inerciales. La teoría general de la relatividad de Einstein incluye, en buena medida, la tesis del físico austriaco.

La teoría de Einstein fue la primera concepción de la gravedad que ofrecía en potencia un cuadro coherente del universo. No sólo abarcaba el movimiento de los objetos por el espacio y el tiempo, sino también la propia evolución dinámica del espacio y del tiempo. Al intentar describir el universo con su nueva teoría, Einstein buscó una solución finita, estática y compatible con los principios de Mach (vale decir una distribución de materia finita

que fuera perdiéndose en un vacío, por ejemplo, no satisfaría la idea machiana de que se necesitaba materia para definir el espacio). Estos tres prejuicios llevaron a Einstein a introducir el término cosmológico, con el que llegaba a una solución estática y, aunque finita, sin fronteras; su universo se curvaba sobre sí mismo, a la manera de la superficie de un balón. Desde un punto de vista físico, el término cosmológico, aunque inobservable a la escala de nuestro sistema solar, producía, a escalas mayores, una repulsión cósmica que compensaba la atracción gravitatoria sobre los objetos distantes.

Sin embargo, el entusiasmo de Einstein por el término cosmológico menguó muy pronto. En 1917, Willem de Sitter demostró que las ecuaciones de Einstein completadas con el término cosmológico tenían una solución —un espaciotiempo— sin materia, resultado no muy machiano que se diga. Más tarde, se vio que ese modelo no era estático. En 1922, Alexander Friedmann construyó modelos de universos en expansión y en contracción que no requerían el término cosmológico. Y en 1930 Arthur Eddington demostró que el universo de Einstein no era realmente estático: el equilibrio entre la gravedad y el término cosmológico resultaba tan precario, que bastaban pequeñas perturbaciones para que se produjera una contracción o una expansión desbocadas. En 1931, con la expansión del universo firmemente establecida por Hubble, Einstein había ya abandonado su término cosmológico. “Considerado desde una óptica teórica, resultaba insatisfactorio”, declaró.

El descubrimiento de Hubble acabó con la necesidad del término cosmológico para compensar la gravedad. En un universo que se expande, la gravedad debe frenar la

expansión. Cabe entonces preguntarse si la gravedad adquirirá intensidad suficiente para detener la expansión y obligar al universo a contraerse o si, por el contrario, el cosmos se expandirá para siempre. En los modelos de Friedmann, la respuesta guarda relación con la densidad media de materia: un universo de densidad elevada se contraerá indefinidamente (colapsará), mientras que un universo de densidad baja se expandirá por toda la eternidad. La línea divisoria se halla en el universo de densidad crítica, que se expande sin fin, aunque a velocidad siempre decreciente. Puesto que en la teoría de Einstein la curvatura media del universo guarda relación con la densidad media, van ligados la geometría y el sino del cosmos. El universo de densidad elevada tiene curvatura positiva, similar a la superficie de un balón; el de baja densidad, curvatura negativa, a la manera de una silla de montar; por último, el de densidad crítica es espacialmente plano. En resumen, los cosmólogos vinieron a creer que la determinación de la geometría del universo nos revelaría su destino.

La energía de la nada

El término cosmológico desapareció de la cosmología a lo largo de los seis decenios subsiguientes, salvo una esporádica reaparición en que se subsumió en la teoría del estado estacionario, enunciada a finales de los años cuarenta y descartada en los sesenta. Pero quizás lo más sorprendente acerca del término estriba en otro fenómeno: aun cuando Einstein no lo hubiera introducido en un momento de confusión, mientras gestaba la relatividad general, habríamos acabado por comprender que su presencia resulta inevitable. En su actual conformación, no deriva de la relatividad, que gobierna la naturaleza a las mayores escalas, sino de la mecánica cuántica, la física de lo más pequeño.

Esta nueva concepción del término cosmológico difiere bastante de la enunciada por Einstein. Su ecuación de campo original, $G_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$, relaciona la curvatura del espacio, $G_{\mu\nu}$, con la distribución de materia y energía, $T_{\mu\nu}$, donde G es la constante de Newton que ca-

Resumen

- La mecánica cuántica y la relatividad, combinadas con el descubrimiento de que el universo se expande, han llevado a los físicos a retomar el término cosmológico que Einstein introdujo y después repudió. Pero ahora representa una misteriosa forma de energía que impregna el espacio vacío y acelera la expansión cósmica.
- El esfuerzo por entender el origen de esta energía quizás deje atrás la teoría de Einstein y cambie nuestra concepción del universo.

racteriza la intensidad de la gravedad. Cuando Einstein añadió el término cosmológico, lo puso en el lado izquierdo de la ecuación, dando a entender que era una propiedad del propio espacio. Si lo trasladase al lado derecho, adquiriría un sentido radicalmente nuevo, el que tiene hoy día: una nueva y extraña forma de densidad de energía que permanece constante, incluso cuando el universo se expande, y cuya gravedad no es repulsiva, sino atractiva.

La invariancia de Lorentz, la simetría fundamental asociada con ambas teorías de la relatividad, la especial y la general, dicta que sólo el espacio vacío puede alcanzar esta clase de densidad de energía. Desde esa perspectiva, resulta más extraño aún el término cosmológico. Ante la pregunta sobre cuál sea la energía del espacio vacío, la mayoría respondería que “nada”. La intuición así lo entiende.

Mas, por desgracia, la mecánica cuántica dista mucho de ser intuitiva. A las escalas más pequeñas, donde los efectos cuánticos se vuelven importantes, ni siquiera el espacio vacío está realmente vacío. Muy al contrario, lo pueblan pares de partículas y antipartículas virtuales, que recorren cortas distancias y desaparecen. Todo allí resulta tan efímero, que no puede observarse directamente. Lo que no impide que cuenten, y mucho, sus efectos indirectos; pueden medirse. Las partículas virtuales, por citar un ejemplo, alteran, de una forma mensurable, el espectro del hidrógeno. De hecho, se ha medido.

Una vez aceptada esta premisa, hay que admitir que esas partículas virtuales podrían dotar de alguna energía no nula al espacio vacío. La mecánica cuántica considera, pues, obligatorio el término cosmológico de Einstein, no opcional. No cabe prescindir del mismo con un “teóricamente insatisfactorio”. Pero existe un problema. Todos los cálculos y estimaciones de la magnitud de la energía del espacio vacío conducen a valores tales, que resultan absurdos: entre 55 y 120 órdenes de magnitud superiores a la energía de toda la materia y la radiación del universo observable. Si la densidad de energía del vacío fuera de esas proporciones, la ma-

EL TERMINO COSMOLOGICO

Un cambio de significado

El núcleo de la teoría de la relatividad general de Einstein es la ecuación de campo, según la cual la geometría del espacio-tiempo ($G_{\mu\nu}$, el tensor de curvatura de Einstein) está determinada por la distribución de materia y de energía ($T_{\mu\nu}$, el tensor energíamomento), donde G es la constante de Newton que caracteriza la intensidad de la gravedad. (Un tensor es una entidad geométrica o física que se puede representar por medio de un conjunto de números.) En otras palabras, la materia y la energía le dicen al espacio cómo se ha de curvar.

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Einstein introdujo el término cosmológico Λ para que compensase la atracción de la gravedad a escalas cósmicas; se obtenía así un universo estático. Añadió el término (multiplicado por $g_{\mu\nu}$, el tensor métrico del espacio-tiempo, que define las distancias) al lado izquierdo de la ecuación de campo; daba así a entender que era una propiedad del espacio. Pero abandonó el término una vez quedó claro que el universo se expandía.

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

El nuevo término cosmológico que hoy se investiga es una consecuencia de la teoría cuántica, que indica que el espacio vacío puede poseer una densidad de energía. Este término $-\rho_{VAC}$, la densidad de energía del vacío, multiplicada por $g_{\mu\nu}$ — debe ir al lado derecho de la ecuación de campo con las otras formas de energía.

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G (T_{\mu\nu} + \rho_{VAC} g_{\mu\nu})$$

Aunque matemáticamente equivalentes, el término cosmológico de Einstein y la energía del vacío cuántico divergen en su significación conceptual; aquél constituye una propiedad del espacio, ésta una forma de energía ligada a los pares virtuales partícula-antipartícula. La teoría cuántica mantiene que estas partículas virtuales salen sin cesar del vacío, existen durante un brevísimo intervalo de tiempo y desaparecen (*abajo*).

IMAGEN ELIMINADA POR RESTRICCIÓN DE DERECHOS

teria del universo se dispersaría al instante.

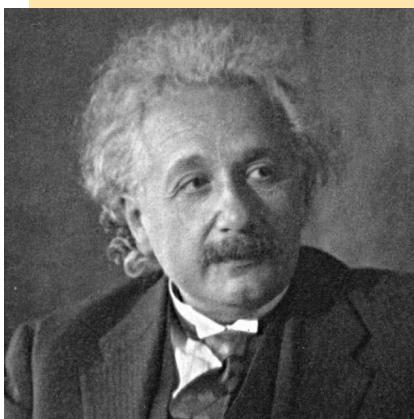
Con esa china en el zapato han venido batallando los teóricos desde hace tres decenios, por lo menos. En principio, debía haberse advertido tal dificultad en los años treinta, época en que se empezaron a calcular los efectos de las partículas virtuales. Pero en todas las áreas de la física, con la excepción de las relacionadas con la gravedad, carece de interés la energía absoluta de un sistema; sólo importan las diferen-

cias de energías entre los estados (por ejemplo, las diferencias de energías entre el estado fundamental de un átomo y sus estados excitados). Si se añade una constante a todos los valores de las energías, desaparecerá en los cálculos; puede, pues, ignorarse. Además, por entonces, los físicos no prestaban atención suficiente a la cosmología como para preocuparse de aplicarle la teoría cuántica.

Pero la relatividad general establece que todas las formas de ener-

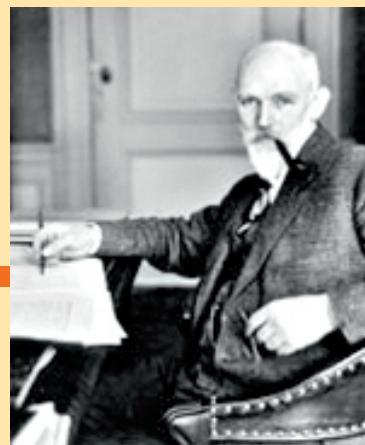
Los hitos

Desde que Einstein lo concibiera hace casi 90 años, el término cosmológico ha pasado por el rechazo, la remodelación y reasunción. Aquí se exponen algunos de los hitos.



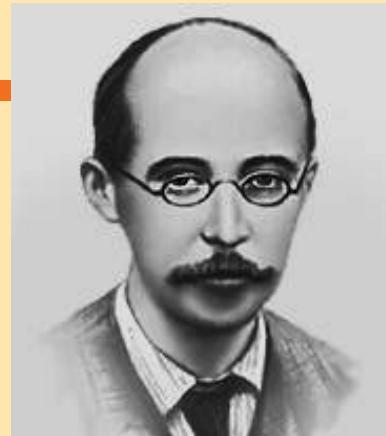
WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

FEBRERO DE 1917: Einstein introduce el término cosmológico para compensar la gravedad; le permitió construir un modelo teórico de universo estático y finito.



MARZO DE 1917: Willem de Sitter construye un modelo alternativo también con término cosmológico. Más tarde, se demostró que implica una expansión acelerada.

1922: Alexander Friedmann construye modelos de universos en expansión y en contracción sin un término cosmológico.



gía, incluida la energía de la nada, actúan como una fuente de gravedad. En los años sesenta, Yakov Borisovich Zel'dovich cayó en la cuenta del interés del problema. Acometió las primeras estimaciones de la densidad de energía del vacío. A partir de entonces, los teóricos se propusieron esclarecer por qué sus cálculos daban unos valores tan desmedidos. Algún mecanismo desconocido, razonaban, debía anular la mayor parte de la energía del vacío, si no toda. En realidad, suponían que el valor más verosímil era cero; hasta la nada cuántica debía carecer de peso.

Mientras los teóricos persistieron en la creencia de que tenía que existir tal mecanismo de anulación, pudieron dejar de lado el problema del término cosmológico. Aunque fascinante, resultaba prescindible. Pero intervino la naturaleza.

Con creces

La primera prueba sólida de que algo no acaba de encajar llegó con ciertas mediciones aprestadas para determinar a qué ritmo se frenaba la expansión del universo. Recordemos que Hubble descubrió que las velocidades relativas de las galaxias remotas eran proporcionales a su distancia de nuestra galaxia. Desde el punto de vista de la relatividad general, esta correlación se debe a la expansión del propio espacio, que ha de frenarse con el tiempo en virtud de la atracción gravitatoria. Y como las galaxias re-

motas se ven según eran hace miles de millones de años, el frenado de la expansión ha de curvar la relación de Hubble; lineal en los demás aspectos. Vale decir, la recesión de las galaxias más distantes ha de ser más veloz que lo predicho por la ley de Hubble. Así las cosas, la tarea consistía, por lo tanto, en determinar con precisión las distancias y las velocidades de las galaxias más remotas.

Para esa medición había que encontrar objetos de luminosidad intrínseca conocida, que sirvieran de referencia; es decir, cuerpos que brillasen lo suficiente para que pudiésemos verlos a través del universo y de cuya luminosidad deducir la distancia a que se encontrasen. Se alcanzó ese hito en los años noventa, con la calibración de las supernovas de tipo Ia; se trata de explosiones termonucleares de estrellas enanas blancas con una masa de alrededor de 1,4 veces la solar. Dos grupos —el Proyecto Cosmología y Supernovas, dirigido por Saul Perlmutter, del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley, y el Equipo Supernovas de z Elevado, dirigido por Brian Schmidt, de los Observatorios Mount Stromlo y Siding Spring— emprendieron la medición del frenado de la expansión del universo con este tipo de supernovas. A comienzos de 1998, ambos grupos convergieron en un mismo descubrimiento, sorprendente: durante los últimos cinco mil millones de años, se ha ido acelerando la ex-

pansión, no frenándose. Desde entonces, se han venido consolidándose las pruebas de la aceleración cósmica; además, no sólo las tenemos de la actual fase de aceleración, sino también de una época anterior de deceleración.

Los datos de las supernovas, sin embargo, no agotan las pruebas de que alguna nueva forma de energía domine la expansión cósmica. La mejor información de que disponemos acerca del universo primitivo proviene de las observaciones del fondo cósmico de microondas (FCM), la radiación residual de la gran explosión que lleva inscritas las características del universo cuando sólo tenía unos 400.000 años. Con las mediciones harto precisas, realizadas en el año 2000, del tamaño angular de las variaciones del FCM a través del cielo se pudo determinar que el universo es plano. Han confirmado este descubrimiento una nave espacial que observa el FCM, la Sonda Wilkinson de la Anisotropía de las Microondas, y algunos experimentos más.

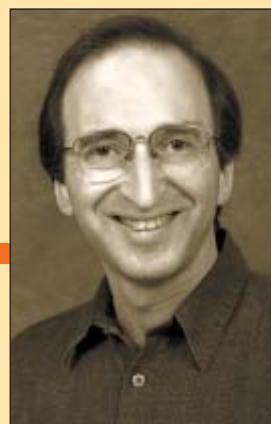
Una geometría espacialmente plana obliga a que la densidad media del universo sea igual a la densidad crítica. Ahora bien, numerosas mediciones de cada una de las formas de materia —incluida la materia oscura fría, un supuesto mar de partículas que se mueven lentamente y no emiten luz, aunque sí que ejercen una atracción gravitatoria— han mostrado que la materia contribuye sólo en alrededor de



1929: Edwin Hubble descubre que el universo está en expansión. Dos años después, Einstein abandona el término cosmológico. En su opinión resultaba ser teóricamente insatisfactorio".

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

1967: Yakov Borisovich Zel'dovich estima la densidad de energía del vacío cuántico y encuentra que daría un término cosmológico elevadísimo.



1998: Dos equipos estudiosos de las supernovas dirigidos por Saul Perlmutter (izquierda) y Brian Schmidt (derecha) anuncian que la expansión cósmica se está acelerando. Un término cosmológico remodelado produciría este efecto. Desde 1998, se han acumulado las pruebas de la aceleración cósmica



un 30 por ciento a la densidad crítica. Un universo plano requiere, por tanto, alguna otra forma de energía, repartida de manera homogénea, que no ejerza influencia observable en las acumulaciones locales de materia y, pese a ello, sume el 70 por ciento de la densidad crítica. La energía del vacío, o algo muy parecido a ella, produciría el efecto deseado.

Desde una tercera línea de razonamiento se apuntaba en el mismo sentido: la aceleración cósmica constituía la pieza que faltaba en el rompecabezas cosmológico. A lo largo de veinte años, el modelo de la inflación con materia oscura fría se convirtió en la principal explicación de la estructura del universo. La teoría de la inflación mantiene que, en sus primerísimos momentos, el universo sufrió un ingente pulso de expansión que suavizó y aplano su geometría y amplió las fluctuaciones cuánticas de la densidad de energía, de tamaños subatómicos a magnitudes cósmicas. En el transcurso de ese período se produjo la distribución de materia ligeramente inhomogénea que llevó a las variaciones que se ven en el FCM y a las estructuras del universo actual. La gravedad de la materia oscura fría, que supera por mucho a la de la materia ordinaria, gobernó la formación de estas estructuras.

A mediados de los noventa, sin embargo, las observaciones pusieron en entredicho ese modelo explicativo. El nivel predicho de aglo-

meración de la materia difería del que se estaba midiendo. Peor aún, la edad del universo predicha parecía ser menor que la edad de las estrellas más viejas. En 1995 indicamos que estas contradicciones desaparecían si la energía del vacío representaba unos dos tercios de la densidad crítica. (Este modelo difería del universo cerrado de Einstein, en el que la densidad del término cosmológico era la mitad que la de la materia.) Dada la movida historia de la energía del vacío, nuestra idea constituía una provocación.

Pero diez años más tarde todo cuadra. Además de explicar la actual aceleración cósmica y el período de deceleración previo, el resurgido término cosmológico modifica la edad del universo; ahora llega casi a los 14.000 millones de años (más, y con un margen suficiente, que la edad de las estrellas más viejas); amén de añadir la suficiente energía para llevar el universo a la densidad crítica. No sabemos si esa energía realmente proviene del vacío cuántico. Dada la importancia que tendría descubrir la causa de la aceleración cósmica, urge cuantificar la energía del vacío. No puede obviarse ya la determinación del peso de la nada, dejar la tarea a las futuras generaciones. Y el rompecabezas parece ahora todavía más confuso que cuando se perseguía una teoría que anulara la energía del vacío. Importa explicar por qué la energía del vacío no es cero, aun-

que sí tan pequeña como para que sus efectos en el cosmos cuenten sólo desde hace algunos miles de millones de años.

Nada más apasionante para los científicos que un problema de este calibre e importancia. Así como a Einstein le condujo a la relatividad general la incompatibilidad de la relatividad especial y la teoría newtoniana de la gravedad, hoy en día creemos que la teoría einsteiniana es incompleta porque no puede incorporar las leyes de la mecánica cuántica. Pero las observaciones cosmológicas quizás iluminen la relación entre la gravedad y la mecánica cuántica en sus aspectos más fundamentales. La equivalencia de los sistemas referenciales acelerados y la gravedad indicó a Einstein el camino; otra clase de aceleración, la aceleración cósmica, podría marcarnoslo a nosotros. Los teóricos han esbozado ya un mapa provisional.

