

TEMAS

3^{er} trimestre 2019 • N.º 97 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Los monográficos de
**INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA**

AGUJEROS NEGROS

MECÁNICA CUÁNTICA

La paradoja
de la información

FÍSICA TEÓRICA

El principio
holográfico

GALAXIAS

Agujeros negros
supermasivos

ONDAS GRAVITACIONALES

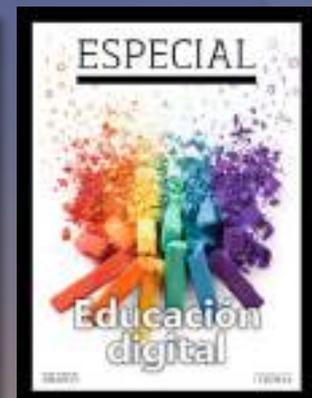
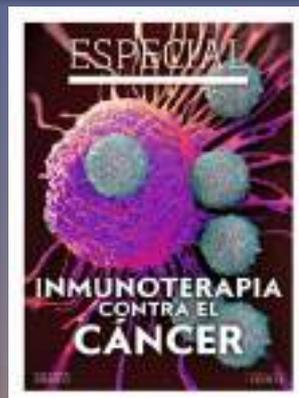
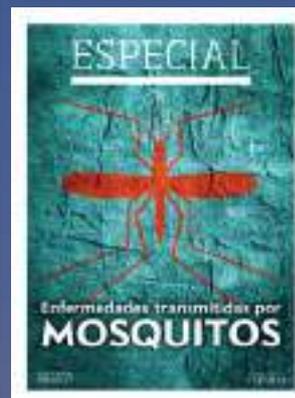
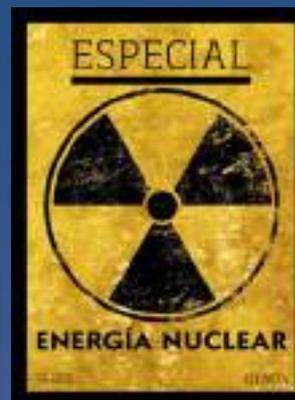
Ecós en el
horizonte



ESPECIAL

MONOGRÁFICOS DIGITALES

Descubre los monográficos digitales que reúnen nuestros mejores artículos (en pdf) sobre temas de actualidad



www.investigacionyciencia.es/revistas/especial



Prensa Científica, S.A.



La piedra de Rosetta de la gravedad

En 1915, mientras servía en el frente ruso de la Primera Guerra Mundial, el astrónomo alemán Karl Schwarzschild derivó la primera solución exacta de la relatividad general, la teoría geométrica de la gravitación que ese mismo año había formulado Albert Einstein. El propósito de Schwarzschild era bastante mundano: espoleado por el problema que planteaba el movimiento anómalo del perihelio de Mercurio, el cual Einstein solo había conseguido resolver de manera aproximada, el astrónomo intentaba describir cómo sería la trayectoria de un planeta en el campo gravitatorio creado por una estrella. «Las siguientes líneas permiten que el resultado del Sr. Einstein reluzca con acrecentada claridad», escribió en la introducción de su artículo, publicado en febrero de 1916 (pág. 4).

Schwarzschild no vivió lo suficiente para verlo (murió tres meses después, víctima de una dolorosa enfermedad contraída en Rusia), pero aquel trabajo acabaría planteando un colosal rompecabezas que, cien años después, los físicos siguen intentando resolver. Su solución describía el caso más sencillo posible de lo que hoy denominamos un agujero negro: un astro cuyo campo gravitatorio es tan intenso que, pasado cierto punto conocido como horizonte de sucesos, un objeto tendría que moverse más rápido que la luz para poder escapar de él.

Desde entonces, el estudio de este insólito fenómeno de la naturaleza ha dado lugar a dos fecundas líneas de investigación largamente independientes, una en física matemática, basada en complejos cálculos y experimentos mentales (págs. 12-55), y otra en astrofísica (págs. 56-95). La primera ha proporcionado los que, para muchos expertos, son algunos de los indicios más sólidos del funcionamiento de la gravedad a escala cuántica. La segunda constituye un floreciente campo observacional que ha ayudado a entender el devenir de las estrellas y la estructura y evolución de las galaxias. El presente monográfico de la colección TEMAS le invita a explorar ambos enfoques a través de una cuidada selección de los mejores artículos sobre agujeros negros publicados en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA.

El problema teórico que plantean los agujeros negros surge al preguntarse por el destino de lo que cae en ellos. Esta cuestión reveló su verdadera importancia en los años setenta, cuando Stephen Hawking descubrió que, al tomar en consideración ciertos efectos cuánticos, los agujeros negros debían emitir radiación. Sin embargo, el análisis del físico británico sugería que las partículas expulsadas por un agujero negro no guardaban ninguna relación con lo que antes hubiese caído en él. De ser el caso, ello haría saltar por los aires uno de los pilares de la mecánica cuántica (pág. 14). En los últimos decenios, el estudio de esta paradoja ha permitido explorar cuestiones tan profundas como la manera en que la naturaleza procesa la información (págs. 22 y 32), los límites de las leyes físicas (pág. 42) y las propiedades cuánticas del espacio y el tiempo (pág. 48).

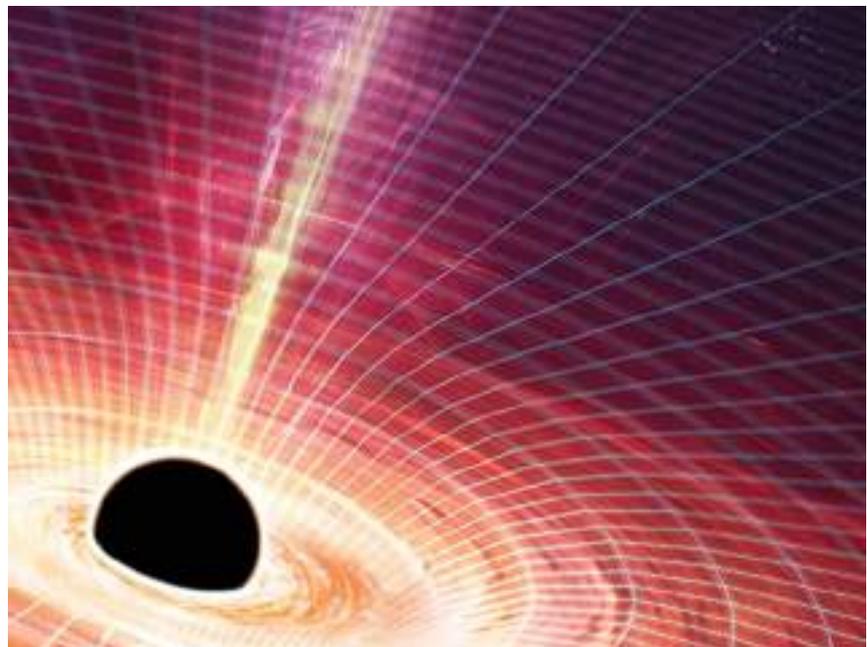
Por su parte, y aunque muy distintos de la solución eterna e idealizada de Schwarzschild, hace ya tiempo que los astrónomos cuentan con indicios claros de la existencia de agujeros negros en el universo. Algunos son cadáveres estelares, con masas del orden de diez veces la del Sol. Otros, los más enigmáticos en cuanto a su origen, son los astros hasta miles de millones de veces más masivos

que hoy sabemos que ocupan el centro de numerosas galaxias (págs. 58 y 66). En las últimas dos décadas, el estudio de estos colosos y de sus homólogos estelares ha vivido espectaculares avances gracias al desarrollo de nuevas técnicas (pág. 72) y, desde 2015, a la detección de ondas gravitacionales (págs. 80 y 88).

¿Convergerán algún día estas dos grandes líneas de investigación? Por sorprendente que pueda parecer, la astronomía de ondas gravitacionales ha abierto la puerta a sondear por medios experimentales las propiedades de los horizontes de sucesos. Con suerte, los resultados que a corto o medio plazo deparen estos trabajos podrían revolucionar el conocimiento de la interacción fundamental más enigmática de la naturaleza (pág. 88).

Al igual que el átomo de hidrógeno fue la piedra de Rosetta que permitió descifrar los secretos de la teoría cuántica, hace décadas que los físicos ven en los agujeros negros la piedra de Rosetta de la gravedad. Aunque el camino que queda para interpretarla por completo aún se antoja largo, los resultados cosechados hasta ahora conforman una de las piezas más valiosas de las que disponen los científicos para continuar armando el puzle último de la realidad.

—La redacción

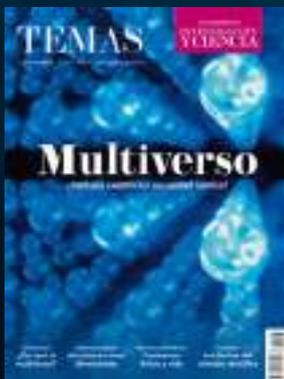


SUSCRÍBETE A LA REVISTA TEMAS

Ventajas para los suscriptores:

- **Envío** puntual a domicilio
- **Ahorro** sobre el precio de portada
~~27,60 €~~ 22 € por un año (4 ejemplares)
- **Acceso gratuito** a la edición digital de los números incluidos en la suscripción

Selecciones temáticas
de nuestros
mejores artículos



www.investigacionyciencia.es/suscripciones
Teléfono +34 935 952 368

Los monográficos de
**INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA**



Agujeros negros

1 Presentación

La piedra de Rosetta de la gravedad

La redacción

4 Historia

El padre renuente de los agujeros negros

Jeremy Bernstein

AGUJEROS NEGROS MATEMÁTICOS

14 Los agujeros negros y la paradoja de la información

Leonard Susskind

22 La información en el universo holográfico

Jacob D. Bekenstein

32 Computación en agujeros negros

Seth Lloyd e Y. Jack Ng

42 Minería de agujeros negros

Adam Brown

48 Geometría y entrelazamiento cuántico

Juan Martín Maldacena

AGUJEROS NEGROS ASTROFÍSICOS

58 Agujeros negros de masa intermedia

Jenny E. Greene

66 Los primeros agujeros negros supermasivos

Priyamvada Natarajan

72 Devorar un sol

S. Bradley Cenko y Neil Gehrels

80 Agujeros negros primordiales y materia oscura

Juan García-Bellido y Sébastien Clesse

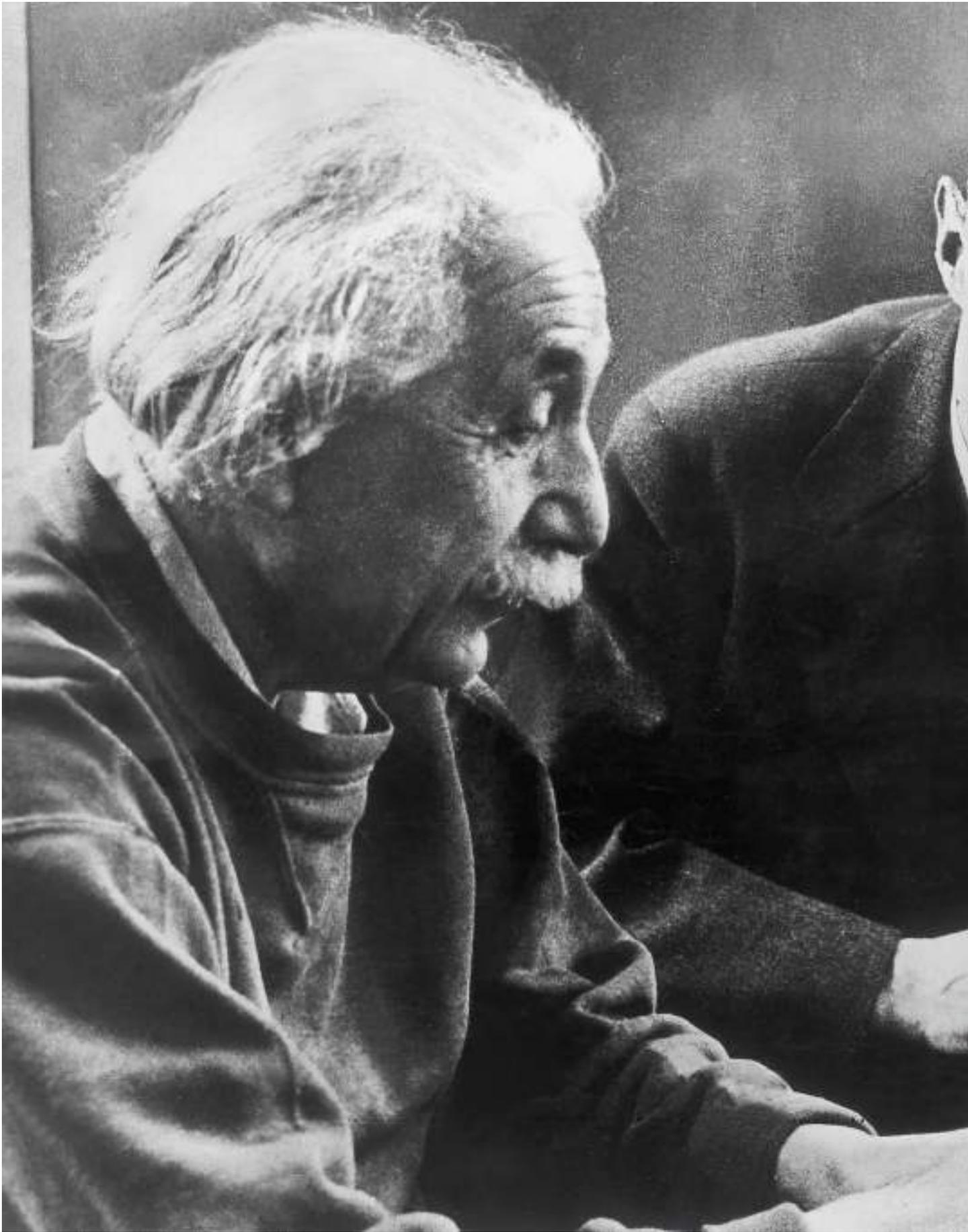
88 Ecos desde el horizonte

Pablo Bueno y Pablo A. Cano



EN PORTADA

Descubiertos como soluciones de las ecuaciones de Einstein en 1915, hace décadas que los físicos teóricos ven en los agujeros negros una de las claves fundamentales para descifrar el comportamiento de la gravedad. En los últimos años, y de manera independiente, su estudio se ha convertido en una de las áreas más fascinantes y prometedoras de la astronomía observacional. ¿Convergerán algún día ambas líneas de investigación? Ilustración: Getty Images/Keanu2/iStock.



EL PADRE RENUENTE DE LOS AGUJEROS NEGROS

Las ecuaciones de la gravedad de Albert Einstein constituyen el fundamento de la teoría moderna de los agujeros negros. En ellas se basó él, sin embargo, para intentar demostrar que tales objetos no podían existir

Jeremy Bernstein



A FAVOR Y EN CONTRA:

En 1939, Robert Oppenheimer (*derecha*) abogó por la existencia de agujeros negros al mismo tiempo que Albert Einstein intentaba refutarla. Sus caminos se cruzaron en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton a finales de los años cuarenta, época a la que corresponde esta fotografía, pero se desconoce si alguna vez llegaron a hablar sobre agujeros negros.



A CIENCIA DEJA EN OCASIONES UNA HERENCIA QUE DESBORDA NO SOLO la imaginación, sino también las intenciones de sus creadores. Un ejemplo notable lo constituyen los primeros pasos de la teoría de los agujeros negros, y muy particularmente el papel que en ella desempeñó Albert Einstein. En 1939, el físico alemán publicó en la revista *Annals of Mathematics* un artículo de título intimidatorio: «Sobre un sistema estacionario con simetría esférica formado por muchas masas gravitatorias». En él se proponía demostrar la imposibilidad de los agujeros negros, objetos celestes de tal densidad que su gravedad provoca que ni siquiera la luz pueda escapar de ellos.

Lo irónico del caso es que, en su argumentación, Einstein usó su propia teoría de la relatividad general, publicada en 1916, la cual empleamos hoy en día para concluir que los agujeros negros no solo son posibles, sino que constituyen el fin inevitable de numerosos astros. De hecho, pocos meses después de la aparición del artículo de Einstein, el físico Robert Oppenheimer y su alumno Hartland Snyder publicaron —sin mencionar el trabajo del alemán— un artículo titulado «Sobre la contracción gravitatoria continua». En él usaban la teoría de la relatividad general para, por primera vez en el ámbito de la física moderna, explicar el proceso de formación de un agujero negro.

Pero tal vez resulte más irónico aún que la investigación actual sobre agujeros negros —y, en general, el estudio de las estrellas en fase de colapso, o contracción gravitatoria— se base en un aspecto completamente distinto del legado de Einstein: su trabajo en mecánica cuántica estadística. Sin las predicciones de la estadística cuántica, todos los objetos

astronómicos terminarían por contraerse hasta convertirse en agujeros negros, lo que daría lugar a un universo que no se parecería en nada a este en el que vivimos.

ESTADÍSTICA CUÁNTICA

La creación de la estadística cuántica le fue inspirada a Einstein por una carta que recibió en junio de 1924 de Satyendra Nath Bose, un joven físico indio por entonces desconocido. La misiva venía acompañada de un artículo que Bose había enviado a una revista científica británica pero que había sido rechazado. Tras leer el manuscrito, el propio Einstein lo tradujo al alemán e hizo lo necesario para que se publicara en *Zeitschrift für Physik*.

¿Qué indujo a Einstein a ponderar la importancia de aquel trabajo? Durante veinte años, el alemán había estado debatiéndose para entender la naturaleza de la radiación electromagnética, en especial la de aquella atrapada en un recipiente caliente y que ha alcanzado la misma temperatura que sus paredes. A principios del siglo xx, Max Planck había descubierto la

expresión matemática que describía las variaciones de intensidad de las distintas longitudes de onda presentes en ese tipo de radiación, llamada «de cuerpo negro». La forma de dicho espectro resultaba no depender del material de las paredes ni de otros detalles, sino tan solo de la temperatura de la radiación.

Un poco por casualidad, Bose había calculado las propiedades estadísticas de la radiación de cuerpo negro. En otras palabras: había obtenido la ley de Planck a partir de una descripción matemática de la física cuántica subyacente. Este resultado llamó la atención de Einstein, quien, acorde con su talante, profundizó en la cuestión. El alemán empleó el mismo método para estudiar la mecánica estadística de un gas de moléculas con masa que obedecían el mismo tipo de leyes que Bose había asociado a los fotones.

Al derivar una ley análoga a la de Planck para este caso, Einstein observó algo extraordinario: si se enfriaba un gas de partículas que obedecen la estadística que hoy denominamos «de Bose-Eins-

EN SÍNTESIS

En 1916, el físico alemán Karl Schwarzschild demostró que, para un cuerpo esférico, existía un radio en el que el campo gravitatorio predicho por la teoría de Einstein se tornaba singular: el tiempo parecía anularse y el espacio se hacía infinito.

Más de dos décadas después, en 1939, Einstein usó su teoría de la relatividad general para intentar demostrar que tales «singularidades de Schwarzschild» —hoy conocidas como agujeros negros— no podían llegar a formarse.

La conclusión de Einstein resultó ser errónea. Ese mismo año, a partir de estudios previos sobre enanas blancas y estrellas de neutrones, Robert Oppenheimer y Hartland Snyder lograron explicar el proceso de formación de un agujero negro.

tein», al llegar a una temperatura crítica determinada, todas las moléculas se acumularían de repente en un estado único, o «degenerado». Se trata de lo que hoy conocemos como condensación de Bose-Einstein (si bien el primero no tuvo nada que ver en su formulación).

Un ejemplo interesante lo hallamos en un gas de helio 4, el isótopo común del helio, cuyo núcleo consta de dos protones y dos neutrones. A la temperatura de 2,18 kelvin, este gas se convierte en un líquido con las propiedades más misteriosas que uno pueda imaginar, incluida la superfluidez, o capacidad de fluir sin rozamiento. A lo largo de los últimos años, los científicos han culminado la difícil tarea de enfriar otras clases de átomos a milmillonésimas de kelvin para conseguir condensados de Bose-Einstein.

Sin embargo, no todas las partículas de la naturaleza experimentan este fenómeno. En 1925, justo después de que Einstein publicara sus artículos sobre la condensación, el físico austriaco Wolfgang Pauli identificó una segunda clase de partículas (aquella a la que pertenecen el electrón, el protón o el neutrón) con

En 1939, Einstein se propuso demostrar que los agujeros negros no podrían llegar a formarse

otras propiedades. Pauli descubrió que dos partículas idénticas de este tipo (dos electrones, por ejemplo) nunca podrían adoptar el mismo estado cuántico a la vez. Hoy esta regla se conoce como principio de exclusión de Pauli. En 1926, Enrico Fermi y Paul Dirac derivaron la estadística cuántica que debían obedecer las partículas de esta clase.

En virtud del principio de exclusión de Pauli, lo último que harían estas partículas al enfriarse sería condensarse en un mismo estado cuántico. Si comprimimos cada vez más un gas de electrones, antes o después estos deberían invadir el espacio de sus vecinos. Sin embargo, eso queda prohibido por el principio de exclusión de Pauli. Como consecuencia, llegará un momento en que los electrones tenderán a alejarse unos de otros a velocidades que pueden

aproximarse a la de la luz. La presión creada por estas partículas que intentan escapar, conocida como «presión de degeneración», persiste aun cuando el gas se enfría hasta el cero absoluto. Dicha repulsión no guarda ninguna relación con la repulsión eléctrica que sufren las partículas con idéntica carga: los neutrones, que carecen de carga eléctrica, también la experimentan. Es pura física cuántica.

ENANAS BLANCAS

¿Qué tiene que ver la estadística cuántica con las estrellas? A principios del siglo XX, los astrónomos habían empezado a estudiar una clase peculiar de estrellas pequeñas y mortecinas: las enanas blancas. La que acompaña a la estrella más brillante del cielo, Sirio, tiene la masa del Sol pero emite alrededor de 1/360 de su luz. Dados

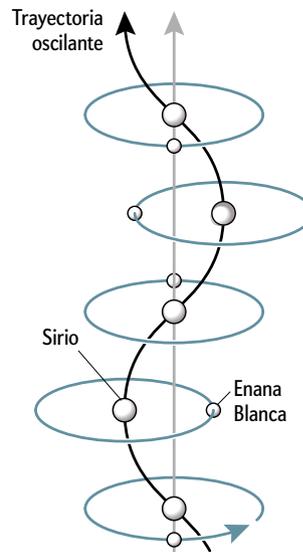
La historia temprana de los agujeros negros



1900
Max Planck describe la radiación de cuerpo negro.



1905
Albert Einstein demuestra que la luz puede considerarse formada por cierto tipo de partículas (fotones).



1915
Walter S. Adams identifica la tenue compañera de Sirio (causante de las oscilaciones que experimenta su trayectoria) como una enana blanca.



1916
Einstein publica la teoría de la relatividad general, cuyas ecuaciones describen la gravedad.

su masa y su tamaño, las enanas blancas deben ser extraordinariamente densas. La densidad de la compañera de Sirio multiplica por 61.000 la del agua. ¿Qué podían ser aquellos objetos tan extraños? Fue aquí cuando Sir Arthur Eddington entró en escena.

Cuando yo empezaba a estudiar física, a finales de los años cuarenta, Eddington era uno de mis héroes, aunque por razones equivocadas. Desconocía sus fabulosas contribuciones a la astronomía, pero admiraba sus libros de divulgación (si bien estos, con el tiempo, han acabado por parecerme demasiado ingenuos). Eddington, que murió en 1944, era un neokantiano convencido de que todo lo importante acerca del universo podía descubrirse examinando lo que ocurre dentro de la propia cabeza. Pero, desde finales de la década de 1910, cuando dirigió una de las dos expediciones que confirmaron la predicción de Einstein de que el Sol desvía la luz de las estrellas, hasta finales de los años treinta, cuando comenzó a desvariar, fue uno de los gigantes de la ciencia del siglo xx. En la práctica, fue él quien creó la disciplina que permitió entender la constitución interna de las estrellas, título de su libro

clásico de 1926. Para él las enanas blancas eran una afrenta, por lo menos desde un punto de vista estético. Sin embargo, las estudió con detenimiento y acabó llegando a una idea liberadora.

En 1924 Eddington propuso que la presión gravitatoria que comprimía a una enana blanca podía despojar algunos protones de sus electrones. En tal caso, los átomos perderían su corteza y podrían aglomerarse hasta formar un paquete pequeño y denso. Con el tiempo, la contracción gravitatoria de la enana blanca se detendría a causa de la presión de degeneración de Fermi-Dirac; esto es, cuando el principio de exclusión de Pauli obligara a los electrones a mantenerse separados unos de otros.

La comprensión de las enanas blancas dio un paso más en julio de 1930, cuando Subrahmanyan Chandrasekhar, a la sazón de 19 años, viajaba de Madrás a Southampton. El físico Ralph Fowler había aceptado que Chandrasekhar acudiera a estudiar con él en la Universidad de Cambridge, donde también se encontraba Eddington. Tras leer el libro de Eddington sobre las estrellas y el de Fowler sobre mecánica cuántica estadística, el muchacho se sintió fascinado por las enanas

blancas. A modo de pasatiempo durante la travesía, el joven físico indio se entretuvo en responder la siguiente pregunta: ¿existía un límite máximo para la masa de una enana blanca, uno más allá del cual el objeto acabaría colapsando sobre sí mismo por efecto de su propia gravedad? La respuesta a la que llegó desató una revolución.

En conjunto, una enana blanca es eléctricamente neutra. Eso significa que cada electrón debe tener su correspondiente protón, dotado de una masa unas 2000 veces mayor. En consecuencia, son los protones los principales responsables de la compresión gravitatoria. Si la enana blanca no se está contrayendo, la presión de degeneración de los electrones debe equilibrar la contracción gravitatoria de los protones. Dicho equilibrio limita el número de protones y, por tanto, la masa de la enana blanca. Ese valor máximo, conocido como límite de Chandrasekhar, es igual a unas 1,4 veces la masa del Sol. Por tanto, las enanas blancas con una masa mayor no pueden ser estables.

El resultado de Chandrasekhar inquietó profundamente a Eddington. ¿Qué ocurriría si la masa de una estrella superaba ese límite? La respuesta no le



1916

Karl Schwarzschild demuestra que, para un objeto esférico, existe un radio donde el campo gravitatorio predicho por la teoría de Einstein se torna «singular»: el tiempo parece anularse y el espacio se hace infinito.



1924

Einstein consigue que se publique el trabajo de **Satyendra Nath Bose** sobre la radiación de cuerpo negro. En él se desarrolla la estadística cuántica de la clase de partículas a la que pertenecen los fotones.



1924

Sir Arthur Eddington sugiere que, en una enana blanca, la gravedad puede despojar a los protones de sus electrones.



1925

Wolfgang Pauli enuncia el principio de exclusión, que afirma que ciertas partículas no pueden hallarse en el mismo estado cuántico al mismo tiempo.

gustaba. O el resultado de Chandrasekhar era incorrecto o, salvo que existiera algún mecanismo que limitara la masa de las estrellas que acaban convertidas en enanas blancas, las estrellas más masivas estaban condenadas a contraerse gravitatoriamente hasta desaparecer.

Eddington juzgó intolerable semejante conclusión y procedió a atacar, en público y en privado, el uso que Chandrasekhar había hecho de la estadística cuántica. La crítica hizo mella en el indio. Sin embargo, gracias al apoyo de físicos como Niels Bohr, quien le aseguró que Eddington estaba equivocado, Chandrasekhar se mantuvo firme.

UNA DISTANCIA SINGULAR

Mientras algunos físicos estudiaban la estadística cuántica y las enanas blancas, otros desarrollaban la relatividad general, la teoría de la gravitación de Einstein. Hasta donde sabemos, Einstein nunca invirtió mucho tiempo buscando soluciones exactas de sus ecuaciones. La parte que describe el comportamiento de la gravedad en presencia de materia reviste una dificultad notable, ya que la gravedad distorsiona la geometría del espacio y el tiempo y hace que las partículas

En los primeros trabajos sobre agujeros negros convergieron la relatividad general y la estadística cuántica

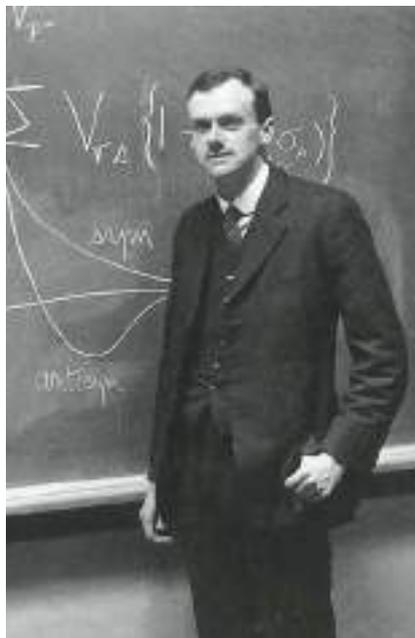
sigan trayectorias curvas. Para Einstein, más importante aún era el hecho de que la materia, la fuente de la gravedad, no podía describirse con las ecuaciones de la gravedad: tenía que añadirse a mano, lo que le movía a pensar que sus ecuaciones eran incompletas. Con todo, algunas soluciones aproximadas permitían describir con la suficiente precisión la desviación de los rayos de luz y otros fenómenos. No obstante, Einstein quedó impresionado cuando, en 1916, el astrónomo alemán Karl Schwarzschild obtuvo una solución exacta para una situación realista: el caso de un planeta que gira alrededor de una estrella.