El supermundo

La teoría de cuerdas, llamada también teoría M, parece a muchos una vía prometedora hacia la unificación de la mecánica cuántica y la gravedad. Tiene en la supersimetría, o SUSY, uno de sus principios básicos. Consiste en una simetría entre las partículas de espín semientero, o fermiones (quarks y leptones), y las de espín entero, los bosones (fotones, gluones y otros transmisores de fuerzas). En un mundo en el que SUSY se manifestara plena-

Modelos de cosmos: entonces y ahora

El modelo cosmológico de Einstein (*izquierda*) representaba un universo, finito en el espacio e infinito en el tiempo, que conserva el mismo tamaño eternamente. Carente de límites espaciales, se curva sobre sí mismo como un círculo. Tras el descubrimiento de la expansión cósmica, los cosmólogos construyeron un modelo de universo infinito en el que el ritmo de expansión se iba frenando a causa de la gravedad (*centro*), quizás hasta el punto de que acabara desplomándose sobre sí mismo. En los años ochenta los teóricos añ-

dieron una fase previa de rápido crecimiento; de esa fase anterior de inflación, se tienen ya bastantes indicios. En los seis últimos años, las observaciones han demostrado que la expansión cósmica empezó a acelerarse hace unos cinco mil millones de años (*derecha*). El destino último del universo —expansión continuada, colapso o una hiperaceleración o “gran desgarro”— depende de la naturaleza de la misteriosa energía oscura que está generando la acelerada expansión.

IMAGEN ELIMINADA POR RESTRICCIÓN DE DERECHOS

mente, una partícula y su supercompañera poseerían la misma masa; por ejemplo, el electrón supersimétrico (selectrón) sería tan ligero como el electrón, y así sucesivamente. Se puede demostrar que, en ese supermundo, la nada cuántica no pesaría y el vacío tendría energía cero.

Sin embargo, sabemos que en el mundo real no puede existir un selectrón tan ligero como el electrón: se habría detectado en los aceleradores de partículas. (Se conjectura que las partículas supercompañeras son millones de veces más pesadas que los electrones; por eso no pueden hallarse sin aceleradores más potentes.) SUSY debe ser, por tanto, una simetría rota: la nada cuántica podría pesar un poco.

Se han ideado modelos de supersimetría rota que dan una densidad de energía del vacío menor, en muchos órdenes de magnitud, que las elevadísimas estimaciones mencionadas. Pero aun así supera con creces la indicada por las observa-

ciones cosmológicas. Hace poco, sin embargo, se ha reconocido que la teoría M parece permitir un número casi infinito de soluciones diferentes. Aunque la mayoría de esas posibles soluciones ofrecería una energía del vacío demasiado alta, algunas sí podrían rendir una tan baja como la que observamos.

Otro hito de la teoría de supercuerdas es la introducción de dimensiones adicionales, seis o siete dimensiones espaciales, todas ocultas a la vista excepto las tres usuales. Dicho constructo ofrece una manera inédita de explicar la aceleración cósmica. Georgi Dvali y su equipo, de la Universidad de Nueva York, han propuesto que el efecto de las dimensiones extra quizás se manifieste como un término adicional en las ecuaciones de campo de Einstein, que ocasionaría una expansión acelerada del universo [véase “*Salir de la oscuridad*, por Georgi Dvali; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 2004]. Este enfoque va en contra de lo que se esperaba: durante

muchos años se ha supuesto que en las distancias cortas sería donde cabría buscar diferencias entre la relatividad general y su teoría sucesora, no a escala cósmica. Si la hipótesis de Dvali está en lo cierto, los presagios de una nueva concepción del cosmos vendrán de las mayores distancias, no de las menores.

Cabe la posibilidad de que la explicación de la aceleración cósmica no tenga nada que ver con que el término cosmológico sea tan pequeño o con la manera en que se pueda extender la teoría de Einstein para que incluya la mecánica cuántica. La relatividad general estipula que la gravedad de un objeto es proporcional a su densidad de energía más tres veces su presión interna. Cualquier forma de energía con una presión grande y negativa —que tire hacia dentro, como una lámina elástica, en vez de empujar hacia fuera, como un globo de gas— tendrá, por tanto, una gravedad repulsiva. La aceleración cósmica podría, pues, haber revelado, lisa y llanamente,

la existencia de la energía oscura, una forma insólita de energía que no predicen ni la mecánica cuántica ni la teoría de cuerdas.

Geometría y destino

En cualquier caso, el descubrimiento de la aceleración cósmica ha transformado nuestra concepción del futuro. El destino se ha desligado de la geometría. Una vez aceptamos la existencia de la energía del vacío o de algo similar, cabe cualquier sino. Un universo plano dominado por una energía del vacío positiva se expandirá para siempre a un ritmo cada vez mayor, mientras que otro dominado por una energía del vacío negativa colapsará. Y si la energía oscura no es en absoluto energía del vacío, su futuro efecto sobre la expansión cósmica resulta incierto. Al contrario que una constante cosmológica, la densidad de energía oscura podría crecer o menguar con el tiempo. Si la densidad crece, la aceleración cósmica aumentará: las galaxias, los sistemas solares, los planetas y los átomos, en este orden, se disgregarán en un lapso de tiempo finito. Pero si la densidad cae, la aceleración podría cesar. Y si la densidad se hace negativa, el universo quizás colapse. Nosotros hemos demostrado que, si no se conoce con detalle el origen de la energía que hoy impele la expansión, ningún conjunto de observaciones cosmológicas podrá establecer el fin último del universo.

Para encajar este rompecabezas, quizás necesitemos una teoría fundamental que nos permita predecir y categorizar la aportación gravitatoria de cada una de las posibles contribuciones a la energía del espacio vacío. En otras palabras, la física de la nada determinará el sino de nuestro universo. Para dar con la solución puede que se requieran nuevas mediciones, de la expansión cósmica y de las estructuras que se forman en ella, que orienten a los teóricos. Afortunadamente, se están planeando muchos experimentos nuevos, entre ellos un telescopio espacial que observará las supernovas remotas y otros, tanto terrestres como espaciales, que analizarán la energía oscura a través de su efecto en el desarrollo de las macroestructuras cósmicas.

Nuestro conocimiento del mundo físico suele desarrollarse en una atmósfera de confusión creadora. La niebla de lo desconocido condujo a Einstein a considerar el término cosmológico como un recurso desesperado en la construcción de un universo estático, machiano. Hoy en día, la confusión acerca de la aceleración cósmica nos lleva a explorar cada camino que nos pueda enseñar acerca de la energía que impulsa la aceleración. La buena nueva es que, aunque muchas rutas lleven a vías muertas, la resolución de este profundo y paradójico misterio quizás nos sirva para unificar la gravedad con las demás fuerzas de la naturaleza, la gran esperanza de Einstein.

Los autores

Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner fueron de los primeros en argumentar que el universo está dominado por un término cosmológico radicalmente diferente del que introdujo, y después repudió, Einstein. Su predicción, en 1995, de una aceleración cósmica fue confirmada por las observaciones astronómicas tres años más tarde. Krauss es profesor del departamento de física en la Universidad Case de la Reserva Federal. Turner ocupa la cátedra Bruce V. Rauner de la Universidad de Chicago.

Bibliografía complementaria

SUBTLE IS THE LORD: THE SCIENCE AND LIFE OF ALBERT EINSTEIN. Abraham Pais. Oxford University Press, 1982.

THE COSMOLOGICAL CONSTANT PROBLEM. Steven Weinberg en *Reviews of Modern Physics*, vol. 61, n.º 1, páginas 1-23; 1989.

THE OBSERVATIONAL CASE FOR A LOW DENSITY UNIVERSE WITH A NON-ZERO COSMOLOGICAL CONSTANT. J. P. Ostriker y P. J. Steinhardt en *Nature*, vol. 377, págs. 600-602; 19 de octubre, 1995.

THE COSMOLOGICAL CONSTANT IS BACK. Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner en *General Relativity and Gravitation*, vol. 27, n.º 11, págs. 1135; 1995.

GEOMETRY AND DESTINY. Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner en *General Relativity and Gravitation*, vol. 31, n.º 10, págs. 1453-1459; octubre 1999.

Los sonidos del espaciotiempo

Cuando dos agujeros negros se funden, generan ondas gravitatorias con patrones característicos del fenómeno. ¿Pueden oírse?

Craig J. Hogan

De los hábitos compartidos por antiguos y modernos, quizás no lo haya más sereno que observar las estrellas. Cuando contemplamos un firmamento rutilante o las hermosísimas fotografías de estrellas y galaxias del Telescopio Espacial Hubble, penetraremos en un reino mágico de sagrada calma, como una catedral antigua o un museo de prestigio.

¿Cómo se sentiría si mientras admira en silencio el cielo, oyera de repente un rumor de estrellas?

Pasada la conmoción de que le hubiesen arrancado de su ensueño poético, el universo le parecería quizás mucho más inmediato, presente, verdadero y vivo. Una cosa es ver destellos y relámpagos a distancia, y otra muy distinta que nos sacuda el sonido arrollador del trueno. Oír el universo es, en cierto modo, tocarlo. Se están descubriendo formas de “palpar” el activo universo que nos rodea.

La teoría einsteiniana del espaciotiempo nos enseña que el universo no es silencioso. El espacio y el tiempo albergan una cacofonía de vibraciones con texturas y timbres tan ricos y variados como la música de una selva tropical o el final de una ópera de Wagner. Pero aún no hemos oído esos sonidos. El universo es un concierto al que hemos estado asistiendo como si se tratase de una película muda.

Vibraciones del espaciotiempo

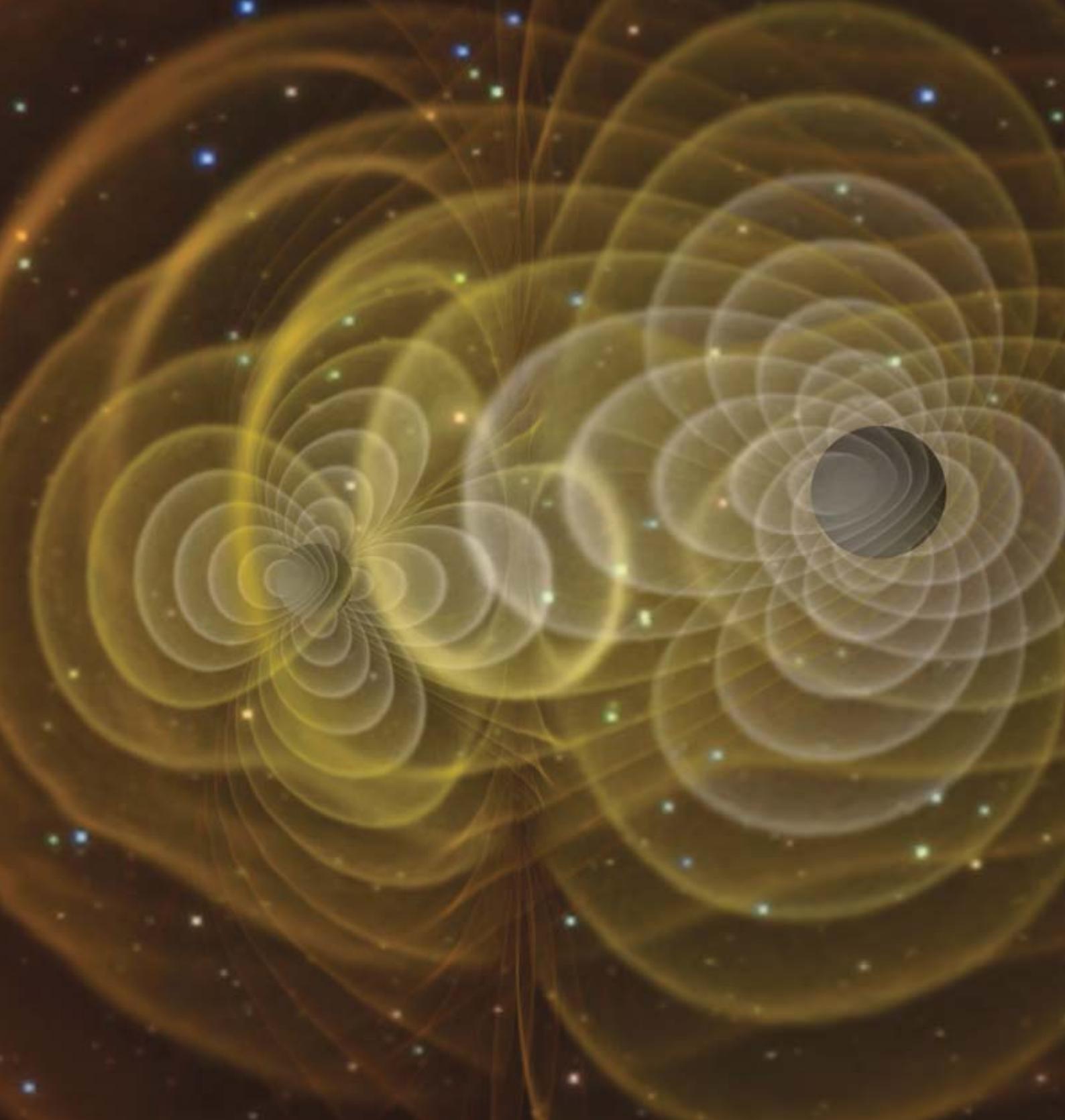
Los sonidos del cosmos no son como los que captan nuestros oídos, transportados por las vibraciones del aire. El espacio es un vacío casi perfecto. El sonido ordinario sólo puede darse donde haya materia que pueda vibrar. Nuestro conocimiento inmediato del universo lejos del sistema solar, desde la astronomía precientífica hasta ahora, nos viene casi enteramente de una sola forma de energía: la luz. Según demostró James Clerk Maxwell en el siglo XIX, la luz no es sino otro nombre de las

vibraciones de los campos eléctricos y magnéticos que viajan a través del espacio a la velocidad de la luz.

(Para ser justos, no debemos olvidarnos aquí de otros mensajeros de lo lejano: rayos cósmicos, neutrinos, polvo cósmico, meteoritos y otra materia que cae a la Tierra desde el espacio exterior. Sobre todo, no debemos olvidarnos del origen cósmico de todos los átomos que componen la Tierra, incluidos los que nos constituyen. Pero son cuestiones distintas.)

En contraste con las vibraciones de los campos eléctricos y magnéticos que llamamos luz, los sonidos del universo son transportados por vibraciones del espaciotiempo, las *ondas gravitatorias*. La teoría general de la relatividad de Albert Einstein nos dice que todas las formas de materia crean deformaciones en el espaciotiempo y que los movimientos de la materia generan vibraciones que viajan por el espacio a la velocidad de la luz. Las vibraciones estiran y encogen la urdimbre del propio espacio. Las más rápidas aceleraciones de los objetos más densos y de gravedad más intensa, los agujeros negros (que consisten en realidad en densos nudos de la curvatura del espaciotiempo), crean las vibraciones más sonoras. Cuando podamos oírlas, percibiremos cataclismos enormes, y a menudo invisibles, del universo observable.

Las ondas gravitatorias se emiten cuando se aceleran grandes masas; la luz, cuando se aceleran pequeñas cargas eléctricas. De ahí que las ondas gravitatorias tengan frecuencias mucho menores que la luz. Los sucesos en que se producen aquéllas y éstas difieren. Las estrellas normales emiten mucha luz a causa del movimiento de los electrones en su atmósfera caliente, pero apenas generan radiación gravitatoria. En el extremo opuesto, las más potentes transformaciones energéticas del universo —la fusión de dos agujeros negros entre sí para generar un agujero negro mayor— emiten casi toda su energía en



1. A PESAR DE LA SERENA IMPRESIÓN QUE CAUSA, el cosmos es un maremágnum plagado de cataclismos, de episodios que no nos son visibles pese a las poderosas masas que intervienen. Acontece con la fusión de dos agujeros negros, la mayor transformación de energía del universo, representada aquí en una simulación de la NASA. Cuando dos agujeros negros, las más densas concentraciones de masa, se precipitan en espiral el uno sobre el otro y chocan para formar un nuevo agujero negro

supermasivo, emiten cantidades enormes de energía en forma de ondas gravitatorias, vibraciones que estiran y encogen el espaciotiempo. Si los oídos humanos percibieran tan profundas vibraciones, el espacio parecería un lugar retumbante, cacofónico. Una primera generación de detectores terrestres está ahora escuchando las ondas gravitatorias; para detectar episodios de mayor alcance en regiones más lejanas en el espacio y el tiempo, se están proyectando nuevos ingenios espaciales.

forma de ondas gravitatorias y apenas algo de ella en forma de luz.

En el escaso tiempo que tarda en producirse la fusión, alrededor de una hora en el caso de los mayores agujeros que conocemos, se emite mil veces más energía en ondas gravitatorias que la desprendida en forma de luz por todas las estrellas de todas las galaxias del universo visible juntas. Por tanto, los fenómenos más ruidosos del universo no son los más brillantes, ni viceversa. Las dos clases de energía vienen a constituir sendos sentidos de lo que está sucediendo ahí fuera.

Tal como Peter S. Shawhan explicó en estas páginas [véase “La detección de las ondas gravitatorias”; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 2005], la teoría de Einstein calcula muchas características de las ondas gravitatorias. Nos dice que pasan a través de todo, que se propagan desde los confines más lejanos del espacio-tiempo y desde los momentos iniciales de la gran explosión, hasta alcanzarnos. Nos dice que los pares de estrellas ordinarias que orbitan una alrededor de otra, incluidas las binarias que ya conocemos, han de estar emitiendo ondas gravitatorias. Nos dice exactamente cuánta energía radian. Declara, por fin, la conformación matemática del espacio-tiempo distorsionado por

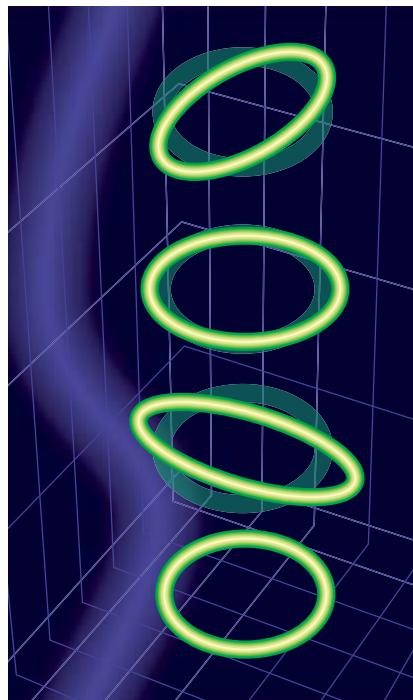
los agujeros negros, que se traduce en ondas gravitatorias, predecibles con mucha exactitud y emitidas por cualquier objeto que caiga en su interior.

Disponemos, pues, de un modelo matemático bien definido que describe las maneras en que el espacio y el tiempo deben vibrar. Si detectásemos las ondas gravitatorias, contaríamos con un método de nuevo cuño para explorar el universo visible y, al mismo tiempo, para someter a prueba ideas fundamentales sobre el espacio y el tiempo.

Hay pruebas indirectas precisas de que las ondas gravitatorias existen. A Russell Hulse y a Joseph Taylor les concedieron el premio Nobel de 1993, en parte, por medir los efectos de la pérdida de energía por ondas gravitatorias en un sistema púlsar binario. Pero hasta ahora, no se ha detectado directamente ninguna onda gravitatoria.

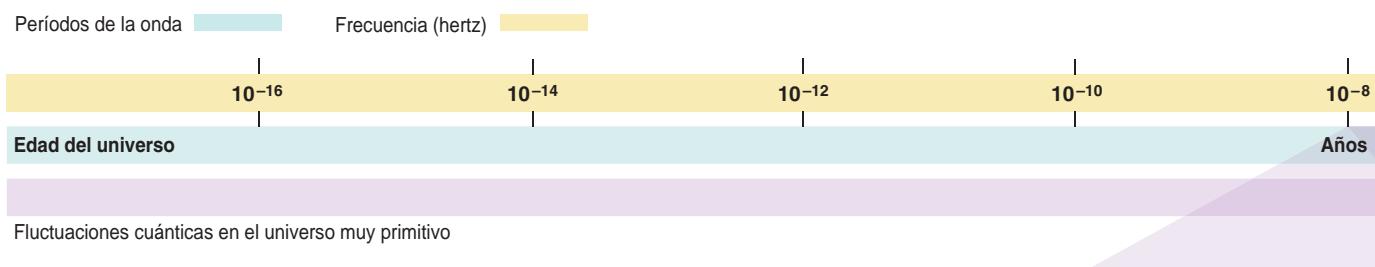
Micrófonos extraordinariamente sensibles

A los astrónomos les gustaría sintetizar la polifonía de la banda sonora del cosmos y escuchar lo que está sucediendo por todas partes. Pero estas vibraciones, pese a su mucha energía, son muy difíciles de detectar. (Guarda relación con que lo atraviesen todo.)



2. EL PASO DE UNA ONDA

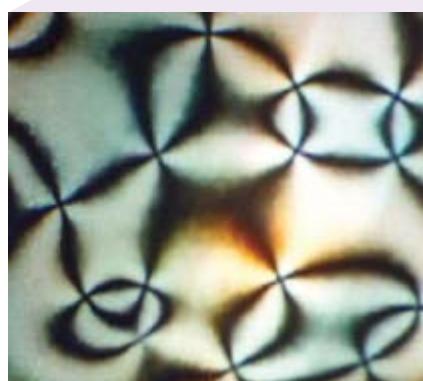
GRAVITATORIA estira y encoge el espacio. Se exagera en esta simulación, donde una serie de anillos (verde) se deforman por el paso de una onda gravitatoria (púrpura). Al contrario que una onda acústica, que distorsiona el aire por compresión, el paso de una onda gravitatoria distorsiona el espacio al estirar su forma sin comprimirla.



3. LOS FÍSICOS HAN EXPLORADO A FONDO el espectro de la radiación

electromagnética, desde las bajas frecuencias y largas longitudes de onda de las ondas de radio hasta las altas frecuencias y cortas longitudes de onda de los rayos gamma, pasando por el espectro de la luz visible. Las ondas gravitatorias presentan su propio espectro, que se puede representar en hertz, o ciclos por segundo. Los interferómetros láser terrestres pueden oír intervalos de ondas de alta intensidad y alta frecuencia, correspondientes a la muerte y final unión de dos estrellas en una. LISA, la Antena Espacial de Interferometría Láser, podrá detectar los retumbos más lentos y extensos que caracterizan tanto a agujeros negros de mucha mayor masa que las estrellas como a las primeras etapas de las fusiones estelares. Un ejemplo de fusión que ocurrirá en el futuro lejano es la del par de agujeros negros supermasivos del cúmulo de galaxias Abell 400, que se muestra en la radioimagen en falso color a la izquierda, en la página siguiente. LISA “oirá” también las ondas gravitatorias de las primeras etapas de la evolución del universo y comprobará las teorías que explican la forma adquirida por el espacio y el tiempo.

Transiciones de fase y cambios dimensionales en el universo primitivo; supercuerdas cósmicas



Cerca de los agujeros negros, el espaciotiempo está muy deformado, tanto, que escapar de ellos resulta imposible si se cae en su vecindad. Sin embargo, las ondas gravitatorias que nos alcanzan desde muy grandes distancias distorsionan el espacio sólo en un grado minúsculo, menor que el cociente entre el tamaño del agujero negro y la distancia a que se encuentre. Otra manera de decir lo mismo: el espaciotiempo es el medio más rígido que hay, hasta el punto de que una enorme cantidad de energía sólo crea en él vibraciones minúsculas. ¿Cómo podremos, entonces, oírlas?

Por donde pasa una onda gravitatoria, se estira y encoge el espacio, lo que significa que se modifica la distancia entre objetos. Para una fracción de estiramiento dada, el cambio en la distancia será mayor cuanto más separados se encuentren los cuerpos. Nuestra tarea, pues, consiste en medir variaciones minúsculas en la distancia entre objetos muy separados. La interferometría láser ofrece un modo de detectar, con extraordinaria sensibilidad, minúsculas dilataciones en distancias grandes. En esa técnica se apoyan los mejores detectores de ondas gravitatorias.

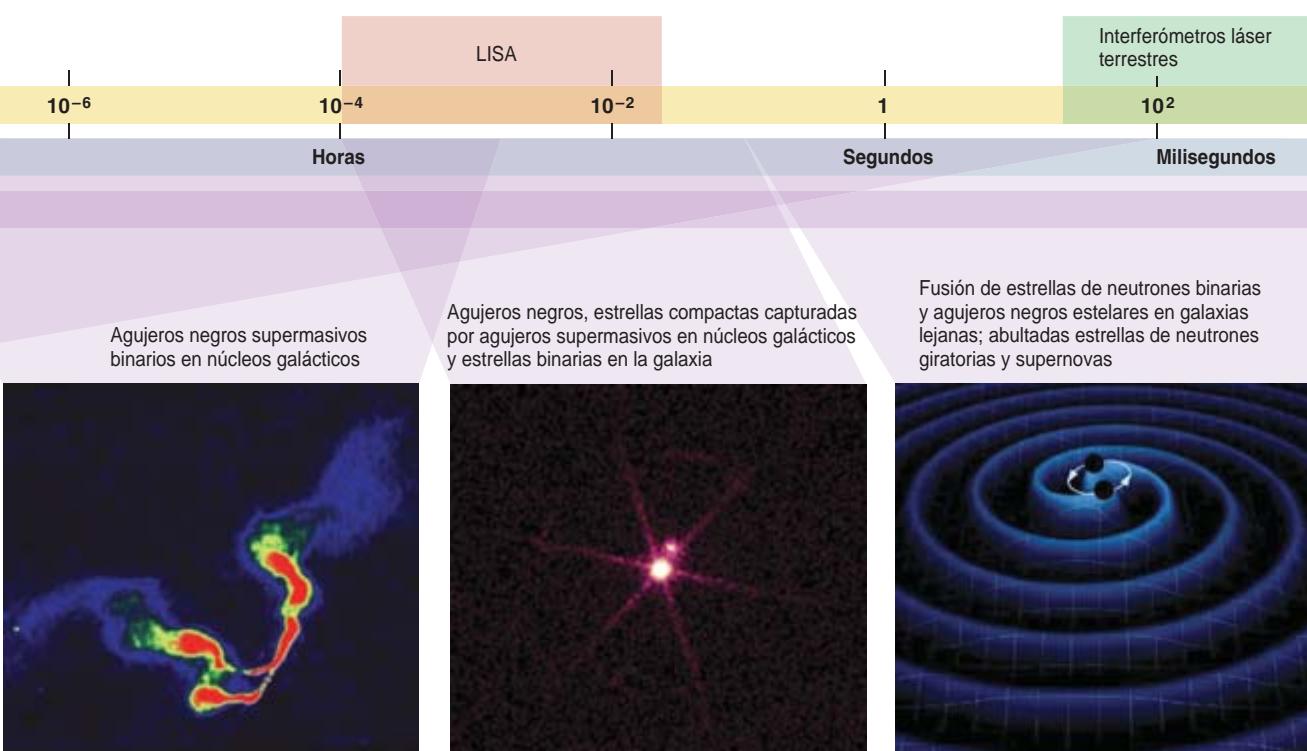
La luz láser es un “color puro”, formado por ondas de sólo una lon-



4. EQUIPOS DE INVESTIGACIÓN DE TODO EL MUNDO cooperan en la detección de ondas gravitatorias, a través de una red terrestre de interferómetros láser. Cada detector porta dos brazos de varios kilómetros de largo, equipados con espejos que reflejan luz láser entre ellos. La medición precisa de las variaciones en la intensidad de esta luz de una sola longitud de onda detecta minúsculos movimientos de los espejos, indicativos de una ondulación del espacio. Aquí se ve el observatorio franco-italiano VIRGO, cerca de Pisa, uno de los cinco observatorios interferométricos construidos hasta la fecha. El proyecto de mayor magnitud es LIGO, Observatorio de Ondas Gravitatorias por Interferometría Láser, formado por interferómetros en forma de L de 2 y 4 kilómetros de largo, en Hanford, estado de Washington, y Livingston, Luisiana.

gitud de onda. En el interferómetro, la luz de un láser se refleja en un espejo. Cualquier alteración de la distancia al espejo cambia la longitud de onda de la luz. (Puesto que es una deformación del espaciotiempo, vale imaginar que este cambio consiste en el corrimiento Doppler asociado al movimiento del espejo.) La luz

reflejada se combina entonces con luz láser original no reflejada, de modo que ambos conjuntos de ondas se interfieran. La luz cambia de brillo en razón del punto de sus vibraciones relativas en que se encuentren los dos conjuntos de ondas láser. Al medir las variaciones de la intensidad de la luz se determinan con muy alta preci-



sión los minúsculos movimientos del espejo, aunque esté muy lejos.

Los detectores interferométricos de ondas gravitatorias actualmente instalados en tierra (que se describen con detalle en el artículo de Shawhan) miden movimientos mucho menores que un núcleo atómico en distancias de varios kilómetros. El detector que se instalará en el espacio, la “Antena Espacial de Interferometría Láser” (LISA), medirá movimientos mucho menores que un átomo en distancias de 5 millones de kilómetros, unas 13 veces la distancia a la Luna.

Veinte octavas de sonido del espaciotiempo

La razón de construir interferómetros terrestres (LIGO, u Observatorio de Ondas Gravitatorias por Interferometría Láser, y otros en distintas partes del globo) y orbitales (LISA) es que observan diferentes frecuencias de ondas gravitatorias, tal y como los telescopios ópticos y los de radio captan frecuencias de la radiación elec-

tromagnética muy dispares. Abarcan el teclado de un piano de 20 octavas. Darán, pues, con fenómenos de universos muy distintos también.

Los detectores terrestres perciben las vibraciones del espaciotiempo a las frecuencias audibles, en una banda alrededor de los 100 ciclos por segundo, o hertz, de algo más de tres octavas, el registro de una soprano versátil. Corresponden a las estrellas de neutrones y agujeros negros de masa parecida a la de una estrella. Cuanto más deprisa giran sobre sí mismos y alrededor de otros, momentos antes de su catastrófica fusión, más resuenan. LIGO oírá esos estertores de muerte estelares.

En el espacio, los detectores pueden oír frecuencias un millón de veces más bajas. Este profundo retumbar, en una amplia banda alrededor de un milihertz, se origina en fusiones catastróficas de agujeros negros mucho mayores que los que percibe LIGO, con masas que multiplican millones de veces la de una estrella. Pueden

también venir de estrellas binarias, que estén orbitando una alrededor de la otra más despacio y a mayor distancia. Las estrellas binarias son tan comunes, que sus ondas gravitatorias se confunden y en algunas frecuencias serán la principal fuente de “ruido” para LISA. Para esta antena espacial, el universo será un bullicio. En cuanto funcione, sentirá una cacofonía. Habrá que discriminar entre sonidos, cual si se tratara de entender conversaciones distintas en una fiesta en la que todos hablan a la vez.

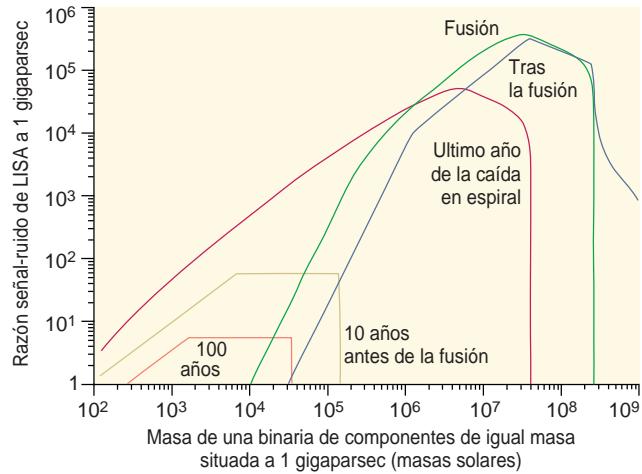
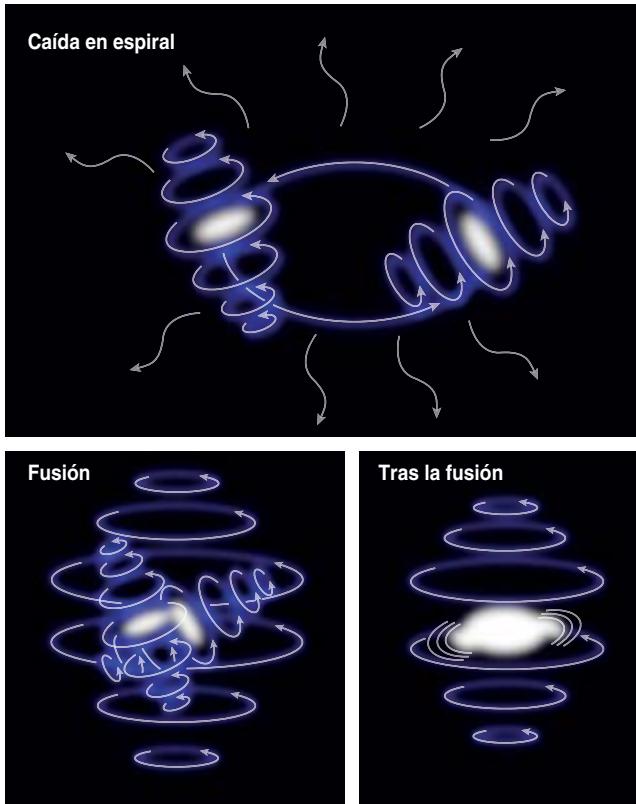
Los estilos de observación de LIGO y de LISA difieren bastante. LIGO se halla a la espera de los sonidos de las fusiones de estrellas, breves ráfagas de intensa actividad. Tales episodios de fusión se producen sin cesar en el universo, aunque desconocemos su cadencia o cuándo se producirá una fusión cercana a LIGO y pueda así percibirla. En razón de esa cadencia de episodios, y dependiendo también de nuestra fortuna, LIGO podría detectar ondas gravitatorias lo mismo este año que el decenio que viene.

Cuando LISA se halle en el espacio, quizás dentro de diez años, detectará inmediatamente ondas gravitatorias de alguna fuente conocida. A partir de ese momento habrá que clasificar e identificar una amplia variedad de ruidos cósmicos familiares y extraños.

¿Qué aprenderemos de la radiación gravitatoria cuando se detecte? Mucho acerca de lo que sucede en el universo, gracias a una nueva manera de hacer astronomía. Estudiaremos la física de la gravedad y del espaciotiempo de manera inédita; los resultados confirmarán lo que creemos saber —esto es, la teoría de Einstein del espaciotiempo— o nos enseñarán algo hasta ahora desconocido sobre el espaciotiempo. Quizás nos sorprendan fenómenos nuevos; por ejemplo, estados radicalmente inéditos de masa y energía cuya existencia hasta ahora sólo hemos sospechado. Un tal descubrimiento arrojaría luz sobre la unificación de las ideas sobre el espacio y el tiempo con las relativistas a la energía y los cuantos, quizás bajo la forma de una teoría de cuerdas, unificación que se cuenta entre los misterios más profundos de la física.



5. LAS IMAGENES DEL TELESCOPIO ESPACIAL HUBBLE (*con una ampliación de la zona contorneada en la imagen tomada por un telescopio terrestre*) prueban que las galaxias espirales NGC4038 y NGC 4039, las “galaxias antena,” colisionan entre sí, un choque a 63 millones de años luz de la Tierra, que dura ya 100 millones de años. A medida que avanza el proceso, los agujeros negros supermasivos de los centros de las galaxias se hundirán hacia el centro de la galaxia que se está formando, proceso que LISA debería detectar. Aunque las galaxias tardan miles de millones de años en formarse, son tan numerosas, que fusiones así pueden suceder en una u otra parte muchas veces al año.



6. LAS FUSIONES DE PARES DE AGUJEROS NEGROS se desarrollan en tres etapas, cada una con un perfil “sonoro” distintivo. Durante la primera etapa, en la que uno va cayendo en espiral sobre el otro, se emite un conjunto sonoro constante, como una sola nota musical que gradualmente se va haciendo más aguda. Momentos antes de la fusión, la nota aumenta de repente en intensidad y tono. Después de la fusión, la radiación gravitatoria se extingue y desaparece. El gráfico muestra la intensidad predicha de la señal que LISA recibiría a lo largo de un año de observación de las diversas etapas de un tal suceso situado a 1 gigaparsec de la Tierra, aproximadamente una cuarta parte de la distancia al horizonte del universo observable.

Agujeros negros y binarias

Los episodios más espectaculares que registrará LISA serán enormes y retumbantes: las caídas en espiral de imponentes agujeros negros sobre otros, en alguna parte del universo, hasta que se fusionen en uno solo y mayor. Este agujero final pesará mucho menos que la suma de los dos de partida. La diferencia de masa se radiará en forma de ondas gravitatorias. Como he mencionado antes, una de estas fusiones brilla, en términos de potencia radiada, más que el resto del universo.

Durante un largo intervalo, los agujeros negros en órbita mutua emiten un conjunto de sonidos casi constantes, como una sola nota de un violín que sólo muy lentamente se fuese agudizando. Momentos antes de que los agujeros se fundan, la nota, rápidamente, se vuelve más aguda e intensifica al mismo tiempo, como la floritura de un virtuoso. Por fin, después de la fusión, el sonido se desvanece rápidamente, como las reverberaciones en la sala de conciertos.

Creemos que las fusiones suceden con bastante frecuencia por doquier en el universo. La mayoría de las galaxias tienen un agujero negro de gran

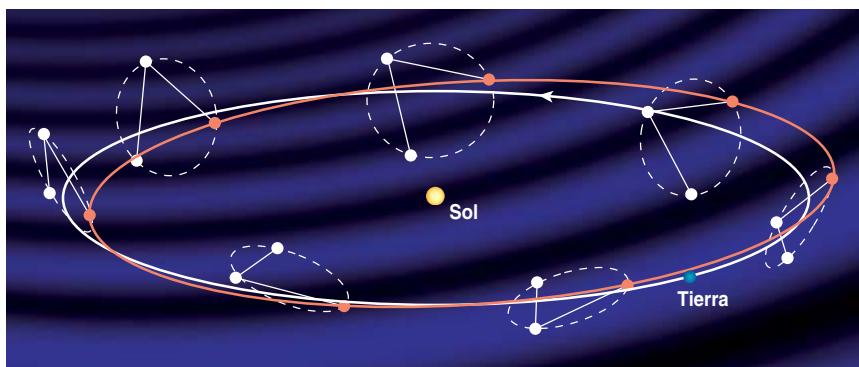
masa en su mismo centro. No hay galaxia que no se haya fundido con otra, o la haya engullido, en más de una ocasión; así crecen las galaxias. Cuando dos galaxias se fusionan, sus respectivos agujeros negros centrales se hunden en el centro de la nueva galaxia porque, en sus interacciones gravitatorias, ceden energía a las estrellas y al gas. Los agujeros terminan por encontrarse y fundirse. Hay unos diez mil millones de galaxias que oír. Si cada una participase en una fusión galáctica una sola vez en sus diez mil millones de años, habría, en promedio, un episodio al año.