En el camino, Schwarzschild había encontrado algo inquietante. A una determinada distancia del centro de la estrella, las matemáticas se empezaban a dispartar. A dicha distancia, hoy conocida como «radio de Schwarzschild», el tiem-

po parecía anularse y el espacio parecía hacerse infinito. La solución presentaba lo que los matemáticos denominan una «singularidad». Por regla general, el radio de Schwarzschild es mucho menor que el del objeto en sí. Para el Sol, por ejemplo, asciende a unos 3 kilómetros, mientras que para una canica de un gramo es de 10^{-28} centímetros.

Por supuesto, Schwarzschild era consciente de que su fórmula describía algo muy extraño a esa distancia, pero decidió que eso no importaba. Construyó un modelo simplificado de una estrella con el que demostró que sería necesario un gradiente de presión infinito para comprimirla hasta alcanzar dicho radio. Este, concluyó, carecía por tanto de interés físico.

Pero el análisis de Schwarzschild no satisfizo a todos. A Einstein le inquietaba que el modelo estelar de Schwarzschild no



1926

Enrico Fermi (izquierda) y Paul Dirac (derecha) desarrollan la estadística cuántica de aquellas partículas que obedecen el principio de exclusión de Pauli, como los electrones o los protones. Al comprimirlas, llega un momento en que tales partículas se alejan mutuamente, lo que da lugar a la llamada «presión de degeneración».

1930

Sirviéndose de la estadística cuántica y del trabajo de Eddington sobre estrellas, **Subrahmanyan Chandrasekhar** descubre que la masa de una enana blanca no puede exceder 1,4 masas solares. De lo contrario, el astro se contraería más y más hasta desaparecer. Eddington critica dicha conclusión.

cumpliera algunos requisitos técnicos de la teoría de la relatividad. Otros autores, sin embargo, mostraron que era posible reescribir la solución de Schwarzschild de manera que la singularidad no apareciera. ¿Quería eso decir que el resultado estaba realmente libre de singularidades? Sea como fuere, sería inexacto afirmar que el asunto levantó un acalorado debate. La mayoría de los físicos estaban poco interesados por estas cuestiones, por lo menos hasta 1939.

En su trabajo de ese año, Einstein atribuía su renovado interés por el radio de Schwarzschild a discusiones con el cosmólogo de Princeton Harold P. Robertson y con su ayudante, Peter G. Bergmann. En su artículo Einstein se propuso acabar de una vez por todas con la singularidad de Schwarzschild. En él concluía: «El resultado esencial de esta investigación es una comprensión clara de por qué las “singularidades de Schwarzschild” no existen en la realidad física». En otras palabras, los agujeros negros no podían existir.

Para demostrar su tesis, Einstein estudió un grupo de pequeñas partículas que se movían en órbitas circulares bajo la influencia de su gravitación mutua; una

descripción efectiva de un cúmulo estelar esférico. Se preguntó si un sistema así podría contraerse por efecto de su propia gravedad y formar una estrella estable de radio igual al radio de Schwarzschild. Y llegó a la conclusión de que aquello no podía ocurrir, dado que, con un radio ligeramente mayor, las estrellas del cúmulo tendrían que moverse a una velocidad superior a la de la luz para que la configuración fuera estable.

Sin embargo, aunque el razonamiento de Einstein era correcto, estaba fuera de lugar: una estrella en fase de contracción no tiene por qué ser estable al alcanzar el radio de Schwarzschild, ya que el astro sigue encogiéndose más allá de ese tamaño de todos modos. No deja de ser impresionante que, a sus 60 años, Einstein presentara en su artículo tablas de resultados numéricos, los cuales tuvo que haber obtenido con una regla de cálculo. Pero su artículo, al igual que las reglas de cálculo, no es hoy más que una reliquia histórica.

ESTRELLAS DE NEUTRONES Y AGUJEROS NEGROS

Mientras Einstein trabajaba en esta línea, algo completamente distinto ocurría en

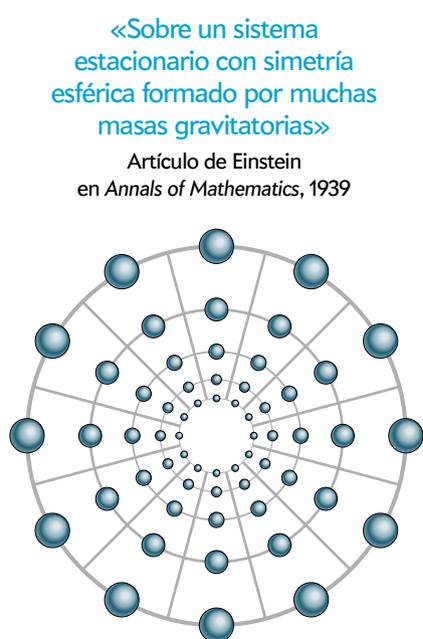
California, donde Oppenheimer y sus estudiantes estaban formulando la teoría moderna de los agujeros negros. Lo curioso de la investigación sobre agujeros negros es que se inspiró en una idea que, a la postre, se demostraría completamente falsa.

En 1932 James Chadwick había descubierto el neutrón, el componente neutro de los núcleos atómicos. Pronto se empezó a especular —sobre todo por parte de Fritz Zwicky, del Instituto de Tecnología de California, y por Lev D. Landáu, un brillante físico teórico soviético— que los neutrones podían proporcionar una solución alternativa a las enanas blancas. Según este razonamiento, cuando la presión gravitatoria fuera lo suficientemente grande, los electrones de la estrella podrían combinarse con los protones y convertirse en neutrones. (Zwicky incluso conjeturó que este proceso se daría en las explosiones de supernova; estaba en lo cierto, y hoy identificamos estas «estrellas de neutrones» como púlsares.) En aquel momento se desconocía el verdadero mecanismo que genera la energía de las estrellas ordinarias. Una solución consistía en imaginar que el núcleo de estas estaba ocupado por una estrella de neutrones;



1932

James Chadwick descubre el neutrón. Su existencia conduce a los investigadores a preguntarse si las «estrellas de neutrones» podrían constituir una alternativa a las enanas blancas.



1939

Conversaciones con colegas mueven a Einstein a intentar refutar la singularidad de Schwarzschild. En un artículo publicado en *Annals of Mathematics*, Einstein concluye que los agujeros negros no pueden llegar a formarse.



1939

A partir de la teoría de las enanas blancas y las estrellas de neutrones en fase de contracción, Robert Oppenheimer y su estudiante Hartland Snyder explican el proceso de formación de un agujero negro.

algo similar a la conclusión moderna de que en el interior de los cuásares se esconde un agujero negro.

Entonces se planteó la cuestión: ¿cuál era el equivalente al límite de masa de Chandrasekhar para las estrellas de neutrones? Calcularlo resultaba mucho más difícil que en el caso de las enanas blancas, ya que los neutrones interactúan entre sí por medio de la interacción nuclear fuerte, cuyos detalles no se entienden por completo. Al final, la gravedad se acaba imponiendo, pero el valor exacto de la masa límite depende de pormenores difíciles de considerar. Junto con sus estudiantes Robert Serber y George M. Volkoff, Oppenheimer publicó dos artículos al respecto y concluyó que la masa límite era similar a la obtenida por Chandrasekhar para las enanas blancas. El primero de esos trabajos apareció en 1938, y el segundo en 1939. (La verdadera fuente de la energía estelar, la fusión nuclear, fue descubierta en 1938 por Hans Bethe y Carl Friedrich von Weizsäcker. Pero pasaron unos años antes de que la idea fuese aceptada, por lo que los astrofísicos continuaron explorando otras teorías.)

Oppenheimer se preguntó entonces lo mismo que Eddington acerca de las enanas blancas: ¿qué ocurriría con una estrella en fase de contracción gravitatoria cuya masa excediera cualquiera de los límites? El rechazo de los agujeros negros por parte de Einstein en 1939 —que Oppenheimer y sus estudiantes ignoraban, pues estaban trabajando a 5000 kilómetros de distancia— era irrelevante. Oppenheimer, que no pretendía construir una estrella estable de radio igual al de Schwarzschild, quería saber qué sucedía cuando una estrella se contrajera más allá de su radio de Schwarzschild, y encargó a Snyder el cálculo del problema.

Para simplificar la cuestión, Oppenheimer sugirió a Snyder que omitiera la presión de degeneración, la posible rotación de la estrella y otras consideraciones técnicas similares. Su intuición le decía que tales factores no debían influir en lo esencial. Tales hipótesis fueron cuestionadas muchos años después por una nueva generación de investigadores que disponían de refinadas computadoras de alta velocidad (el pobre Snyder apenas contaba con una anticuada calculadora mecánica de sobremesa), pero Oppenheimer estaba en lo cierto: no influyen en nada esencial. Con esas simplificaciones, Snyder descubrió que,

Lo que ocurre con una estrella en fase de colapso depende del punto de vista del observador

sorprendentemente, lo que le ocurre a una estrella en fase de contracción gravitatoria depende del punto de vista del observador.

DOS VISIONES DEL COLAPSO

Consideremos en primer lugar un observador en reposo situado a una gran distancia de la estrella. Supongamos también que otro observador se encuentra en la superficie del astro (moviéndose conjuntamente con ella a medida que el objeto se contrae) y envía señales luminosas a su compañero en reposo. El observador lejano verá que esas señales de luz se desplazan gradualmente hacia el extremo rojo del espectro. Si la frecuencia de las señales la interpretamos como un reloj, el observador en reposo concluiría que el reloj del observador en movimiento se está retrasando poco a poco.

De hecho, al llegar al radio de Schwarzschild, el reloj se detendrá por completo. El observador en reposo deduciría así que la estrella necesita un tiempo infinito para contraerse hasta el radio de Schwarzschild. No podemos hablar de lo que ocurre después, porque, según el observador lejano, no hay ningún «después». En lo que concierne a este observador, la estrella «se congela» al alcanzar el radio de Schwarzschild. No en vano, hasta diciembre de 1967, cuando el físico John A. Wheeler acuñó en una conferencia la expresión «agujero negro», era frecuente en la bibliografía científica denominar estos objetos «estrellas congeladas».

Este estado congelado es el significado real de la singularidad de Schwarzschild. Como Oppenheimer y Snyder señalaron

en su trabajo, la estrella en contracción «tiende a encerrarse en sí misma y a cortar toda comunicación con un observador lejano; solo queda su campo gravitatorio». En otras palabras, se ha formado un agujero negro.

Pero ¿qué ocurre con el observador situado en la superficie de la estrella? Oppenheimer y Snyder señalaron que este verá las cosas de un modo muy distinto. Para él, el radio de Schwarzschild no significa nada especial: lo atravesará y llegará al centro de la estrella en cuestión de horas, según el tiempo medido por su propio reloj. Sin embargo, antes de eso sufrirá unas descomunales fuerzas de marea que lo destruirán.

Todo esto ocurría en 1939, justo antes de que nuestro propio mundo saltase en pedazos. Poco después, Oppenheimer participó en la guerra construyendo el arma más destructiva jamás imaginada por el ser humano. Nunca más volvió a ocuparse de los agujeros negros. Y hasta donde sabemos, Einstein tampoco lo hizo. Después de la guerra, en 1947, Oppenheimer ocupó la dirección del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, donde Einstein seguía de profesor. Conversaban de vez en cuando, pero nada indica que alguna vez lo hicieran sobre agujeros negros. Los nuevos avances al respecto no llegaron hasta los años sesenta, cuando el descubrimiento de cuásares, púlsares y fuentes compactas de rayos X dio nueva vida al misterioso sino de las estrellas. ■

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, agosto de 1996

EL AUTOR

Jeremy Bernstein es profesor emérito de física del Instituto de Tecnología Stevens, en Nueva Jersey. Ha escrito decenas de artículos de investigación, varias monografías técnicas y numerosos libros de divulgación científica.

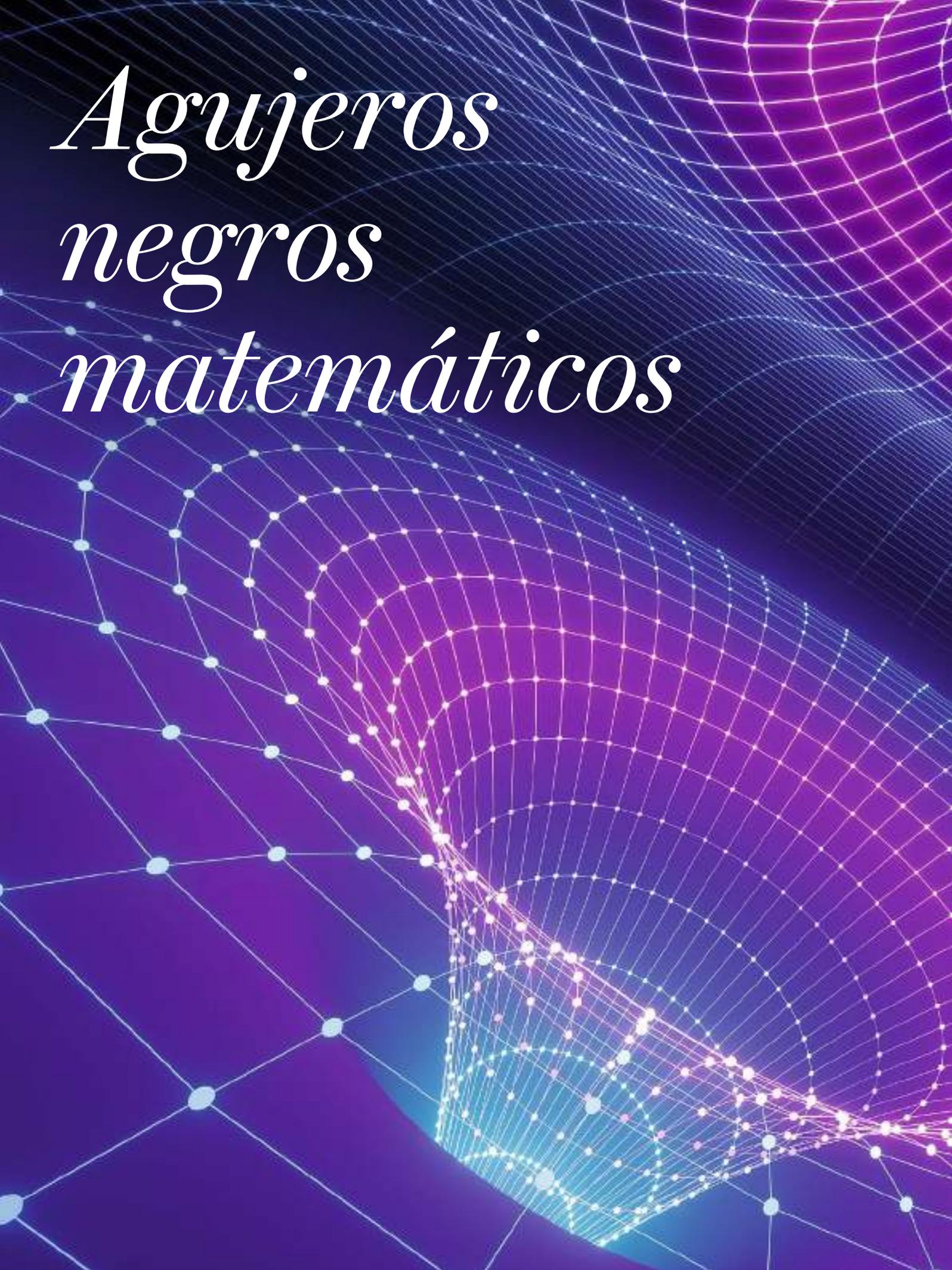
PARA SABER MÁS

Subtle is the Lord: The science and the life of Albert Einstein. Abraham Pais. Oxford University Press, 1982.

Dark stars: The evolution of an idea. Werner Israel en *300 years of gravitation*, dirigido por S. W. Hawking y W. Israel. Cambridge University Press, 1987.

Black holes. Jean-Pierre Luminet. Cambridge University Press, 1992.

Black holes and time warps. Kip Thorne. W. W. Norton, 1994.



*Agujeros
negros
matemáticos*



LOS AGUJEROS NEGROS Y LA PARADOJA DE LA INFORMACIÓN

¿Qué ocurre con la información contenida en la materia destruida por un agujero negro? En la búsqueda de una respuesta, los físicos avanzan hacia una teoría cuántica de la gravedad

Leonard Susskind



EN SÍNTESIS

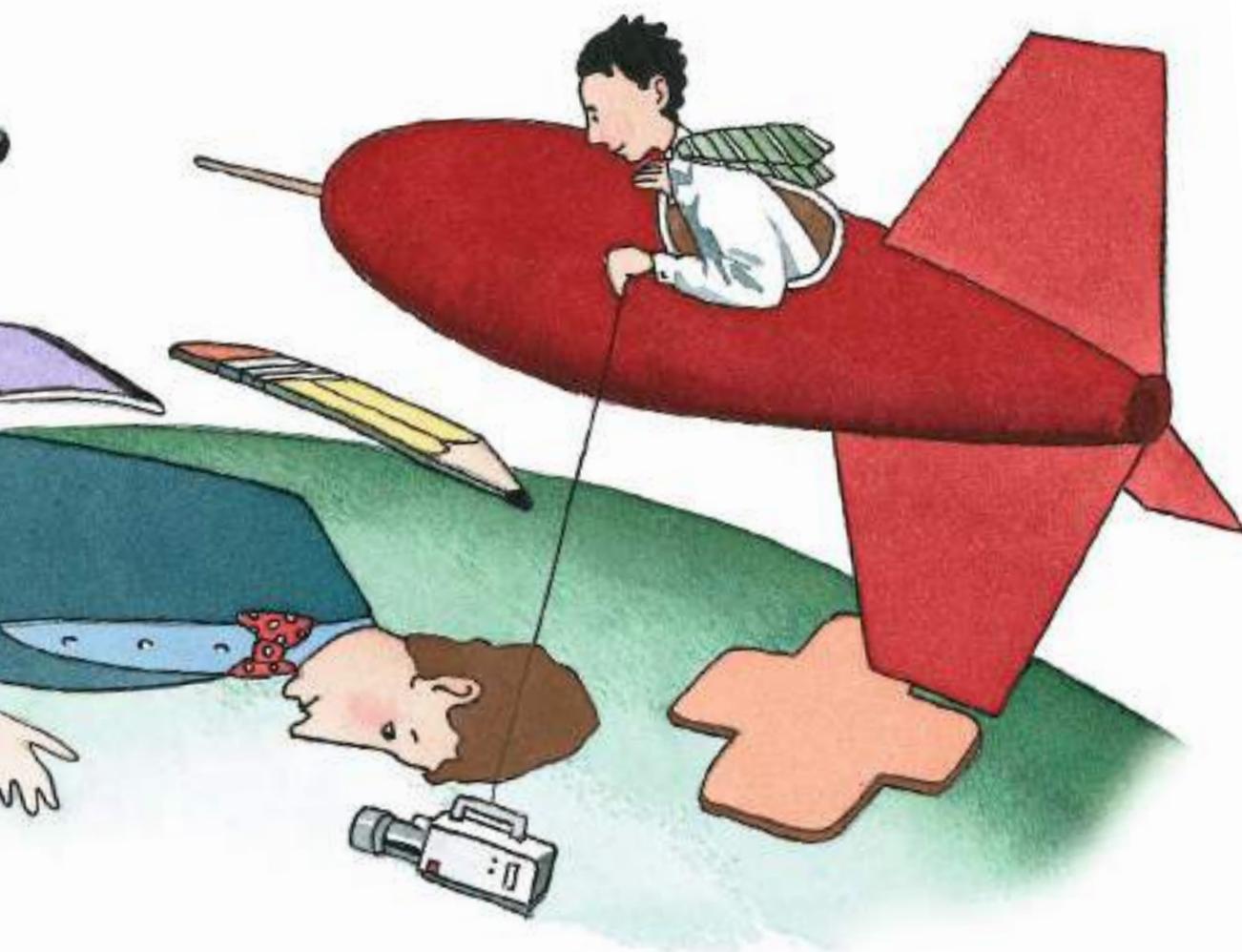
En los años setenta, Stephen Hawking argumentó que los agujeros negros destruyen para siempre la información contenida en la materia que cae en ellos. De ser el caso, ello violaría uno de los postulados básicos de la mecánica cuántica.

Una propuesta para resolver dicha paradoja es el llamado «principio de complementariedad». Este sostiene que la información que cae en un agujero negro nunca se pierde, si bien su destino depende del punto de vista del observador.

La teoría de cuerdas parece ofrecer un marco teórico en el que acomodar dicho principio. En particular, varios cálculos han conseguido explicar en términos de cuerdas cuánticas la entropía y la tasa de radiación de ciertos agujeros negros.

E

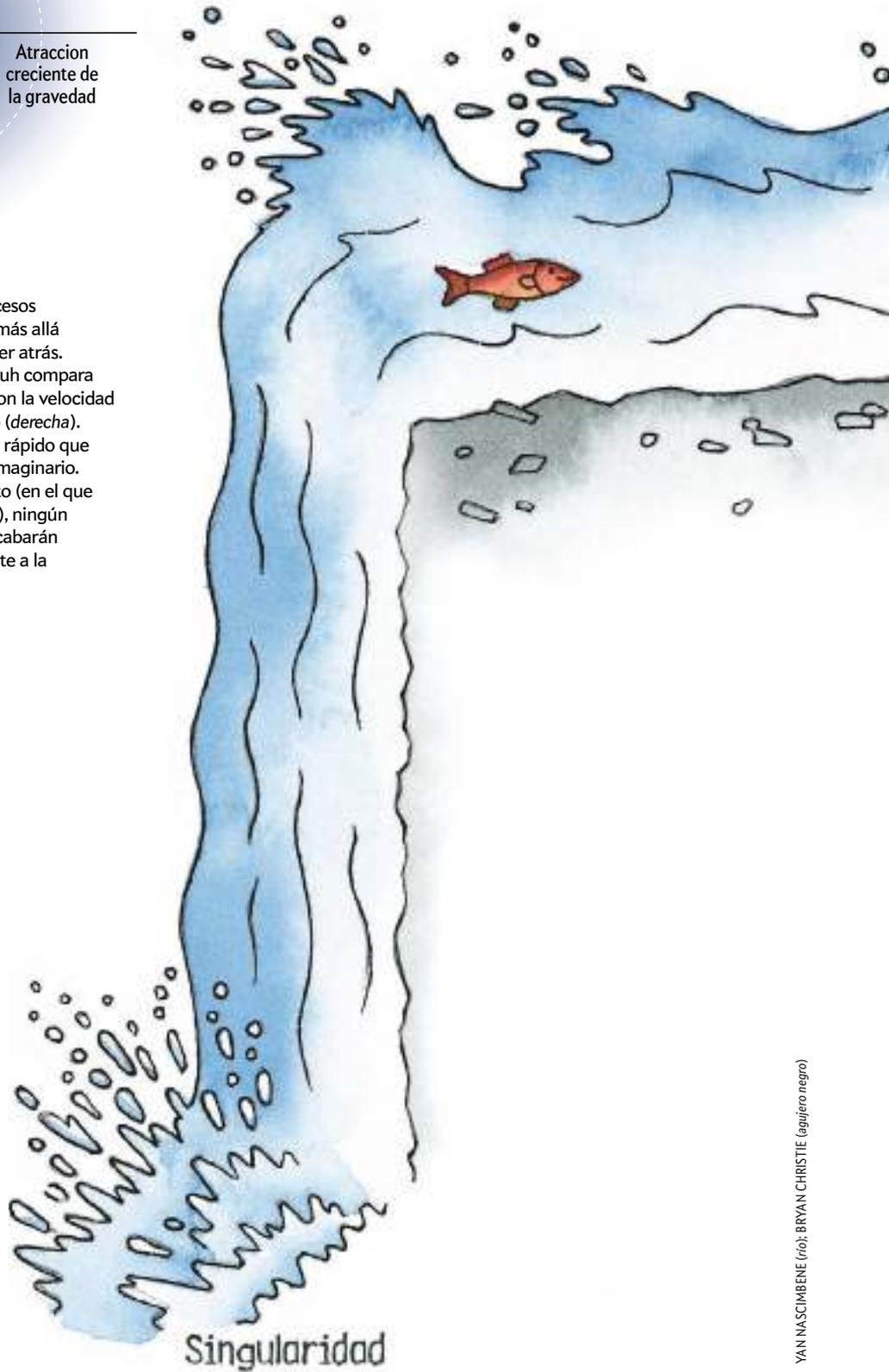
N UN LUGAR DEL ESPACIO SIDERAL, LA CÁPSULA DEL PROFESOR BOCAZAS HA SIDO sabotada por su rival, el profesor Estofado. En ella iba la única copia de una fórmula matemática de importancia vital para las generaciones futuras. Pero el diabólico plan urdido por Estofado de poner una bomba en la cápsula triunfa: la fórmula se desintegra en una nube de electrones, nucleones, fotones y algún que otro neutrino. Bocazas no puede creerlo. No guarda ninguna copia de la fórmula y ya no recuerda cómo derivarla.

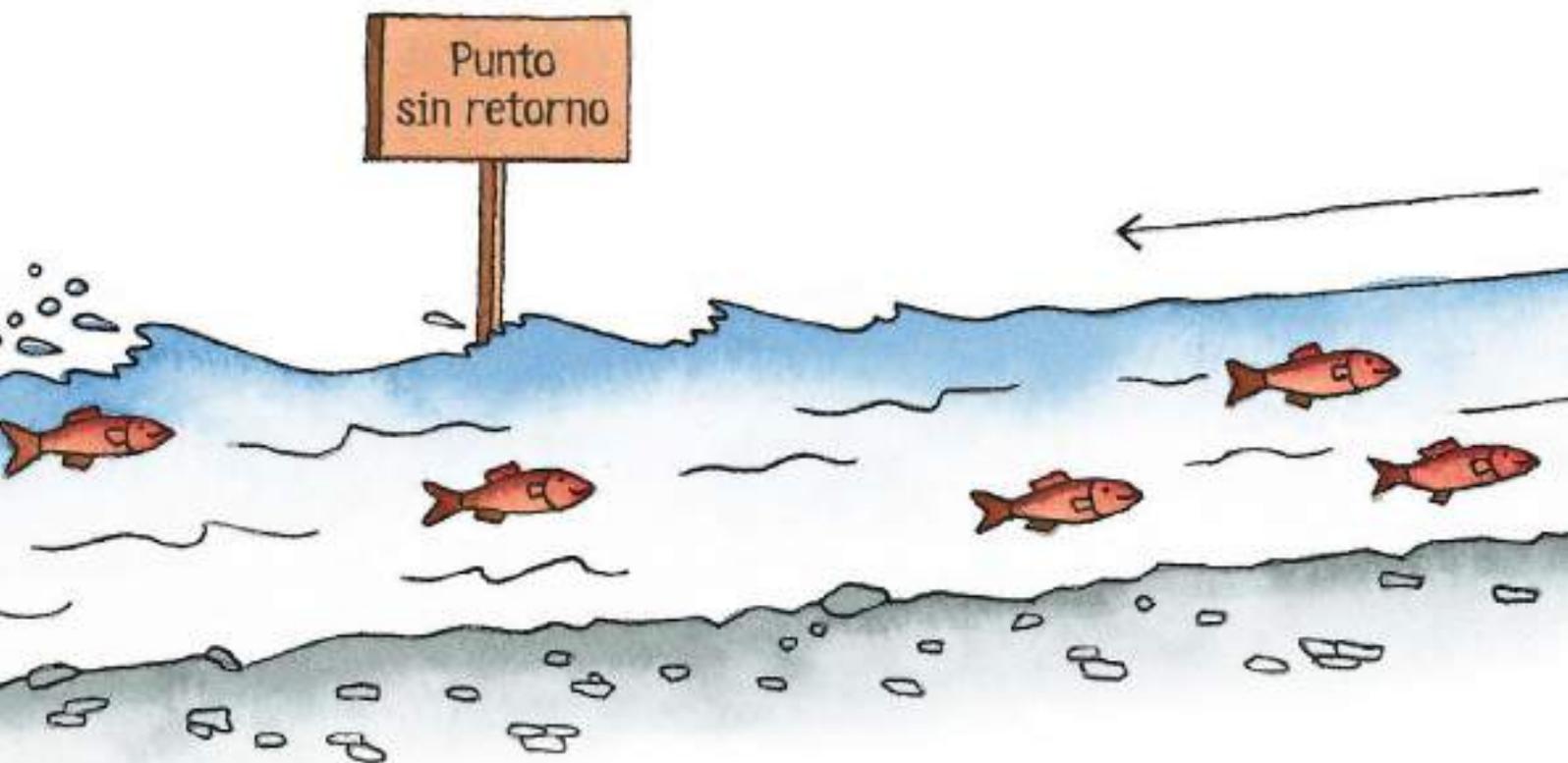


DESCRIPCIONES COMPLEMENTARIAS: Dos personajes ficticios, Bocazas y Estofado, comparan sus impresiones cuando el segundo cae en un agujero negro. Desde una nave espacial lejana, Bocazas ve cómo su compañero se mueve cada vez más despacio y se extiende a lo largo del horizonte de sucesos (*verde*), sin llegar nunca a atravesarlo. Estofado, sin embargo, no notará nada especial al llegar al horizonte y seguirá cayendo hacia el interior del agujero negro, donde acabará destrozado por las intensas fuerzas gravitatorias.