Pero los agujeros negros de mayor masa no tienen que esperar tanto para engullir algo; atraen a sí a los objetos de menor talla que se hallen en su vecindad. Los agujeros imponentes moran en los densos enjambres de estrellas del centro de las galaxias; siempre hay alguna estrella que se acerca demasiado.

En ocasiones un remanente estelar muy compacto —una estrella de neutrones o un agujero negro con una masa parecida a la de una estrella— queda atrapado en una danza de la muerte: gira, muchas veces,

alrededor de un agujero negro masivo, hasta que cae en el horizonte de sucesos del agujero y desaparece engullida. Mientras baile, emitirá radiación gravitatoria. En ella se registrarán una historia de la órbita y un mapa detallado del espaciotiempo en los alrededores del agujero negro masivo. Recuérdese que el agujero negro sólo se compone de gravedad y que la teoría de Einstein describe la estructura de los agujeros negros. Estos episodios nos informan sobre la estructura de los propios agujeros negros: la forma en que el espaciotiempo se ata a sí mismo en unos nudos estables y rotatorios, a los que llamamos agujeros negros.

LISA dispone de objetivos seguros, también. Nuestra galaxia está llena de estrellas. Las estrellas siguen un ciclo vital. Son normales sólo mientras dure su combustible de hidrógeno: muchas de ellas se han quemado ya y muerto. La mayoría de las veces, el remanente es una brasa pequeña y densa, vale decir, una enana blanca o una estrella de neutrones; en muchas ocasiones, como las estrellas tienden a formar sistemas binarios, el remanente per-

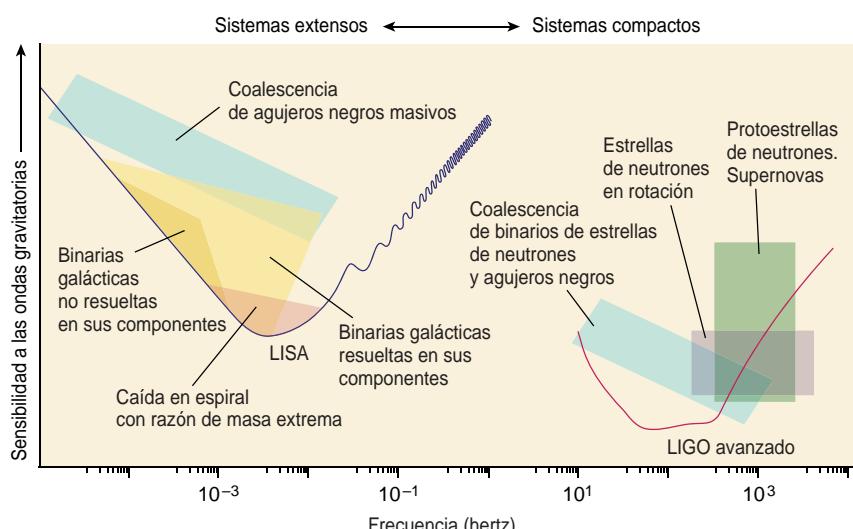


7. LA CAPACIDAD DE LISA de detectar ciertos sucesos viene en parte de la longitud de sus brazos, en parte de su diseño (véase la figura 10) y en parte de su aislamiento del ruidoso entorno geofísico de la Tierra. Se lanzarían tres naves espaciales a una órbita solar circular, en el plano de la eclíptica, donde seguirá a la Tierra a lo largo de unos 50 millones de kilómetros. Las naves espaciales formarán un triángulo equilátero, con su plano de rotación inclinado 60 grados con respecto a la eclíptica y brazos del interferómetro de 5 millones de kilómetros de largo.

tenece también a un sistema binario, con un compañero similar. Esos remanentes que orbitan uno alrededor de otro, con períodos de entre algunos minutos y una hora, irradian a las frecuencias que LISA oirá.

Conocemos algunas binarias cercanas, descubiertas con telescopios

normales, que LISA podría captar. Las llamamos “binarias calibradoras”, pues disponemos ya de una idea madura de sus características, su frecuencia y su distancia. Gracias a LISA sabremos mucho más; la morfología de la onda gravitatoria nos revelará su inclinación, su masa



8. LOS VIOLENTOS SUCESOS DONDE PARTICIPAN SISTEMAS COMPACTOS —estrellas de neutrones y agujeros negros— estarán, se supone, al alcance de los observatorios LIGO a medida que éstos vayan refinándose. Cada interferómetro tiene una curva de ruido, que define las frecuencias y las amplitudes de las ondas de las que podrá recibir una señal suficientemente clara como para distinguir del fondo ruidoso un episodio (líneas rojas y púrpuras). Las regiones sombreadas indican los intervalos en los que deberían detectarse ciertos sucesos. LIGO está a la escucha de la rotación y coalescencia de estrellas de neutrones binarias compactas y los colapsos de núcleos estelares que se convierten en supernovas. La curva de ruido de LISA sintoniza sucesos de más baja frecuencia, que no se pueden detectar desde la Tierra. En particular, LISA podría observar la generación de agujeros negros supermasivos.

precisa y otras características. Las binarias próximas garantizarán que LISA realmente funciona y detecta ondas gravitatorias. Millares de binarias más distantes se mezclarán en un ruidoso coro de fondo, que LISA percibirá en cuanto se conecte.

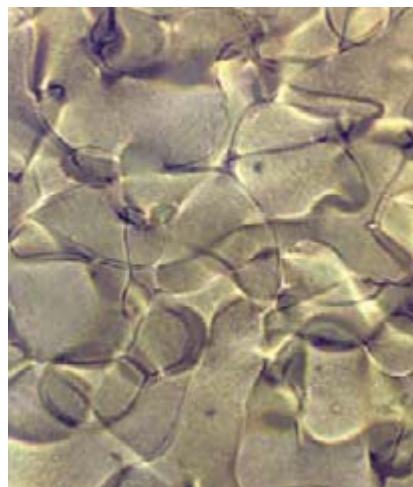
Desde el universo lejano

Con nuestras teorías acerca de la emisión de ondas gravitatorias y los datos de LISA, convertiremos las ondas gravitatorias en un instrumento para establecer las distancias a las galaxias del universo lejano. Midiendo el sonido sostenido de la fusión de un agujero negro binario remoto —cuánto tarda en cambiar de nota—, podremos determinar la masa de los agujeros negros que se fusionan. Midiendo su intensidad tonal, averiguaremos a qué distancia se hallan. Se trata de una manera nueva de explorar la expansión cósmica; resultará más exacta y directa que las demás, siempre y cuando sea cabal nuestro conocimiento de la física de las fusiones de agujeros negros.

Este proyecto tropieza con una dificultad: hay que identificar la galaxia anfitriona en luz visible (porque necesitamos una medida independiente del corrimiento hacia el rojo, o estiramiento de las longitudes de onda a causa de la expansión del universo). No sabemos si será posible. Para las binarias ruidosas, LISA nos permitirá a veces calcular la dirección por la que viene el sonido, mediante la combinación de los datos de diversas partes del año (como si fuera un micrófono estéreo). La mejor precisión será de cerca de un grado de arco. En un sector de cielo de ese tamaño caben decenas de millares de imágenes de galaxias. Es razonable esperar que la singular galaxia donde se han fusionado un par de agujeros negros presente un aspecto diferente, tanto como para que la reconozcamos, quizás por la variación temporal de la actividad nuclear en el visible, quizás por los cambios que haya inducido en su conformación la reciente fusión galáctica.

La cartografía precisa de las distancias con supernovas llevó al descubrimiento de la energía oscura cósmica que acelera la expansión del universo; con una medición mejor de las distancias gracias a las ondas

9. ALGUNOS MODELOS de la formación del universo incluyen "cuerdas cósmicas", que llenarían el universo de radiación gravitatoria. Las cuerdas cósmicas podrían generarse por enfriamiento rápido durante la expansión del universo. Este proceso es análogo al crecimiento y coalescencia de burbujas de una nueva fase en un cristal líquido, con la formación de cuerdas (*a la derecha*).



gravitatorias profundizaremos en esa nueva fuerza de la naturaleza.

La sección de cuerdas

Por extrañas que parezcan, las fuentes de que acabamos de hablar, incluso las enormes fusiones de agujeros negros binarios, serán parte del curso normal de las cosas, según nuestro conocimiento actual del universo. Pero, ¿no podría haberlas nuevas e inesperadas?

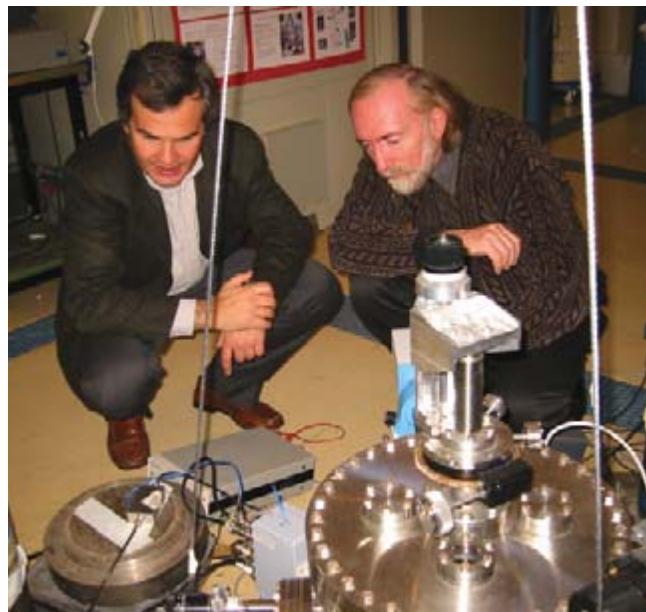
La física llega ahora hasta los instantes subsiguientes a la gran explosión, a temperaturas increíblemente altas, incluso hasta la época de la inflación, cuando la expansión cósmica

recibió el impulso por el que ha devenido de la magnitud que ahora contemplamos. Si retrocedemos lo suficiente, ni siquiera el espacio y el tiempo eran como hoy. Según una versión cuántica aún no comprobada de la teoría de Einstein, la teoría de cuerdas, el espacio tiene 10 dimensiones, muchas muy curvadas ("compactadas"), y todas las partículas de materia, y quizás incluso el espaciotiempo y las ondas gravitatorias,

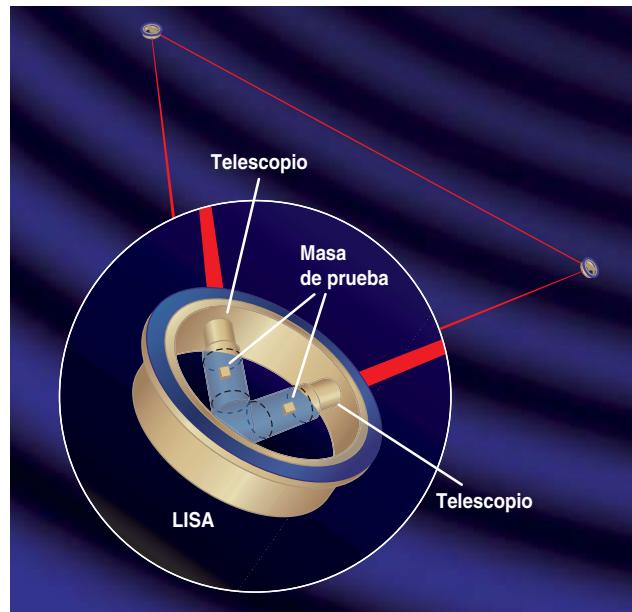
se componen en última instancia de minúsculas cuerdas cuánticas. El problema de la teoría de cuerdas es que, a pesar de su milagrosa capacidad de relacionar ideas de diferentes partes de la física y de las matemáticas, no se ha encontrado todavía ninguna prueba real que la avale. ¿Podrá LISA captar aunque sea un susurro de ese tipo de física?

Hay al menos una clase de objeto nuevo, una clase genuina de "cuerda" que, si existiese, llenaría el universo de radiación gravitatoria audible por LISA. Las minúsculas cuerdas cuánticas podrían también dar lugar a *supercuerdas cósmicas*, de microscópica finura y astronómica longitud.

Muy al principio de los tiempos, el rápido enfriamiento del universo, al expandirse, debió de formar una densa red de esas cuerdas. Semejante proceso de formación recuerda el modo en que se agrietan los cubitos de hielo cuando caen repentinamente en agua, el patrón irregular de los dominios de aleación en una espada de samurái finamente forjada o las líneas de vórtice atrapadas que acostumbran



10. ¿COMO "OIRÁ" LISA LAS PEQUEÑAS ONDULACIONES DEL ESPACIOTIEMPO? Los láseres de la antena detectarán el movimiento de una masa de prueba, un cubo de oro y platino que flotará libremente dentro de cada nave espacial, protegido de toda fuerza, salvo de la gravedad. El diseño aplica lo aprendido con balanzas de torsión, que detectan minúsculas fuerzas en la Tierra. En la fotografía, los físicos Stephano Vitale, de la Universidad de Trento, y Kip Thorne, del Caltech,



examinan modelos del equipo que se está desarrollando para el "LISA Pathfinder", misión que ensayarán durante seis meses, se prevé que en 2009, las técnicas necesarias para proteger las masas de prueba de otras fuerzas. Se espera que LISA alcanzará sensibilidad bastante para detectar un estiramiento del espaciotiempo casi tan pequeño como un núcleo atómico a través de los 5 millones de kilómetros de longitud de sus brazos.

a crearse en el enfriamiento brusco de superconductores, superfluidos o cristales líquidos.

A medida que el universo se va expandiendo, las cuerdas se desenredan y mueven casi a la velocidad de la luz; cuando se cruzan pueden intercambiar fragmentos y crear lazos de cuerdas. Se acumula una cantidad notable de lazos, que no desaparecen fácilmente. Los lazos en cuestión se agitan por doquier, aunque, casi estables, permanecen largo tiempo y se contraen con parsimonia. Pierden energía en forma de ondas gravitatorias. Según algunos modelos de la inflación derivados de la teoría de cuerdas, la intensidad de las ondas gravitatorias las pondría al alcance de LISA.

Los episodios de tipo cuerda más interesantes en que intervienen estos lazos son las ocasiones, bastante raras, en que un lazo, inusualmente cercano, emite ondas gravitatorias en nuestra dirección en una especie de latigazo o formación de una cúspide catastrófica. El movimiento de la cuerda, por un instante, en un lugar, se aproxima formalmente a la velocidad de la luz; cuando este momento se acerca, se emiten y se amplifican ondas gravitatorias. Si se detectasen tales pulsos, tendríamos una abundante fuente de datos y una ventana inédita a la teoría de cuerdas actuante en el mundo real.

Cabe, asimismo, que podamos ver directamente ondas gravitatorias del universo primitivo, del final de la inflación quizás, cuando los campos que dirigían la gran explosión convirtieron su energía en luz, materia y antimateria, o de una posterior transición de fase, cuando la luz y la materia produjeron el exceso de la materia sobre la antimateria, origen de nuestros átomos. Las ondas gravitatorias son tan penetrantes, que nos alcanzan desde cualquier momento de la historia del universo, desde el mismo comienzo de la gran explosión.

Picómetros en gigámetros

¿Cuándo volará LISA? Su construcción entraña notables dificultades, que habrá de superar un equipo de científicos e ingenieros de los Estados Unidos y Europa.

La idea básica es simple. Unos cubos de oro y platino flotan libremente

dentro de tres naves espaciales, uno en cada nave, sin tocar nada. Están protegidos de todas las fuerzas, excepto de la gravedad; la nave detecta con delicada precisión su posición y maniobra con minúsculos impulsores para que sus paredes no acaben topándose con los cubos. La luz de un láser se refleja en los cubos y se expide a los demás ingenios de LISA, a cinco millones de kilómetros, y se observa con telescopios. Así se miden los cambios de distancia sutiles entre los cubos causados por las ondas gravitatorias. Los cambios medidos en las distancias vienen del estiramiento relativo del espacio-tiempo, unos 0,05 picómetros, 10^{-23} veces menor que la distancia entre los cubos. Esa distancia es mucho menor que un átomo; casi el diámetro de un núcleo atómico.

Parece increíble que se piense construir un instrumento que medirá distancias mucho mayores que la distancia a la Luna con una precisión de menos del tamaño de un átomo. Entre los innumerables problemas técnicos, no debe olvidarse la creación de un entorno para los cubos que esté libre de todas las fuerzas, salvo las gravitatorias. La nave espacial que rodea la masa debe detectar la posición del cubo, sin perturbarla, y seguirlo a medida que la van alterando las oscilaciones del espacio-tiempo. Los acelerómetros más sensibles que existen —las balanzas de torsión, aplicadas también a la búsqueda de minúsculas fuerzas de las dimensiones extra y de nuevas formas de la gravedad— contribuyen a minimizar las fuerzas.

Una de las razones de que LISA vaya al espacio es el ruido gravitatorio en la Tierra. A fin de comprobar que sus dispositivos ofrecen la exquisita precisión requerida, en particular tras los rigores del lanzamiento, debemos enviar máquinas al espacio. Dentro de unos años se lanzará el satélite "LISA Pathfinder" para poner a prueba las técnicas más sensibles de LISA, que no pueden someterse a ensayo en el dominio terrestre. Se tratará de un solo satélite; no podrá, pues, detectar ondas gravitatorias, pero las masas y los sensores de prueba de a bordo, y los minúsculos impulsores del orden del micronewton, gracias a los que maniobrará muy suavemente, ten-

drán igual diseño que los de LISA. Se han fabricado ya prototipos de esos sistemas. Hasta donde sabemos, no hay ningún obstáculo técnico fundamental que impida construir LISA.

Faltan años para el lanzamiento real de LISA. En su empeño, largo y complejo, deberán comprometerse científicos, ingenieros e instituciones de ambos lados del Atlántico, sin olvidar su financiación. Costará en torno a los mil millones de euros. Mas hay precedentes; ese presupuesto se queda pequeño comparado con el "Gran Colisionador de Hadrones" del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN), o con el del telescopio espacial Hubble. No es habitual que el primer paso en un área tan nueva se lleve tanta inversión, pero no es menos insólito dar con un proyecto científico para sondear el universo de una manera radicalmente innovadora.

El autor

Craig J. Hogan es profesor de física y astronomía de la Universidad de Washington en Seattle. Fue codescubridor de la aceleración cósmica causada por la energía oscura. Lleva estudiando las fuentes de las ondas gravitatorias desde hace más de 20 años. Forma parte del equipo científico internacional de LISA. ©American Scientist Magazine.

Bibliografía complementaria

EINSTEIN'S UNFINISHED SYMPHONY: LISTENING TO THE SOUNDS OF SPACE-TIME. M. Bartusik. National Academies Press; Washington, D.C., 2000.

AN OVERVIEW OF GRAVITATIONAL-WAVE SOURCES. C. Cutler y K. S. Thorne en *Proceedings of GR16* (Durban, Sudáfrica, 2001), 2002.