ANALOGÍA ACUÁTICA: El horizonte de sucesos de un agujero negro (*arriba*) es la superficie más allá de la cual nada, ni siquiera la luz, puede volver atrás. Una analogía debida al físico William G. Unruh compara el campo gravitatorio de un agujero negro con la velocidad creciente de un río que corre montaña abajo (*derecha*). A partir de cierto punto, el agua avanza más rápido que los *luzios*, los peces más veloces de este río imaginario. En consecuencia, una vez pasado dicho punto (en el que por lo demás no sucede nada extraordinario), ningún pez podrá regresar corriente arriba. Todos acabarán destrozados en la catarata (*abajo*), equivalente a la singularidad del agujero negro.





Más tarde, en el juicio, Bocazas alega que la fechoría de Estofado no tiene remedio: «¡Lo que ha hecho es irreversible! El muy sinvergüenza ha destruido mi fórmula y tiene que pagar. ¡Que le destituyan de su cargo de profesor!».

«Eso es ridículo», replica Estofado con calma. «La información no puede destruirse nunca. Todo es fruto de tu pereza, Bocazas. Lo único que tienes que hacer es ponerte manos a la obra, buscar cada una de las partículas de la ceniza e invertir sus movimientos. Las leyes de la naturaleza son simétricas con respecto al tiempo, por lo que, si todo se invierte, tu estúpida fórmula quedará reconstruida. Queda así demostrado más allá de toda duda que jamás hubiera podido destruir tu preciosa información.» Estofado gana el juicio.

La represalia de Bocazas no es menos diabólica. Un día que Estofado está fuera de la ciudad, le roba el ordenador con todos sus ficheros, incluidas sus recetas de cocina. Y para asegurarse de que Estofado nunca más disfrutará de su *matelote d'anguille*, Bocazas arroja el ordenador a un agujero negro.

En el juicio contra Bocazas, Estofado está fuera de sí: «Esta vez has ido demasiado lejos. No hay forma de recuperar mis datos. Están dentro del agujero negro, y si voy allí a sacarlos acabaré hecho trizas. Has destruido verdaderamente mi información».

«¡Protesto, señoría!», replica Bocazas. «Todo el mundo sabe que los agujeros negros acaban evaporándose. Si se espera lo suficiente, el agujero negro radiará toda su masa en forma de fotones y otras partículas. Es cierto que tal vez haya que aguardar 10^{70} años, pero, en principio, no hay ninguna diferencia con el caso de la bomba. Todo lo que Estofado tiene que hacer es invertir la trayectoria de esas partículas y su ordenador regresará del agujero negro.»

«No es cierto», replica Estofado. «Este caso es diferente. Mi receta desapareció tras la frontera del agujero negro, su horizonte de sucesos. Cuando algo lo cruza, nunca puede volver atrás a menos que se mueva más rápido que la luz, algo completamente

imposible. Y no hay forma de que los productos de la evaporación, que en realidad proceden de fuera del horizonte, puedan contener la información que había en mis recetas. Bocazas es culpable, señoría.»

El juez se halla confuso. «Necesitamos el testimonio de los peritos. Profesor Hawking, ¿qué tiene que decir?»

Toma la palabra Stephen Hawking, físico de la Universidad de Cambridge: «Estofado tiene razón, señoría. En muchas situaciones la información se desbarata y, desde un punto de vista práctico, se pierde. Si lanzamos una baraja al aire, el orden original de los naipes desaparece. Pero, en principio, si conociésemos todos los detalles sobre cómo se arrojaron las cartas, podríamos reconstruir la configuración inicial. Este es el principio de microrreversibilidad. Sin embargo, en mi artículo de 1976 demostré que dicho principio, que se cumple tanto en física clásica como en física cuántica, se viola en los agujeros negros. Dado que la información no puede salir del horizonte de sucesos una vez que lo ha atravesado, los agujeros negros constituyen una fuente fundamental de irreversibilidad en la naturaleza. Bocazas ha destruido realmente la información.»

El juez se dirige al acusado: «Tiene algo que alegar?». Bocazas llama al profesor Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht.

«El profesor Hawking se equivoca», comienza 't Hooft. «No creo que los agujeros negros violen las leyes aceptadas de la mecánica cuántica. Si así fuera, la teoría se nos iría de las manos. No es posible socavar la reversibilidad microscópica sin acabar también con el principio de conservación de la energía. Si Hawking tuviese razón, el universo se calentaría hasta alcanzar los 10^{31} grados en una fracción de segundo. Y, como tal cosa no ha ocurrido, tiene que haber una manera de sortear el problema.»

Otros veinte famosos físicos teóricos son llamados a declarar. Pero lo único que el juez puede sacar en limpio es que son incapaces de ponerse de acuerdo.

LA PARADOJA DE LA INFORMACIÓN

Bocazas y Estofado son, desde luego, personajes ficticios. Pero no lo son Hawking ni 't Hooft, ni tampoco la controversia acerca de qué ocurre con la información que cae en un agujero negro. La idea de Hawking de que los agujeros negros destruyen información ha puesto el foco en un conflicto potencialmente muy grave entre la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad general de Einstein. Dicho problema recibe el nombre de paradoja de la información.

Cuando algo cae en un agujero negro, no cabe esperar que vuelva afuera. Según Hawking, es imposible recuperar la información contenida en los átomos que constituían el objeto perdido. En cierta ocasión, Albert Einstein expresó su rechazo a la mecánica cuántica con las famosas palabras «Dios no juega a los dados». Pero, según Hawking, «Dios no solo juega a los dados, sino que a veces los arroja donde no los podemos ver». Esto es, en un agujero negro.

El problema que señala 't Hooft es que, si la información realmente se pierde, la mecánica cuántica se viene abajo. Pese a su célebre indeterminación, la mecánica cuántica controla el comportamiento de las partículas de una manera muy concreta:

Discernir si los agujeros negros violan o no las leyes cuánticas es clave para desentrañar la estructura última de las partículas

reversiblemente. Cuando una partícula interactúa con otra, puede que sea absorbida, reflejada o incluso que se desintegre en otras partículas. Sin embargo, siempre será posible reconstruir la configuración original de las partículas iniciales a partir de los productos finales.

Si los agujeros negros infringiesen esta regla, la energía podría crearse o destruirse, con lo que se vería amenazado uno de los pilares de la física. La estructura matemática de la mecánica cuántica garantiza la conservación de la energía y también la reversibilidad: perder una implica perder la otra. En los años ochenta, Thomas Banks, Michael Peskin y el autor de este artículo demostramos en Stanford que la pérdida de información en un agujero negro implica la generación de enormes cantidades de energía. Por eso, 't Hooft y yo creemos que la información que cae en un agujero negro debe, de una forma u otra, ser accesible para el mundo exterior.

Algunos físicos consideran que la pregunta sobre lo que ocurre en el interior de un agujero negro es excesivamente académica o incluso teológica, como contar cuántos ángeles caben en la cabeza de un alfiler. Pero no es así en absoluto: están en juego las futuras reglas de la física.

Los procesos que ocurren en el interior de un agujero negro no son más que ejemplos extremos de interacciones entre partículas elementales. A las energías que pueden alcanzar hoy los mayores aceleradores del mundo, la atracción gravitatoria entre partículas es insignificante. Pero, si una partícula pudiese acelerarse hasta alcanzar la llamada «energía de Planck», se

concentraría tanta energía en un volumen tan minúsculo que las fuerzas gravitatorias superarían a todas las demás. En las colisiones resultantes, la teoría de la relatividad general tendría tanta influencia como las leyes cuánticas.

Así pues, parece que la guía para construir nuestras teorías físicas futuras tendremos que buscarla en aceleradores de partículas planckianos. Sin embargo, físicos como Shmuel Nussinov, de la Universidad de Tel Aviv, han llegado a la conclusión de que tales máquinas deberían ser de proporciones cósmicas.

No obstante, las propiedades ya conocidas de la materia podrían revelarnos cómo es la física a la escala de Planck. Las partículas elementales exhiben una serie de características que nos hacen sospechar que, en el fondo, no son tan elementales: en su interior han de esconder una buena cantidad de maquinaria, la cual se regiría en última instancia por las leyes que gobiernen la física a la escala de Planck. En tal caso, podremos reconocer la combinación correcta de relatividad general y física cuántica —o gravedad cuántica— por su capacidad para explicar las propiedades observables de los electrones, los fotones, los quarks y los neutrinos.

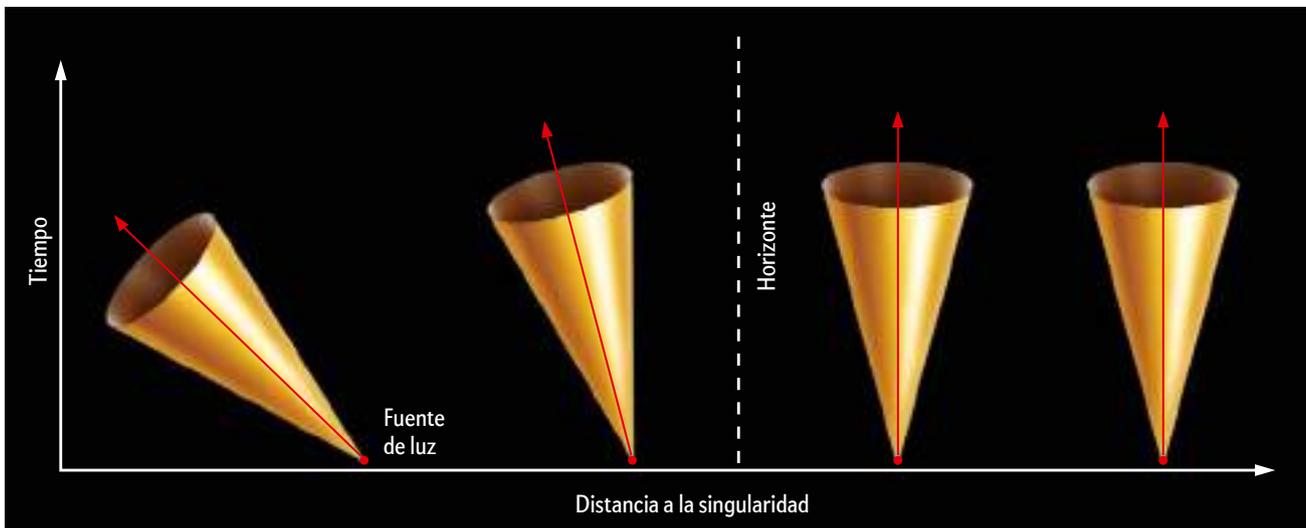
Es muy poco lo que sabemos a ciencia cierta sobre las colisiones de partículas a la escala de Planck. Pero hay algo que sí podemos concluir con fundamento. A tales energías, un choque frontal entre partículas concentraría tanta masa en un volumen tan reducido que acabaría formándose un pequeño agujero negro, el cual se evaporaría poco después. Por tanto, discernir si los agujeros negros violan o no las reglas de la mecánica cuántica es clave para desentrañar la estructura última de las partículas.

Un agujero negro se forma cuando, en un volumen muy reducido, se juntan tanta masa o energía que las fuerzas gravitatorias superan a todas las demás y el conjunto colapsa por efecto de su propio peso. En tal caso, la materia se comprime hasta ocupar una región inimaginablemente pequeña, o «singularidad», cuya densidad resulta ser formalmente infinita. Dicha singularidad se encuentra rodeada por una superficie imaginaria: el horizonte de sucesos. Para un agujero negro cuya masa fuese igual a la de una galaxia, el horizonte se hallaría a unos 10^{11} kilómetros del centro, una distancia similar a la que media entre el Sol y los confines más remotos del sistema solar. Para un agujero negro con la masa del Sol, el horizonte se sitúa a unos tres kilómetros. Y si el objeto tuviese la masa de una montaña pequeña, el horizonte estaría a unos 10^{-13} centímetros, el tamaño de un protón.

El horizonte divide el espacio en dos regiones, las cuales podemos considerar el exterior y el interior del agujero negro. Supongamos que Estofado, que está rastreando en las inmediaciones del agujero negro en busca de su ordenador, lanza una partícula en dirección opuesta al centro. Si no está demasiado cerca del horizonte, y si la partícula alcanza la velocidad suficiente, podrá superar la atracción gravitatoria del agujero negro y alejarse de él. Su probabilidad de escapar será mayor si su velocidad es máxima; es decir, si es igual a la de la luz. Sin embargo, si Estofado ha cruzado el horizonte, la atracción gravitatoria será tan intensa que ni siquiera un rayo de luz podrá escapar. El horizonte es el lugar en el que hay una especie de cartel —imaginario— con las palabras «punto sin retorno». Ninguna partícula o señal que se origine en el interior podrá cruzarlo y escapar al exterior.

HORIZONTE Y ENTROPÍA

Una analogía concebida por William G. Unruh, físico de la Universidad de la Columbia Británica y pionero en el estudio de la



DISTORSIÓN ESPACIOTEMPORAL: Los conos de luz (amarillo) describen la trayectoria espaciotemporal de los rayos luminosos emitidos desde un punto. Fuera del horizonte (derecha), los conos apuntan hacia arriba; es decir, hacia delante en el tiempo. Sin embargo, una vez pasado el horizonte (izquierda) los conos de luz se inclinan: ya no hay rayos de luz que puedan escapar hacia atrás y sus trayectorias acabarán en la singularidad.

mecánica cuántica de los agujeros negros, sirve para explicar la importancia del horizonte. Imagine un río que baja por una montaña y cuyo caudal corre cada vez más deprisa. Entre los peces que lo pueblan, los más rápidos son los llamados *luzios*. Sin embargo, en cierto lugar, la velocidad del agua iguala a la máxima velocidad que pueden alcanzar estos peces. Está claro que ninguno que se deje arrastrar más allá de ese punto podrá retroceder jamás: estará condenado a estrellarse en las rocas que se encuentran al final de las Cataratas de Singularidad, situadas más abajo. El luzio, sin embargo, no notará nada especial cuando cruce el punto de no retorno, pues en él no hay corrientes ni ondas de choque que le indiquen que lo ha sobrepasado.

¿Qué le sucede a Estofado, que en un descuido se ha acercado demasiado al horizonte del agujero negro? Al igual que el pez que se deja llevar por la corriente, en ese momento no siente nada especial: ni fuerzas vigorosas, ni sacudidas violentas ni luces de aviso. Se toma el pulso y la respiración y comprueba que siguen siendo normales. Para nuestro físico, el horizonte es idéntico a cualquier otro lugar.

Sin embargo, Bocazas, que se encuentra observando a Estofado desde una nave espacial situada a gran distancia del agujero negro, ve que su rival comienza a actuar de forma extraña. Para no perderlo de vista, ha tendido hasta el horizonte un cable con una cámara de vídeo y otros instrumentos de sondeo. A medida que Estofado cae hacia el agujero negro, su velocidad aumenta y se aproxima a la de la luz. Einstein halló que, si dos personas se mueven muy deprisa una con respecto a la otra, cada una verá que el reloj de la segunda se retrasa. Además, un reloj que se halle muy cerca de un objeto de gran masa también avanzará más despacio que otro que se encuentre lejos. Así pues, lo que Bocazas ve es a un Estofado cada vez más aletargado: mientras cae, le enseña amenazante el puño cerrado, pero sus movimientos se van haciendo más y más lentos hasta detenerse por completo. Así pues, y aunque Estofado acabará cruzando el horizonte, Bocazas nunca le verá llegar hasta él.

En realidad, Bocazas no solo verá que Estofado se mueve cada vez más despacio. Verá también cómo su cuerpo se aplasta hasta quedar convertido en una fina capa. Einstein también nos

enseñó que, si dos personas se mueven a gran velocidad una con respecto a la otra, a cada una le parecerá que la otra se aplatada en la dirección del movimiento. Y, más extraño aún, Bocazas debería ver toda la materia que alguna vez hubiese caído en el agujero negro —incluido el ordenador de Estofado— aplanada y congelada en el horizonte. Para un observador externo, toda la materia sufre una dilatación temporal relativista: el agujero negro es en realidad un inmenso vertedero de materia aplastada en el horizonte. No obstante, Estofado no verá nada extraño hasta mucho más tarde, cuando llegue a la singularidad y sea destrozado por el intenso campo gravitatorio.

A lo largo de los años, los teóricos han descubierto que, desde el exterior, las propiedades de un agujero negro pueden describirse mediante una membrana matemática definida sobre el horizonte. Dicha capa posee varias propiedades físicas, como conductividad eléctrica y viscosidad. Pero la más sorprendente de todas quizá sea la que a principios de los años setenta propusieron Hawking, Unruh y Jacob D. Bekenstein, de la Universidad Hebrea de Jerusalén. Hallaron que, como consecuencia de las leyes cuánticas, un agujero negro —en concreto, su horizonte— se comporta como si contuviese calor. El horizonte es una capa de material caliente de algún tipo.

La temperatura del horizonte depende del lugar desde el que la midamos. Supongamos que una de las sondas que Bocazas ha conectado a su cable es un termómetro. Lejos del horizonte, verá que la temperatura es inversamente proporcional a la masa del agujero negro. Si esta es similar a la del Sol, dicha temperatura, conocida como «temperatura de Hawking», será de unos 10^{-8} grados, mucho más fría que el espacio intergaláctico. Sin embargo, a medida que el termómetro de Bocazas se acerque al horizonte, comenzará a registrar temperaturas mayores. A un centímetro de distancia, marcará alrededor de una milésima de grado, y a un diámetro nuclear, 10.000 millones de grados. Al final, la temperatura será tan elevada que ningún termómetro imaginable podría medirla.

Los objetos calientes poseen, además, un desorden intrínseco: la entropía. Esta se halla relacionada con la cantidad de información que puede almacenar un sistema. Piense en una red



¿POSIBLE SOLUCIÓN? Según la teoría de cuerdas, las partículas elementales son en realidad pequeños objetos unidimensionales cuyos distintos modos de vibración (*ilustraciones*) se corresponden con los diferentes tipos de partículas. Varios cálculos han demostrado que estos diminutos objetos cuánticos son capaces de codificar la información almacenada en un agujero negro.

cristalina con N nodos, cada uno de los cuales puede albergar un átomo o ninguno. Cada nodo porta de esta manera un bit de información: la correspondiente a si hay o no un átomo en él. La red consta de N bits, por lo que almacena N unidades de información. Por cada una hay dos opciones, de modo que el sistema puede encontrarse en 2^N estados distintos. La entropía se define como el logaritmo del número de estados posibles. Viene a ser igual a N , el mismo número que cuantifica la capacidad del sistema de portar información.

Bekenstein halló que la entropía de un agujero negro es proporcional al área del horizonte. La fórmula precisa, derivada por Hawking, predice una entropía de $3,2 \times 10^{64}$ por centímetro cuadrado de horizonte. Sea cual sea el sistema físico que encarne los bits de información asociados, deberá ser sumamente pequeño y denso, con dimensiones lineales del orden de $1/10^{20}$ veces el tamaño del protón. Además, habrá de tener propiedades muy especiales para que Estofado no se percate de su existencia al cruzar el horizonte.

En los años setenta, el descubrimiento de la entropía y demás propiedades térmicas de los agujeros negros condujo a Hawking a una conclusión muy interesante. Como los demás cuerpos calientes, un agujero negro deberá radiar energía y partículas hacia el espacio circundante. La radiación procede de la región del horizonte, por lo que no viola la regla que dicta que nada puede salir de su interior. Sin embargo, esa radiación hace que el agujero negro pierda energía y masa. Así que, con el tiempo, cualquier agujero negro acabará radiando toda su masa hasta extinguirse por completo, o «evaporarse».

Todo esto es bien conocido por los relativistas desde hace años. La verdadera controversia nace cuando, siguiendo a Hawking, nos preguntamos por el destino de la información de la materia que cayó en el agujero negro durante y después de su formación. ¿Se halla codificada en los productos de evaporación (por más que se haya desorganizado por completo) o se pierde para siempre tras el horizonte?

Estofado, que siguió su ordenador hasta el interior del agujero negro, insistiría en que la información traspasó el horizonte, donde se perdió para el mundo exterior. Este es, en pocas palabras, el argumento de Hawking. Pero Bocazas podría replicar: «Vi que el ordenador caía hacia el horizonte, pero jamás llegué a ver que lo atravesase; la temperatura y la radiación eran tan elevadas que le perdí la pista. Creo que el ordenador se desintegró y que

su energía y su masa se convirtieron en radiación térmica. Y la coherencia interna de la mecánica cuántica exige que esa energía de evaporación lleve consigo toda la información que había en el ordenador». Esta es la posición que adoptamos 't Hooft y yo.

EL PRINCIPIO DE COMPLEMENTARIEDAD

¿Es posible que tanto Bocazas como Estofado tengan razón? ¿Podría ocurrir que las observaciones de Bocazas sean compatibles con la hipótesis de que Estofado y su ordenador se convirtieron en energía térmica que, antes de llegar al horizonte, fue radiada al espacio, y que aun así Estofado no vea nada especial hasta mucho después, cuando se encuentre con la singularidad? La idea de que ambos puntos de vista podrían no ser contradictorios, sino complementarios, se conoce con el nombre de principio de complementariedad de los agujeros negros, y fue propuesta en Stanford por Lárus Thorlacius, John Uglum y el autor de este artículo. El trabajo de 't Hooft contiene ideas muy similares. La complementariedad de los agujeros negros es un nuevo principio de relatividad. En virtud de la teoría de la relatividad especial, aunque los distintos observadores discrepen acerca de cuánto miden las reglas y cuánto duran los intervalos de tiempo, los sucesos ocurren en localizaciones espaciotemporales bien definidas. El principio de complementariedad de los agujeros negros prescinde incluso de esto último.

La manera en que este principio entra en juego queda más clara si se lo aplicamos a las partículas elementales. Supongamos que Bocazas, cuyo cable lleva además un potente microscopio, observa la caída de un átomo hacia el horizonte. Al principio lo verá como un núcleo rodeado por una nube de carga negativa: los electrones de la nube se mueven tan deprisa que forman una mancha borrosa. Pero, a medida que se acerca al agujero negro, parecerá que los movimientos internos del átomo se frenan y que los electrones se tornan visibles. Los protones y los neutrones del núcleo siguen moviéndose con rapidez y su estructura es aún difusa. Un poco después, los electrones se congelan y los protones y los neutrones comienzan a dejarse ver. Pasa el tiempo y aparecen los quarks que constituyen esas partículas. (Estofado, que cae con el átomo, no percibe tales cambios.)

Muchos físicos creen que las partículas elementales se componen de constituyentes aún menores. Todavía no disponemos de una teoría definitiva de esta maquinaria interna, pero hay una candidata prometedora: la teoría de cuerdas. Según esta,

una partícula elemental no se parece a un punto, sino a una diminuta goma elástica que puede vibrar de muchos modos (con muchas «notas»), cada uno de los cuales corresponde a un tipo de partícula elemental diferente.

Aquí vendrá bien otra comparación. Cuando un colibrí bate sus alas, no podemos verlas porque las mueve demasiado deprisa. No obstante, si tomamos una fotografía de alta velocidad, sí que las veremos, con lo que el pájaro nos parecerá mayor. Si un colibrí cae en el agujero negro, Bocazas irá viendo cómo sus alas toman forma a medida que el ave se acerca al horizonte. Parecerá que la vibración se detiene y que el animal crece. Supongamos ahora que las plumas del ala se agitan aún más deprisa. También ellas acabarán siendo visibles, con lo que el tamaño aparente del pájaro aumentará aún más. De hecho, Bocazas verá que el colibrí se agranda sin cesar. Pero Estofado, que cae con él, no observará nada extraño.

Como las alas del colibrí, las oscilaciones de la cuerda suelen ser demasiado rápidas para detectarlas. Una cuerda es diminuta, con un tamaño unas $1/10^{20}$ veces el de un protón. Pero, a medida que va cayendo en el agujero negro, sus vibraciones se tornan más lentas y van dejándose ver cada vez mejor. Los cálculos efectuados en Stanford por Amanda Peet, Thorlacius, Arthur Mezhlumian y el autor de este artículo han desentrañado el comportamiento de la cuerda a medida que sus modos de mayor frecuencia se congelan. La cuerda se extiende y crece, tal y como sucedería si se viese bombardeada por partículas y radiación en un entorno muy caliente. Tras un tiempo relativamente corto, la cuerda y toda su información se habrán extendido a lo largo de todo el horizonte.

Esta idea vale para toda materia que caiga en un agujero negro, ya que, según la teoría de cuerdas, todo está hecho en última instancia de cuerdas. Cada cuerda elemental se extiende y se superpone a las demás hasta que una densa maraña cubre el horizonte. Cada minúsculo segmento de cuerda, con sus 10^{-33} centímetros de diámetro, hace las veces de un bit. Así pues, las cuerdas ofrecen un medio para que la superficie del agujero negro albergue la inmensa cantidad de información que cae en él durante y tras su nacimiento.

TEORÍA DE CUERDAS

Parece por tanto que el horizonte está hecho de toda la sustancia del agujero negro, resuelta en una gigantesca maraña de cuerdas. La información, por lo que se refiere a un observador externo, no cayó en realidad nunca en el agujero negro: se detuvo en el horizonte y fue luego radiada desde allí. La teoría de cuerdas ofrece una realización concreta del principio de complementariedad de los agujeros negros, y, con ello, una solución a la paradoja de la información. Para los observadores externos (es decir, para nosotros), la información no se pierde nunca. Y lo que es más importante: según parece, los bits del horizonte son diminutos segmentos de cuerda.

La descripción completa de la evolución de un agujero negro de principio a fin trasciende las posibilidades técnicas con las que cuentan hoy en día los teóricos de cuerdas. Con todo, varios resultados ya han dado cuerpo a estas ideas. Los agujeros negros más fáciles de analizar matemáticamente son los llamados «extremos». Los agujeros negros carentes de carga eléctrica se evaporan hasta que radian toda su masa. Sin embargo, aquellos que poseen carga eléctrica no: su evaporación cesa cuando la atracción gravitatoria compensa la repulsión electrostática de lo que tengan dentro. El objeto estable que resulta de este proceso recibe el nombre de agujero negro extremo.

En 1995, Ashoke Sen, del Instituto Tata de Investigaciones Fundamentales de la India, demostró que, para ciertos agujeros negros extremos, el número de bits predicho por la teoría de cuerdas explicaba exactamente la entropía calculada a partir del área del horizonte. Esta coincidencia fue el primer respaldo sólido a la idea de que los agujeros negros son compatibles con las cuerdas cuánticas.

Sin embargo, los agujeros negros considerados por Sen eran microscópicos. Poco después, Andrew Strominger, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y Cumrun Vafa, de Harvard, así como Curtis Callan y Juan Maldacena, por entonces ambos en la Universidad de Princeton, generalizaron este análisis a agujeros negros macroscópicos: objetos lo suficientemente grandes para que Estofado caiga en ellos incólume. Una vez más, la concordancia en el valor de la entropía fue completa.

Debemos un cálculo aún más apasionante a dos grupos: el formado por Sumit Das, del Instituto Tata, y Samir Mathur, del Instituto de Tecnología de Massachusetts; y el de Avinash Dhar, Gautam Mandal y Spenta R. Wadia, del Instituto Tata. Estos investigadores estudiaron el proceso por el que un agujero negro casi extremo, con cierto exceso de energía, emite radiación. Como resultado, obtuvieron que teoría de cuerdas explica por completo la radiación de Hawking. Así pues, al igual que la mecánica cuántica describe la manera en que un átomo radia energía electromagnética, parece que la teoría de cuerdas explica la radiación de un agujero negro.

En mi opinión, la mecánica cuántica acabará demostrándose compatible con la teoría de la gravedad. Estas dos grandes ramas de la física se están fundiendo en una teoría cuántica de la gravitación basada en la teoría de cuerdas. La paradoja de la información ha desempeñado un papel extraordinario en esta revolución. Y aunque Estofado nunca lo admitiría, es probable que Bocazas tenga razón y que el mundo no haya perdido para siempre su receta del *matelote d'anguille*. 

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, junio de 1997

EL AUTOR

Leonard Susskind es físico teórico de Stanford y uno de los creadores de la teoría de cuerdas. Ha destacado por sus aportaciones pioneras en física de partículas elementales, teoría cuántica de campos, cosmología, gravedad cuántica y física de los agujeros negros.

PARA SABER MÁS

Difficulties for the evolution of pure states into mixed states. Thomas Banks, Leonard Susskind y Michael Peskin en *Nuclear Physics B*, vol. 244, págs. 125-134, septiembre de 1984.

The stretched horizon and black hole complementarity. Leonard Susskind, Lárus Thorlacius y John Uglum en *Physical Review D*, vol. 48, págs. 3743-3761, octubre de 1993.

Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy. Andrew Strominger y Cumrun Vafa en *Physics Letters B*, vol. 379, págs. 99-104, junio de 1996.

Agujeros negros y tiempo curvo: El escandaloso legado de Einstein. Kip Thorne. Editorial Crítica, 2010.

Historia del tiempo: Del big bang a los agujeros negros. Stephen W. Hawking. Editorial Crítica, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

La mecánica cuántica de los agujeros negros. Stephen Hawking en *IyC*, marzo de 1977. Reeditado para «Grandes ideas de la física», colección *Temas de IyC* n.º 80, 2015.