LA DETECCIÓN DE LAS ONDAS GRAVITATORIAS. P. S. Shawhan en *Investigación y Ciencia*, n.º 349, págs. 76-84; octubre, 2005.

GRAVITATIONAL WAVES FROM LIGHT COSMIC STRINGS: BACKGROUNDS AND BURSTS WITH LARGE LOOPS. Craig J. Hogan en *Physical Review D*, vol. 74, pág. 043526; 2006.

Singularidades desnudas

Afín a un agujero negro es la inquietante singularidad desnuda. Los físicos habían creído —confiado más bien— en que tal tipo de singularidad no podía existir. Ya no están tan seguros

PANKAJ S. JOSHI

CONCEPTOS BASICOS

■ Se suele creer que el colapso de una estrella de masa muy grande acaba por convertirla en un agujero negro, pero algunos modelos teóricos predicen que pueden transformarse también en una singularidad desnuda. Es uno de los problemas no resueltos de la astrofísica.

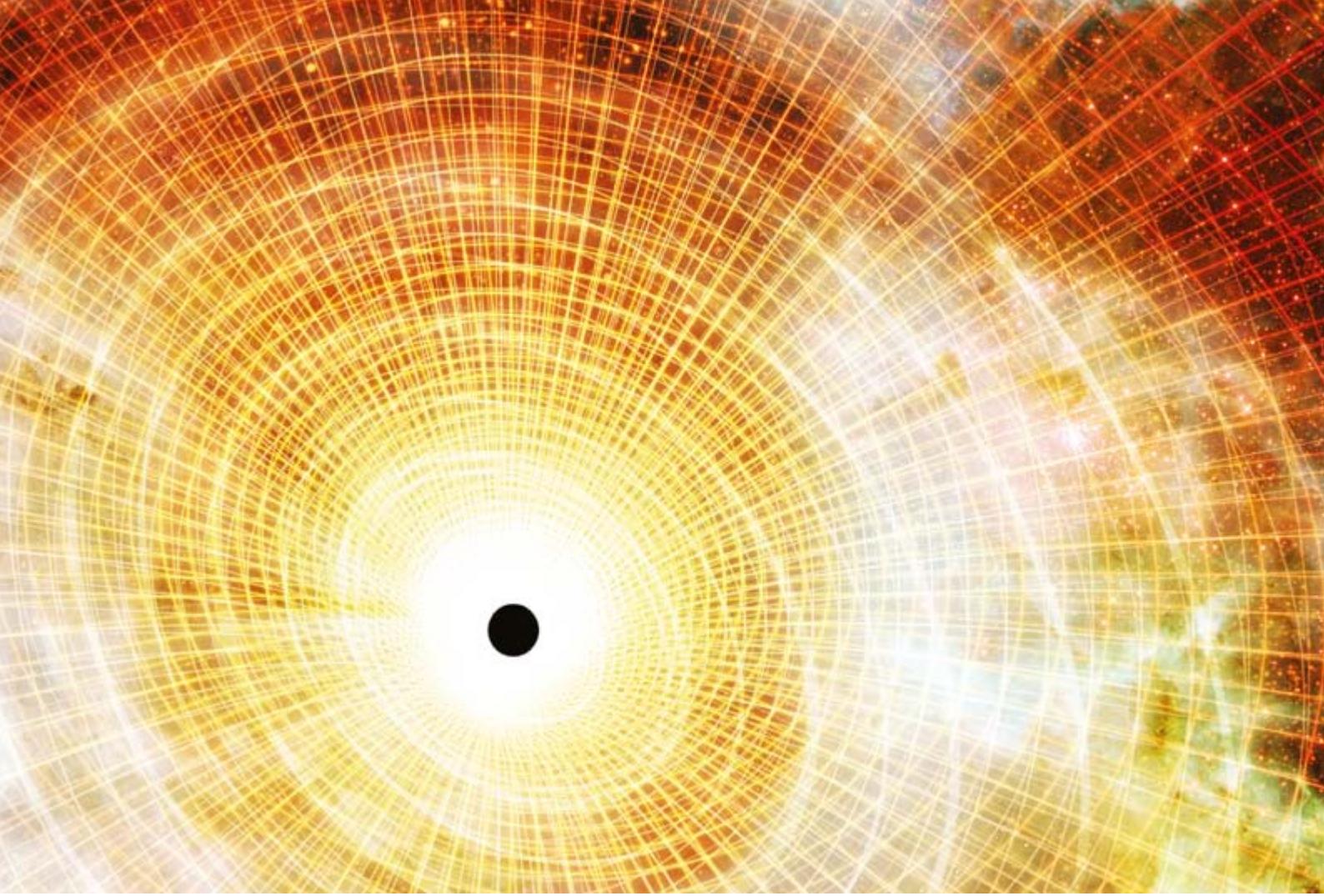
■ El descubrimiento de las singularidades desnudas cambiaría los derroteros de la teoría unificada de la física, entre otras cosas porque ofrecería una manera de contrastarla mediante observaciones.

La ciencia moderna ha dado al mundo un gran número de ideas curiosas, pero pocas como el final que les depara a las estrellas de mayor masa. Cuando han agotado el combustible que las mantiene durante millones de años, no aguantan su propio peso; se desploman catastróficamente sobre sí mismas. Las estrellas modestas, el Sol entre ellas, aunque se hunden también, se estabilizan llegadas a algún punto de su empequeñecimiento. En una estrella con masa suficiente, la gravedad superará a todas las fuerzas que podrían frenar semejante desplome (“colapso”). El astro se encogerá tanto, que de tener un diámetro de millones de kilómetros pasará a no ser ni el punto de una i.

Físicos y astrónomos piensan que así se crea un agujero negro, una región de espacio de gravedad tan intensa, que nada que entre en

ella podrá salir. En las entrañas de esa región hay una singularidad, el punto infinitesimal donde se concentra la masa de la estrella. El perímetro de la región recibe el nombre de horizonte de sucesos. Lo que atraviese el horizonte de sucesos no saldrá nunca, y la luz que emita también quedará atrapada: un observador externo no volverá a verlo jamás. Y todo objeto que traspase el horizonte acaba inevitablemente en la singularidad.

Pero, ¿sucede realmente así? Las leyes conocidas de la física son claras en cuanto a la formación de la singularidad y algo confusas en cuanto al horizonte de sucesos. La mayoría de los físicos trabaja con la hipótesis de que hay horizonte de sucesos porque les vale de tapadera científica. No se sabe qué pasa en la singularidad: la materia se aplasta, ¿y después? El horizonte de sucesos esconde la singularidad



y aísla esa laguna en nuestro conocimiento; ya podrían ocurrir en la singularidad procesos de todo tipo, desconocidos para la ciencia, que no afectarían lo más mínimo al mundo exterior. Los astrónomos que estudian las órbitas de los planetas y las estrellas pueden ignorar la incertidumbre relativa a las singularidades y aplicar confiadamente las leyes ordinarias de la física. Pase lo que pase en un agujero negro, de allí no saldrá.

Sin embargo, un creciente grupo de investigadores cuestiona esta hipótesis de trabajo. Se ha descubierto una amplia diversidad de formas de colapso estelar en los que no aparecería un horizonte de sucesos y la singularidad quedaría a la vista, "desnuda". Materia y radiación podrían entrar y salir. La visita a una singularidad dentro de un agujero negro es un viaje sólo de ida; por el contrario, cabría acercarse tanto como se quisiese, al menos en principio, a una singularidad desnuda y regresar para contarla.

Si las singularidades desnudas existieran de verdad, las implicaciones serían enormes; repercutirían en cada uno de los aspectos de la astrofísica y de la física fundamental. La inexistencia de un horizonte de sucesos significaría que los misteriosos procesos que operasen en la vecindad de las singularidades influirían

en el mundo exterior. Las singularidades desnudas explicarían los fenómenos de altas energías observados por los astrónomos y ofrecerían un laboratorio donde se exploraría la naturaleza del espaciotiempo a escalas muy finas.

Censor cósmico

Se pensaba que los horizontes de sucesos eran la parte fácil de los agujeros negros. No cabe duda del carácter misterioso de las singularidades. Allí, la fuerza de la gravedad se hace infinita y no valen las leyes conocidas de la física. De acuerdo con las nociones vigentes sobre la gravedad, las que se encierran en la teoría de la relatividad general de Einstein, es inevitable que aparezcan singularidades cuando se desploma una estrella gigante. Pero la relatividad general no tiene en cuenta los efectos cuánticos, importantes para los objetos microscópicos, que quizás impidan que la fuerza de gravedad se haga de verdad infinita. Hoy se sigue luchando por desarrollar la teoría de la gravedad cuántica necesaria para explicar las singularidades.

En comparación, lo que le ocurre a la región del espaciotiempo alrededor de la singularidad parece más sencillo. Los horizontes de sucesos tienen tamaños de muchos kilómetros; son bastante mayores que la escala típica de los

¿VESTIDAS O DESNUDAS?

Los agujeros negros y las singularidades desnudas son dos resultados posibles del colapso de una estrella agonizante de masa muy grande. En los dos casos hay una singularidad, una concentración de materia tan densa, que se necesitan nuevas leyes físicas para describirla. Cualquier cosa que choque contra la singularidad es destruida.

En un agujero negro, la singularidad está "vestida"; es decir, rodeada por una frontera, el horizonte de sucesos, que la esconde. Nada que entre por esa superficie sale de nuevo.

Una singularidad desnuda carece de frontera. Es visible para los observadores externos, y los objetos que caen hacia la singularidad pueden en principio invertir su curso hasta justo antes del impacto.

fenómenos cuánticos. Suponiendo que no hay intervención de nuevas fuerzas de la naturaleza, los horizontes deberían estar gobernados sólo por la relatividad general, teoría basada en principios conocidos que ha superado noventa años de observaciones.

Dicho esto, hay que reconocer que la aplicación de la relatividad general al colapso estelar sigue siendo una tarea ardua. La resolución de las ecuaciones einsteinianas de la gravedad, notablemente complejas, exige la adopción de simplificaciones. J. Robert Oppenheimer y Hartland S. Snyder, por un lado, y B. Datt, por otro, dieron el primer paso a finales de los años treinta del siglo pasado. Para simplificar las ecuaciones, consideraron sólo estrellas de gas esféricas y de densidad homogénea, y despreciaron la presión gaseosa. Encontraron que, a medida que esta estrella ideal colapsa, la gravedad se intensifica en su superficie hasta tomar tal fuerza que atrapa toda luz y toda materia; es decir, aparece un horizonte de sucesos. La estrella se vuelve invisible para los observadores externos; poco después, colapsa y se convierte en una singularidad.

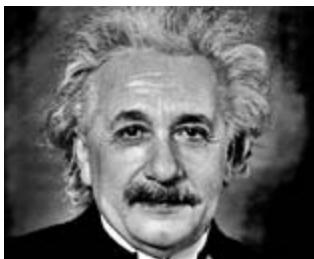
Las estrellas reales son bastante más complejas. Su densidad es inhomogénea, el gas ejerce presión y adoptan formas diferentes. ¿Se convierte en agujero negro toda estrella de masa suficiente? En 1969, Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, propuso que se aceptase una respuesta afirmativa. Conjeturó que la formación de una singularidad durante el colapso estelar traía consigo necesariamente la formación de un horizonte de sucesos. La naturaleza nos priva de ver una singularidad; el horizonte de sucesos la oculta para siempre. La conjetura de Penrose ha recibido el nombre de hipótesis de la censura cósmica. Se trata sólo de una conjetura, pero en ella se basa hoy el estudio de los agujeros negros. Se tenía la esperanza de poder demostrarla con el mismo rigor matemático con que se probó que las singularidades son inevitables.

Las singularidades al natural

Pero no ha habido tal prueba. En vez de obtener una demostración directa de la censura que se aplique a todas las situaciones, hemos tenido que embarcarnos en una ruta más larga: analizar uno a uno diferentes casos de colapso gravitatorio e ir enriqueciendo poco a poco los modelos teóricos con ingredientes que faltaban en análisis anteriores. En 1973, Hans Jürgen Seifert y sus colaboradores incluyeron la inhomogeneidad. Curiosamente, encontraron que las capas de la materia que colapsa podían intersecarse. Se creaban entonces singularidades momentáneas que no estaban rodeadas de horizontes. Las había de varios tipos, todas

LOS PADRES

El debate actual sobre si puede haber singularidades desnudas es parte de una historia más larga, la de la teoría de los agujeros negros.



La teoría de la relatividad general predice los agujeros negros, pero Einstein dudaba que pudieran formarse realmente.



J. Robert Oppenheimer (más tarde director del Proyecto Manhattan) y otros probaron que sí podían formarse.



Stephen Hawking y Roger Penrose (abajo) demostraron que las singularidades son inevitables.



Penrose conjeturó que las singularidades quedan ocultas por horizontes de sucesos. No todos están de acuerdo con este principio.

un tanto benignas. Aunque la densidad en un punto concreto se hacía infinita, no así la fuerza de la gravedad: la singularidad no concentraba el astro en una punta de alfiler infinitesimal, ni a los objetos entrantes. Por tanto, la relatividad general conservaba su validez y la materia seguía atravesando esos puntos sin encontrar por ello su final.

En 1979, Douglas M. Eardley, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y Larry Smarr de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, dieron un paso más. Realizaron una simulación numérica de una estrella con un perfil de densidad realista: máxima en el centro y disminuyendo hacia la superficie. Un tratamiento exacto de la misma situación fue llevado a cabo con lápiz y papel en 1984 por Demetrios Christodoulou, del Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zúrich. Ambos métodos deducían que la estrella se encogía hasta un tamaño nulo y aparecía una singularidad desnuda. Pero este modelo aún despreciaba la presión del gas y Richard P. A. C. Newman, entonces en la Universidad de York, probó que su singularidad también era gravitatoriamente débil.

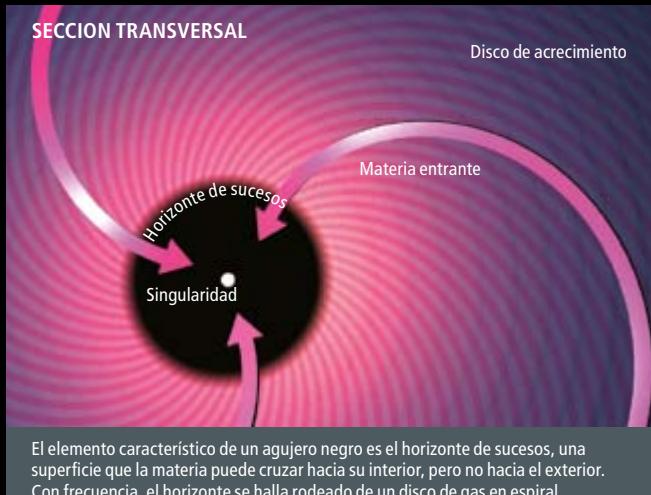
Inspirados por estos descubrimientos, muchos investigadores, yo entre ellos, intentamos demostrar un teorema que estableciese que las singularidades desnudas son siempre débiles. No tuvimos éxito. El motivo quedó claro pronto: las singularidades desnudas no siempre son débiles. Hallamos circunstancias en las que el colapso inhomogéneo conduce a singularidades con gravedad intensa —esto es, singularidades genuinas, capaces de triturar la materia hasta sacarla de las leyes ordinarias de la física— que permanecen visibles para los observadores externos. Un análisis general del colapso estelar sin presión gaseosa, desarrollado en 1993 por Indresh Dwivedi, entonces en la Universidad de Agra, y por mí, aclaró y asentó estos puntos.

A principios de los años noventa se tuvieron en cuenta los efectos de la presión del gas. Amos Ori, del Instituto Technion de Tecnología de Israel, y Tsvi Piran, de la Universidad Hebreo de Jerusalén, realizaron simulaciones numéricas. Mi grupo resolvió con exactitud las ecuaciones importantes. El colapso de estrellas con una relación perfectamente realista entre la densidad y la presión podía engendrar singularidades desnudas. Casi al mismo tiempo, los equipos dirigidos por Giulio Magli, de la Universidad Politécnica de Milán, y Kenichi Nakao, de la Universidad Metropolitana de Osaka, estudiaron una forma de presión generada por la rotación de las partículas dentro de una estrella que colapsa. También ellos vieron que, en una gran variedad de circunstancias, el desplome da paso a una singularidad desnuda.

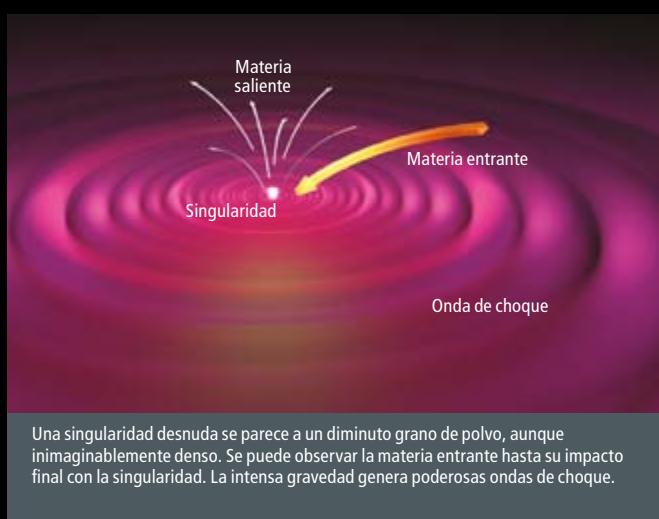
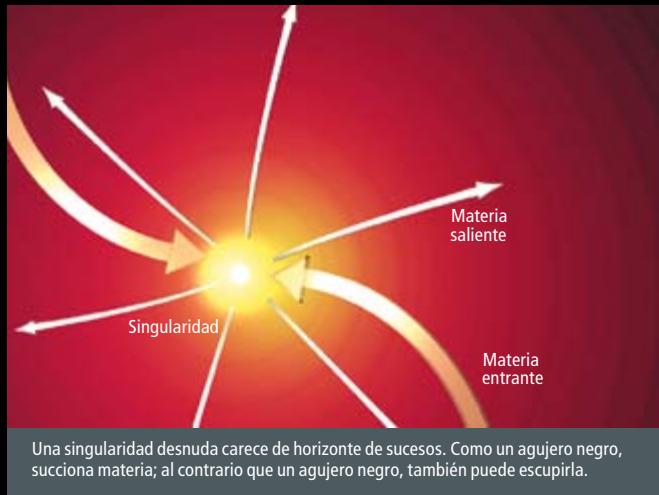
Dos monstruos cósmicos

Una singularidad desnuda viene a ser un agujero negro sin la parte a la que éste debe su adjetivo. Puede tanto succionar como escupir materia y radiación. Desde fuera tendría un aspecto y unos efectos en los aledaños diferentes de los característicos de un agujero negro.

AGUJERO NEGRO



SINGULARIDAD DESNUDA



Dos formas de condensar una estrella

Las simulaciones por ordenador revelan las circunstancias en las que el colapso convierte a una estrella en un agujero negro o en una singularidad desnuda. Las simulaciones mostradas aquí representan la

estrella mediante un enjambre de granos cuya gravedad es tan potente, que otras fuerzas de la naturaleza, como la presión del gas, pierden importancia.