AGUJEROS NEGROS MATEMÁTICOS

LA INFORMACIÓN EN EL UNIVERSO HOLOGRÁFICO

Los resultados teóricos relativos a la entropía de los agujeros negros llevan a concluir que el universo podría ser un inmenso holograma

Jacob D. Bekenstein

EN SÍNTESIS

La física de los agujeros negros indica que, en contra de lo que cabría pensar, la cantidad de información que puede almacenar una región del espacio no está limitada por su volumen, sino por el área de la superficie que la rodea.

Tales consideraciones han llevado a la formulación del «principio holográfico»: la idea de que toda la física de nuestras tres dimensiones espaciales sería equivalente a otro conjunto de leyes que operan en una superficie vasta y lejana.

Ya se conocen algunos ejemplos concretos de esta correspondencia. Los físicos teóricos esperan que tales consideraciones generales sobre la manera en que el universo almacena la información les permitan formular una teoría última de la realidad.



S

I PREGUNTAMOS DE QUÉ SE COMPONE EL MUNDO FÍSICO, SE NOS RESPONDERÁ QUE «de materia y energía». Pero quien sepa algo de ingeniería, biología y física nos citará también la información como elemento no menos importante. El robot de una fábrica de automóviles es de metal y plástico, pero no hará nada útil sin abundantes instrucciones que le digan qué pieza ha de soldar a otra. Un ribosoma de una célula se construye con aminoácidos y se alimenta con la energía generada por la conversión del ATP en ADP, pero no podría sintetizar proteínas sin la información suministrada por el ADN del núcleo celular. Un siglo de investigaciones nos ha enseñado que la información desempeña una función esencial en los sistemas y procesos físicos. Hoy, una línea de pensamiento iniciada por John A. Wheeler, de la Universidad de Princeton, contempla el mundo físico como hecho de información; la energía y la materia serían accesorias.

Este punto de vista invita a reconsiderar cuestiones fundamentales. La capacidad de almacenamiento de información de los discos duros y demás dispositivos de memoria ha ido creciendo a toda velocidad. ¿Cuándo se parará este progreso? ¿Cuál es la capacidad de información última de un dispositivo que pese, digamos, menos de un gramo y ocupe un centímetro cúbico (el tamaño del chip de un ordenador)? ¿Cuánta información se necesita para describir todo un universo? ¿Podría tal descripción caber en la memoria de un ordenador? ¿Podríamos, tal como escribió William Blake, «ver el mundo en un grano de arena», o tales palabras han de tomarse solo como una licencia poética?

Varios desarrollos recientes de la física teórica contestan algunas de estas preguntas, y las respuestas podrían constituir hitos importantes hacia la teoría definitiva de la realidad. Del estudio de las misteriosas propiedades de los agujeros negros se han deducido límites absolutos que acotan la información que cabe en una región del espacio o en una cantidad de materia y energía. Resultados relacionados sugieren que nuestro universo, en el que percibimos tres dimensiones espaciales, podría en realidad estar «escrito» en una superficie bidimensional, como un holograma. Nuestra percepción ordinaria de un mundo tridimensional resultaría en tal caso una profunda ilusión, una de dos maneras alternativas de ver la realidad. Quizás un grano de arena no abarque el mundo, pero sí lo haga una pantalla plana.

DOS ENTROPÍAS

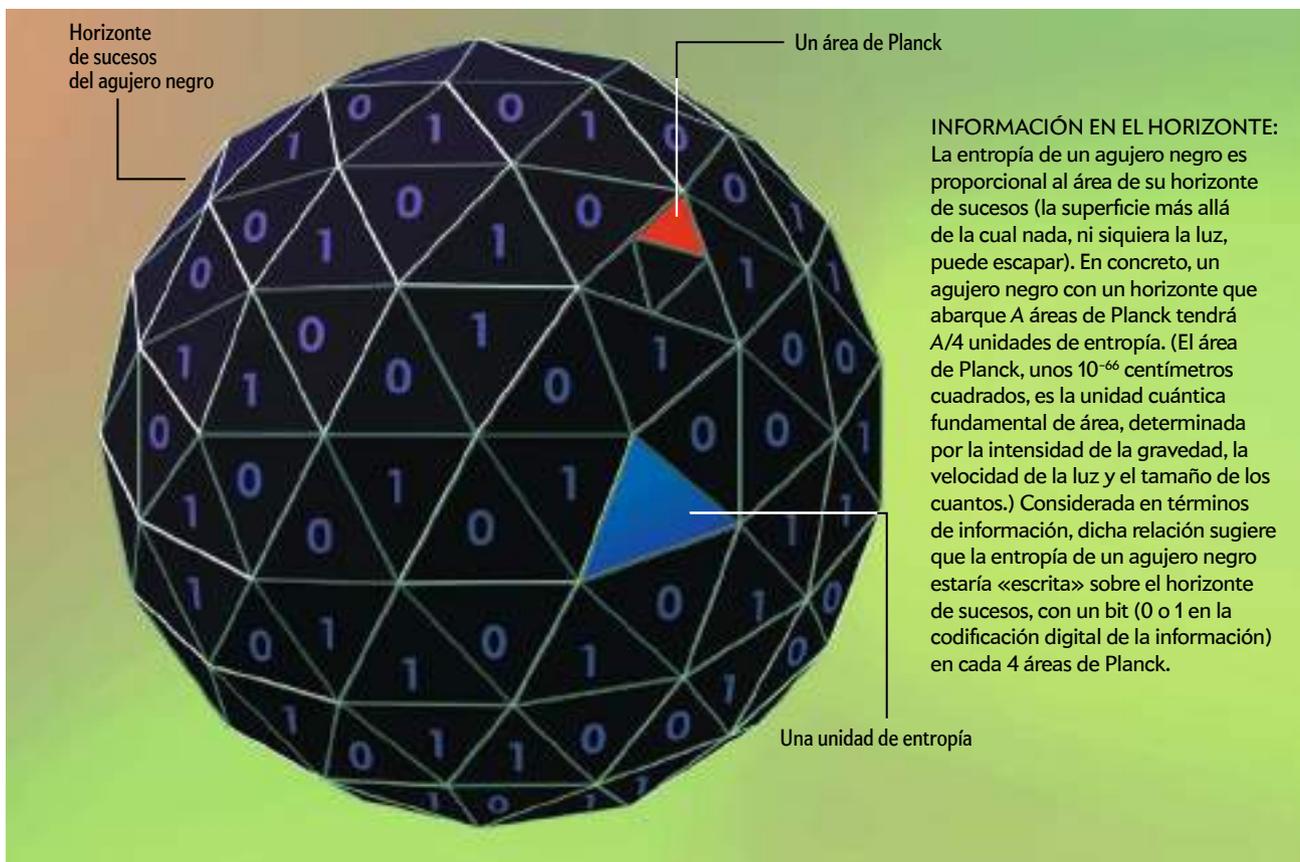
La teoría formal de la información nació con los artículos publicados en 1948 por el matemático estadounidense Claude Shannon. En ellos enunció la medida de información más ampliamente usada hoy en día: la entropía. La entropía había sido hasta entonces un concepto central de la termodinámica, la rama de la física que se ocupa del calor. Suele decirse que la entropía termodinámica expresa el desorden de un sistema físico. En 1877, el físico austríaco Ludwig Boltzmann la caracterizó como el número de estados microscópicos en los que pueden hallarse las partículas que componen un trozo de materia, de tal forma que este siga pareciendo el mismo desde un punto de vista macroscópico. En el caso del aire de una habitación, contaríamos

las maneras en que podrían distribuirse y moverse en ella las moléculas del gas.

Cuando Shannon buscó una manera de cuantificar la información contenida en un mensaje, la lógica le condujo a una fórmula que tenía el mismo aspecto que la de Boltzmann. La entropía de Shannon de un mensaje es el número de dígitos binarios, o bits, necesarios para codificarlo. No nos ilustra acerca del valor de la información, que depende mucho del contexto. Pero en cuanto medida objetiva de la cantidad de información, la entropía de Shannon ha sido enormemente útil en ciencia y tecnología. El diseño de todos los aparatos de comunicación modernos —desde los teléfonos móviles hasta los módems y los reproductores de discos compactos— se basa en la entropía de Shannon.

La entropía termodinámica y la de Shannon son conceptualmente equivalentes: el número de configuraciones que se cuentan en la entropía de Boltzmann refleja la cantidad de información de Shannon que se necesitaría para realizar cualquier configuración determinada. Tales entropías presentan, sin embargo, dos diferencias principales. En primer lugar, la entropía termodinámica que emplean un químico o un experto en refrigeración se expresa en unidades de energía dividida por temperatura, mientras que la entropía de Shannon aplicada por un ingeniero de telecomunicaciones se da en bits, magnitud que carece de dimensiones. Esta diferencia no es más que una cuestión de convenciones.

Sin embargo, cuando se expresan en unidades comunes, los valores típicos de ambas entropías difieren enormemente en su magnitud. Un microchip de silicio con un gigaocteto de datos posee una entropía de Shannon de unos 10^{10} bits, muchísimo menor que la entropía termodinámica del chip, unos 10^{23} bits a temperatura ambiente. Esta discrepancia se debe a que una y otra entropía se calculan para grados de libertad diferentes. Un grado de libertad es cualquier cantidad que pueda cambiar, como una coordenada que especifica la localización de una partícula o una componente de su velocidad. La entropía de Shannon del chip solo atiende al estado global de cada pequeño transistor impreso en el cristal de silicio: este representa un 0 o un 1, un único grado de libertad binario. La entropía termodinámica, por el contrario, depende del estado de todos y cada uno de los miles



de millones de átomos (con sus electrones en órbita) que forman cada transistor. A medida que la miniaturización nos acerca al día en que cada átomo almacene un bit de información, la entropía útil de Shannon del mejor microchip del momento se irá acercando a la entropía termodinámica del material. Cuando ambas entropías se calculan para los mismos grados de libertad, resultan iguales.

¿Cuáles son los grados de libertad fundamentales? Al fin y al cabo, los átomos se componen de electrones y núcleos; los núcleos, de protones y neutrones, y estos, de quarks. Muchos consideran hoy en día que los electrones y los quarks son excitaciones de cuerdas, las cuales serían los entes fundamentales de la naturaleza. Pero las vicisitudes de un siglo de revelaciones en física nos han curado contra el dogmatismo. Podría haber más niveles de estructura en nuestro universo que los que sueña la física actual.

No se puede calcular la capacidad máxima de información de un pedazo de materia o, de manera equivalente, su verdadera entropía termodinámica, sin conocer la naturaleza de los constituyentes últimos de la materia, su nivel de estructura más profundo, al que llamaremos «nivel X». (Esta ambigüedad no causa problemas a la termodinámica práctica, la de un motor de coche, por ejemplo, ya que es posible ignorar los quarks del interior del átomo, pues estos no cambian de estado en las moderadas condiciones del motor.) Dado el vertiginoso progreso de la miniaturización, juguemos a imaginar un día en que los quarks sirviesen para almacenar información, quizás un bit cada uno. ¿Cuánta información cabría entonces en nuestro cubo de un centímetro de lado? ¿Y cuánta si lográsemos controlar las cuerdas, o niveles más profundos con los que ni siquiera soñamos? Sorprendentemente, los desarrollos en la

física de la gravitación de las últimas décadas han proporcionado algunas respuestas claras a preguntas que parecían tan inabordables.

TERMODINÁMICA Y AGUJEROS NEGROS

Protagonistas de estos avances son los agujeros negros. Estos objetos son una consecuencia de la relatividad general, la teoría geométrica de la gravitación establecida por Albert Einstein en 1915. Según ella, la gravedad surge de la curvatura del espaciotiempo. A la inversa, la causa de la curvatura es la presencia de materia y energía. Según las ecuaciones de Einstein, una concentración lo suficientemente densa de materia o energía curva tanto el espaciotiempo que lo «rasga» y hace que se forme un agujero negro. Las leyes de la relatividad prohíben que aquello que caiga en un agujero negro pueda salir; por lo menos, dentro de la formulación clásica (es decir, no cuántica) de la física. El punto de no retorno, el horizonte de sucesos, es de crucial importancia. En el caso más simple este es una esfera, la cual será mayor cuanto más masa tenga el agujero negro.

Es imposible determinar lo que hay dentro de un agujero negro, ya que ninguna información detallada puede emerger del horizonte y escapar al mundo exterior. Con todo, un pedazo de materia deja algunos rastros cuando desaparece en un agujero negro. Su energía (contamos cualquier masa como energía, de acuerdo con la fórmula de Einstein $E = mc^2$) queda permanentemente reflejada en un incremento de la masa del agujero negro. Si la materia que absorbe orbitaba a su alrededor, el momento angular correspondiente se añadirá al momento angular del agujero negro. Tanto la masa como el momento angular del agujero negro son medibles gracias a sus efectos en el espaciotiempo de los alrededores del objeto. Así pues, los agujeros negros respetan

las leyes de conservación de la energía y del momento angular. En cambio, parece como si otra ley fundamental, la segunda ley de la termodinámica, se violase.

La segunda ley de la termodinámica compendia algo conocido por todos: que la mayoría de los procesos naturales son irreversibles. Una taza de té cae de la mesa y se rompe; nadie ha visto jamás que los trozos salten del suelo y recompongan la taza. La segunda ley de la termodinámica prohíbe el proceso inverso. Establece que la entropía de un sistema físico aislado nunca decrece: en el mejor de los casos permanecerá constante y, en general, aumentará. Esta ley es esencial para la fisicoquímica y la ingeniería, y probablemente sea la ley física que más se tiene en cuenta fuera de la propia física.

Tal y como explicó Wheeler, con la materia que cae en un agujero negro desaparece también su entropía, lo que parece violar la segunda ley. Una idea para resolver este problema llegó en 1970, cuando Demetrios Christodoulou, por entonces estudiante de doctorado de Wheeler en Princeton, y, de manera independiente, Stephen W. Hawking, de la Universidad de Cambridge, demostraron que, en varios procesos, como la fusión de

dos agujeros negros, el área total de los horizontes de sucesos nunca decrece. La analogía con la tendencia de la entropía a aumentar me llevó a proponer en 1972 que un agujero negro debía tener una entropía proporcional al área de su horizonte. Conjeturé que, cuando la materia cae en un agujero negro, el aumento en la entropía de este siempre compensa la entropía «perdida» por la materia. Con más generalidad, la suma de la entropía del agujero negro y de la entropía ordinaria fuera de este no puede decrecer. Esta es la generalización de la segunda ley (o GSL).

La GSL ha superado un gran número de pruebas teóricas. Cuando una estrella colapsa sobre sí misma y crea un agujero negro, la entropía de este supera con mucho a la de la estrella. En 1974, Hawking demostró que un agujero negro emite espontáneamente radiación térmica, hoy denominada «radiación de Hawking», mediante un proceso cuántico. El teorema de Christodoulou-Hawking falla ante ese fenómeno (la masa del agujero negro y, por tanto, el área de su horizonte decrecen), pero la GSL ataja el problema: la entropía de la radiación emergente compensa la merma de la entropía del agujero negro. En 1986,

ENTROPÍA MÁXIMA

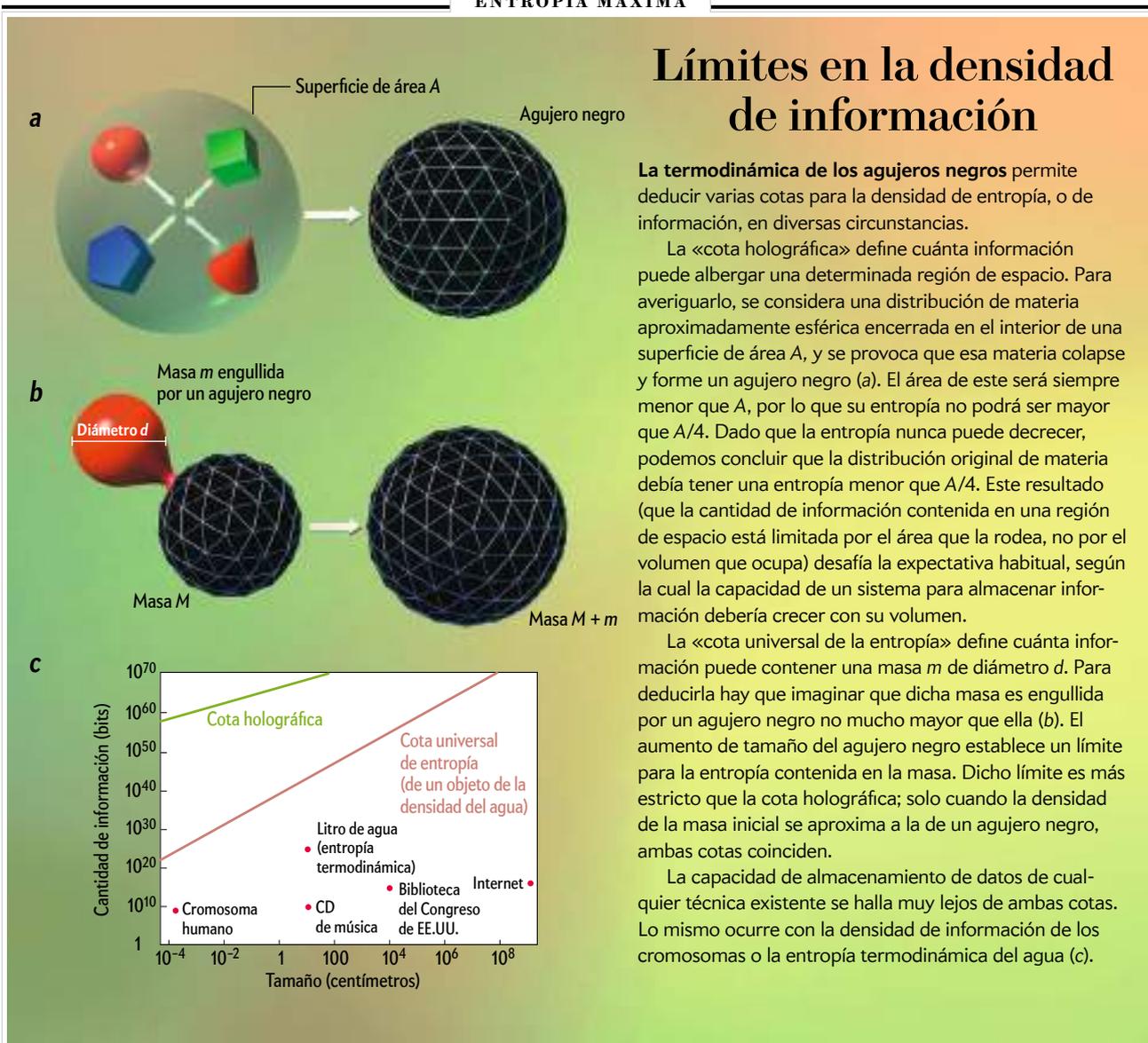
Límites en la densidad de información

La termodinámica de los agujeros negros permite deducir varias cotas para la densidad de entropía, o de información, en diversas circunstancias.

La «cota holográfica» define cuánta información puede albergar una determinada región de espacio. Para averiguarlo, se considera una distribución de materia aproximadamente esférica encerrada en el interior de una superficie de área A , y se provoca que esa materia colapse y forme un agujero negro (a). El área de este será siempre menor que A , por lo que su entropía no podrá ser mayor que $A/4$. Dado que la entropía nunca puede decrecer, podemos concluir que la distribución original de materia debía tener una entropía menor que $A/4$. Este resultado (que la cantidad de información contenida en una región de espacio está limitada por el área que la rodea, no por el volumen que ocupa) desafía la expectativa habitual, según la cual la capacidad de un sistema para almacenar información debería crecer con su volumen.

La «cota universal de la entropía» define cuánta información puede contener una masa m de diámetro d . Para deducirla hay que imaginar que dicha masa es engullida por un agujero negro no mucho mayor que ella (b). El aumento de tamaño del agujero negro establece un límite para la entropía contenida en la masa. Dicho límite es más estricto que la cota holográfica; solo cuando la densidad de la masa inicial se aproxima a la de un agujero negro, ambas cotas coinciden.

La capacidad de almacenamiento de datos de cualquier técnica existente se halla muy lejos de ambas cotas. Lo mismo ocurre con la densidad de información de los cromosomas o la entropía termodinámica del agua (c).



ENTROPÍA, ÁREA Y VOLUMEN: La cantidad de información que puede almacenar una pila de chips aumenta en proporción al número de estos; es decir, lo hace de manera proporcional al volumen que ocupan. Pero esta regla fallará en cierto momento: cuando la información supere la cota holográfica, la cual pone el límite en el área, no en el volumen. Dicho «fallo» se producirá cuando la pila sea tan descomunal que colapse sobre sí misma y forme un agujero negro.



Rafael Sorkin, de la Universidad de Siracusa, en Nueva York, explotó el hecho de que el horizonte impide que la información interna del agujero negro influya en el exterior para demostrar que la GSL (o algo muy parecido a ella) tenía que ser válida en cualquier proceso concebible en el que interviniesen agujeros negros. Su profundo argumento dejaba claro que la entropía a que se refiere la GSL coincide con la calculada en el nivel X , sea cual sea ese nivel.

Con su proceso de radiación, Hawking determinó la constante de proporcionalidad entre la entropía de un agujero negro y el área del horizonte. La entropía del agujero negro es exactamente igual a $1/4$ del área del horizonte medida en áreas de Planck. (La longitud de Planck, unos 10^{-33} centímetros, es la escala fundamental de longitud relacionada con la gravedad y la mecánica cuántica. Su cuadrado es el área de Planck.) Incluso desde un punto de vista termodinámico, se trata de una cantidad de entropía enorme. La entropía de un agujero negro de un centímetro de diámetro sería de unos 10^{66} bits, aproximadamente igual a la entropía termodinámica de un cubo de agua de 10.000 millones de kilómetros de lado.

COTAS A LA ENTROPÍA

La GSL nos permite establecer cotas a la capacidad para almacenar información en cualquier sistema físico aislado: límites que se refieren a la información en todos los niveles de estructura, hasta el nivel X . En 1980 empecé a estudiar la primera de tales cotas, la llamada «cota universal de entropía». Esta limita la entropía que puede contener una determinada masa de un tamaño concreto. Una noción afín, la «cota holográfica», fue desarrollada en 1995 por Leonard Susskind, de Stanford. Esta limita cuánta entropía pueden contener la materia y la energía que ocupen un determinado volumen de espacio.

En su trabajo sobre la cota holográfica, Susskind consideró cualquier masa aislada, aproximadamente esférica, que no fuese un agujero negro y que cupiera dentro de una superficie cerrada de área A . Si la masa puede contraerse hasta convertirse en un

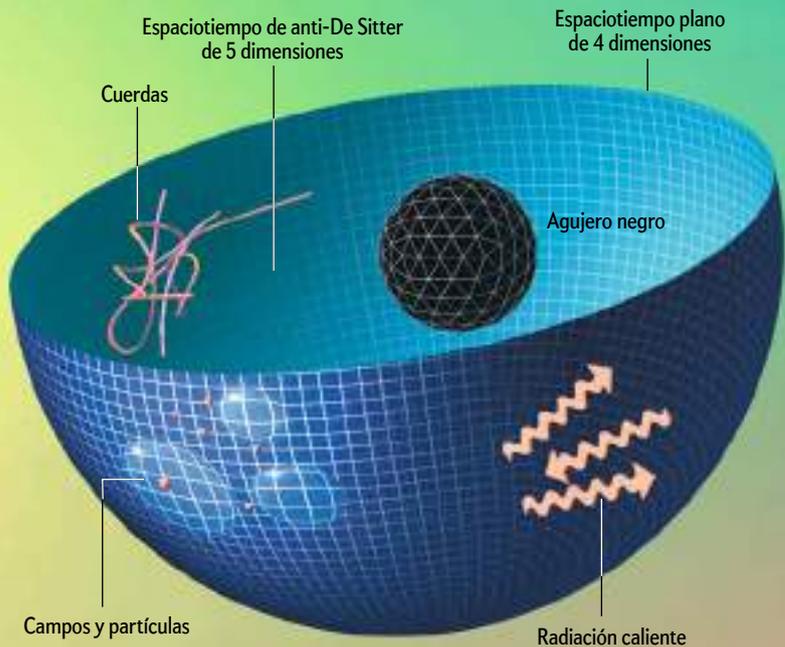
agujero negro, este acabará con un horizonte de área menor que A ; su entropía será, por tanto, menor que $A/4$. Según la GSL, la entropía del sistema no puede decrecer; por tanto, la entropía de la masa original no pudo haber sido mayor que $A/4$. En consecuencia, la entropía de un sistema físico aislado limitado por un área A es necesariamente menor que $A/4$. ¿Qué sucede si la masa no sufre un colapso gravitatorio espontáneo que la convierta en un agujero negro? En el año 2000 demostré que podía usarse un pequeño agujero negro para convertir el sistema en un agujero negro no muy diferente del considerado en el argumento de Susskind. La cota es, por tanto, independiente de la constitución del sistema o de la naturaleza del nivel X . Solo depende de la GSL.

Podemos ahora responder algunas de las cuestiones sobre los límites últimos del almacenamiento de información. Un dispositivo de un centímetro de diámetro podría, en principio, contener hasta 10^{66} bits. El universo visible contiene por lo menos 10^{100} bits de entropía, que en principio cabría almacenar en una esfera de una décima de año luz de diámetro. Sin embargo, estimar la entropía del universo es un problema difícil, y parecen verosímiles números mucho mayores, que requerirían una esfera casi tan grande como el propio universo.

Pero hay otro aspecto de la cota holográfica que sorprende. La máxima entropía posible depende del *área* de la superficie que delimita el volumen, no del volumen en sí. Imaginemos que apilamos chips de memoria. El número de transistores (la capacidad total de almacenamiento de datos) aumenta con el volumen del conjunto. Con este aumentará también la entropía termodinámica total de los chips. Pero es notable que el límite teórico de la capacidad para almacenar información en dicho espacio aumente con el área de la superficie que lo delimita. Dado que el volumen aumenta más deprisa que el área, llegará un momento en que la entropía de los chips sobrepasará la cota holográfica. Parecería entonces que, o bien la GSL, o bien nuestras ideas corrientes sobre la entropía y sobre la capacidad para almacenar información tendrían que fallar. Sin embar-

Universos equivalentes

El **principio holográfico** postula una equivalencia entre dos universos con distinto número de dimensiones y que obedecen leyes físicas dispares. Un ejemplo concreto de esta correspondencia lo proporciona cierto universo de 5 dimensiones, conocido como «espaciotiempo de anti-De Sitter», y su frontera, de 4 dimensiones. Como si se tratase de un holograma, todo lo que ocurre en el espacio de 5D puede codificarse en la frontera, de 4D. En este caso, el primero queda descrito por una teoría de cuerdas, mientras que el segundo sigue las leyes de cierta teoría cuántica de campos. Por ejemplo, un agujero negro en el espacio de 5D equivale a radiación caliente en la frontera de 4D. El agujero negro y la radiación tienen la misma entropía, a pesar de que el origen físico de esta es totalmente distinto en cada caso. Aunque estas dos descripciones del universo parecen muy diferentes, ningún experimento podría diferenciarlas, ni siquiera en principio.



go, los que fallarán serán los propios chips: colapsarán bajo su propia gravedad y formarán un agujero negro antes de que se sobrepase la cota. Cada chip adicional aumentará la masa y el área del agujero negro, respetando la GSL.

Este sorprendente resultado —que la capacidad para almacenar información depende del área— tiene una explicación natural si es cierto el principio holográfico, propuesto en 1993 por el premio nóbel Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht, y elaborado por Susskind. En el mundo ordinario, un holograma es una clase especial de fotografía que genera una imagen 3D cuando se la ilumina de la manera adecuada. Toda la información que describe la imagen 3D está codificada en las zonas claras y oscuras de una placa 2D. De manera similar, el principio holográfico afirma que lo mismo puede aplicarse a la descripción física de cualquier sistema que ocupe una región 3D del espacio: otra teoría física, definida solo en el contorno 2D de dicha región, describirá por completo la física 3D. Y si un sistema 3D puede ser descrito completamente por una teoría física definida solo sobre su frontera 2D, cabe esperar que la capacidad del sistema para almacenar información no exceda a la de la descripción asociada a su contorno.

EL MUNDO COMO UN HOLOGRAMA

¿Podemos aplicar el principio holográfico a todo el universo? El universo real es un sistema tetradimensional: tiene volumen y se extiende en el tiempo. Si la física de nuestro universo fuese holográfica, habría otro conjunto de leyes físicas que se aplicarían en algún contorno tridimensional del espaciotiempo, equivalente a nuestra conocida física tetradimensional. Aún no sabemos de ninguna teoría tridimensional que actúe de esta manera. ¿Y qué superficie deberíamos usar como contorno del

universo? Estudiar modelos más sencillos que nuestro universo real es un paso hacia la realización de estas ideas.

Una clase de ejemplos concretos del principio holográfico lo proporcionan los espaciotiempos anti-De Sitter. El espaciotiempo de De Sitter es un modelo de universo formulado en 1917 por el astrónomo holandés Willem de Sitter: una solución de las ecuaciones de Einstein que incluye una fuerza repulsiva, la «constante cosmológica». El espaciotiempo de De Sitter está vacío, se expande a un ritmo acelerado y es muy simétrico. En 1997, la observación de explosiones de supernova distantes mostró que nuestro universo se expande aceleradamente, y es probable que en el futuro se vaya pareciendo cada vez más a un espaciotiempo de De Sitter. Pero, si en las ecuaciones de Einstein esa fuerza repulsiva se convierte en atractiva (si se invierte el signo de la constante cosmológica), la solución de De Sitter se convierte en un espaciotiempo de anti-De Sitter, no menos simétrico. Lo importante para el principio holográfico es que dicho espaciotiempo cuenta con un contorno «en el infinito», el cual se parece mucho a nuestro espaciotiempo habitual.

Con el espaciotiempo de anti-De Sitter, los teóricos han encontrado una realización concreta del principio holográfico. Un universo descrito por la teoría de cuerdas en un espaciotiempo anti-De Sitter resulta ser equivalente a una teoría cuántica de campos definida sobre la frontera de dicho espaciotiempo. De esta manera, toda la majestuosidad de la teoría de cuerdas queda «pintada» sobre el contorno del universo. Juan Maldacena, por entonces en Harvard, conjeturó tal relación en 1997 para un espaciotiempo de anti-De Sitter de 5 dimensiones. Sus cálculos fueron confirmados más tarde por Edward Witten, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, y Steven Gubser, Igor Klebanov y Alexander Polyakov, de la Universidad de Princeton.

Hoy se conocen ejemplos de esta correspondencia holográfica en espaciotiempos de diversas dimensiones.

Se establece así la equivalencia de dos teorías, en apariencia muy diferentes y que ni siquiera operan en espacios de la misma dimensión. Las criaturas que vivieran en uno de estos universos serían incapaces de determinar si habitan en un universo de 5 dimensiones descrito por la teoría de cuerdas o en uno de 4 descrito por una teoría cuántica de campos, con partículas puntuales. (Con todo, su cerebro les podría inducir un irresistible prejuicio de «sentido común» a favor de una u otra descripción, de la misma manera que nuestro cerebro construye una percepción innata de que nuestro universo tiene tres dimensiones espaciales.)

Gracias a esta equivalencia holográfica, un complejo cálculo sobre quarks y gluones en 4 dimensiones puede «traducirse» a otro más sencillo en el muy simétrico espaciotiempo de anti-De Sitter de 5 dimensiones. La correspondencia funciona también en sentido inverso. Witten ha demostrado que un agujero negro en un espaciotiempo de anti-De Sitter corresponde, en la teoría alternativa, a radiación caliente. Y la entropía del agujero negro, un concepto profundamente misterioso, es igual a la entropía de la radiación, una noción sencilla.

EL UNIVERSO EN EXPANSIÓN

Altamente simétrico y vacío, el universo de anti-De Sitter de 5 dimensiones es muy distinto de nuestro universo tetradimensional, lleno de materia y radiación y escenario de sucesos violentos. Incluso cuando describimos de manera solo aproximada nuestro universo real como uno dotado de materia y radiación distribuidas uniformemente, no obtenemos un universo de anti-

De Sitter, sino uno de Friedmann-Robertson-Walker (FRW). Hoy, la mayoría de los cosmólogos coinciden en que nuestro universo se parece a uno de FRW: un mundo infinito, sin frontera y que se irá expandiendo por siempre jamás.

¿Concuerda tal universo con el principio holográfico o con la cota holográfica? El argumento de Susskind, basado en la formación de un agujero negro, no ayuda aquí. De hecho, la cota holográfica deducida a partir de los agujeros negros debe fallar en un universo uniforme en expansión. La entropía de una región uniformemente llena de materia y radiación es realmente proporcional a su volumen. Por tanto, una región lo bastante grande violaría la cota holográfica.

En 1999, Raphael Bousso, por entonces en Stanford, propuso una cota holográfica modificada, la cual ha demostrado funcionar en situaciones donde no pueden aplicarse las cotas que hemos presentado aquí. La formulación de Bousso parte de cualquier superficie bidimensional adecuada, ya sea cerrada como una esfera o abierta como una hoja de papel. Hay que imaginar a continuación breves destellos de luz que parten simultánea y perpendicularmente de uno de los lados de la superficie. La única condición es que esos rayos de luz imaginarios converjan. La luz emitida desde la superficie interior de una corteza esférica, por ejemplo, satisface este requisito. Se considera entonces la entropía de la materia y la radiación que atraviesan estos rayos imaginarios hasta llegar a los puntos donde se cruzan. Bousso conjeturó que dicha entropía no puede superar a la asociada a la superficie inicial: $1/4$ de su área, medida en áreas de Planck. Esta forma de medir la entropía difiere de la usada en la cota holográfica original. La cota de Bousso no se refiere a la entropía de una región en un instante de tiempo, sino a la suma de



¿ES REAL EL ESPACIO?
Nuestra percepción
innata de que el mundo
es tridimensional podría
no ser más que una
extraordinaria ilusión.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Antonio Malet: *El padre renuente de los agujeros negros*; Juan Pedro Campos: *Los agujeros negros y la paradoja de la información*; Ramón Pascual: *La información en el universo holográfico*; Luis Bou: *Computación en agujeros negros*; Yago Ascasibar: *Minería de agujeros negros, Agujeros negros de masa intermedia*; Javier Grande: *Los primeros agujeros negros supermasivos, Devorar un sol, Agujeros negros primordiales y materia oscura*

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

ACTING EDITOR IN CHIEF Curtis Brainard
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

Copyright © 2019 Scientific American Inc.,
1 New York Plaza, New York, NY 10004-1562.

Copyright © 2019 Prensa Científica S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona (España)

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

ISSN edición impresa: 1135-5662 ISSN edición digital: 2385-5673
Dep. legal: B-32.350-1995

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova
17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España

entropías en distintos lugares y momentos: aquellos que son «iluminados» por los destellos de luz imaginarios que salen de la superficie.

La cota de Bousso incluye otras cotas de entropía a la vez que evita sus limitaciones. Tanto la cota universal de entropía como la cota holográfica de 't Hooft-Susskind pueden deducirse de la de Bousso para cualquier sistema aislado que no cambie con rapidez y cuyo campo gravitacional no sea demasiado intenso. Cuando estas condiciones se superan —como en el caso de una esfera de materia que colapsa ya dentro de un agujero negro, por ejemplo—, las otras cotas fallan, pero la de Bousso no. Bousso también ha demostrado que su método puede usarse para hallar superficies bidimensionales en las que «grabar» un holograma del universo.

AUGURIOS DE UNA REVOLUCIÓN

Se han propuesto muchas otras cotas para la entropía. La proliferación de variaciones de la idea holográfica deja claro que esta aún no ha alcanzado la categoría de ley física. Pero, aunque el planteamiento holográfico todavía no se entienda del todo, parece haber llegado para quedarse. Este principio pone de manifiesto la necesidad de abandonar una creencia que ha imperado durante medio siglo: que la teoría de campos es el lenguaje final de la física. Los campos, como el electromagnético, varían continuamente de un punto a otro, por lo que describen infinitos grados de libertad. La teoría de cuerdas también abarca un número infinito de grados de libertad. La holografía restringe a un número finito los grados de libertad que puede haber del interior de una superficie; la teoría de campos, con sus infinitos, no puede ser la última palabra. Y aun cuando estos infinitos quedasen bajo control, todavía habría que acomodar la misteriosa dependencia entre información y área.

La holografía puede ser una guía hacia una teoría mejor. ¿Cómo será la teoría fundamental? La cadena de razonamientos relativa a la holografía sugiere a algunos físicos, como Lee Smolin, del Instituto Perimeter de Física Teórica de Waterloo, que dicha teoría no habrá de referirse a campos y ni siquiera al espacio-tiempo, sino al intercambio de información entre procesos físicos. De ser el caso, la idea de que el mundo está hecho de información habrá encontrado una materialización más que digna. 

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, octubre de 2003

EL AUTOR

Jacob D. Bekenstein fue catedrático de física de la Universidad Hebrea de Jerusalén. A lo largo de su carrera destacó por sus estudios pioneros en el estudio de la termodinámica de los agujeros negros y sus implicaciones en física fundamental. Falleció en agosto de 2015.

PARA SABER MÁS

Black holes and entropy. Jacob D. Bekenstein en *Physical Review D*, vol. 7, págs. 2333-2346, abril de 1973.

Dimensional reduction in quantum gravity. Gerard 't Hooft en arxiv.org/abs/gr-qc/9310026, octubre de 1993.

The large- N limit of superconformal field theories and supergravity. Juan Maldacena en *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, vol. 2, págs. 105-114, enero de 1998.

A covariant entropy conjecture. Raphael Bousso en *Journal of High Energy Physics*, vol. 1999, art. 004, agosto de 1999.

EN NUESTRO ARCHIVO

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

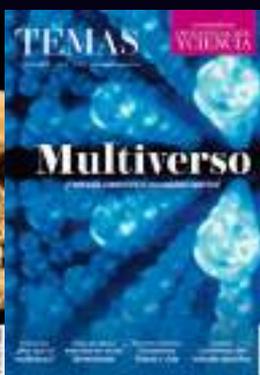
SUSCRÍBETE A INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Ventajas para los suscriptores:

- **Envío** puntual a domicilio
- **Ahorro** sobre el precio de portada
~~82,80 €~~ 75 €
por un año (12 ejemplares)
~~165,60 €~~ 140 €
por dos años (24 ejemplares)
- **Acceso gratuito** a la edición digital de los números incluidos en la suscripción

Y además elige 2 números de la colección TEMAS gratis



www.investigacionyciencia.es/suscripciones

Teléfono: +34 935 952 368

COMPUTACIÓN EN AGUJEROS NEGROS

Conforme al espíritu de nuestro tiempo, cabe interpretar las leyes de la física como programas informáticos y el universo como un colosal ordenador

Seth Lloyd e Y. Jack Ng

¿E

N QUÉ SE DIFERENCIAN UNA COMPUTADORA Y UN AGUJERO NEGRO? Este no es el principio de algún chiste, sino de una de las preguntas más profundas de la física actual. Para la mayoría de la gente, un ordenador es un dispositivo especializado, ya se trate de una caja puesta sobre una mesa de oficina o de un chip del tamaño de una uña incrustado en una cafetera de alta tecnología. Para un físico, en cambio, no hay sistema físico que no sea una computadora. Las rocas, las bombas atómicas o las galaxias no ejecutan Linux, pero no por ello dejan de registrar y procesar información. Cada electrón, cada fotón o cualquier partícula elemental almacena bits de datos, y cada vez que dos de esas partículas interactúan, esos bits se transforman. La existencia física y el contenido de información están inextricablemente ligados. O, tal y como lo expresó el físico John Wheeler, de la Universidad de Princeton: *it from bit*. De la información, de los bits, sale cada cosa que hay en el mundo.

UN NUEVO PUNTO DE VISTA: Considerar los agujeros negros como entidades físicas que procesan información está resultando útil en el estudio de la cosmología y la física fundamental.



Sin embargo, los agujeros negros podrían parecer la excepción a la regla de que todo computa. No hay dificultad en introducirles información, pero, según la teoría de la relatividad general de Einstein, es imposible extraérsela. Un agujero negro absorbe la materia que recibe, pero los detalles de su composición se pierden sin remedio. En los años setenta, Stephen Hawking demostró que, cuando se toman en consideración los efectos cuánticos, los agujeros negros debían emitir radiación del mismo modo en que lo haría un cuerpo caliente. Según el análisis de Hawking, la radiación saliente del agujero negro es aleatoria: no transporta información relativa a lo que haya entrado en él. Si un elefante cayera en un agujero negro, de este saldría una energía equivalente a la masa del animal, pero convertida en un revoltijo de partículas que nunca permitiría recrear el paquidermo.

Esta aparente pérdida de información plantea todo un enigma porque, según las leyes de la mecánica cuántica, la información siempre se conserva. Por tal motivo, científicos como Leonard Susskind, de Stanford, John Preskill, del Instituto de Tecnología de California, y Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht, han argumentado que la radiación emitida por un agujero negro no es realmente aleatoria, sino que sería una versión procesada de la materia que cayó en él. En 2006, Hawking se desdijo de su predicción inicial y se avino a este punto de vista: también los agujeros negros computan.

Los agujeros negros constituyen el ejemplo más singular del principio general que enuncia que el universo registra y procesa información. En sí mismo, este principio no es nuevo. En el siglo XIX, para explicar las leyes de la termodinámica, los fundadores de la mecánica estadística desarrollaron lo que en tiempos modernos acabaría llamándose teoría de la información. A primera vista no parece que la termodinámica y la teoría de la información tengan algo en común. La primera fue ideada para explicar las máquinas de vapor; la segunda, para optimizar las comunicaciones. Sin embargo, la magnitud termodinámica que limita la capacidad de un motor para realizar trabajo útil, la entropía, resulta ser proporcional al número de bits registrados por las posiciones y velocidades de las moléculas de una sustancia. La invención de la mecánica cuántica, ya en el siglo XX, asentó este hallazgo sobre cimientos firmes e introdujo la noción de información cuántica. Los bits que integran el universo son bits cuánticos, o «qubits», dotados de propiedades mucho más ricas que los bits ordinarios.

El análisis del universo en términos de bits no sustituye a los basados en conceptos tradicionales, como fuerza o energía, pero sí saca a la luz hechos nuevos y sorprendentes. Así, en el campo de la mecánica estadística, estas ideas han permitido resolver la paradoja del «demonio de Maxwell», que parecía dar pie al movimiento continuo. En los últimos años se han aplicado estas mismas ideas a la cosmología y a la física fundamental, a la naturaleza de los agujeros negros y la energía oscura, a la estructura del espaciotiempo a pequeña escala y a las leyes ú-

timas de la naturaleza. El universo no es solamente una colosal computadora. Es una colosal computadora cuántica. O en palabras de Paola Zizzi, de la Universidad de Padua: *it from qubit*.

MÁS ALLÁ DEL GIGAHERCIO

La confluencia de la física y la teoría de la información se sigue de la máxima central de la mecánica cuántica: la naturaleza, en el fondo, es discreta. Todo sistema físico puede describirse mediante un número finito de bits, y cada partícula del sistema actúa como la puerta lógica de un ordenador. Dado un eje, el espín de la partícula puede apuntar en uno de los dos sentidos posibles; de esta manera, codifica un bit. Y esa orientación puede invertirse, lo que equivale a una operación computacional sencilla.

El sistema también es discreto en cuanto al tiempo. La inversión de un bit requiere una duración temporal mínima. El valor exacto de ese lapso mínimo viene dado por un teorema formulado por dos precursores de la física del procesamiento de información, Norman Margolus, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Lev Levitin, de la Universidad de Boston. Dicho teorema guarda relación con el principio de incertidumbre de Heisenberg, que enuncia el compromiso inherente a la medición de pares de algunas magnitudes físicas, como la posición y el momento, o el tiempo y la energía. Según el teorema, el tiempo t necesario para invertir un bit depende de la cantidad de energía aplicada, E . Cuanto mayor sea la energía aplicada, menor podrá ser el tiempo. Matemáticamente, $t \geq h/4E$, donde h es la constante de Planck, el parámetro principal de la teoría cuántica. Por ejemplo, un tipo de ordenador cuántico almacena bits en protones y se vale de campos magnéticos para invertirlos. Las operaciones se efectúan en el tiempo mínimo que permite el teorema de Margolus-Levitin.

De este teorema pueden deducirse toda una variedad de conclusiones, desde limitaciones a la geometría del espaciotiempo hasta la capacidad computacional del universo entero. A modo de ejercicio preliminar, examinemos los límites de la potencia computacional de la materia ordinaria. Pensemos en una masa de un kilogramo que ocupa un volumen de un litro. Llamaremos a este dispositivo «el ordenador supremo».

Su batería es la propia materia, convertida directamente en energía mediante la famosa fórmula de Einstein $E = mc^2$. Aplicada toda esta energía a la inversión de bits, el ordenador efectuaría al principio 10^{51} operaciones por segundo, aunque iría perdiendo velocidad a medida que fuese consumiendo energía. La capacidad de memoria de la máquina se calcula a través de la termodinámica. Cuando un kilogramo de materia se convierte en energía que ocupa un litro, su temperatura es de 1000 millones de kelvin. Su entropía, proporcional a su energía dividida por la temperatura, corresponde a 10^{31} bits de información. Nuestro ordenador supremo almacena información en los movimientos y posiciones de las partículas elementales que se agitan en su

EN SÍNTESIS

Todos los sistemas físicos, por su mera existencia, almacenan información que procesan al evolucionar en el tiempo; es decir, computan. Si la información puede escapar de los agujeros negros, también estos pueden entenderse como máquinas de cómputo.

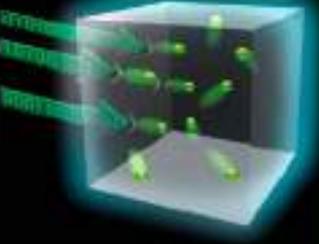
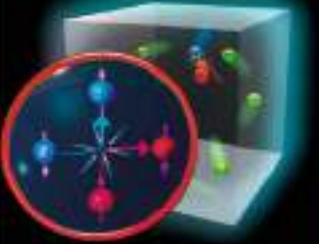
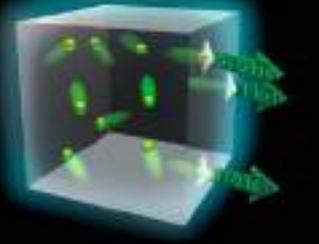
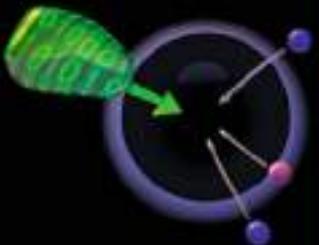
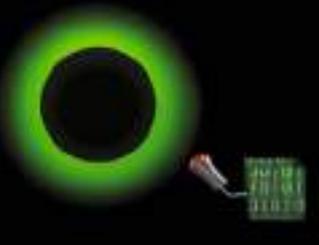
Esa capacidad de cómputo de los agujeros negros se debe en última instancia a la naturaleza cuántica de la información. Estudiar la manera en que estos objetos reprocesan los bits de la materia que cae en ellos permite obtener varias pistas sobre la naturaleza cuántica de la gravedad.

Las mismas ideas pueden aplicarse a las propiedades del espaciotiempo y al universo en su conjunto. Algunos resultados fundamentales, como el principio holográfico, pueden derivarse a partir de consideraciones generales sobre el modo en que la naturaleza procesa la información.

Distintas maneras de procesar datos

¿Qué es una computadora? Aunque se trata de una cuestión insospechadamente compleja, cualquier definición que adoptemos quedará satisfecha no solo por nuestros ordenadores habituales, sino también por todo cuanto hay en el universo. También los objetos físicos pueden resolver problemas lógicos o matemáticos, por más que no siempre acepten o generen datos

en una forma que tenga significado directo para las personas. Las computadoras naturales son intrínsecamente digitales: almacenan datos en estados cuánticos discretos, como el espín de las partículas. Las leyes cuánticas sirven como conjunto de instrucciones. Este esquema muestra el funcionamiento y las capacidades de tres tipos distintos de sistemas de cómputo.

	ENTRADA	CÓMPUTO	SALIDA
ORDENADOR COMÚN Velocidad: 10^9 Hz Memoria: 10^{12} bits	 <p>Un teclado y los circuitos asociados codifican la información entrante mediante impulsos eléctricos.</p>	 <p>Los impulsos interactúan entre sí, guiados por dispositivos electrónicos que efectúan operaciones lógicas.</p>	 <p>Una vez procesados, los impulsos eléctricos se traducen a patrones luminosos dotados de significado.</p>
«ORDENADOR SUPREMO» Velocidad: 10^{20} Hz Memoria: 10^{31} bits	 <p>Consiste en un kilo de plasma muy caliente en un contenedor de un litro. Acepta datos codificados por medio de posiciones, velocidades y espines de las partículas.</p>	 <p>Las partículas interactúan. Las colisiones pueden disponerse de manera que efectúen operaciones lógicas; por ejemplo, cambios en el estado cuántico de una partícula.</p>	 <p>Las propiedades de las partículas pueden medirse una vez que abandonan el contenedor. El sistema pierde velocidad a medida que consume energía.</p>
AGUJERO NEGRO Velocidad: 10^{35} Hz Memoria: 10^{16} bits	 <p>Un agujero negro de un kilo de masa tendría un radio de 10^{-27} metros. Los datos y las instrucciones están codificados en la materia que cae en él.</p>	 <p>Durante su caída, las partículas interactúan, pero ahora también interviene la gravedad. Las leyes que rigen el proceso aún se desconocen.</p>	 <p>El agujero emite radiación de Hawking. Varias teorías sugieren que esa radiación transportaría consigo el resultado del cálculo.</p>

interior. Entran en juego todos y cada uno de los bits que permiten las leyes de la termodinámica.

Cada vez que interactúan dos partículas, cada una puede hacer que los bits de la otra salten de un estado a otro. Cabe comparar este proceso a un lenguaje de programación, como C o Java: las partículas son las variables, y sus interacciones corresponden a operaciones, como la adición. Cada bit puede cambiar de estado 10^{20} veces por segundo, lo que equivale a una velocidad de procesamiento de 100.000 millones de gigahercios. De hecho, el sistema es demasiado rápido para que lo controle un procesador central. El tiempo que tarda un bit en cambiar de estado viene a ser el que tarda una señal en viajar desde un bit hasta su vecino. Así pues, el ordenador supremo opera con un grado muy alto de paralelismo: no actúa como un solo procesador, sino como una inmensa agrupación de ellos, cada uno de los cuales trabaja sin apenas depender de los demás y les comunica sus resultados con relativa lentitud.

En comparación, un ordenador ordinario manipula bits a razón de unas 10^9 veces por segundo, almacena unos 10^{12} bits y cuenta con un solo procesador. Si fuera posible que se siguiera cumpliendo indefinidamente la ley de Moore, según la cual el rendimiento de los chips es exponencial, nuestros descendientes podrían adquirir el ordenador supremo a mediados del siglo XXIII. Antes, los ingenieros habrían tenido que dar con el modo de controlar con precisión las interacciones entre partículas en un plasma más caliente que el núcleo del Sol, y buena parte del ancho de banda de las comunicaciones se emplearía en controlar el ordenador y corregir errores. Además, tendrían que habérselas con espinosos problemas para albergar el ordenador en algún soporte o recipiente seguro.

Pero, en cierto sentido, hoy en día ya es posible adquirir un artilugio de tales características si se tienen los contactos adecuados. «Un kilo de materia convertido por completo en energía» viene a ser la definición de una bomba de hidrógeno de 20 megatones. Durante la explosión, un arma nuclear procesa una ingente cantidad de información: la configuración de partida aporta los datos iniciales, y el resultado viene dado por la radiación que emite.

MÁS ALLÁ DE LA NANOTECNOLOGÍA

Si un trozo cualquiera de materia es un ordenador, un agujero negro no es ni más ni menos que una computadora comprimida

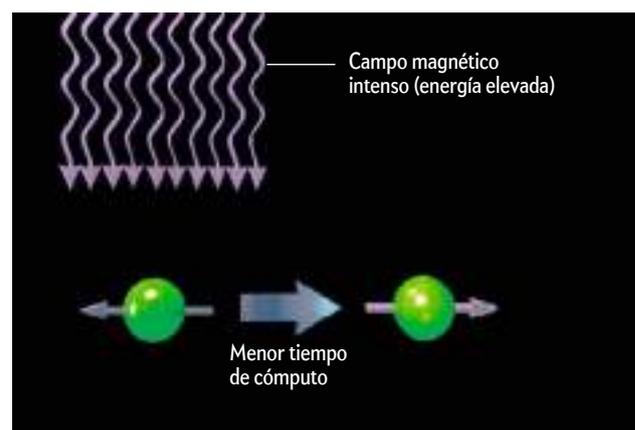
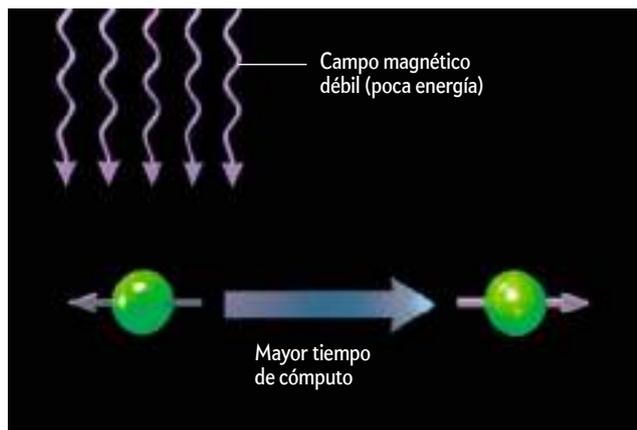
Un agujero negro es una agregación transitoria de materia que efectúa cálculos a la máxima velocidad posible

hasta su mínimo tamaño posible. Cuando una computadora va reduciendo su tamaño, las fuerzas gravitatorias que cada uno de sus componentes ejerce sobre los demás se van haciendo más y más intensas, hasta que, en cierto momento, lo son tanto que ningún objeto puede escapar. El tamaño de un agujero negro, su «radio de Schwarzschild», es proporcional a su masa.

Un agujero negro con una masa de un kilogramo presentaría un radio de unos 10^{-27} metros (en comparación, el tamaño típico de un protón es del orden de 10^{-15} metros). Pero esta reducción de tamaño del ordenador no modifica su contenido energético, por lo que todavía podría calcular a una velocidad de 10^{51} operaciones por segundo, igual que antes.

No obstante, lo que sí cambiará será su capacidad para almacenar información. Cuando la gravedad es insignificante, la capacidad total de almacenamiento de un sistema es proporcional al número de partículas y, por consiguiente, al volumen. Pero cuando domina la gravedad, las partículas se interconectan y su capacidad colectiva de almacenar información disminuye. Como resultado, la capacidad de almacenamiento de un agujero negro es proporcional al área del horizonte de sucesos, no al volumen que este encierra. En los años setenta, Hawking y Jacob Bekenstein, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, calcularon que un agujero negro de un kilogramo podría registrar unos 10^{16} bits, mucho menos que esa misma computadora antes de ser comprimida.

En compensación, el agujero negro procesa mucho más deprisa. El tiempo que tarda en invertir un bit, unos 10^{-35} segundos, coincide con el tiempo que tarda la luz en ir de un lado a otro de la computadora. Así pues, y en contraste con el ordenador



COMPUTACIÓN Y ENERGÍA: La primera ley de la computación cuántica dicta que todo cálculo requiere energía, la cual está relacionada con la velocidad de cómputo. El espín de un protón (verde) codifica un bit, el cual cabe invertir aplicando un campo magnético. Cuanto más intenso sea el campo magnético —cuanta más energía actúe sobre el protón— más rápido cambiará de estado la partícula.

supremo, que en gran medida operaba en paralelo, un agujero negro lo hace secuencialmente, en serie. Actúa como si se tratara de una sola unidad.

¿Cómo funcionaría en la práctica una computadora que fuese un agujero negro? Introducir datos no presentaría dificultades: bastaría con codificarlos en materia y energía y dejarlos caer en el objeto. Preparando adecuadamente ese material, deberíamos poder programar el agujero negro para que efectuase cualquier cómputo que deseáramos. Una vez que la materia entrase en el agujero negro, desaparecería para siempre: el horizonte de sucesos marca el lugar a partir del cual nada de lo que entre puede volver atrás. Más allá, las partículas en caída libre interactuarían entre sí y efectuarían cómputos durante un tiempo finito, hasta que alcanzasen el centro del agujero negro, denominado «singularidad». Qué le ocurre a la materia cuando alcanza la singularidad depende de los detalles de la gravedad cuántica, los cuales desconocemos.

Por su parte, el resultado que el agujero ofrece al exterior adopta la forma de radiación de Hawking. Dado que la energía se conserva durante el proceso, esa emisión de radiación hace que la masa del objeto disminuya. En el caso de un agujero negro con una masa de un kilogramo, este habrá desaparecido por completo en 10^{-21} segundos. De toda la radiación emitida, la de mayor intensidad es aquella con una longitud de onda similar al radio del agujero negro; en nuestro caso, se trataría de rayos gamma extraordinariamente energéticos. Por último, un detector de partículas los captaría y descodificaría la información que transportasen.

El trabajo de Hawking sobre la radiación que hoy lleva su nombre refutó la creencia imperante hasta entonces de que nada puede escapar de un agujero negro. La tasa de radiación de un agujero negro depende de su tamaño. Aquellos enormes, como los situados en el centro de las galaxias, radian energía mucho más despacio de lo que engullen materia. Sin embargo, en un futuro tal vez sea posible crear diminutos agujeros negros en aceleradores de partículas. En tal caso, estos objetos se desvanecerían de inmediato en un estallido de radiación. Así pues, un agujero negro no debe verse como un objeto estático, sino como una agregación transitoria de materia que efectúa cálculos a la máxima velocidad posible.

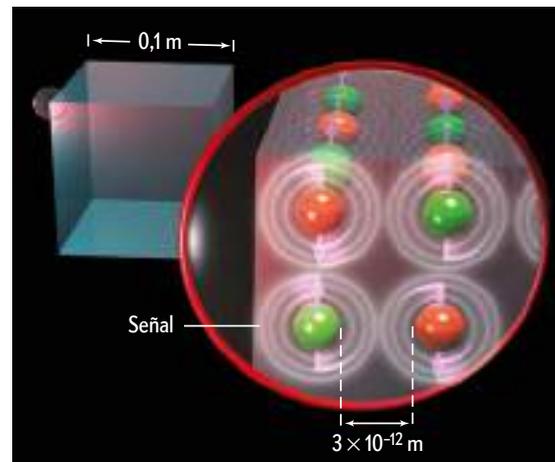
¿CÓMO ESCAPA LA INFORMACIÓN?