AGUJERO NEGRO



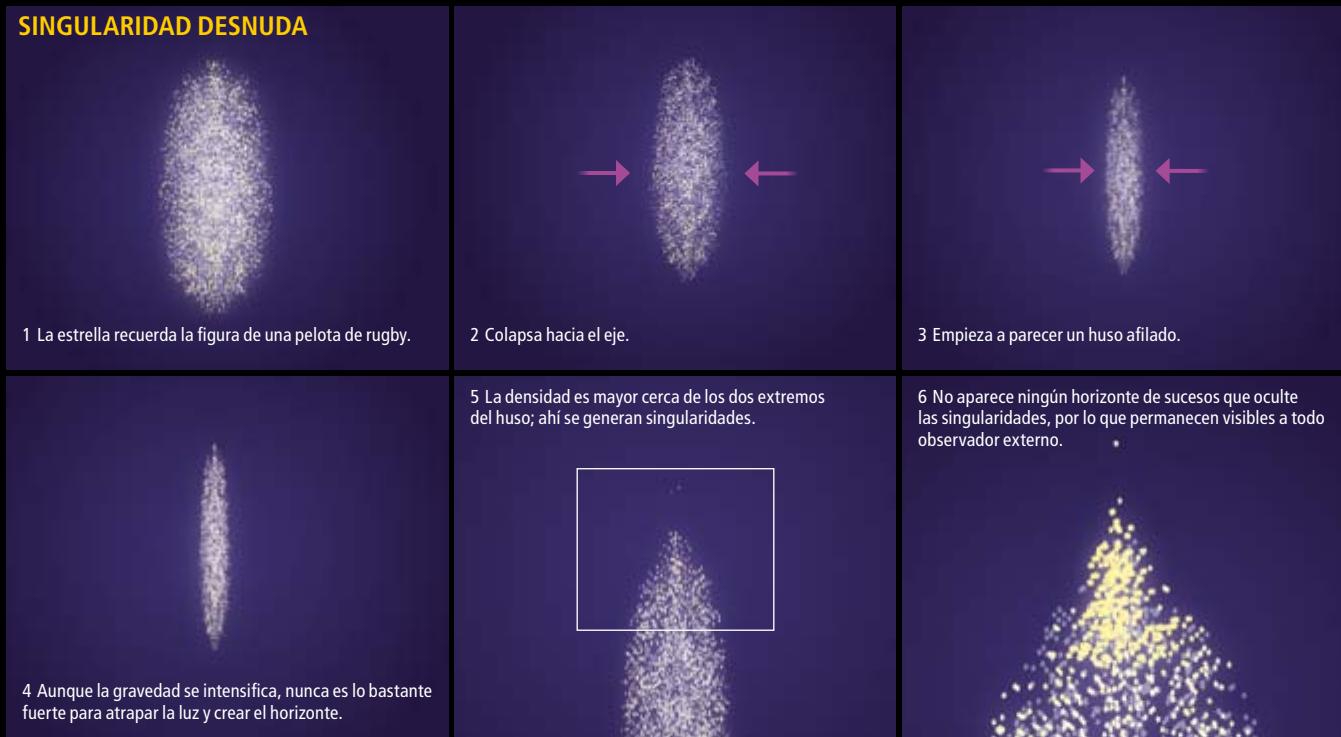
Las investigaciones reseñadas analizaban estrellas perfectamente esféricas, lo que no constituía una limitación tan grande como parece, puesto que la naturaleza de la mayoría de las estrellas se aproxima bastante a dicha forma. Es más, las estrellas esféricas reúnen condiciones más favorables para la creación del horizonte que las estrellas de otras formas; si la censura cósmica falla hasta con las estrellas esféricas, difícil parece que se imponga en las que no lo son. De todos modos, se ha explorado el colapso no esférico. En 1991, Stuart L. Shapiro, de la Universidad de Illinois, y Saul A. Teukolsky, de la Universidad de Cornell, presentaron simulaciones numéricas en las que el colapso de estrellas oblongas podían crear una singularidad desnuda. Pocos años más tarde, Andrzej Królik, de la Academia Polaca de Ciencias, y yo investigamos el colapso no esférico y también encontramos singularidades desnudas. Ambos estudios despreciaban la presión gaseosa.

Los escépticos se han preguntado si tales situaciones no serán artificiosas. ¿No podría un pequeño cambio en la configuración inicial de la estrella llevar a la brusca aparición de un horizonte de sucesos que tape la singularidad? En tal caso, la singularidad desnuda sólo sería un artefacto de las aproximaciones empleadas en los cálculos. No existiría en la naturaleza. Algunas situaciones, con formas inusuales de materia, son, en efecto, muy sensibles. Hasta

ahora, nuestros resultados prueban, sin embargo, la estabilidad de la mayoría de las singularidades desnudas frente a pequeñas variaciones de las condiciones iniciales. Por tanto, estas situaciones parecen ser, como dicen los físicos, genéricas; es decir, no son artificiosas.

Cómo combatir al censor

Estos contraejemplos de la conjectura de Penrose sugieren que la censura cósmica no es la regla general. No se puede aseverar que “el colapso de toda estrella masiva sólo crea un agujero negro” o que “cualquier colapso físicamente real termina en agujero negro”. Algunas situaciones conducen a un agujero negro y otras a una singularidad desnuda. En algunos modelos, la visibilidad de las singularidades se mantiene sólo por un tiempo; al final aparecen horizontes de sucesos que las ocultan. Otros modelos predicen que las singularidades permanecen visibles para siempre. La singularidad desnuda suele aparecer en el centro geométrico del colapso, pero no siempre, y aun cuando aparezca en el centro, puede extenderse hacia otras regiones. La desnudez tiene también grados: el horizonte de sucesos puede ocultarles la singularidad a los observadores lejanos y dejar que los que atraviesen el horizonte vean la singularidad hasta el momento en que caen en ella. La variedad de los resultados es desconcertante.



Mis colaboradores y yo hemos identificado varias propiedades que una situación ha de tener para que en ella aparezca un horizonte de sucesos. En concreto, hemos evaluado el papel de las inhomogeneidades y de la presión del gas. De acuerdo con la teoría de la gravedad de Einstein, la gravedad es un complejo fenómeno en el que no sólo intervienen las fuerzas de atracción, sino otros efectos, como la cizalladura, en la que distintas capas de materia se desplazan lateralmente en direcciones opuestas. Si la densidad de una estrella que colapsa es muy alta —tanto, que, en principio, debería atrapar la luz— pero inhomogénea, esos otros efectos de la gravedad abrirán rutas de escape. La cizalladura de la materia próxima a la singularidad, por ejemplo, crearía poderosas ondas de choque que expulsarían masa y luz. Tamaño tifón gravitatorio trastocaría la formación del horizonte de sucesos.

Para concretar, consideremos una estrella homogénea y despreciamos la presión gaseosa. (La presión altera los detalles, pero no las líneas generales de lo que sucede.) Cuando la estrella colapsa, la fuerza de la gravedad, que aumenta, dobla cada vez más las trayectorias de los objetos en movimiento. También los rayos de luz se doblan. Llega un momento en el que la atracción es tan intensa, que la luz no puede alejarse de la estrella. La región donde la luz queda atrapada es pequeña al principio,

OBSERVACION DE SINGULARIDADES DESNUDAS

Las singularidades desnudas revelarían su presencia de diversas formas:

- Las explosiones de alta energía que producirían se abrillantarían y decaerían de una forma característica.
- Hay ciertos tipos de explosiones de rayos gamma que no tienen explicación; las singularidades desnudas podrían darles una.
- Las singularidades desnudas doblarían los rayos de luz de las estrellas del fondo del cielo de una manera diferente a los agujeros negros.
- Si un agujero negro rotase a una velocidad mayor que cierto valor límite, dependiente de la masa, tendría que tratarse de una singularidad desnuda. El radiotelescopio *Square Kilometer Array*, aún no construido, contará con la precisión necesaria para investigar esta posibilidad.

pero crece y con el tiempo alcanza un tamaño estable proporcional a la masa de la estrella. Mientras tanto, puesto que la densidad de la estrella es uniforme en el espacio y sólo varía con el tiempo, la estrella se concentra, toda ella a la vez, en un punto. La luz ya estaba atrapada mucho antes: la singularidad queda escondida.

Ahora consideremos la misma situación, con la única diferencia de que la densidad disminuya cuando la distancia al centro aumente. La estrella en cuestión presenta una estructura de cebolla, con capas concéntricas de materiales. La fuerza de la gravedad que actúa sobre cada capa depende de la densidad promedio de la propia capa. Puesto que las capas interiores, más densas, sufren un mayor empuje gravitatorio, se desploman más deprisa que las exteriores. No toda la estrella cae en una singularidad al mismo tiempo. Las capas más interiores colapsan primero; después se van apilando las capas exteriores.

Este retraso puede postergar la formación del horizonte de sucesos. Si el horizonte se formara en algún lugar, lo haría en las capas interiores más densas. Pero si la densidad disminuye bruscamente con la distancia, esas capas internas no tendrán masa suficiente para atrapar la luz. La singularidad, una vez formada, estará al descubierto. Por tanto, existe un umbral: si el grado de inhomogeneidad

El autor

Pankaj S. Joshi es profesor de física del Instituto Tata de Investigación Fundamental de Mumbai (antes Bombay). Se ha especializado en gravitación y cosmología.

es muy pequeño, inferior a determinado valor crítico, se generará un agujero negro; con la suficiente inhomogeneidad, aparecerá una singularidad desnuda.

En otros modelos la propiedad relevante corresponde a la velocidad del colapso. Este efecto es muy claro en los modelos donde todo el gas estelar se ha convertido en radiación; se dice de una estrella así que es una "bola de fuego". El primero en analizar tal situación fue P. C. Vaidya, en los años 40 del siglo pasado; se proponía construir modelos de una estrella radiante. De nuevo, existe un umbral: las bolas de fuego de colapso lento se convierten en agujeros negros, pero si colapsan con rapidez suficiente, no se atrapará la luz y la singularidad quedará desnuda.

Sembradora de incertidumbre

Se ha tardado tanto en aceptar las singularidades desnudas por culpa de la cantidad de problemas conceptuales que crean. El motivo de inquietud más común es la incertidumbre que estas singularidades imprimirían en la naturaleza. La relatividad general se invalida en las singularidades y no es capaz de predecir qué efecto tendrían. Como escribió John Earman, de la Universidad de Pittsburgh, de ellas podrían salir lo mismo babas verdes que calcetines perdidos. Lugares mágicos, adonde la ciencia no llega.

Mientras las singularidades permanezcan escudadas por los horizontes de sucesos, la aleatoriedad estará contenida y la relatividad general será una teoría predictiva, al menos fuera del horizonte. Pero si las singularidades estuvieran al descubierto, su comportamiento impredecible podría infectar al resto del uni-

verso. Cuando se usase la relatividad general para calcular la órbita de la Tierra alrededor del Sol, digamos, habría que tener en cuenta la posibilidad de que una singularidad emitiese desde cualquier parte del universo un pulso gravitatorio aleatorio y capaz de arrastrar nuestro planeta hasta las profundidades del espacio.

Sin embargo, esta preocupación está fuera de lugar. Lo impredecible es habitual en la relatividad general, y no siempre en lo relacionado con la violación de la censura. La teoría permite el viaje en el tiempo, que crearía bucles con resultados imprevistos. Hasta los agujeros negros resultan impredecibles: si dejásemos caer una carga eléctrica en un agujero negro no cargado, la forma del espaciotiempo alrededor del agujero cambiaría radicalmente y dejaría de ser predecible. O si el agujero negro rota, el espaciotiempo ya no se separará claramente en espacio y tiempo; por consiguiente no se podrá saber cómo evolucionará el agujero negro a partir de un momento dado. Sólo el más puro de los agujeros negros puros, sin carga o rotación alguna, es completamente predecible.

La pérdida de predecibilidad y otros problemas de los agujeros negros nacen de la existencia de las singularidades, se hallen o no escondidas. La solución de estos problemas residirá probablemente en la teoría cuántica de la gravedad, que iría más allá de la relatividad general y ofrecería una explicación completa de las singularidades. En esa teoría, todas las singularidades tendrían una densidad muy alta, aunque finita. Una singularidad desnuda sería una "estrella cuántica", un cuerpo hiperdenso gobernado por las leyes de la gravedad cuántica. Lo que parece aleatorio podría tener una explicación lógica.

Otra posibilidad es que las singularidades presenten de verdad una densidad infinita. La gravedad cuántica no las explicaría: habría que aceptarlas como fuesen. La invalidez de la relatividad general en estos puntos no sería un fallo de la teoría, sino una prueba de que el espacio y el tiempo tienen un límite. La singularidad marcaría el final del mundo físico. Deberíamos considerarla más un suceso que un objeto: el momento en que la materia que colapsa alcanza el final y deja de existir. Como la gran explosión del universo, pero al revés.

En tal caso, preguntarse por lo que diminaría de una singularidad desnuda carecería de sentido. No habría nada de donde algo pudiese venir: la singularidad es sólo un momento en el tiempo. Desde la distancia no veríamos la singularidad en sí misma, sino los procesos que ocurrirían por las condiciones extremas de la materia cercana al evento; así, ondas de choque causadas por las inhomogeneidades

¿Se puede romper un agujero negro?

Además del colapso de una estrella, hay otra forma de crear una singularidad desnuda: la destrucción de un agujero negro ya existente. Aunque suene a tarea imposible, y peligrosa, las ecuaciones de la relatividad general dicen que el horizonte de sucesos existe sólo si el agujero no rota demasiado deprisa, ni una carga eléctrica desmesurada. La mayoría de los físicos piensan que los agujeros se resistirían a acelerarse o a cargarse más allá de los límites prescritos. Pero algunos creen que los agujeros acabarían por sucumbir, el horizonte se disiparía y la singularidad quedaría expuesta. Acelerar un agujero negro no es muy difícil. La materia cae en él de manera natural con un

cierto momento angular que hará que el agujero rote cada vez más rápido, como al empujar una puerta giratoria. Aumentar la carga de un agujero negro es mucho más complicado: un agujero cargado repele las partículas de su misma carga y atrae las de carga contraria, hasta neutralizarse. Pero la entrada de grandes cantidades de materia podría contrarrestar dicha tendencia. La propiedad fundamental de un agujero negro —su capacidad de engullir la materia de sus alrededores para crecer— podría convertirse en la causa de su propia destrucción. Se sigue debatiendo si el agujero negro se salvaría o se desgarraría dejando al descubierto la singularidad de su interior.

de ese medio ultradenso o efectos gravitatorios cuánticos en las inmediaciones.

Además de la impredecibilidad, hay un segundo motivo de inquietud. Tras aceptar provisionalmente la conjetura de la censura, los físicos se han pasado cuarenta años formulando leyes que los agujeros negros deben obedecer. Esas leyes suenan a verdades profundas. No están, sin embargo, exentas de paradojas. Sostienen, por ejemplo, que los agujeros negros absorben y destruyen la información, lo que contradice los principios básicos de la teoría cuántica [véase “Los agujeros negros y la paradoja de la información”, por Leonard Susskind; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1997]. Esta paradoja y otras inconveniencias derivan de la presencia de un horizonte de sucesos. Sin el horizonte, quizás esos problemas desaparecerían. Si la estrella radiara la mayor parte de su masa en los últimos estadios del colapso, no se destruiría ninguna información y no dejaría tras de sí ninguna singularidad. En tal caso, no se necesitaría la teoría cuántica de la gravedad para explicar las singularidades; bastaría la relatividad general.

Un laboratorio de gravedad cuántica

Más que considerar a las singularidades desnudas un problema, cabría ver en ellas un activo. Si las singularidades formadas por el colapso gravitatorio de una estrella masiva fueren visibles para los observadores externos, podrían servir de laboratorio para estudiar los efectos gravitatorios cuánticos. Las teorías de la gravedad cuántica, al igual que la teoría de cuerdas y la gravedad cuántica de bucles, están muy necesitadas de observaciones de cualquier tipo, sin las cuales resulta imposible restringir las muchas oportunidades que se ofrecen. Se tiende a buscar las observaciones en el universo temprano, cuando las condiciones eran tan extremas, que los efectos gravitatorios cuánticos dominaban. Pero la gran explosión fue un suceso único. Si las singularidades existieran al descubierto, se observaría algo equivalente a la gran explosión cada vez que la vida de una estrella masiva llegara a su fin.

Para saber si las singularidades desnudas nos dejarían ver fenómenos que de otra forma resultarían inobservables, hemos simulado recientemente un colapso de estrella generador de una singularidad desnuda, incluyendo en la simulación los efectos predichos por la gravedad cuántica de bucles. De acuerdo con esa teoría, el espacio se compone de pequeños átomos que se dejan sentir, cuando la materia es muy densa, por medio de una fuerza repulsiva tan poderosa, que impide que la densidad alcance un valor infinito [véase “El rebote del universo”, por Martin Bojowald; IN-

Las variedades del colapso estelar

Como los seres humanos, las estrellas tienen un ciclo vital. Nacen en nubes gigantescas de polvo y material galáctico en las profundidades del espacio, evolucionan y brillan durante millones de años, para, andando el tiempo, entrar en una fase de disolución y extinción. Las estrellas brillan porque queman su combustible nuclear, al principio sobre todo hidrógeno, al que convierten en helio y después en elementos más pesados. Mantienen un equilibrio entre la fuerza de la gravedad, que empuja la materia hacia el centro, y la presión hacia fuera ejercida por la fusión nuclear. Este equilibrio mantiene estable la estrella, hasta que todo el combustible se ha convertido en hierro, que es, en lo que se refiere a la generación nuclear de energía, inerte. Entonces termina la fusión, la omnipresente fuerza de la gravedad toma lasbridas y la estrella se contrae.

Cuando agote su combustible el Sol, el núcleo se le contraerá bajo su propia gravedad hasta un tamaño no mayor que el de la Tierra. Llegado ese punto, lo sostendrá la fuerza ejercida por los electrones en movimiento rápido, que ejercen un tipo de presión llamado “de degeneración electrónica”. El objeto resultante será una enana blanca. Las estrellas con una masa entre tres y cinco veces la solar llegan a un estado final distinto, una estrella de neutrones, donde la gravedad es tan intensa, que hasta los átomos ceden. Las estrellas de neutrones, soportadas, no por la presión de los electrones, sino de los neutrones, apenas si miden 10 kilómetros.

Las estrellas de masa aún mayor no terminan ni en una enana blanca, ni en una estrella de neutrones porque ambas formas de presión son en tal caso insuficientes. Al menos que otras formas de presión por ahora desconocidas intervengan en el proceso, el colapso gravitatorio será imparable. La gravedad es la única fuerza operativa; el estado final de la estrella viene determinado por la teoría de la gravedad de Einstein, que predice que el resultado es una singularidad. La duda es si esta singularidad es visible o no.

VESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2008]. En nuestro modelo, esta fuerza repulsiva dispersa la estrella y disuelve la singularidad. Casi un cuarto de la masa estelar es expulsada en una fracción del microsegundo final. Un observador lejano vería justo antes una repentina caída de la intensidad de la radiación de la estrella que colapsa (un resultado directo de la gravedad cuántica).

Una explosión así liberaría rayos gamma de alta energía, rayos cósmicos y otras partículas, entre ellas neutrinos. Instrumentos futuros, como el Observatorio Espacial del Universo Extremo —un módulo de la Estación Espacial Internacional—, que debería empezar a funcionar en 2013, podrían tener la sensibilidad suficiente para detectar esa emisión. El detalle de los resultados dependería de las particularidades de las teorías de la gravedad cuántica: las observaciones distinguirían las diversas opciones.