El auténtico problema consiste en saber si la radiación de Hawking nos da el verdadero resultado del cálculo o solo produce un galimatías. Aún existe un debate abierto al respecto, pero hoy la mayoría de los físicos creen que la radiación de Hawking es una versión muy procesada de la información que entró en el agujero negro. Aunque la materia en sí no pueda abandonarlo, la información asociada a ella sí lo haría. En este momento, una de las cuestiones más apasionantes de la física consiste en comprender exactamente cómo lo hace.

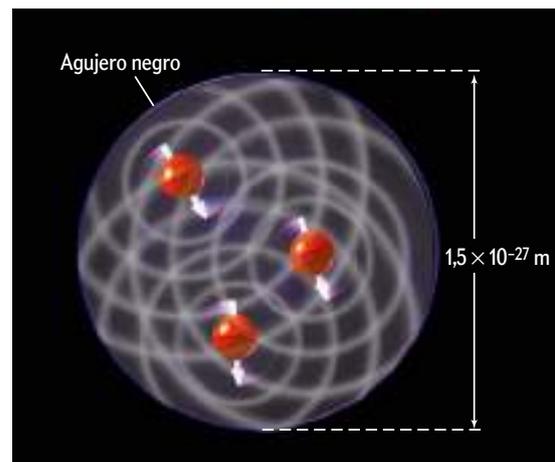
En 2003, Gary Horowitz, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y Juan Maldacena, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, esbozaron un posible mecanismo. La solución al problema estaría en el entrelazamiento, un fenómeno cuántico que conserva las correlaciones entre las propiedades de dos o más sistemas aunque estos se encuentren muy separados en el espacio y en el tiempo. El entrelazamiento hace posible el teletransporte cuántico, un proceso que transfiere la información de una partícula a otra con tal fidelidad que, a todos los efectos, parece como si la propia partícula se hubiese transferido de una posición a otra a la velocidad de la luz.

Computación extrema

El ordenador supremo y el agujero negro constituyen dos métodos de aumentar la potencia de cómputo. El ordenador supremo encarna el límite de la computación en paralelo (un conjunto de procesadores que operan simultáneamente), mientras que el agujero negro calcula en serie (un único procesador que ejecuta las instrucciones de una en una).



El ordenador supremo consta de una colección de partículas que codifican y procesan bits. Cada una puede ejecutar una instrucción en unos 10^{-20} segundos. En ese tiempo, las señales solo pueden viajar una distancia de 3×10^{-12} metros, que viene a ser la separación existente entre las partículas. Así pues, la comunicación entre partículas es mucho más lenta que la computación. Las subregiones del ordenador funcionan de forma casi independiente.

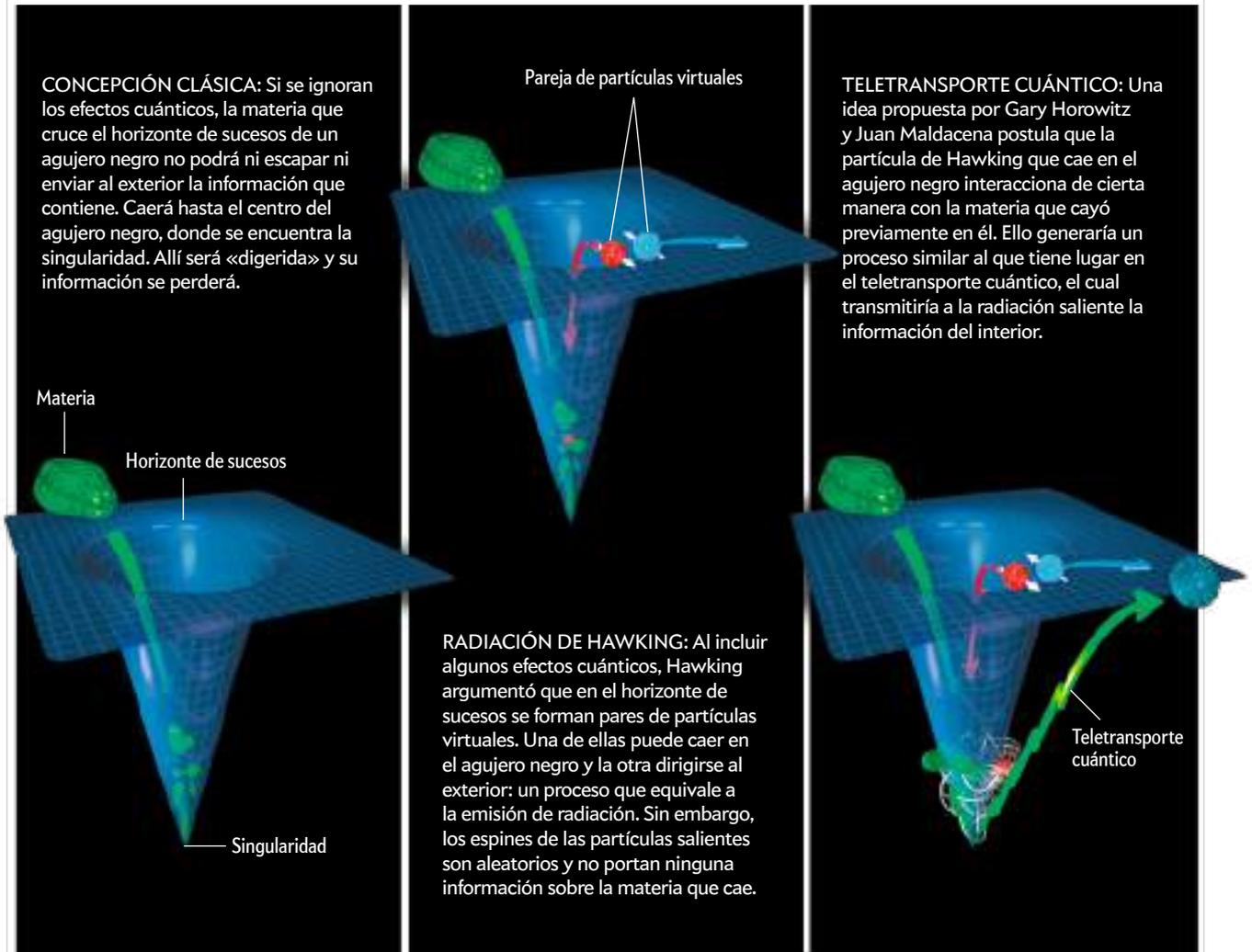


Un agujero negro también consiste en una colección de partículas. Pero, a causa de la gravedad, codifican menos bits, lo que se traduce en más energía por bit. Cada una puede ejecutar una instrucción en 10^{-35} segundos, el tiempo que tarda una señal en cruzar el agujero negro. Por consiguiente, la comunicación es igual de rápida que la computación. La computadora opera como una sola unidad.

¿Qué ocurre con la información?

«Un objeto de tal densidad que nada, ni siquiera la luz, puede escapar de él.» Esta definición de agujero negro se ha convertido en tópico, pero en última instancia probablemente sea errónea. En los años setenta, Stephen Hawking demostró que la energía podía escapar poco a poco de un agujero negro. Hoy

muchos físicos creen que con la información ocurre lo mismo. Estos diagramas muestran tres posibles destinos de la materia y la información que caen en un agujero negro. Según el tipo de procesos que intervienen, la materia es atrapada, acaba escapando en forma de energía o lo hace junto con la información.



El teletransporte cuántico, que ya ha sido verificado en el laboratorio, requiere previamente que dos partículas estén entrelazadas. A continuación se efectúa una medición conjunta sobre una de esas partículas y sobre la materia que contenga la información que deseamos teletransportar. La medida borra la información en su ubicación original; pero, debido al entrelazamiento, esa información se hallará codificada en la segunda partícula del par entrelazado. Después, la información puede descodificarse usando como «clave de seguridad» los resultados de las mediciones.

Un procedimiento parecido podría operar en los agujeros negros. En el horizonte de sucesos se materializan constantemente pares de fotones entrelazados. Uno de ellos vuela hacia el exterior, con lo que se convierte en la radiación de Hawking que vemos desde fuera, mientras que el otro cae en el agujero negro

y acaba en la singularidad junto con la materia que lo formó. La aniquilación del fotón que cae equivale a una medición, lo que transfiere la información contenida en la materia a la radiación de Hawking saliente.

La diferencia con el teletransporte de laboratorio estriba en que no se necesitan los resultados de dicha «medición» para descodificar la información que fue teletransportada. En su trabajo, Horowitz y Maldacena razonaron que la aniquilación no tiene una variedad de posibles resultados, sino solamente uno. Un observador externo podría determinar este único resultado gracias a métodos físicos básicos y, con ello, descifraría la información. Este último aspecto trasciende la formulación habitual de la mecánica cuántica; pero, aunque controvertido, es verosímil. Del mismo modo que la singularidad inicial con que comenzó nuestro universo puede que solo tuviese un estado

posible, tal vez la singularidad del interior de un agujero negro solo posea un único estado final. En 2004, uno de nosotros (Lloyd) demostró que el mecanismo de Horowitz-Maldacena es robusto: no depende de cuál sea exactamente ese estado final, siempre que haya alguno. No obstante, aún parece conducir a una pequeña pérdida de información.

Otros investigadores también han propuesto mecanismos de escape basados en extraños fenómenos cuánticos. En 1996, Andrew Strominger y Cumrun Vafa, de Harvard, analizaron la posibilidad de que los agujeros negros se compongan de «branas», ciertas estructuras multidimensionales que aparecen en la teoría de cuerdas. La información que cae en el objeto se almacenaría en forma de ondas en dichas branas y más tarde acabaría filtrándose al exterior. Y en 2004, Samir Mathur, de la Universidad Estatal de Ohio, y sus colaboradores modelizaron un agujero negro mediante un gigantesco ovillo de cuerdas. Esta «bola de pelusa» (*fuzzball*) actúa a modo de contenedor de la información que portan los objetos que caen en el agujero negro, y emite radiación que refleja dicha información. Por su parte, Hawking ha razonado que las fluctuaciones cuánticas impiden que llegue a formarse un horizonte de sucesos nítidamente definido. Todas estas ideas están aún a la espera de veredicto.

ESPACIOTIEMPO Y HOLOGRAFÍA

Las propiedades de los agujeros negros están inextricablemente imbricadas con las del espaciotiempo. Así pues, si los agujeros negros pueden ser tenidos por computadoras, otro tanto vale para el propio espaciotiempo. La mecánica cuántica predice que el espaciotiempo, igual que otros sistemas físicos, es discreto. No es posible medir con precisión infinita ni las distancias ni los tiempos; a escalas diminutas, el espacio tiene una estructura espumosa, llena de burbujas. La cantidad máxima de información que puede almacenarse en una región del espacio depende de lo pequeños que sean los bits, y estos no pueden ser menores que las celdillas espumosas.

Hace tiempo que los físicos creen que el tamaño de estas celdillas es la longitud de Planck (l_p), unos 10^{-35} metros, la distancia a la que cuentan por igual los efectos gravitatorios y las fluctuaciones cuánticas. En tal caso, la naturaleza espumosa resultará siempre demasiado diminuta para que podamos observarla. Pero, como han demostrado Hendrik van Dam, de la Universidad de Carolina del Norte; Frigyes Károlyházy, de la Universidad Loránd Eötvös de Hungría, y uno de nosotros (Ng), dichas celdillas son en realidad mucho mayores. De hecho, carecen de tamaño fijo: cuanto mayor sea una región del espaciotiempo, tanto mayores serán las celdas que la constituyen. Esta afirmación se nos puede antojar paradójica a primera vista; sería como decir que los átomos de un elefante son mayores que los de un ratón. Sin embargo, Lloyd la ha deducido a partir de las leyes que limitan la potencia de los ordenadores.

El proceso de cartografiar la geometría del espaciotiempo es un tipo particular de cómputo: uno en el que las distancias se calibran mediante transmisión y procesamiento de información. Una de las formas de hacerlo sería llenar una región del espacio con un enjambre de satélites GPS, cada uno dotado de un reloj y un radiotransmisor. Para medir una distancia, un satélite envía una señal y cronometra cuánto tarda en llegar. La precisión de la medida depende de cuán corto sea el tictac del reloj. Y generar los tictacs es una operación de computación, por lo que su ritmo máximo viene dado por el teorema de Margolus-Levitin: el tiempo que separa dos tictacs consecutivos es inversamente proporcional a la energía.

¿Qué está computando el universo? Hasta donde sabemos, no está calculando una única respuesta a una sola pregunta

La energía, por su parte, también está limitada. Si los satélites disponen de demasiada energía, o si los agrupamos demasiado juntos unos de otros, colapsarán y formarán un agujero negro, por lo que ya no podrán participar en las medidas. (El agujero seguirá emitiendo radiación de Hawking, pero de una longitud de onda similar al tamaño del propio agujero negro, por lo que esta no podrá usarse para cartografiar detalles menores.) El resultado es que la energía total máxima de la constelación de satélites es proporcional al radio de la región que estemos cartografiando.

Así pues, la energía aumenta más despacio que el volumen de la región (el cual crece como el radio al cubo). Al ir aumentando esta, el cartógrafo tendrá que hacer frente a un compromiso: o bien reduce la densidad de satélites, de modo que estén más separados entre sí, o bien reduce la energía disponible en cada satélite, con lo que sus relojes batirán más despacio. En uno y otro caso, la medición se tornará menos precisa. En el tiempo que se invierte en cartografiar una región de radio R , el número total de tictacs de todos los satélites es R^2/l_p^2 . Si cada satélite genera justo un tictac durante el cartografiado, los satélites estarán separados por una distancia media igual a $R^{1/3}l_p^{2/3}$. Es posible medir distancias más cortas en una subregión, pero solo a costa de perder precisión en otra. El razonamiento mantiene su validez incluso cuando el espacio se está expandiendo.

Esta fórmula proporciona la precisión con la que cabe medir distancias, y es aplicable cuando el aparato de medida está a punto de convertirse en agujero negro. Por debajo de la escala mínima, la geometría deja de existir. Este grado de precisión es muchísimo mayor que la longitud de Planck, aunque sigue siendo extraordinariamente pequeño. Por ejemplo, si quisiéramos medir el tamaño del universo observable (unos 10^{27} metros), la imprecisión media rondaría los 10^{-15} metros. Ello podría ser detectable con instrumentos de medición de distancias muy precisos, como observatorios de ondas gravitacionales.

Desde el punto de vista teórico, el aspecto más importante de nuestro resultado es que proporciona una nueva manera de considerar los agujeros negros. Ng ha demostrado que la extraña dependencia de las fluctuaciones espaciotemporales con la raíz cúbica de las distancias permite rederivar la fórmula de Bekenstein y Hawking para la cantidad de información que puede almacenar un agujero negro. Al mismo tiempo, también permite obtener una cota universal para toda computación efectuada por agujeros negros: el número de bits en la memoria es proporcional al cuadrado de la velocidad de cómputo, donde la constante de proporcionalidad resulta ser Gh/c^5 . Ello pone de manifiesto el vínculo entre la información y la teoría de la relatividad especial (cuyo parámetro definitorio es la velocidad de la luz, c), la relatividad general (ya que depende de la constante de la gravitación universal, G) y la mecánica cuántica (manifiesta en la dependencia con la constante de Planck, h).

Cartografiar el espaciotiempo

Medir distancias e intervalos de tiempo constituye una forma de computación y está sometida a las mismas limitaciones que afectan a los ordenadores normales. Tales consideraciones demuestran que el proceso de medición es más sutil de lo que se pensaba.

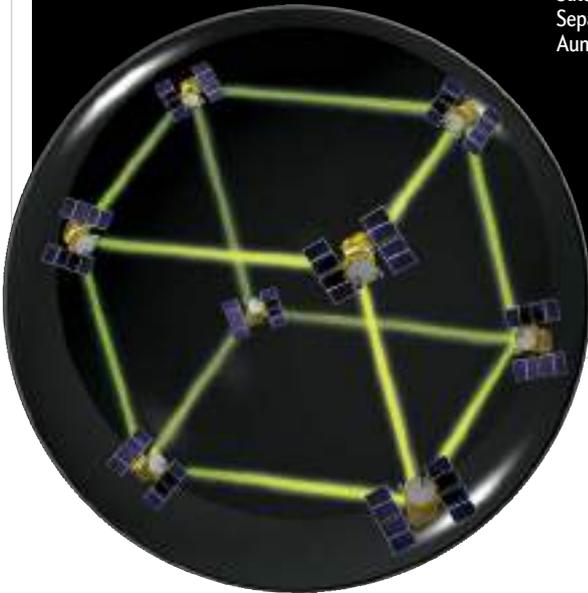
Una manera de cartografiar un volumen de espacio consistiría en usar un enjambre de satélites GPS que efectuasen mediciones enviando señales y cronometrando su llegada. Para lograr una precisión máxima, habremos de emplear un gran número de satélites. Pero esto tiene un límite: si son demasiados, el sistema colapsará sobre sí mismo por efecto de su propia gravedad y se convertirá en un agujero negro.

Para medir una región con el doble de diámetro podríamos usar el doble de satélites. Sin embargo, el volumen será ocho veces mayor, por lo que los satélites habrán de estar más espaciados. Cada uno deberá cubrir una subregión mayor, lo que reducirá la precisión de las medidas.

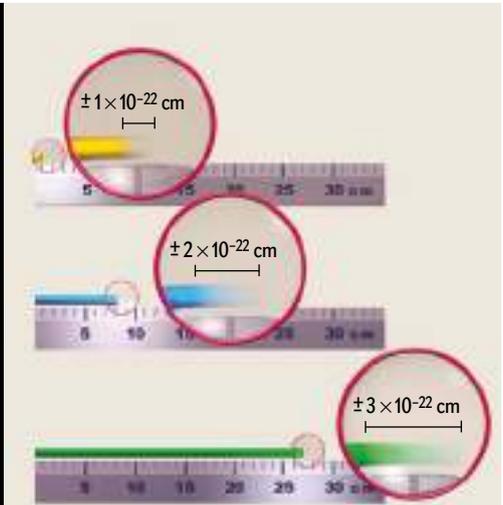


▲ Radio: 100 km
Satélites: 4
Separación: 90 km

▼ Radio: 200 km
Satélites: 8
Separación: 150 km
Aumento del error: 26 %



Y, tal vez más importante aún, el resultado anterior conduce directamente al principio holográfico: la hipótesis de que nuestro universo tridimensional sería, en un sentido profundo aunque todavía insondable, bidimensional. La cantidad máxima de información que puede almacenar una región de espacio parece ser proporcional no a su volumen, como cabría esperar, sino al área de la superficie que delimita dicho volumen [véase «La información en el universo holográfico», en este mismo número]. Se suele considerar que el principio holográfico emana de los detalles que aún ignoramos del funcionamiento de la gravedad a nivel cuántico. Sin embargo, también se deduce de manera directa a partir de las limitaciones cuánticas fundamentales a la precisión de las medidas.

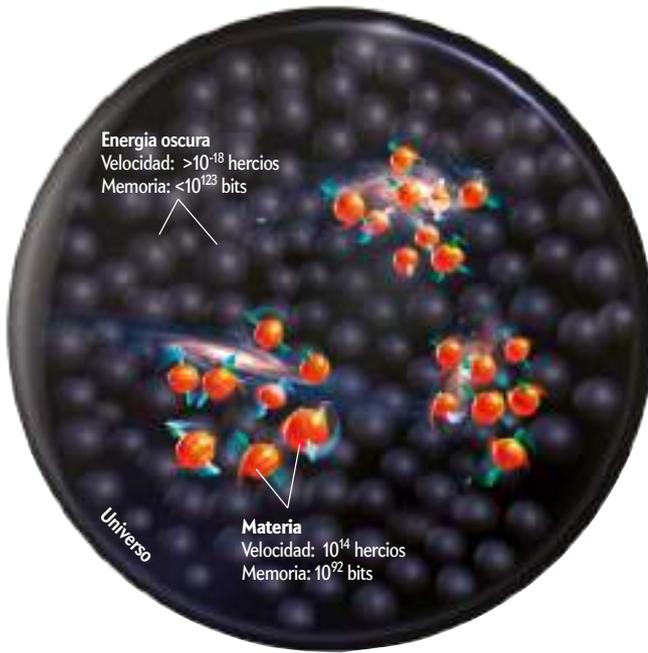


Como resultado, la incertidumbre de la medida no es fija, sino que varía en función del tamaño del objeto que se mide. Cuanto mayor sea dicho objeto, más borrosos serán los detalles de su estructura. No ocurre igual en la vida cotidiana, donde la imprecisión de la medida es independiente del tamaño del objeto y solo depende de cuán finas sean las subdivisiones de nuestra regla. Es como si nuestra elección de qué vamos a medir afectase a la estructura detallada del espaciotiempo.

LA CAPACIDAD DE CÓMPUTO DEL UNIVERSO

Los principios de la computación pueden aplicarse no solo a los ordenadores más compactos (los agujeros negros) y diminutos (la espuma del espaciotiempo), sino también al mayor de todos ellos: el universo. Es posible que el cosmos sea infinito en extensión, pero solo ha existido durante un tiempo finito. El radio de la porción observable en la actualidad mide varias decenas de miles de millones de años luz. Para que podamos conocer el resultado de un cómputo, es necesario que este haya tenido lugar dentro de dichos límites.

El análisis anterior sobre el número de tictacs proporciona también el número de operaciones que han podido realizarse en el universo desde su comienzo: 10^{123} . Compárese este límite con el comportamiento de la materia que nos rodea: la materia visible, la materia oscura y la llamada energía oscura, responsable de que el universo se esté expandiendo a una velocidad cada vez mayor. La densidad observada de energía cósmica es de unos 10^{-9} julios por metro cúbico, por lo que el universo visible contiene una energía del orden de 10^{72} julios. Eso quiere decir que, de acuerdo con el teorema de Margolus-Levitin, puede



COMPUTO ERGO SUM: El universo puede verse como un ordenador que consta de dos tipos de componentes: la materia (rojo) y la energía oscura (gris). La primera es muy dinámica y actúa como un ordenador ultrarrápido que computa en paralelo. La energía oscura parece casi estática y procede como un ordenador que opera en serie, mucho más lento. En conjunto, estos componentes han efectuado tantas operaciones como permiten las leyes de la física.

efectuar hasta 10^{106} operaciones por segundo. Desde su origen hasta el presente (10^{17} segundos), eso da un total de 10^{223} operaciones de cómputo. En otras palabras: el universo habría efectuado el número máximo de operaciones que permiten las leyes de la física.

Para calcular la capacidad total de memoria de la materia ordinaria, aquella formada por átomos, podemos aplicar los métodos habituales de la mecánica estadística y la cosmología. La materia puede albergar el máximo de información cuando se convierte en partículas energéticas y sin masa, como los neutrinos o los fotones, cuya densidad de entropía es proporcional al cubo de su temperatura. La densidad de energía de las partículas (que determina el número de operaciones que pueden efectuar) es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura. Así pues, el número total de bits es proporcional al número de operaciones elevado a $3/4$. El valor correspondiente al universo en su conjunto arroja la cifra de 10^{92} bits. Si las partículas contienen estructura interna, el número de bits puede ser algo mayor. Estos bits cambian de estado más rápido de lo que se comunican entre sí: la materia ordinaria es una computadora que, a diferencia de los agujeros negros, funciona en gran medida en paralelo, igual que el ordenador supremo.

En cuanto a la energía oscura, nadie sabe qué es ni, por supuesto, cuánta información almacena. Pero según el principio holográfico, el universo puede almacenar un máximo de 10^{223} bits, un número casi igual al del total de operaciones. Esta igualdad aproximada no es una coincidencia. Nuestro universo se encuentra cerca de su densidad crítica: si su densidad hubiera sido un poco mayor, podría haber colapsado sobre sí mismo. Así

pues, cumple —o casi cumple— las condiciones para maximizar el número de cómputos. Ese número máximo es R^2/l_p^2 , el mismo que el número de bits dado por el principio holográfico. En cada época, el número máximo de bits que el universo puede contener es aproximadamente igual al número de operaciones que podría haber efectuado hasta ese momento.

Mientras que la materia ordinaria experimenta un inmenso número de operaciones, la energía oscura se comporta de modo muy distinto. Si codifica el número máximo de bits permitido por el principio holográfico, la abrumadora mayoría de esos bits no habría tenido tiempo para cambiar de estado más que una vez en el transcurso de la historia cósmica. Así pues, esos bits no ordinarios son meros espectadores de los cómputos mucho más veloces efectuados por un número mucho menor de bits ordinarios. Sea lo que sea la energía oscura, no está computando demasiado. Tampoco tiene por qué: suministrar la energía que falta y acelerar la expansión cósmica son, en términos computacionales, tareas sencillas.

¿Qué está computando el universo? Hasta donde sabemos, no está calculando una única respuesta a una sola pregunta, como hacía el superordenador Pensamiento Profundo de la *Guía del autoestopista galáctico*, la célebre novela de ciencia ficción de Douglas Adams. En su lugar, el universo parece estar computándose a sí mismo. Impulsado por el modelo estándar de la física de partículas a modo de programa, computa campos cuánticos, compuestos químicos, bacterias, seres humanos, estrellas y galaxias. Mientras lo hace, va cartografiando su propia geometría espaciotemporal con la precisión máxima que permiten las leyes de la física. La computación es la existencia.

Estos resultados, válidos para los ordenadores tradicionales, los agujeros negros, la espuma del espaciotiempo y la cosmología, dan testimonio de la unidad de la naturaleza. También ponen de manifiesto las interconexiones conceptuales de la física fundamental. Y aunque los físicos seguimos a la espera de una teoría completa de la gravitación cuántica, si sabemos que, sea cual sea, dicha teoría estará íntimamente conectada con la información cuántica.

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, enero de 2005

LOS AUTORES

Seth Lloyd es catedrático de ingeniería mecánica en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Ha destacado por sus investigaciones en computación cuántica y por haber propuesto el primer ordenador cuántico técnicamente viable. **Y. Jack Ng** es catedrático en la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill. Sus investigaciones se centran en las propiedades fundamentales del espaciotiempo, la materia y la energía oscuras y la gravedad cuántica.

PARA SABER MÁS

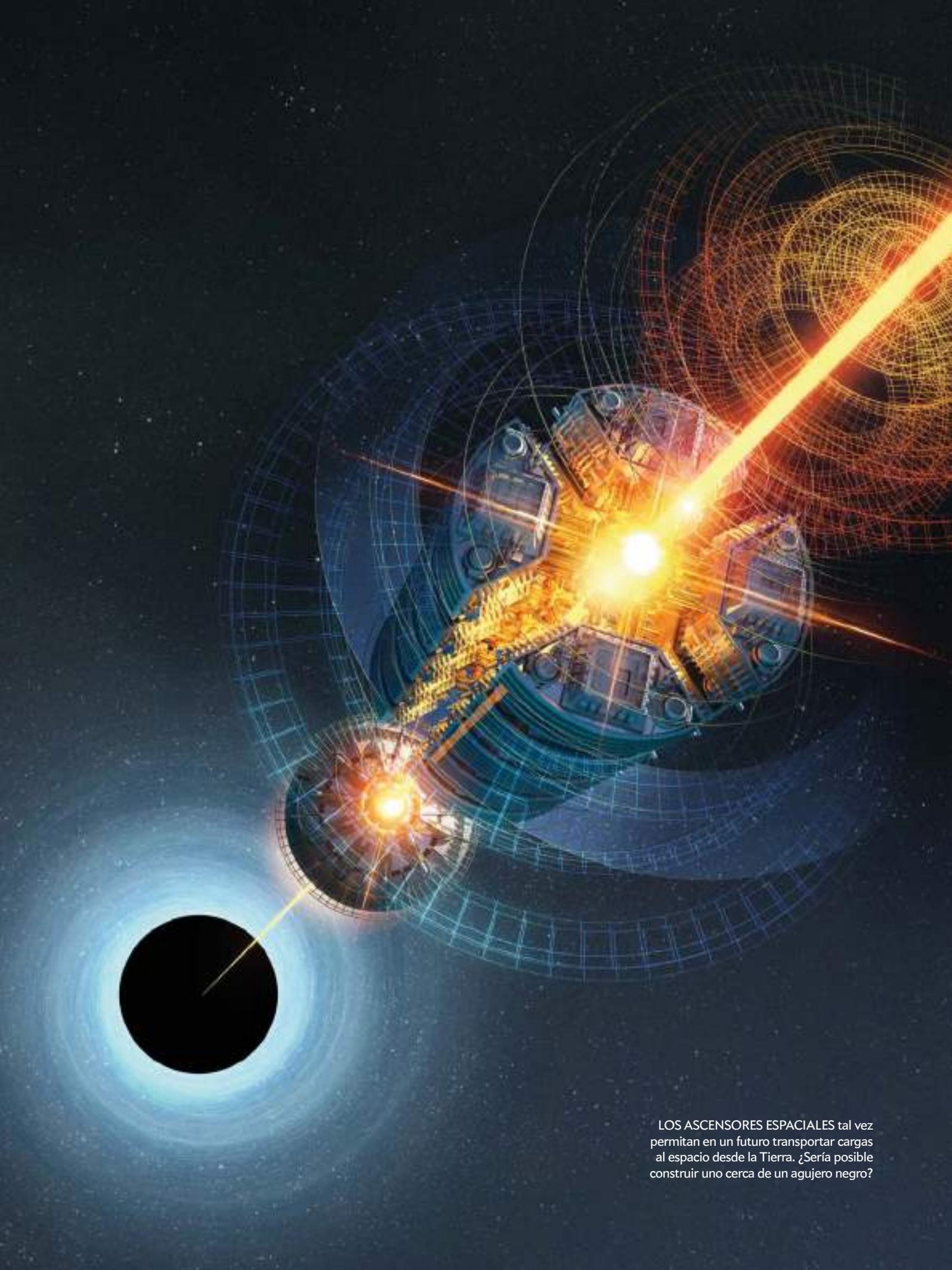
Ultimate physical limits to computation. Seth Lloyd en *Nature*, vol. 406, págs. 1047-1054, agosto de 2000.

From computation to black holes and space-time foam. Y. Jack Ng en *Physical Review Letters*, vol. 86, págs. 2946-2949, abril de 2001.

Computational capacity of the universe. Seth Lloyd en *Physical Review Letters*, vol. 88, art. 237901, junio de 2002.

The black hole final state. Gary T. Horowitz y Juan Maldacena en *Journal of High Energy Physics*, vol. 2004, art. 008, febrero de 2004.

Information: The new language of science. Hans Christian von Baeyer. Harvard University Press, 2004.



LOS ASCENSORES ESPACIALES tal vez permitan en un futuro transportar cargas al espacio desde la Tierra. ¿Sería posible construir uno cerca de un agujero negro?

AGUJEROS NEGROS MATEMÁTICOS

MINERÍA DE AGUJEROS NEGROS

¿Es posible extraer energía de las proximidades de un agujero negro? Según un experimento mental, el dispositivo necesario violaría las leyes de la física

Adam Brown

TARDE O TEMPRANO EL SOL SE APAGARÁ. SU COMBUSTIBLE nuclear se agotará y, en caso de que la Tierra sobreviva, la humanidad se sumirá en un perpetuo invierno. En una situación así, nuestros descendientes se verían obligados a buscar otras alternativas energéticas. Primero consumirían los recursos del planeta, después los del sistema solar y, por último, los de todas las estrellas del universo observable. Cuando ya no quedase nada que quemar, seguramente fijarían su mirada en el único depósito de energía disponible: los agujeros negros. ¿Podrían aprovechar su energía?

Parece que no. Las razones por las que algo así resultaría inviable obedecen a las propiedades de las cuerdas cuánticas y a las características de un clásico de la ciencia ficción: el ascensor espacial.

FALSAS ESPERANZAS

A primera vista, extraer energía —o, de hecho, cualquier otra cosa— de un agujero negro parece imposible. Estos objetos se encuentran rodeados por un «horizonte de sucesos», una divisoria más allá de la cual nada puede escapar. Una bola de demolición que intentase derriuir un agujero negro para liberar su energía sería aniquilada, tragada para siempre junto con su desafortunado operario. Arrojar una bomba al astro no haría más que incrementar ligeramente su tamaño, en una cantidad proporcional a la masa del artefacto. Nada que entre en un agujero negro, ya sea un asteroide o un cohete, vuelve a salir jamás. Ni siquiera la luz puede huir de su interior.



O eso creíamos. Sin embargo, en 1974, en el que a mi juicio constituye el artículo de física más exquisito e impactante de todos los tiempos, Stephen Hawking demostró que estábamos equivocados. A partir de algunas ideas propuestas con anterioridad por Jacob Bekenstein, Hawking demostró que, en realidad, los agujeros negros dejan escapar una pequeña cantidad de radiación. Por supuesto, siguen destruyendo todo lo que cae en ellos. Pero aunque los objetos no salgan de una pieza, su energía sí acaba filtrándose al exterior. Ello sugiere la posibilidad de explotar su energía.

El origen de dicha radiación se encuentra en la mecánica cuántica. Gracias al efecto túnel, las partículas cuánticas pueden atravesar obstáculos que de otro modo nunca salvarían. Una partícula que rueda hacia una barrera puede aparecer de repente al otro lado. No intente hacer algo así en casa: si se lanza contra una pared, es muy poco probable que se materialice ileso en la habitación contigua. No obstante, en el caso de una partícula microscópica, la probabilidad de que eso ocurra resulta mayor.

Es el efecto túnel lo que permite que una partícula alfa (un núcleo de helio) escape de un núcleo radiactivo como el de un átomo de uranio. Y es también dicho fenómeno el que posibilita que la radiación salga de un agujero negro. Las partículas de Hawking no cruzan

la barrera gravitatoria «reventando» el horizonte de sucesos, sino deslizándose sutilmente hacia el otro lado por efecto túnel. Hawking demostró que la tasa de emisión de un agujero negro es muy baja, por lo que hasta ahora nadie ha observado dicha radiación. Sin embargo, constituye una consecuencia matemática tan convincente de aplicar las leyes cuánticas a un espaciotiempo curvo que hoy nadie duda de su existencia.

El hecho de que los agujeros negros permitan que la energía se filtre al exterior invita a pensar en la posibilidad de aprovecharla. Sin embargo, el diablo se encuentra en los detalles. No importa cómo intentemos succionar dicha energía, siempre aparecerán dificultades.

Una manera sencilla de atacar el problema consistiría en sentarse a esperar. Transcurrido un tiempo suficiente, el agujero negro acabará desembuchando toda su energía fotón a fotón. En el proceso, el astro irá encogiéndose hasta desvanecerse por completo. Podemos pensar en un agujero negro como en una deliciosa taza de café cuya superficie está prohibido tocar so pena de desmembramiento gravitatorio. Sin embargo, siempre nos quedará una manera de degustarlo: esperar a que se evapore e ir aspirando su aroma.

No obstante, ese método conlleva un serio inconveniente. Aunque esperar es fácil, deberíamos aguardar un tiempo insosteniblemente largo. Un agujero negro con una masa equivalente a la del Sol radia a una temperatura de unos 60 nanokelvin. Hasta los años ochenta, ni siquiera sabíamos como obtener temperaturas tan bajas en el laboratorio. Como consecuencia, un astro así tarda una asombrosa cantidad de tiempo en evaporarse: del orden de 10^{57} veces la edad del universo actual. En general, el tiempo de vida de un agujero negro crece como el cubo de su masa, m^3 . Así pues, nuestros helados descendientes

EN SÍNTESIS

Los agujeros negros poseen una «atmósfera térmica» en las inmediaciones del horizonte de sucesos. Dicha envoltura se compone de partículas de Hawking que, debido al intenso campo gravitatorio, nunca lograrán escapar hasta el infinito.

En el pasado, varios investigadores han propuesto que esa energía podría extraerse con el dispositivo adecuado. En principio, bastaría con descolgar una caja amarrada a un cable hasta las proximidades del horizonte y llenarla de radiación.

Sin embargo, es posible demostrar que un cable capaz de resistir la gravedad sin romperse violaría las leyes de la física. Las cuerdas cuánticas parecen encontrarse justo en el límite, pero no podrían levantar ningún peso.

tendrían una buena motivación para querer acelerar el proceso.

Hay una razón para el optimismo. No todas las partículas de Hawking escapan hacia el infinito. De hecho, casi ninguna lo hace. Casi todas las que atraviesan el horizonte de sucesos por efecto túnel vuelven a caer poco después en el agujero negro. Por tanto, si fuésemos capaces de atrapar esos fotones antes de que regresaran a las fauces del astro, tal vez podríamos recolectar más rápido su energía.

Para entender cómo cabría liberar esos fotones, hemos de explorar primero las fuerzas extremas que aparecen en las inmediaciones de un agujero negro. El motivo por el que la mayor parte de las partículas de Hawking vuelven a caer hacia el objeto se debe a que no son emitidas «en línea recta» hacia el exterior. Imagine que encendemos un láser justo en el exterior del horizonte de sucesos. Tendríamos que apuntar directamente hacia arriba para que la luz pudiera escapar. Y, cuanto más cerca nos encontrásemos del horizonte, con mayor precisión deberíamos hacerlo. El campo gravitatorio reviste tal intensidad que, si nos desviamos mínimamente de la vertical, la luz dará media vuelta y acabará regresando al astro.

Tal vez resulte extraño que la velocidad orbital haga aún más difícil que una partícula escape. A fin de cuentas, es gracias al movimiento orbital que la Estación Espacial Internacional no se precipita hacia la Tierra, ya que este le proporciona la fuerza centrífuga necesaria para contrarrestar la atracción gravitatoria.

Radiación de Hawking



Sin embargo, la situación se invierte cuando nos acercamos demasiado a un agujero negro. En ellos, la velocidad orbital impide el escape. Ello se debe a la relatividad general, según la cual tanto la masa como la energía experimentan el efecto de la gravedad. En este caso, dicho principio se aplica a la energía cinética



orbital. En la vecindad del agujero negro (en concreto, dentro de un radio 1,5 veces mayor que el del horizonte de sucesos), la atracción gravitatoria debida a la energía cinética orbital supera a la repulsión centrífuga. Por tanto, dentro de ese radio, una mayor velocidad angular provocará que las partículas caigan más rápido.

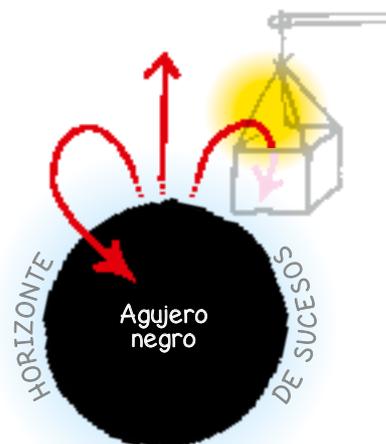


Lo anterior implica que, si nos acercamos lo suficiente al horizonte de sucesos de un agujero negro, comenzaremos a sentir calor, ya que no solo nos veremos rodeados por los fotones de Hawking que lograrán escapar hacia el infinito, sino también por aquellos que nunca lo conseguirán. Así pues, los agujeros negros se encuentran envueltos por una «atmósfera térmica»: cuanto más cerca nos encontremos del horizonte, más calor sentiremos. Y dicho calor transporta energía.

Dado que en las inmediaciones de un horizonte de sucesos hay energía almacenada, en el pasado varios investigadores han concebido astutas propuestas de «minería de agujeros negros». Estas consisten en acercarse a una caja al astro —sin que llegue a cruzar el horizonte—, dejar que se llene con la radiación de la atmósfera térmica y, una vez repleta, tirar de un cable para recuperarla.

Una fracción de la energía que atrapamos de esta manera habría escapado

de todos modos en forma de radiación de Hawking, pero la mayor parte habría vuelto a caer en él de no haber sido por nuestra intervención. Una vez lejos del horizonte, transportar la energía hasta un planeta como la Tierra resultaría relativamente sencillo. Bastaría con cargar la caja en un cohete o convertir la radiación en luz láser y transmitirla a casa.



La estrategia puede compararse a soplar sobre nuestra taza de café. Si no lo hacemos, la mayor parte del vapor de agua volverá a caer en el líquido. Pero, si soplamos sobre la superficie, lograremos que el vapor recién emitido escape. Varios expertos han argumentado que, si atrapásemos la atmósfera térmica de un agujero negro de la manera adecuada, podríamos extraer toda su energía en un tiempo mucho menor que el que implicaría esperar a que se evaporase por sí solo. Dicho tiempo, en lugar de crecer como m^3 , lo haría de manera proporcional a la masa del objeto, m .

Sin embargo, en un trabajo reciente he demostrado que esa conjetura es falsa. El problema no radica en ningún sutil efecto cuántico ni en las propiedades de ninguna teoría cuántica de la gravedad, sino en una consideración de lo más mundana: es imposible construir un cable lo bastante resistente para sostener la caja cerca de un agujero negro. Para extraer su atmósfera térmica, necesitaríamos un ascensor espacial que violase las leyes fundamentales de la física.



Al igual que nuestro empeño por viajar cada vez más rápido se encuentra limitado de manera fundamental por la velocidad de la luz, la resistencia de los materiales termina en $E = mc^2$

ASCENSORES ESPACIALES

Los ascensores espaciales fueron popularizados por Arthur C. Clarke en su novela de 1979 *Las fuentes del paraíso*. Constan de un cable que pende del espacio exterior y que llega hasta la superficie de la Tierra. El cable no se encuentra sujeto desde abajo (como en un rascacielos, donde cada planta soporta a las superiores), sino desde arriba: cada segmento del cable tira de los que se encuentran debajo. El extremo más alejado está amarrado a un gran contrapeso situado en una órbita geoestacionaria. El equilibrio entre las distintas fuerzas asegura que el sistema permanezca flotando como por arte de magia; donde la magia, como dijo una vez Clarke, resultaría indistinguible de una tecnología lo suficientemente avanzada.

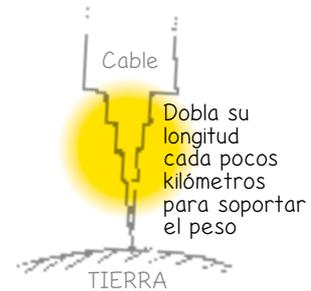
La ventaja de semejante construcción reside en que, una vez preparado el cable,

poner una carga en órbita resultaría muy sencillo. Ya no sería necesario recurrir al riesgo y la ineficiencia de los cohetes, que, durante las primeras etapas de su viaje, hacen poco más que transportar su propio combustible. Con un ascensor espacial bastaría con enganchar al cable un ascensor dotado de un motor eléctrico. Ello reduciría el coste marginal de transportar una carga hasta una órbita baja al precio de la electricidad. La factura por mandar un kilogramo al espacio pasaría de las decenas de miles de dólares que cobraba el transbordador espacial a un par de dólares. Un viaje espacial por el precio de un billete de metro.

Por supuesto, los obstáculos técnicos asociados a la construcción de un ascensor espacial son formidables. El mayor de todos radica en encontrar un material para el cable. Este tendría que ser muy resistente y, al mismo tiempo, muy ligero: resistente para que no se estire demasiado y se rompa, y ligero para no sobrecargar la parte superior.

El acero no cumple en absoluto con tales requisitos. Además de todo lo que se encuentra debajo, cada segmento del cable debe sostener su propio peso, por lo que su grosor ha de aumentar con la altitud. Dado el elevado peso del acero con relación a su resistencia, cerca de la superficie terrestre el grosor del cable debería doblarse cada pocos kilómetros. Mucho antes de llegar al punto geoestacionario, alcanzaría un tamaño tan vasto que el proyecto nunca podría llevarse a cabo.

Jamás podremos fabricar un ascensor espacial con materiales del siglo XIX. Sin embargo, algunos materiales del siglo XXI parecen más prometedores. Los nanotubos de carbono, largas cadenas de átomos de carbono dispuestos según un patrón hexagonal, hacen gala de una resistencia mil veces mayor que la del acero. Construir un ascensor espacial con ellos



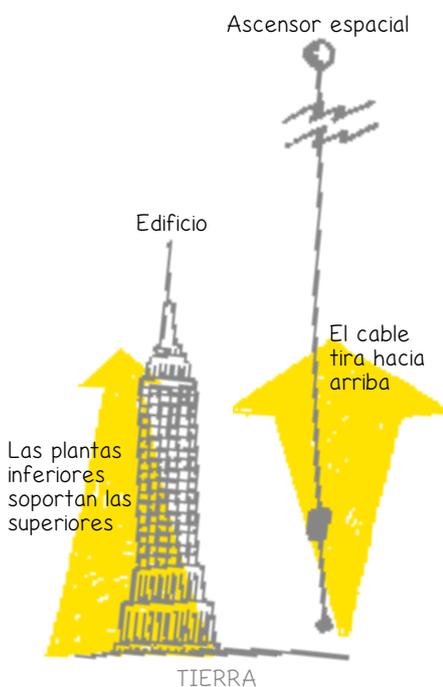
costaría miles de millones y supondría, de lejos, el mayor proyecto de ingeniería de la historia. Tendríamos que apañárnoslas para entretejer los nanotubos hasta formar hilos de decenas de miles kilómetros de longitud, así como vencer un sinfín de dificultades adicionales. Pero, para un físico teórico, como quien escribe, siempre que un proyecto así no viole las leyes de la física todo lo demás es pura ingeniería. (Según este criterio, el problema de construir un reactor de fusión estaría ya «resuelto», a pesar de la notoria ausencia de tales dispositivos en nuestra civilización... con la honrosa excepción del Sol.)

INGENIERÍA EN UN AGUJERO NEGRO

Por supuesto, todo resultaría muchísimo más complicado en las inmediaciones de un agujero negro. El campo gravitatorio alcanza allí una intensidad enorme, por lo que una construcción que funcionase en la Tierra bien podría resultar patética en un agujero negro.

Puede demostrarse que, incluso con nanotubos de carbono, un hipotético ascensor espacial que llegase hasta el horizonte de sucesos de un agujero negro tendría que ser, o bien tan delgado cerca del astro que un solo fotón de Hawking acabaría destruyéndolo, o bien tan grueso lejos de él que colapsaría bajo su propio peso y se convertiría, a su vez, en otro agujero negro.

Tales limitaciones descartan los nanotubos de carbono. Pero, al igual que a la Edad del Bronce siguió la Edad de Hierro, y del mismo modo que tras el acero llegaron los nanotubos de carbono, cabe esperar que se continúen descubriendo sustancias cada vez más ligeras y resistentes. Pero el progreso no puede continuar para siempre. Hay un límite para la relación entre peso y tensión de un cable que la ingeniería de materiales nunca podrá superar. Dicho límite está impuesto por las leyes de la naturaleza. En concreto, aparece como consecuencia de la célebre ecuación de Einstein $E = mc^2$.



La tensión de un cable nos indica cuánta energía hemos de invertir para estirarlo: cuanto más tenso esté, más nos costará alargarlo. Una goma elástica tiene tensión porque, para redistribuir sus moléculas, hemos de invertir energía. Cuando un material nos permite recolocar sus moléculas con facilidad, su tensión es baja; en caso contrario, es elevada. Pero, en lugar intentar reordenar los elementos básicos de un cable, siempre podemos optar por una estrategia más radical: crear una nueva sección de cable y unirla al extremo. El coste energético de estirar el cable mediante este procedimiento resulta igual a la energía contenida en la masa del nuevo segmento, dado por la fórmula $E = mc^2$: la masa de la nueva porción multiplicada por la velocidad de la luz al cuadrado.

Aunque semejante opción requiere invertir una enorme cantidad de energía, proporciona un método a prueba de fallos. Al mismo tiempo, implica un límite superior para el coste energético de estirar un cable y, por ende, para su tensión: esta nunca puede superar a la masa por unidad de longitud multiplicada por c^2 . (Tal vez piense que dos sogas entrecruzadas darán lugar a un cable dos veces más resistente. Sin embargo, pesan también el doble, por lo que la relación entre tensión y masa no mejorará.)

Este límite fundamental deja un amplio margen para el progreso técnico. La cota sobre la tensión que impone la ecuación de Einstein resulta cientos de miles de millones de veces superior a la resistencia del acero, así como cientos de millones de veces mayor que la de los nanotubos de carbono. Con todo, implica que no podremos mejorar nuestros materiales de manera indefinida. Al igual que nuestro empeño por viajar cada vez más rápido se encuentra limitado de manera fundamental por la velocidad de la luz, la resistencia de los materiales termina en $E = mc^2$.

Hay un material hipotético que justamente alcanza dicho límite, uno tan fuerte como nunca podrá llegar a serlo ningún otro. Hablamos de una sustancia que jamás ha sido observada en ningún laboratorio; algunos físicos incluso dudan de su existencia, pero otros han dedicado sus carreras a estudiarla. Aunque no hayamos visto los cables más resistentes de la naturaleza, sabemos cuáles podrían ser: las cuerdas cuánticas de la teoría de cuerdas. Quienes investigan sus propiedades creen que dichos objetos se corresponden con los constituyentes fundamentales de la materia. Pero, para el

propósito que nos ocupa, no nos importa cuán fundamentales sean, sino cuán resistentes.

Un cable fabricado con cuerdas cuánticas y que tuviese la misma longitud y peso que un cordón de zapatos podría sostener el Everest. Si deseásemos construir un ascensor espacial en un agujero negro, en ellas encontraríamos nuestra mejor opción. Allí donde los nanotubos de carbono fallan, las cuerdas tal vez tengan una posibilidad. Si nuestro problema de ingeniería puede resolverse de alguna manera, las cuerdas cuánticas bastarán. En cambio, si estas no lo logran, ningún otro material servirá.

Pero, si bien las cuerdas fundamentales son muy resistentes, no lo son lo suficiente. De hecho, se encuentran justo en el límite: un poco más fuertes, y podríamos construir un ascensor espacial que llegase hasta la superficie de un agujero negro; algo menos, y el proyecto estaría condenado al fracaso, ya que la cuerda acabaría rompiéndose por efecto de su propio peso. Las cuerdas cuánticas resultan estrictamente marginales en el sentido de que, si descolgáramos una hasta un horizonte de sucesos, tendría la resistencia justa para soportar su propio peso, pero no le sobraría nada para levantar ninguna carga. Podría sostenerse a sí misma, pero solo a costa de soltar la caja.

Así pues, los agujeros negros estarán siempre a salvo del pillaje energético. Las leyes de la naturaleza limitan los materiales de los que podemos disponer. Y aunque tal vez logremos construir un cable que penetre en su atmósfera térmica, este nunca podrá extraer su energía.

Dado que la resistencia de una cuerda cuántica se encuentra justo en el límite, siempre queda la posibilidad de emplear un cable algo más corto. Uno que solo llegue hasta las capas superiores de la atmósfera térmica, más enrarecidas, y arrebate de ellas algo de energía. Sin embargo, esa posibilidad no resulta mucho mejor que sentarse a esperar a que el agujero negro se evapore por sí solo. El tiempo que tardaríamos en succionar toda su energía seguiría

creciendo como m^3 , igual que la evaporación espontánea. Podríamos reducirlo en un pequeño factor, pero no cambiaríamos de manera sustancial las reglas del juego.

En última instancia, nuestro enemigo es la velocidad de la luz. Dado que resulta imposible viajar más rápido que la luz, nada puede escapar del interior de

un agujero negro. Como no podemos extraer energía de ningún combustible por un valor superior a mc^2 , el último recurso de una civilización futura serán los agujeros negros. Pero, debido a que la tensión de un cable no puede superar a su densidad lineal de masa por la velocidad de la luz al cuadrado, nunca podremos extraer su energía.

Cuando todas las estrellas se hayan apagado, comenzará un invierno perpetuo. Podremos echar mano del tesoro energético almacenado en las atmósferas térmicas de los agujeros negros, pero será a nuestro propio riesgo. Si lo hacemos de manera precipitada o nos adentramos demasiado en ellas, en lugar de extraer la radiación del agujero negro, este nos arrebatara la caja a nosotros. Sin duda, el invierno será frío. ☹️



Artículo publicado en Investigación y Ciencia, abril de 2015

EL AUTOR

Adam Brown es físico teórico de la Universidad Stanford. Sus investigaciones se centran en las propiedades matemáticas de los agujeros negros y en la cosmología teórica.

PARA SABER MÁS

Acceleration radiation and the generalized second law of thermodynamics. William G. Unruh y Robert M. Wald en *Physical Review D*, vol. 25, n.º 4, págs. 942-958, febrero de 1982.

Tensile strength and the mining of black holes. Adam R. Brown en *Physical Review Letters*, vol. 111, 211301, noviembre de 2013.

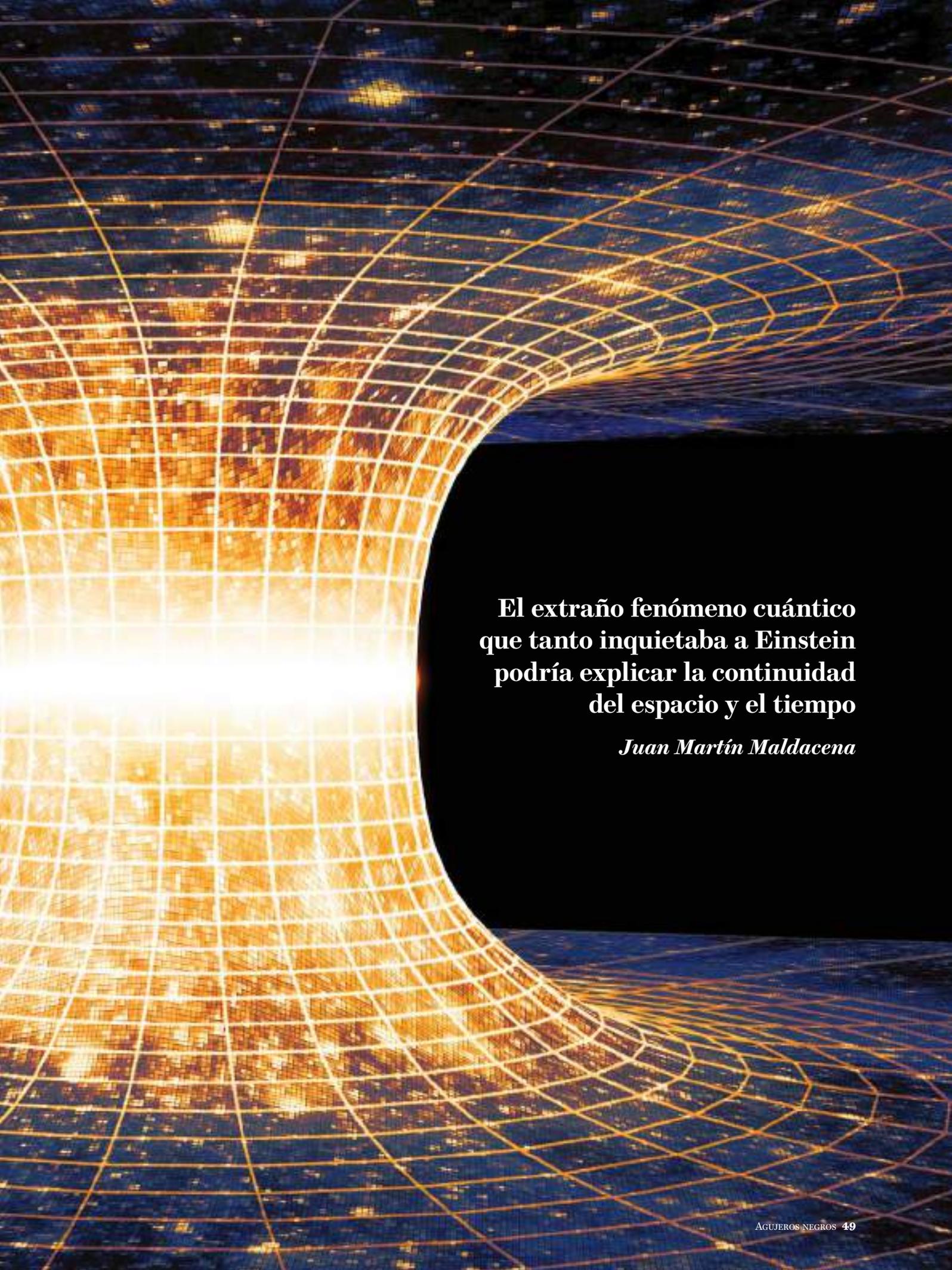
EN NUESTRO ARCHIVO

La mecánica cuántica de los agujeros negros. Stephen W. Hawking en *IyC*, marzo de 1977. Reeditado para «Grandes ideas de la física», colección Temas de *IyC*, n.º 80, 2015.



AGUJEROS NEGROS MATEMÁTICOS

GEOMETRÍA Y ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO



**El extraño fenómeno cuántico
que tanto inquietaba a Einstein
podría explicar la continuidad
del espacio y el tiempo**

Juan Martín Maldacena



PRINCIPIOS DEL SIGLO XX HUBO DOS REVOLUCIONES EN FÍSICA: LA MECÁNICA cuántica y la relatividad general. La mecánica cuántica nos enseñó las leyes que rigen el comportamiento del mundo microscópico. La relatividad general, formulada en 1915 por Albert Einstein, es una teoría del espacio y el tiempo. Según ella, el espaciotiempo es curvo y posee una dinámica propia.

Hasta ahora todas las predicciones de ambas teorías se han visto confirmadas por los experimentos. Sin embargo, solemos aplicar una y otra a fenómenos muy distintos. Acostumbramos a emplear la mecánica cuántica para describir el comportamiento de objetos extremadamente pequeños (como átomos o fotones), mientras que usamos la relatividad general para estudiar cómo cambia la geometría del espaciotiempo en presencia de cuerpos muy masivos (estrellas o galaxias, por ejemplo). Para investigar sistemas físicos muy pequeños y masivos, como el universo pocos instantes después de la gran explosión, necesitaríamos disponer de una descripción cuántica del espaciotiempo. Hoy en día este sigue siendo uno de los mayores retos a los que se enfrenta la física fundamental.

En 2013, motivados por un debate reciente relacionado con las propiedades de los agujeros negros, el físico de Stanford Leonard Susskind y el autor de este artículo propusimos una conexión entre dos fenómenos aparentemente paradójicos que ocurren en mecánica cuántica y en relatividad general: el entrelazamiento cuántico y los agujeros de gusano. El primero hace referencia a un tipo de correlación cuántica que puede existir entre dos sistemas físicos distantes. Los agujeros de gusano son «atajos» que aparecen en algunas soluciones de las ecuaciones de Einstein y que conectan regiones muy lejanas del espacio.

A continuación veremos que ambos fenómenos están relacionados. La equivalencia entre ellos puede argumentarse con solidez para algunos casos concretos en los que intervienen agujeros negros, pero parece ser más general. Nuestra idea es que esta relación entre geometría y entrelazamiento tal vez constituya un principio que toda teoría cuántica del espaciotiempo, o de grave-

dad cuántica, debería obedecer. Dicho principio tiene consecuencias profundas. Sugiere que, de alguna forma, el espaciotiempo mismo podría emerger a partir del entrelazamiento cuántico de constituyentes microscópicos más fundamentales.

Curiosamente, tanto el entrelazamiento cuántico como los agujeros de gusano se remontan a dos artículos que Einstein escribió en 1935. Ambos trabajos parecen tratar sobre fenómenos muy distintos, y seguramente Einstein nunca sospechó que pudiese haber una conexión entre ellos. De hecho, el entrelazamiento era una propiedad de la mecánica cuántica que molestaba enormemente al físico alemán. En lo que sigue repasaremos ambos artículos y explicaremos su relación desde un punto de vista moderno.

AGUJEROS NEGROS Y AGUJEROS DE GUSANO

Una predicción sorprendente de la teoría de Einstein son los agujeros negros. Estos objetos se forman cuando una gran cantidad de materia se concentra en una región pequeña del espacio. La materia no tiene por qué ser especial; por ejemplo, podríamos crear un agujero negro con aire. Eso sí, necesitaríamos mucho aire: tendríamos que llenar una esfera del tamaño del sistema solar. Pero, si lo hiciéramos, el sistema colapsaría bajo su propio peso y se comprimiría hasta formar un agujero negro.

Todo agujero negro se encuentra rodeado por una superficie imaginaria llamada horizonte de sucesos. Decimos que es imaginaria porque un astronauta que cayese libremente no encontraría nada allí. Sin embargo, una vez que la atravesase, no podría dar la vuelta atrás. Entraría en una región donde el espacio está colapsando hacia una «singularidad», una zona

EN SÍNTESIS

Un debate reciente sobre la manera en que los agujeros negros procesan la información ha llevado a proponer una conexión insospechada entre las leyes cuánticas y las propiedades fundamentales del espaciotiempo.

La mecánica cuántica y la relatividad general predicen dos fenómenos que, a primera vista, parecen permitir la transmisión instantánea de la información: el entrelazamiento cuántico y los agujeros de gusano.

Varios trabajos han demostrado que ambos fenómenos están relacionados: el entrelazamiento puede originar una conexión geométrica entre regiones distantes del espacio. La idea sugiere un nuevo principio en gravedad cuántica.

donde la geometría se contrae por completo. Al acercarse a la singularidad, el astronauta moriría despedazado por las fuerzas gravitatorias.

Fuera de la región donde se encuentra la materia, un agujero negro queda descrito por una solución de las ecuaciones de Einstein que fue descubierta en 1916 por el físico Karl Schwarzschild. La motivación original de Schwarzschild era encontrar el campo gravitatorio generado por una masa puntual. De hecho, su solución no contiene materia: todo lo que describe es un campo gravitatorio puro con simetría esférica. Aunque puede parecer una configuración simple, las propiedades de este espaciotiempo resultaron bastante difíciles de interpretar. Una comprensión razonable de su estructura completa no llegó hasta los años sesenta.

En 1935, en uno de los artículos a los que aludíamos más arriba, Einstein y Nathan Rosen, uno de sus colaboradores en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, descubrieron un aspecto muy curioso de la solución de Schwarzschild. Hallaron que esta contiene dos espacios independientes unidos por una especie de «tubo». A un instante de tiempo fijo, la geometría puede visualizarse de la siguiente manera: muy lejos de la región central, el espacio es plano (sin curvatura apreciable); pero, a medida que nos acercamos al centro, la geometría se deforma y se conecta con un segundo espacio que también es asintóticamente plano.

La conexión geométrica que acabamos de describir recibe el nombre de «puente de Einstein y Rosen» (ER), o agujero de gusano. Ellos analizaron la geometría de una hipersuperficie a un tiempo fijo (es decir, un espacio curvo de tres dimensiones) años antes de que se entendiera la estructura completa de la solución de Schwarzschild. Su motivación era encontrar una descripción geométrica de las partículas elementales que no fuera singular. Hoy creemos que su interpretación era desacertada.

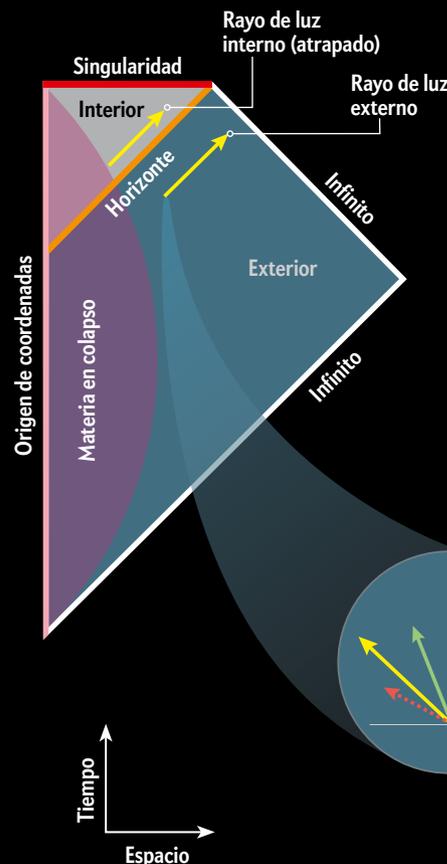
El puente original de ER une dos espacios independientes. Sin embargo, resulta posible encontrar geometrías similares en las que las dos regiones conectadas pertenecen al mismo espacio. Con algunas pequeñas modificaciones, la solución de Schwarzschild puede también interpretarse como una que contiene dos agujeros negros muy distantes unidos a través de su interior. Imagine que tenemos un agujero negro aquí y otro en una galaxia lejana. Un observador, a quien llamaremos Romeo, está parado a un metro del

Causa y efecto en un agujero negro

Los agujeros negros (*derecha*) se forman cuando una gran cantidad de materia se concentra en una región del espacio lo suficientemente pequeña. En tal caso, el campo gravitatorio en la región que rodea a la materia se torna tan intenso que nada, ni siquiera la luz, puede escapar de allí. La superficie a partir de la cual resulta imposible dar la vuelta atrás recibe el nombre de horizonte de sucesos (*naranja*). Todo objeto que traspase el horizonte caerá inevitablemente hacia una singularidad: una zona en la que la curvatura del espacio se torna infinita (*rojo, abajo*).



La estructura causal de un agujero negro suele representarse mediante un «diagrama de Penrose» (*abajo*). En estos diagramas el eje vertical corresponde al tiempo, y el horizontal, a la coordenada radial (las otras dos direcciones del espacio se omiten). La escala en cada punto se elige de tal manera que los rayos de luz describan siempre líneas rectas a 45 grados. Todas las trayectorias físicas transcurren necesariamente en el interior de estos «conos de luz». Por tanto, un suceso que ocurra en una posición e instante determinados solo podrá afectar a los puntos incluidos en el interior de su cono de luz futuro.



En un diagrama de Penrose, todo el espacio físico y todo el tiempo quedan representados en un área finita. Este ejemplo reproduce el colapso gravitatorio de una gran cantidad de materia (*rosa*) y la formación de un agujero negro.

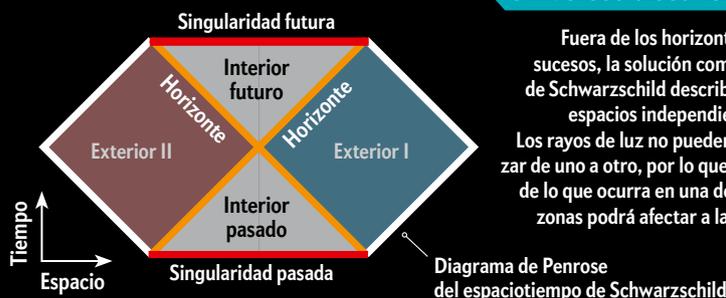
Universos distantes y agujeros de gusano

En 1916, Karl Schwarzschild publicó una solución de las ecuaciones de Einstein correspondiente a un campo gravitacional puro con simetría esférica. Dicha solución no contiene materia; representa un caso idealizado en el que solo hay campo gravitatorio. Más tarde se vio que este descri-

bía una singularidad y un horizonte de sucesos; es decir, un agujero negro. Sin embargo, el espaciotiempo de Schwarzschild esconde una estructura mucho más rica. A continuación se indican sus principales características a partir de su diagrama de Penrose.

Singularidad futura y pasada

El espaciotiempo completo asociado a la solución de Schwarzschild incluye dos singularidades: una en el futuro distante y otra en el pasado remoto. En otras palabras, hay una región donde el espacio está colapsando hacia una singularidad (un agujero negro) y otra en la que el espacio está «saliendo», como si se tratase de una gran explosión. Cada una de estas regiones se encuentra rodeada por su propio horizonte de sucesos.

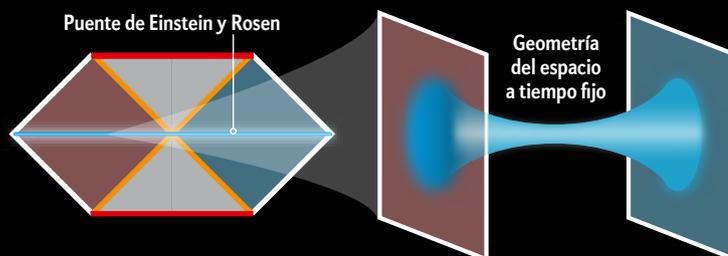


Universos desconexos

Fuera de los horizontes de sucesos, la solución completa de Schwarzschild describe dos espacios independientes. Los rayos de luz no pueden cruzar de uno a otro, por lo que nada de lo que ocurra en una de esas zonas podrá afectar a la otra.

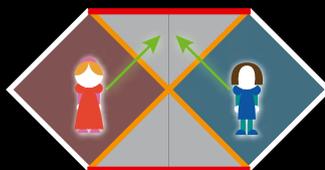
Agujeros de gusano

En 1935, Einstein y Nathan Rosen descubrieron que la solución de Schwarzschild contenía una geometría suave (*línea azul, izquierda*) que conectaba dos espacios distintos. Este «puente», o agujero de gusano, describe la geometría del espacio en un instante de tiempo fijo (*derecha*). No puede atravesarse, ya que para ello sería necesario viajar más rápido que la luz.



Agujeros negros conectados

Imaginemos dos observadores, Romeo y Julieta, uno en cada espacio exterior. Cada uno de ellos verá un horizonte de sucesos; es decir, un agujero negro. Aunque las regiones externas pertenecen a universos distintos, los dos agujeros negros comparten el interior, por lo que Romeo y Julieta podrían encontrarse allí.



Solución idealizada

La solución de Schwarzschild describe un caso de gran interés teórico, pero no se aplica a los agujeros negros del mundo real. Estos últimos se forman por el colapso de materia, lo que modifica la geometría de la solución. Un agujero negro astrofísico solo corresponde a una parte de la geometría de Schwarzschild; en particular, no contiene agujeros de gusano que conecten con otros espacios.

horizonte de sucesos del primer agujero negro, mientras que Julieta se encuentra a un metro del horizonte del segundo. Si los interiores de ambos agujeros negros están conectados por un puente de ER, la distancia entre Romeo y Julieta a través del agujero de gusano será solo de dos metros, con independencia de cuán lejos se hallen en el espacio ambiente.

Tales geometrías parecen problemáticas. Recordemos que uno de los principios de la relatividad especial es la imposibilidad de enviar señales más rápido que la luz. Sin embargo, se diría que los agujeros de gusano nos permiten violar este

principio, ya que podríamos emplearlos para mandar señales a través de ellos. No obstante, en 1962, Robert W. Fuller, de la Universidad de Columbia, y John A. Wheeler, de la de Princeton, demostraron que los puentes de ER no pueden usarse para enviar señales de ningún tipo. Ello se debe a que se trata de geometrías dinámicas en las que el tiempo desempeña un papel importante. Nuestros agujeros de gusano describen la geometría del espacio a un instante de tiempo fijo. Sin embargo, dicha geometría evoluciona con el tiempo. Fuller y Wheeler demostraron que un puente de ER siempre acaba «estirándose» —su longitud

se hace infinita— antes de que a un observador le dé tiempo a cruzarlo. Esto supone una decepción para los personajes de las películas de ciencia ficción, que suelen emplear los agujeros de gusano para cruzar el universo a velocidades superlumínicas.

En el caso de dos agujeros negros conectados a través de su interior por un agujero de gusano, los horizontes se tocan por un instante, pero luego se separan tan rápido que resulta imposible cruzar el puente y llegar al otro lado. De manera que, si Romeo tratase de enviar un mensaje superlumínico a Julieta, no podría: lanzaría un cohete con el mensaje hacia su agujero negro y la nave caería en él. Pero, una vez dentro, los dos horizontes se separarían a toda velocidad y el espacio colapsaría mucho antes de que el mensaje pudiese llegar al horizonte de Julieta.

Sin embargo, Romeo y Julieta aún tendrían una oportunidad para verse. Podrían dejarse caer en sus respectivos agujeros negros y encontrarse en el interior. Pero hay un problema: una vez dentro, jamás podrían salir, por lo que morirían en la singularidad. Se trataría, literalmente, de un caso de «atracción fatal». Lo extraño de esta geometría es que describe dos agujeros negros que comparten el interior. Por eso Romeo y Julieta pueden encontrarse allí.

Hemos de enfatizar que nuestros agujeros de gusano son muy distintos de los que aparecen en las películas de ciencia ficción. Estos últimos (aquellos que sí podrían atravesarse) requieren un tipo de materia con energía negativa que no parece ser compatible con las leyes de la física tal y como las conocemos. Por eso, muchos físicos creemos que los agujeros de gusano de la ciencia ficción no pueden existir en la naturaleza.

Otro matiz importante añade a la clase de agujeros negros que estamos considerando aquí. Los agujeros negros que se forman por el colapso de materia solo corresponden a una porción de la geometría completa de Schwarzschild, ya que la presencia de materia modifica la solución. Este caso se entiende muy bien y en él no hay ningún agujero de gusano. Los agujeros negros que se producen por medio de procesos astrofísicos naturales son de este tipo y no contienen agujeros de gusano que los conecten con otras regiones del espacio ni entre sí, como ocurre en la solución completa de Schwarzschild. Sin embargo, nos gustaría entender mejor la interpretación física del espaciotiempo de Schwarzschild. A fin de cuentas, se trata de una de las soluciones más sencillas de las ecuaciones de Einstein.

CORRELACIONES CUÁNTICAS

De manera sorprendente, la interpretación de la solución de Schwarzschild parece tener que ver con el otro artículo de Einstein que mencionábamos al principio. Este trabajo es hoy muy famoso e influyente. Fue escrito el mismo año junto con Rosen y Boris Podolski, también investigador del Instituto de Estudios Avanzados. Los autores (hoy conocidos por sus iniciales, EPR) mostraron que la mecánica cuántica permite la existencia de extrañas correlaciones entre sistemas físicos lejanos, una propiedad que más tarde sería llamada «entrelazamiento».

Las correlaciones entre objetos distantes también se dan en los sistemas clásicos. Imagine que usted sale de casa con un solo guante porque olvidó el otro en casa. Antes de mirar en su bolsillo, no podrá saber qué guante tomó. Pero, una vez lo haga y vea que tiene el guante derecho, sabrá de inmediato que el que está en su casa es el izquierdo.

Sin embargo, el entrelazamiento implica correlaciones entre variables cuánticas, las cuales pueden estar sujetas al principio de incertidumbre de Heisenberg. Este nos dice que hay pares de variables físicas que no pueden conocerse con total precisión al

mismo tiempo. El ejemplo más famoso es el de la posición y la velocidad de una partícula: si medimos muy bien su posición, la velocidad se tornará incierta, y viceversa. En su artículo, EPR se preguntaron qué ocurriría si tenemos dos sistemas distantes y en cada uno de ellos decidimos medir un par de variables sujetas al principio de incertidumbre.

El ejemplo analizado por EPR consideraba dos partículas con la misma masa que se mueven en una sola dimensión. Llamemos a estas partículas R y J , y preparémoslas de tal manera que su centro de masas tenga una posición bien definida, digamos $x_{cm} = x_R + x_J = 0$. También podemos hacer que su velocidad relativa, $v_{rel} = v_R - v_J$, tome un valor preciso; por ejemplo, $v_{rel} = v_0$. Antes de continuar, clarifiquemos algo. Aquí estamos especificando una posición y una velocidad de manera exacta. ¿No viola esto el principio de incertidumbre de Heisenberg? Recordemos que este se aplica a la posición de un sistema y a la velocidad asociada a dicha posición. Pero, si tenemos dos sistemas distintos, nada nos impide conocer la posición del primero y la velocidad del segundo. En nuestro ejemplo, no estamos determinando la posición y la velocidad del centro de masas, sino la posición del centro de masas y la velocidad relativa de las partículas. Dado que ambas cantidades son independientes, no hay ningún problema en considerar un estado inicial como el que postularon EPR.

La solución de Schwarzschild puede interpretarse como una que contiene dos agujeros negros unidos a través de su interior

Ahora vayamos a la parte más sorprendente. Supongamos que nuestras partículas se encuentran muy alejadas una de otra y que dos observadores, Romeo y Julieta, miden sus posiciones. Debido a cómo han sido preparadas, si Julieta obtiene el valor x_J , entonces Romeo encontrará que su partícula está en $x_R = -x_J$. Por otro lado, si los dos miden la velocidad y Julieta obtiene el resultado v_J , Romeo hallará el valor $v_R = v_0 + v_J$. Por supuesto, Romeo y Julieta son libres de elegir qué variable van a medir. Sin embargo, si Julieta mide la posición y Romeo la velocidad, sus resultados serán completamente aleatorios y no mostrarán correlación alguna.

Lo extraño es que, si Julieta decide medir la posición de su partícula, la de Romeo tendrá una posición completamente determinada una vez que sepamos el resultado de la medición de Julieta. Y lo mismo ocurrirá con la velocidad. Podríamos pensar que, cuando Julieta mide la posición, la partícula de Romeo «sabe» inmediatamente que debe tener una posición bien definida. A primera vista esto parece constituir una transmisión instantánea de información: al repetir el mismo experimento un gran número de veces, Julieta podría enviar a Romeo un mensaje de ceros y unos decidiendo medir la posición o la velocidad de su partícula. Sin embargo, Romeo no sería capaz de leer ese mensaje a menos que conociese el resultado de las mediciones de Julieta. Así pues, las correlaciones debidas al entrelazamiento cuántico no pueden usarse para enviar señales superlumínicas.

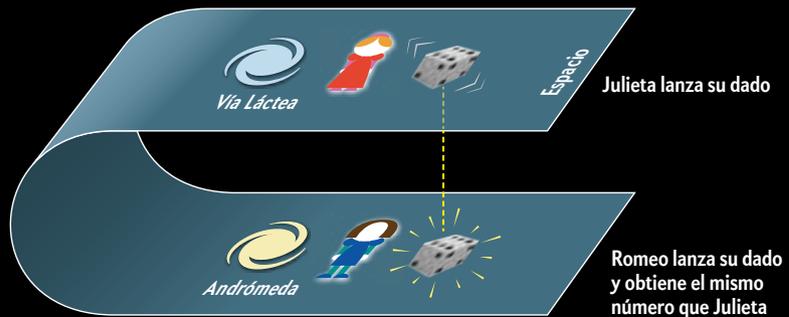
El pegamento cuántico del espaciotiempo

Uno de los fenómenos menos intuitivos predichos por la mecánica cuántica es el entrelazamiento. En él, las medidas efectuadas sobre dos sistemas cuánticos distantes parecen coordinarse de manera instantánea (*arriba*). En 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen analizaron las implicaciones de este fenómeno en un artículo hoy célebre.

Varias investigaciones recientes han demostrado que el entrelazamiento cuántico puede originar una conexión geométrica entre regiones distantes del espacio (*abajo*). Este resultado sugiere un principio general en gravedad cuántica. El espaciotiempo podría emerger a partir de las correlaciones cuánticas de sus constituyentes microscópicos fundamentales.

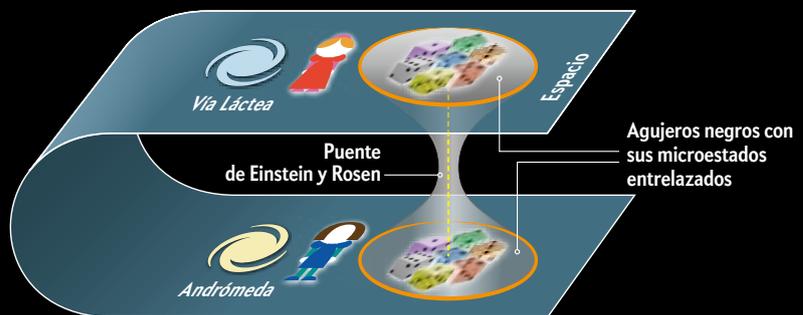
Entrelazamiento cuántico

Dos partículas entrelazadas pueden verse como dos dados que arrojan siempre el mismo resultado. Cada vez que Julieta lance su dado obtendrá un número aleatorio. Sin embargo, su resultado estará correlacionado con el que obtenga Romeo. Al contrario de lo que podría parecer, el entrelazamiento no puede usarse para enviar información de manera instantánea.



Conexión geométrica

Romeo y Julieta podrían crear dos agujeros negros con partículas entrelazadas. Una vez formados, dichos agujeros negros quedarían conectados a través de su interior por un agujero de gusano, como ocurre en la solución completa de Schwarzschild. Ni Romeo ni Julieta podrían atravesar esa conexión geométrica para llegar al otro lado, pero sí podrían encontrarse en su interior.



El entrelazamiento tal vez parezca una propiedad muy esotérica de los sistemas cuánticos, pero a lo largo de los años ha sido confirmado en numerosos experimentos. En las últimas décadas, las correlaciones cuánticas han dado lugar a varias aplicaciones prácticas y a grandes avances en disciplinas como la criptografía y la información cuánticas.

ER = EPR

Ahora retornemos a los agujeros negros. En 1974, Stephen Hawking demostró que los efectos cuánticos causan que los agujeros negros emitan radiación del mismo modo en que lo hace un cuerpo caliente. Ello implica que los agujeros negros tienen asociada una temperatura. Dicha temperatura resulta ser mayor cuanto

más pequeño es el objeto. De hecho, un agujero negro puede ser blanco. En concreto, uno del tamaño de una bacteria, con un radio similar a la longitud de onda de la luz visible, se vería blanco debido a la radiación de Hawking. No emitiría mucha luz, pero desde cerca lo veríamos como un pequeño punto brillante. Con todo, la masa de un agujero negro de ese tamaño seguiría siendo enorme, equiparable a la de un continente, por lo que no cabría usarlo como fuente de energía.

En los agujeros negros que se producen de forma natural por el colapso de estrellas, la radiación de Hawking es tan débil que, en la práctica, resulta inobservable. Estos objetos son demasiado grandes y se encuentran demasiado fríos para apreciar dicho efecto. Sin embargo, el hecho de que los agujeros

negros tengan asociada una temperatura acarrea importantes consecuencias.

Sabemos desde el siglo XIX que la temperatura se debe al movimiento de los constituyentes microscópicos de un sistema. En un gas, por ejemplo, aparece como consecuencia de la agitación de sus moléculas. Por tanto, cabe esperar que un agujero negro cuente con algún tipo de constituyentes microscópicos capaces de adoptar un gran número de configuraciones posibles, o «microestados». También creemos que, al menos vistos desde el exterior, los agujeros negros deberían comportarse como sistemas cuánticos ordinarios sujetos a todas las leyes de la mecánica y la termodinámica.

En vista de lo anterior, nada nos impide considerar estados entrelazados de agujeros negros. Imaginemos un par de agujeros negros muy distantes, cada uno con un gran número de microestados. Podemos pensar en una configuración en la que cada microestado del primer agujero negro se halla correlacionado con el correspondiente microestado del segundo. En concreto, si observamos el primer agujero negro en un microestado determinado, el segundo deberá encontrarse exactamente en el mismo microestado.

Lo interesante es que, a partir de ciertas consideraciones relacionadas con la teoría de cuerdas y las teorías cuánticas de campos, puede argumentarse que un par de agujeros negros con sus microestados entrelazados de esta manera —es decir, en un estado de tipo EPR— darían lugar a un espaciotiempo en el que un puente de ER une el interior de ambos agujeros negros. En otras palabras, el entrelazamiento cuántico origina una conexión geométrica entre los dos agujeros negros.

A esto lo hemos llamado equivalencia entre ER y EPR, o ER = EPR, ya que relaciona los dos artículos que Einstein y sus colaboradores escribieron en 1935. Desde el punto de vista de EPR, las observaciones realizadas cerca del horizonte de cada uno de los agujeros negros se hallan correlacionadas debido al entrelazamiento cuántico. Desde el punto de vista del puente de ER, las observaciones están correlacionadas porque la distancia entre ambos sistemas es pequeña a través del agujero de gusano. Para establecer esta equivalencia, es importante que no podamos enviar información a través del agujero de gusano, ya que tampoco puede enviarse información usando el entrelazamiento.

Pensemos en un futuro muy lejano en el que dos familias enemistadas tratan de mantener a Romeo y Julieta separados. Mandan a Romeo a la galaxia de Andrómeda y retienen a Julieta en la Vía Láctea. Sin embargo, permiten que ambos se envíen mensajes y pares de sistemas cuánticos entrelazados. Esto les llevaría muchísimo tiempo, pero estamos en un futuro en el que la esperanza de vida es mucho mayor. Con paciencia, Romeo y Julieta podrían crear dos agujeros negros entrelazados. Dichos agujeros negros tendrían un aspecto normal vistos desde fuera, por lo que las familias nunca sospecharían nada. Sin embargo, una vez creados, Romeo y Julieta podrían dejarse caer en su interior y encontrarse allí por última vez antes de morir en la singularidad.

¿UN PRINCIPIO UNIVERSAL?

Las ideas que llevan hasta aquí han sido desarrolladas a través de los años por varios investigadores, comenzando por un estudio de 1976 de Werner Israel, de la Universidad de Alberta. Nuestro trabajo con Susskind fue motivado por una paradoja planteada en 2012 por Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski y James Sully, por aquella época todos en la Univer-

sidad de California en Santa Bárbara. En contra de lo que se pensaba hasta entonces, estos investigadores argumentaron que el entrelazamiento obligaba a reemplazar el horizonte de sucesos de un agujero negro (una superficie suave, según la teoría de Einstein) por una barrera impenetrable de alta energía [véase «Agujeros negros y muros de fuego», por Joseph Polchinski, y «¿Fuego en el horizonte?», por Roberto Emparan; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2015]. En el contexto de la relación ER = EPR, dicha paradoja parece poder resolverse.

La equivalencia ER = EPR sugiere que siempre que haya un entrelazamiento cuántico debería surgir una conexión geométrica. Esto se aplicaría incluso al caso más simple en el que solo tenemos dos partículas entrelazadas. En tales situaciones, sin embargo, la conexión espacial podría implicar estructuras diminutas y muy cuánticas, las cuales no se parecerían mucho a nuestra noción usual de geometría. Aunque aún no sabemos cómo describir estas geometrías microscópicas, la idea es que la relación ER = EPR proporcionaría un principio que toda teoría cuántica de la gravedad debería respetar. La teoría de gravedad cuántica más estudiada es la teoría de cuerdas. En ella, la relación ER = EPR puede justificarse de manera rigurosa en algunos casos en los que el entrelazamiento adopta una forma muy específica, pero todavía no existe un consenso sobre si dicha equivalencia se cumple en todos los casos.

Hemos visto que el entrelazamiento cuántico puede, literalmente, acercar dos sistemas distantes. También sabemos que dos regiones cercanas del espacio están entrelazadas. Parece natural pensar que el espaciotiempo, una estructura continua, surja a partir del entrelazamiento, una propiedad profundamente cuántica. Esta idea se encuentra hoy en el punto de mira de varios investigadores, pero aún no se ha sintetizado en una formulación precisa. ■

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, noviembre de 2015

EL AUTOR

Juan Maldacena es físico teórico del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Es mundialmente reconocido por sus contribuciones al estudio de la gravedad cuántica y la teoría de cuerdas. En 2012 recibió el Premio de Física Fundamental de la Fundación Milner.

PARA SABER MÁS

Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie. Karl Schwarzschild en *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, vol. 7, págs. 189-196, febrero de 1916. Traducción al inglés de S. Antoci y A. Loinger disponible en arxiv.org/abs/physics/9905030

Can the quantum mechanical description of physical reality be considered complete? Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen en *The Physical Review* vol. 47, págs. 777-780, mayo de 1935.

The particle problem in the general theory of relativity. Albert Einstein y Nathan Rosen en *The Physical Review*, vol. 48, págs. 73-77, julio de 1935.

Cool horizons for entangled black holes. Juan Maldacena y Leonard Susskind en *Fortschritte der Physik*, vol. 61, pág. 781-811, septiembre de 2013.

Entanglement and the geometry of spacetime. Juan Maldacena en *The Institute for Advanced Study Newsletter*, otoño de 2013. Versión preliminar y más sintética de este artículo. Disponible en <https://www.ias.edu/about/publications/ias-letter/articles/2013-fall/maldacena-entanglement>

EN NUESTRO ARCHIVO

Teoría cuántica y realidad. B. d'Espagnat en *lyC*, enero de 1980.

El espacio, ¿una ilusión? J. M. Maldacena en *lyC*, enero de 2006.

Agujeros negros y muros de fuego. J. Polchinski en *lyC*, abril de 2015.



*Agujeros
negros
astrofísicos*