La confirmación o la negación de la censura cósmica supondría una miniexplosión en la física, habida cuenta de que las singularidades desnudas inciden en muchos de los aspectos más profundos de las teorías actuales. Gracias a los trabajos teóricos sabemos ya, fuera de toda duda, que la validez de la hipótesis de la censura no es incondicional, pese a lo que a veces se cree. Las singularidades se visten si se dan las condiciones apropiadas. Aún ha de saberse si tales condiciones ocurren alguna vez en la naturaleza. Si la respuesta fuese afirmativa, los físicos llegarían a amar lo que una vez temieron.

Bibliografía complementaria

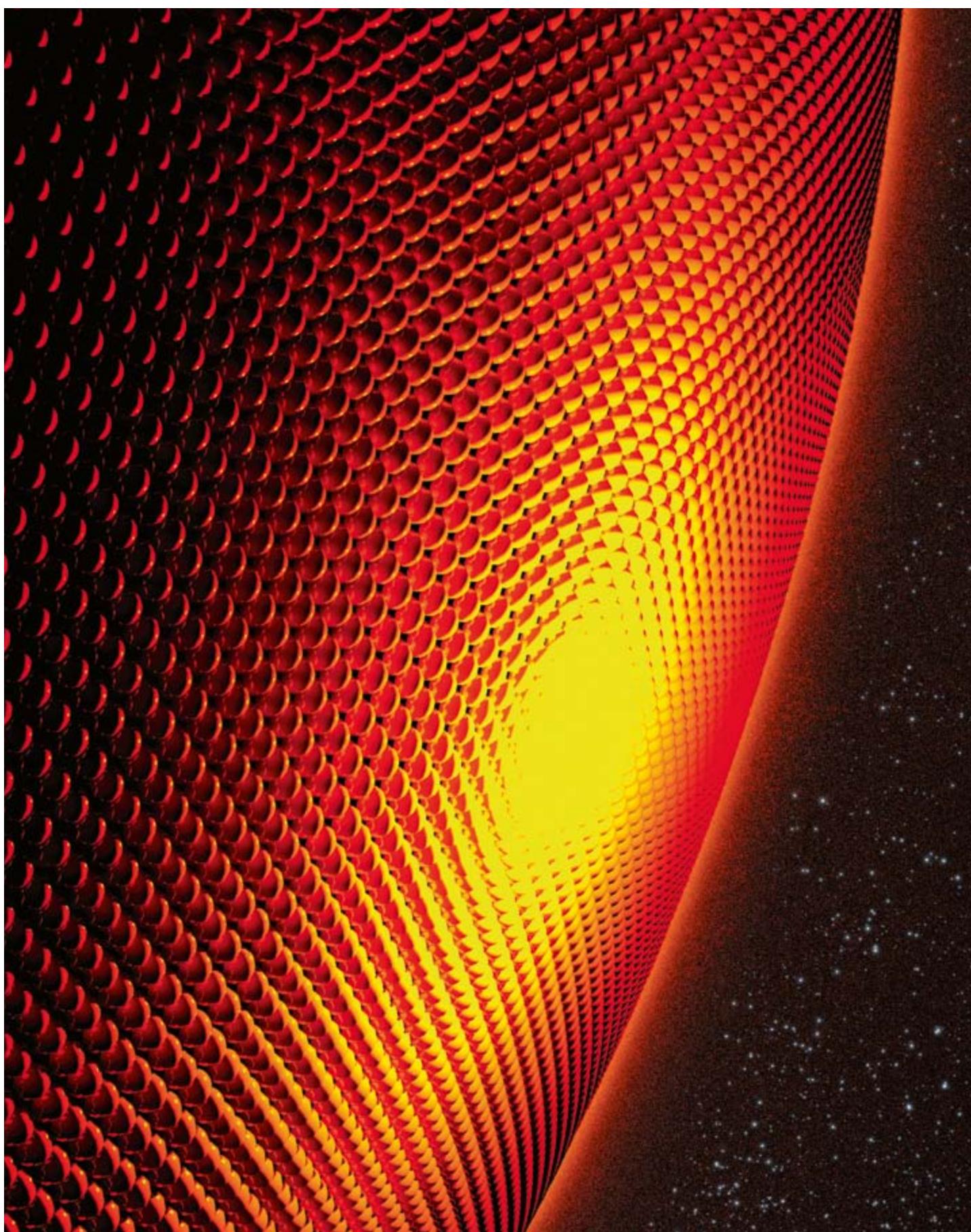
BLACK HOLES, NAKED SINGULARITIES AND COSMIC CENSORSHIP. Stuart L. Shapiro y Saul A. Teukolsky en *American Scientist*, vol. 79, n.º 4, págs. 330-343; julio/agosto, 1991.

BLACK HOLES AND TIME WARPS. Kip Thorne. W. W. Norton, 1994.

BANGS, CRUNCHES, WHIMPS, AND SHRIEKS: SINGULARITIES AND ACAUSALITIES IN RELATIVISTIC SPACETIMES. John Earman; Oxford University Press, 1995.

QUANTUM EVAPORATION OF A NAKED SINGULARITY. Rituparno Goswami, Pankaj S. Joshi y Parampreet Singh en *Physical Review Letters*, vol. 96, n.º 3, artículo 031302; 27 de enero, 2006.

GRAVITATIONAL COLLAPSE AND SPACE-TIME SINGULARITIES. Pankaj S. Joshi. Cambridge University Press, 2007.



AGUJEROS NEGROS Y MUROS DE FUEGO

¿Incineran los agujeros negros a quien intenta penetrar en ellos? Una nueva propuesta obliga a repensar la relatividad general y la mecánica cuántica asociada a estos objetos

Joseph Polchinski

CAER EN UN AGUJERO NEGRO NUNCA FUE DIVERTIDO. Tan pronto como los físicos dedujeron la existencia de estos objetos, se percataron de que acercarse demasiado a uno de ellos supondría una muerte segura. Sin embargo, hasta hace muy poco creímos que un astronauta no sentiría nada especial al cruzar el horizonte de sucesos, la frontera más allá de la cual resulta imposible regresar. Según la teoría de la relatividad general de Einstein, el horizonte no se encuentra marcado por ninguna señal particular. Las malas noticias solo llegan después: quienquiera que lo atraviese únicamente podrá caer, caer y caer hacia una profunda oscuridad.

Hace tres años, en colaboración con Donald Marolf y los entonces estudiantes de posgrado Ahmed Almheiri y James Sully, por aquella época todos en la Universidad de California en Santa Bárbara (hoy a los cuatro se nos conoce por las siglas AMPS), nos propusimos reconsiderar esa imagen

a la luz de algunas ideas recientes sobre las propiedades cuánticas de los agujeros negros. Al hacerlo, llegamos a la conclusión de que el astronauta viviría una experiencia muy distinta de la predicha por Einstein. En lugar de deslizarse suavemente hacia el interior, al llegar al horizonte se toparía con un «muro de fuego» (*firewall*): partículas de alta energía que lo aniquilarían al instante. Ese muro podría incluso señalar el fin del espacio.

Llegamos a ese resultado al emplear ciertas ideas procedentes de la teoría de cuerdas para analizar con detalle una paradoja planteada hace casi cuarenta años por Stephen Hawking. En los años setenta, el físico de Cambridge identificó un profundo conflicto entre las predicciones de la relatividad general y las de la mecánica cuántica en presencia de estos objetos. Según él, o bien la teoría cuántica era errónea, o bien lo era la descripción einsteiniana del espaciotiempo. La batalla sobre qué punto de vista resulta correcto se ha perpetuado desde entonces.

Tal y como ocurrió con la idea de Hawking, nuestros muros de fuego han desatado una tormenta de incredulidad sin que nadie haya ofrecido una alternativa satisfactoria. Si aceptamos la mecánica cuántica, la consecuencia son los muros de fuego. Sin embargo, su existencia plantea nuevos rompecabezas teóricos. Parece que los físicos hemos de abandonar alguna de nuestras teorías más queridas, pero no podemos ponernos de acuerdo en cuál. Con todo, esperamos que de esta confusión emerja una imagen más completa de la mecánica cuántica y de la relatividad general y, en última instancia, una vía para resolver las aparentes contradicciones entre ellas.

LA SINGULARIDAD

La relatividad general, la teoría que dio a luz el concepto de agujero negro, deriva su imagen de estos objetos y sus horizontes de sucesos a partir de la manera en que concibe la acción de la gravedad sobre el espacio y el tiempo. Según ella, al juntar una cantidad suficiente de materia, la atracción gravitatoria hará que comience a colapsar sobre sí misma. Ese proceso continuará hasta que toda la masa haya quedado comprimida en un punto. Dicho punto, donde la densidad y la curvatura del espaciotiempo se tornan infinitas, recibe el nombre de singularidad. El objeto resultante es un agujero negro.

Un viajero que cruce el horizonte de sucesos de un agujero negro sucumbirá al tirón gravitatorio y será arrastrado sin remedio hacia la singularidad. Ni siquiera la luz puede escapar de la región interior. Pero, aunque la singularidad sea un lugar horrible, el horizonte no debería tener nada de particular. Según el principio de equivalencia de la relatividad general, un astronauta que lo traspase experimentará las mismas leyes físicas que cualquier otro observador. A los teóricos les gusta decir que todo el sistema solar podría estar cruzando ahora mismo un horizonte de sucesos sin que notásemos nada fuera de lo normal.

LA RADIACIÓN DE LOS AGUJEROS NEGROS

El desafío de Hawking comenzó en 1974, al considerar los efectos de la mecánica cuántica en presencia de un agujero negro. Según la teoría cuántica, el vacío se encuentra repleto de pares de partículas y antipartículas que constantemente aparecen y se desvanecen. Hawking demostró que, si esas fluctuaciones ocurren justo en el exterior de un horizonte de sucesos, la pareja puede separarse. Un miembro caería dentro y el otro escaparía. El resultado final es que un agujero negro radia partículas, las cuales van drenando poco a poco su masa. En principio, toda la masa del agujero negro puede acabar filtrándose hacia el exterior mediante este proceso, conocido como «evaporación de Hawking».

Para los agujeros negros del mundo real, la evaporación es irrelevante. Dado que constantemente engullen polvo y gas, ganan mucha más masa que la que pierden por radiación de Hawking. Sin embargo, por un interés puramente teórico, podemos preguntarnos qué sucedería si un agujero negro se encontrase completamente aislado y dispusiéramos de tiempo suficiente para observar su evaporación hasta el final. Merced a este expe-

Joseph Polchinski es catedrático de física de la Universidad de California en Santa Bárbara y miembro del Instituto Kavli de Física Teórica, de la misma universidad. Sus investigaciones se centran en la naturaleza de la dualidad y en la gravedad cuántica.



rimento mental, Hawking dedujo dos aparentes contradicciones entre la relatividad general y la mecánica cuántica.

El problema de la entropía. Al calcular qué le ocurría a un agujero negro aislado, Hawking obtuvo que el espectro de la radiación emitida coincidía con el de un cuerpo caliente. Ese resultado implicaba que los agujeros negros debían tener una temperatura. La temperatura de un objeto ordinario se debe al movimiento de sus átomos. Por tanto, la naturaleza térmica de la radiación de Hawking sugiere que un agujero negro debería estar formado por algún tipo de componentes microscópicos básicos, o «bits». Jacob D. Bekenstein, ahora en la Universidad Hebrea de Jerusalén, había llegado a la misma conclusión dos años antes al considerar experimentos mentales consistentes en lanzar objetos a un agujero negro. Los trabajos de Bekenstein y Hawking proporcionaban una fórmula para el número de bits, una medida conocida como entropía del agujero negro. En general, la entropía constituye un indicador de desorden: aumenta a medida que lo hace el número de estados microscópicos en los que puede encontrarse un sistema. Cuantos más componentes básicos tenga un agujero negro, más disposiciones podrán adoptar estos y mayor será su entropía.

En cambio, la relatividad general nos dice que la geometría de un agujero negro es suave, y que todos los agujeros negros con la misma masa, momento angular y carga eléctrica deberían ser exactamente iguales. El fallecido John Wheeler, de la Universidad de Princeton, lo expresó diciendo que «los agujeros negros no tienen pelo». He aquí la primera contradicción: mientras que la relatividad general afirma que los agujeros carecen de subestructura, la mecánica cuántica nos indica que poseen una gran cantidad de entropía, lo que implica una estructura microscópica, o «pelo».

La paradoja de la información. La evaporación de Hawking también pone en aprietos a la teoría cuántica. Según su cálculo, el espectro de radiación de un agujero negro es universal: las partículas emitidas no dependen en absoluto de qué objetos hayan caído antes en él. Si lanzamos una nota con un mensaje, no habría manera de reconstruir el texto a partir de las partículas radiadas. Una vez que la nota atraviese el horizonte, no podrá afectar a nada que más tarde emerja del agujero negro, ya que ninguna información puede escapar de su interior.

En mecánica cuántica, todo sistema queda descrito por una función de onda, la cual determina la probabilidad de encontrar

EN SÍNTESIS

En los años setenta, Stephen Hawking descubrió que los agujeros negros radian partículas, por lo que acabarían «evaporándose». Ello implicaba que destruirían la información, algo prohibido por la mecánica cuántica.

Algunas ideas procedentes de la teoría de cuerdas parecían apuntar a una resolución del problema. Según ellas, el proceso de evaporación de un agujero negro respetaría las leyes cuánticas y no eliminaría la información.

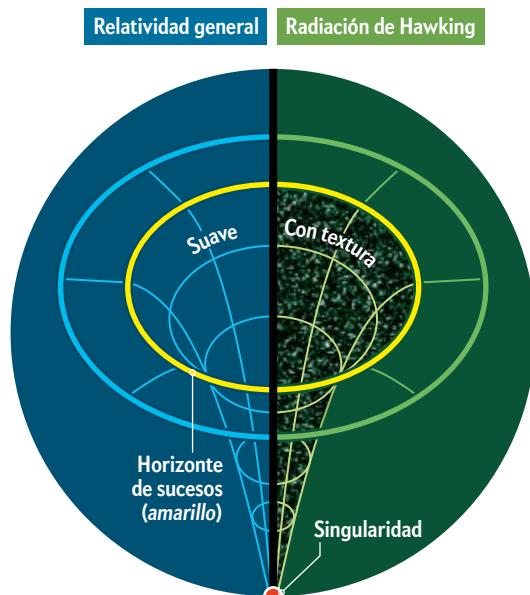
El autor y sus colaboradores han argumentado que, para preservar la información, un agujero negro debe estar rodeado por un «muro» de partículas de alta energía. La idea socava una de las predicciones básicas de la relatividad general.

Agujeros negros e información

En 1974, Stephen Hawking demostró que los agujeros negros emiten una pequeña cantidad de radiación. Según la mecánica cuántica, el vacío se encuentra lleno de pares de partículas y antipartículas que constantemente surgen y se desvanecen.

El problema de la entropía

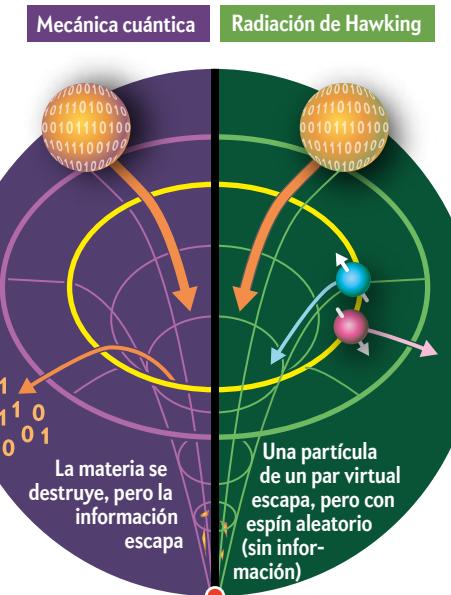
El espectro de la radiación de Hawking sugiere que los agujeros negros tienen asociada una temperatura. En un objeto común, la temperatura se encuentra relacionada con el movimiento de sus átomos. Por tanto, un agujero negro debería tener algún tipo de subestructura: piezas elementales que se puedan reordenar. A su vez, la posibilidad de disponer esos componentes de una forma u otra dota a los agujeros de una medida de desorden, o entropía. Según la relatividad general, sin embargo, los agujeros negros carecen de subestructura, por lo que tampoco podrían tener entropía.



Hawking observó que, si uno de esos pares aparece cerca del horizonte de sucesos de un agujero negro, una partícula puede caer dentro y la otra escapar. Este fenómeno, llamado radiación de Hawking, plantea varios rompecabezas.

La paradoja de la información

La mecánica cuántica prohíbe el borrado de información. Incluso al quemar una carta, la información del mensaje quedaría codificada en los átomos de la ceniza, el humo y la luz. Sin embargo, el carácter térmico de la radiación de Hawking implica que los agujeros negros destruyen de veras la información, ya que las propiedades de las partículas emitidas no dependen en absoluto de los átomos que hayan caído antes en el agujero negro. Hawking sugirió que la mecánica cuántica debía modificarse para dar cabida a esta pérdida de información.

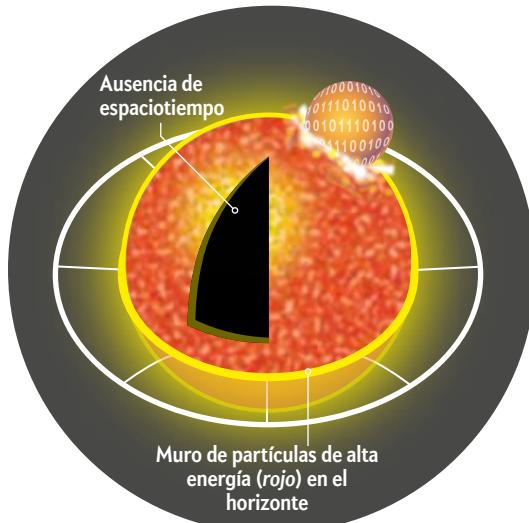


Algunas ideas previas (no mostradas)...

Para resolver tales rompecabezas, se han propuesto diversas formas de combinar la relatividad general con la mecánica cuántica. Un avance importante llegó con la teoría de cuerdas, la cual postula que las partículas elementales corresponden a diminutas «cuerdas» en vibración. Esta teoría permite explicar la entropía de algunos agujeros negros y parece indicar una forma de preservar la información.

... condujeron a los muros de fuego

Según el autor y sus colaboradores, las leyes cuánticas implican que los agujeros negros han de estar rodeados por «muros de fuego»: murallas de partículas de alta energía que incinerarían al instante cualquier objeto que intentase adentrarse más allá del horizonte. Dicha conclusión contradice una de las predicciones básicas de la relatividad general y plantea algunas posibilidades extremas, como que los muros de fuego marquen el final del espacio y el tiempo.



el sistema en un estado u otro. En el experimento mental de Hawking, la pérdida de información significa que no hay forma de predecir la función de onda de la radiación a partir de las propiedades de lo que cayó en el agujero negro. La pérdida de información está prohibida en mecánica cuántica, por lo que Hawking concluyó que la teoría debía modificarse para dar cabida a la pérdida de información en los agujeros negros.

El lector debe estar diciéndose: «Por supuesto que los agujeros negros destruyen la información. ¡Destruyen todo lo que cae en ellos!». Pensemos qué sucedería si simplemente quemásemos la nota. Sin duda, el mensaje acabaría tan desmenuzado que, en la práctica, resultaría imposible reconstruirlo a partir del humo. Pero sabemos que, durante la combustión, los átomos obedecen las leyes de la mecánica cuántica, por lo que la función de onda del humo ha de depender del mensaje original. Así que, al menos en teoría, podríamos reconstruir el texto a partir de dicha función de onda.

Con esa analogía en mano, muchos teóricos concluyeron que Hawking estaba equivocado. Que había confundido la simple mezcla de información con su verdadera pérdida. Además, argumentaron algunos, si la información realmente pudiese desaparecer, el fenómeno no se restringiría a una situación tan exótica como la evaporación de un agujero negro. Se manifestaría en todo momento y lugar, ya que en mecánica cuántica todo lo que puede ocurrir acaba ocurriendo. Si Hawking se hallaba en lo cierto, veríamos signos de ello en la física cotidiana, lo que probablemente incluiría violaciones muy graves de la ley de la conservación de la energía.

Sin embargo, el argumento de Hawking resiste las objeciones más simples. Y, a diferencia de un papel ardiendo, los agujeros negros tienen horizontes que impiden que la información escape. Llegamos así a una paradoja muy evidente: o alteramos la mecánica cuántica para permitir la pérdida de información, o modificamos la relatividad general para que la información pueda escapar de un agujero negro.

Hay una tercera posibilidad: que los agujeros negros no se evaporen por completo y que dejen algún residuo microscópico que contenga toda la información de la materia que lo creó. Pero esta «solución» adolece de sus propios problemas. Entre otros, si un objeto tan diminuto pudiese almacenar tanta información, violaría la noción de entropía de Bekenstein y Hawking.

AGUJEROS NEGROS Y BRANAS

La teoría de cuerdas intenta solucionar los problemas que surgen al conjuntar la mecánica cuántica y la relatividad general. Dicha teoría postula que las partículas puntuales son, en realidad, diminutos bucles o hebras. Gracias a ello, algunas de las dificultades matemáticas que aparecen al combinar la gravedad y la teoría cuántica desaparecen. Sin embargo, reemplazar las partículas por cuerdas no soluciona de inmediato el problema de los agujeros negros.

Un avance al respecto llegó en 1995, cuando estaba considerando otra clase de experimento mental sobre cuerdas en espacios diminutos. A partir de una serie de resultados previos tanto míos como de otros investigadores, demostré que la teoría de cuerdas tal y como la entendíamos por aquella época estaba incompleta: era necesario añadir cierta clase de objetos multidimensionales llamados D-branas. En un agujero negro, las D-branas estarían empaquetadas en dimensiones ocultas y demasiado pequeñas para detectarlas.

Un año después, Andrew Strominger y Cumrun Vafa, hoy en Harvard, demostraron que esa descripción en términos de

cuerdas y D-branas proporcionaba el número de bits justos para dar cuenta de la entropía de los agujeros negros, al menos en algunos casos muy simétricos. El problema de la entropía quedaba así parcialmente resuelto.

¿Y la pérdida de información? En 1997, Juan Maldacena, hoy en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, dio con una forma de sortear la paradoja gracias a lo que hoy se conoce como «dualidad de Maldacena». En general, llamamos «dualidad» a una equivalencia entre dos fenómenos que, a primera vista, no parecen guardar nada en común. Maldacena propuso que las matemáticas asociadas a cierta teoría cuántica de la gravedad basada en la teoría de cuerdas eran, bajo ciertas circunstancias, equivalentes a las matemáticas de una teoría cuántica de partículas ordinarias. En concreto, la física cuántica de un agujero negro correspondería a la de un gas de partículas nucleares calientes. La dualidad de Maldacena implicaba, además, que el espacio-tiempo sería algo muy distinto de lo que percibimos; algo así como un holograma tridimensional proyectado desde la superficie bidimensional de una esfera.

La dualidad de Maldacena ofrece una manera de describir la mecánica cuántica de los agujeros negros. Si su teoría es correcta, la gravedad admite una formulación alternativa basada en las leyes cuánticas habituales, en las que la información nunca desaparece. Un razonamiento más indirecto permite concluir que los agujeros negros no pueden dejar ningún residuo al evaporarse. Por tanto, si la información se conserva, ha de estar codificada en la radiación de Hawking.

Puede defenderse que la dualidad de Maldacena es lo más cerca que hemos estado nunca de unificar la relatividad general y la mecánica cuántica. Maldacena la dedujo mientras investigaba el problema de la entropía y la paradoja de la información en los agujeros negros. Y aunque aún no ha sido demostrada formalmente, hay una enorme cantidad de indicios a su favor. Tantos que, en 2004, Hawking se retractó, reconoció que los agujeros no destruían la información y saldó la apuesta que mantenía con John Preskill, físico del Caltech, en la Conferencia Internacional de Relatividad General y Gravitación en Dublín.

La mayoría de los físicos pensaba que ningún observador detectaría jamás una violación de la relatividad general u otra ley física cerca del horizonte de sucesos de un agujero negro que funcionase como postulaba Maldacena. Sin embargo, su dualidad no acababa de explicar claramente cómo se filtraba la información al exterior.

Hace unos veinte años, Leonard Susskind, de Stanford, y Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht, propusieron una solución al problema de la información. Esta se basaba en lo que llamaron «principio de complementariedad», una especie de principio de relatividad: en esencia, un observador que cayerese en un agujero negro encontraría la información dentro, mientras que uno que permaneciese en el exterior la vería salir. La idea no implica ninguna contradicción, ya que uno y otro no pueden comunicarse.

MUROS DE FUEGO

La dualidad de Maldacena y el principio de complementariedad parecían haber eliminado todas las paradojas; sin embargo, faltaban por concretar los detalles. En 2012, nuestra colaboración AMPS intentó construir un modelo que mostrase cómo funcionaba todo. Para ello nos basamos en algunas ideas de Samir Mathur, de la Universidad estatal de Ohio, y Steven Giddings, de la Universidad de California en Santa Bárbara (y extendimos, sin saberlo, un razonamiento anterior debido a Samuel Brauns-

¿Fuego en el horizonte?

Pese a las serias discordancias entre la física cuántica y la gravedad, parece prematuro abandonar la teoría de Einstein de los agujeros negros

ROBERTO EMPARAN

En 1976, Stephen Hawking señaló una contradicción básica entre la teoría de Einstein de los agujeros negros y la física cuántica. Casi cuarenta años después, esta «paradoja de la información» sigue resistiendo tenazmente todos nuestros intentos por resolverla.

Dicha paradoja puede verse como un problema de irreversibilidad fundamental. Uno de los principios básicos de la física cuántica dicta que todo proceso ha de ser siempre reversible. Por ello, si nuestra tableta de última generación cae en un horno crematorio, no debemos desesperar: bastará con reunir las cenizas y la radiación generadas durante la quema y procesarlas en un superordenador cuántico. Al menos en principio, ello nos permitirá reconstruir todas las fotos y documentos que guardábamos en la tableta.

Por supuesto, lo anterior no es más que un experimento mental; hoy por hoy, seguimos muy lejos de poder llevar a cabo algo así. Sin embargo, a los físicos nos gusta considerar esta clase de procesos imaginarios para investigar la consistencia interna de nuestras teorías. En este caso, lo importante es que, mientras la tableta se quema, todas las partes del sistema pueden intercambiar información entre sí. De este modo, la información se conserva globalmente a lo largo de la combustión, por más que se redistribuya de una forma muy complicada.

Eso no ocurre si la tableta cae en un agujero negro. Una vez que haya atravesado el horizonte de sucesos, resultará imposible transmitir su información al exterior. Por ello, si el agujero negro se «evapora» emitiendo radiación térmica —como descubrió Hawking en 1974— y acaba desapareciendo, la información quedará aniquilada. Es decir, nos encontraríamos ante un proceso verdaderamente irreversible.

Modificar la física cuántica para hacer sitio a esa irreversibilidad sin introducir efectos colaterales indeseados resulta notablemente difícil. Tanto es así que muchos físicos pensaron que, de alguna manera, la información seguiría siendo accesible desde el exterior del agujero negro.

En 2012, Joseph Polchinski y sus colaboradores, conocidos como AMPS por sus iniciales, argumentaron que las consecuencias de esa opción resultaban mucho más conflictivas de lo que nunca habíamos imaginado. Si nos empeñamos en que la información se mantenga accesible desde fuera —por ejemplo, en forma de fotones que almacenen cada uno un bit de información—, debe existir una fuerza enorme cerca del horizonte que impida a esos fotones caer hacia el interior. Esa barrera, que AMPS denominaron «muro de fuego», sería percibida por cualquiera que intentase atravesar el horizonte de sucesos. Las consecuencias son tremendas: semejante «muro» difiere por completo de lo que predice la teoría de Einstein, según la cual en el horizonte no debería ocurrir nada especial.

Aun reconociendo la dificultad del reto lanzado por AMPS, muchos, quizás la mayoría, de los físicos han rechazado seguirles hasta su última conclusión. Estamos habituados a que los efectos cuánticos resulten inapreciables en los objetos macroscópicos. Sin embargo, los muros de fuego implican que la mecánica cuántica altera por completo las propiedades de los agujeros negros, incluso si son tan grandes como el que ocupa el centro de la Vía Láctea,

con un tamaño de millones de kilómetros, o Gargantúa, el agujero negro de *Interstellar*. Si bien AMPS sugieren que tal vez los muros de fuego solo aparezcan en agujeros negros muy antiguos (con una edad mayor que la del universo actual), no estamos preparados para aceptar un fracaso tan drástico de la teoría de Einstein sin haber descartado antes todas las opciones.

Sortear el muro

Una de las alternativas más interesantes ha sido la propuesta por Kyriakos Papadodimas, del CERN y la Universidad de Groninga, y Suvrat Raju, del Centro Internacional para las Ciencias Teóricas de Bangalore. En ella, el interior del agujero negro no tiene una existencia independiente del exterior. El principal logro de estos investigadores ha sido demostrar cómo el interior puede ser codificado empleando únicamente magnitudes accesibles a los observadores externos. En realidad, toda la información se encuentra fuera del horizonte. Por tanto, para un observador externo resulta posible —aunque extremadamente difícil— describir lo que sucede en el interior. Seguimos disponiendo de la información almacenada en nuestra tableta; es decir, su caída en el agujero negro constituye un proceso reversible, tal y como exigen las leyes cuánticas. Pero, a menos que llevemos a cabo observaciones muy precisas, describiremos dicho proceso de manera casi idéntica a como lo hace la teoría de Einstein; en particular, sin encontrar muros de fuego y, aparentemente, perdiendo la información. Ello permite armonizar ambas teorías preservando lo esencial de cada una de ellas.

Con todo, el debate no está cerrado. La construcción de Papadodimas y Raju resulta poco ortodoxa en física cuántica y AMPS —y otros— han cuestionado que pueda llevarse a cabo sin modificar ninguno de sus principios.

Por desgracia, no parece que ningún experimento en un futuro próximo vaya a ayudarnos a resolver la cuestión. Si existiesen los muros de fuego, sus efectos sobre los agujeros negros astrofísicos se verían atemperados por su intensa gravedad. E incluso si los aceleradores de partículas presentes o futuros consiguiesen crear copiosas cantidades de agujeros negros microscópicos —algo que se antoja cada vez más improbable a la vista de los resultados del LHC en el CERN—, estaríamos aún muy lejos de poder realizar el tipo de computación cuántica que decidiría el problema.

Sin embargo, a pesar de su carácter eminentemente teórico, no parece conveniente ignorar el reto. Muchos de los avances más radicales de la física han tenido su origen en las aparentes contradicciones entre teorías que, por separado, estaban bien establecidas. Por ello, tal vez la paradoja de la información se convierta en la contribución más importante y fructífera de Stephen Hawking a la física. Al fin y al cabo, son pocas las controversias capaces de atrapar la atención de los científicos y forzarles a generar nuevas ideas durante cuatro décadas.

Roberto Emparan es profesor de investigación ICREA en el departamento de física fundamental de la Universidad de Barcelona y en el Instituto de Ciencias del Cosmos, de la misma universidad.

tein, de la Universidad de York). Tras fracasar repetidas veces, nos dimos cuenta de que el problema iba más allá de nuestras carencias matemáticas. Aún persistía una contradicción.

Esta aparece al considerar el entrelazamiento cuántico, el fenómeno menos intuitivo de la teoría cuántica y el más alejado de nuestra experiencia cotidiana. Si las partículas fuesen dados, dos partículas entrelazadas serían como dos dados que siempre suman siete: si al lanzar el primero obtenemos un dos, entonces sabremos que en el segundo aparecerá un cinco. De igual modo, cuando medimos las propiedades de una partícula que se encuentra entrelazada con otra, el resultado determina las propiedades de su pareja. La mecánica cuántica también dicta que una partícula solo puede estar completamente entrelazada con otra: si la partícula B se halla entrelazada con la A, entonces no puede estarlo a la vez con una tercera, C. Decimos que el entrelazamiento es «monógamo».

Pensemos ahora en un fotón de Hawking emitido después de que se haya evaporado, al menos, la mitad del agujero negro. Llámemos «B» a dicho fotón. El proceso de Hawking implica que B forma parte de un par de partículas entrelazadas, cuyo segundo miembro, «A», se ha precipitado en el agujero. Por otro lado, la información que anteriormente había caído en el agujero negro ha de estar repartida de algún modo en la radiación de Hawking emitida hasta entonces. Ahora bien, si la información no se pierde, y si el fotón saliente, B, acaba en un estado cuántico bien definido, entonces B ha de estar entrelazado con alguna combinación, «C», de partículas de Hawking radiadas con anterioridad (de lo contrario, el proceso borraría información). Pero entonces llegamos a una contradicción: ¡la poligamia!

Si fuera del agujero negro no ocurre nada extraordinario, el precio de salvar a la mecánica cuántica y preservar el entrelazamiento entre B y C es romper el entrelazamiento entre A y B. Pero, al igual que sucede con un enlace químico, romper el entrelazamiento cuesta energía. Los fotones A y B habían aparecido como un efímero par de partículas muy cerca del horizonte de sucesos. Para romper el entrelazamiento entre todos los pares de Hawking, el horizonte solo puede ser un «muro» de partículas de alta energía. Un astronauta que cayese en un agujero negro no se deslizaría con suavidad en él; en su lugar, se toparía con un muro de fuego.

Hallar una divergencia tan drástica con respecto a las predicciones de la relatividad general nos causó un gran desconcierto. Pero nuestro razonamiento era simple y no pudimos encontrar ningún fallo. En cierto modo, habíamos recorrido el razonamiento original de Hawking en sentido inverso: supusimos que la información no se perdía y vimos a dónde nos llevaba tal hipótesis. Descubrimos que, más que los sutiles efectos de la complementariedad, la relatividad general se desmoronaba. Al comentar nuestro resultado con otros investigadores, la reacción más común fue un escepticismo seguido de la misma perplejidad que habíamos experimentado nosotros.

O existen los muros de fuego, o habremos de abandonar algunos de nuestros principios cuánticos más arraigados. Por desgracia, estudiar los agujeros negros del mundo real no ayudará a resolver la cuestión, ya que cualquier radiación emitida por el objeto quedaría enmascarada por sus efectos gravitatorios, lo que haría el muro de fuego muy difícil de observar.

EL FIN DEL ESPACIO

Si existen los muros de fuego, ¿qué son? Una posibilidad es que marquen el final del espacio. Tal vez las condiciones para que se forme el espaciotiempo no se satisfagan en el interior de un

agujero negro. Como ha apuntado Marolf, quizás el interior no pueda formarse porque «la memoria cuántica del agujero negro está llena». Si el espaciotiempo termina en el horizonte, un astronauta que lo toque se «disolverá» en bits cuánticos alojados en la frontera.

Para evitar situaciones tan estrañas, numerosos investigadores han intentado sortear el argumento que lleva a la existencia de muros de fuego. Una propuesta plantea que, dado que la partícula de Hawking B ha de estar entrelazada a la vez con A y con C, entonces A debe formar parte de C: el fotón que se halla tras el horizonte representa, de alguna manera, el mismo bit que la radiación de Hawking emitida con anterioridad, por más que uno y otra se encuentren muy separados. La idea recuerda a la noción original de complementariedad, pero parece que plasmarla en un modelo concreto también implica modificar la mecánica cuántica. La alternativa más radical, propuesta por Maldacena y Susskind, postula que dos partículas entrelazadas se hallan conectadas por un agujero de gusano espaciotemporal. De esta manera, una extensa región del espaciotiempo, como el interior de un agujero negro, podría construirse a partir de grandes cantidades de entrelazamiento.

Hawking propuso que la relatividad general funciona para los agujeros negros pero que la mecánica cuántica no. Maldacena llegó a la conclusión de que no hace falta modificar la mecánica cuántica, pero que el espaciotiempo es holográfico. Quizá la verdad se encuentre en algún punto intermedio.

Se han propuesto muchas otras ideas. La mayoría implican abandonar alguno de los grandes principios que llevaban largo tiempo con nosotros, pero no hay consenso acerca de qué dirección tomar. Una pregunta común es: ¿qué consecuencias tendrían los muros de fuego para los agujeros negros del mundo real, como el del centro de la Vía Láctea? Aún es pronto para decirlo.

Por el momento, la comunidad vive con emoción esta nueva contradicción entre dos teorías físicas fundamentales. Nuestra incapacidad para decidir si los muros de fuego existen o no ha sacado a la luz una limitación en las formulaciones actuales de la gravedad cuántica. Quizá de todo ello emerja una comprensión más profunda de la naturaleza del espacio y del tiempo, así como de los principios que subyacen a todas las leyes físicas. En último término, al desenmarañar los problemas que plantean los muros de fuego, tal vez obtengamos la clave para unificar la mecánica cuántica y la relatividad general.

PARA SABER MÁS

La guerra de los agujeros negros: Una controversia científica sobre las leyes últimas de la naturaleza. Leonard Susskind. Editorial Crítica, 2009.

Black holes: Complementarity or firewalls? Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski y James Sully en *Journal of High Energy Physics*, vol. 2013, n.º 2, art. 62, febrero de 2013. Disponible en arxiv.org/abs/1207.3123

Cool horizons for entangled black holes. Juan Maldacena y Leonard Susskind en *Fortschritte der Physik*, vol. 61, n.º 9, págs. 781-811, septiembre de 2013. Disponible en arxiv.org/abs/1306.0533

Black hole interior in the holographic correspondence and the information paradox. Kyriacos Papadodimas y Suvrat Raju en *Physical Review Letters*, vol. 112, 051301, febrero de 2014. Disponible en arxiv.org/abs/1310.6334

EN NUESTRO ARCHIVO

Los agujeros negros y la paradoja de la información. Leonard Susskind en *IyC*, junio de 1997.

La información en el universo holográfico. Jacob D. Bekenstein en *IyC*, octubre de 2003.

El espacio, ¿una ilusión? Juan Maldacena en *IyC*, enero de 2006.

Accede a la HIMEROTECA DIGITAL

TODAS LAS REVISTAS DESDE 1990



Suscríbete y accede a todos los artículos

PAPEL

Elige la modalidad mixta y recibirás también las revistas impresas correspondientes al período de suscripción

ARCHIVO

Encuentra toda la información sobre el desarrollo de la ciencia y la tecnología durante los últimos 25 años

DIGITAL

Accede desde cualquier ordenador o tableta al PDF de más de 8000 artículos elaborados por expertos

www.investigacionyciencia.es

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA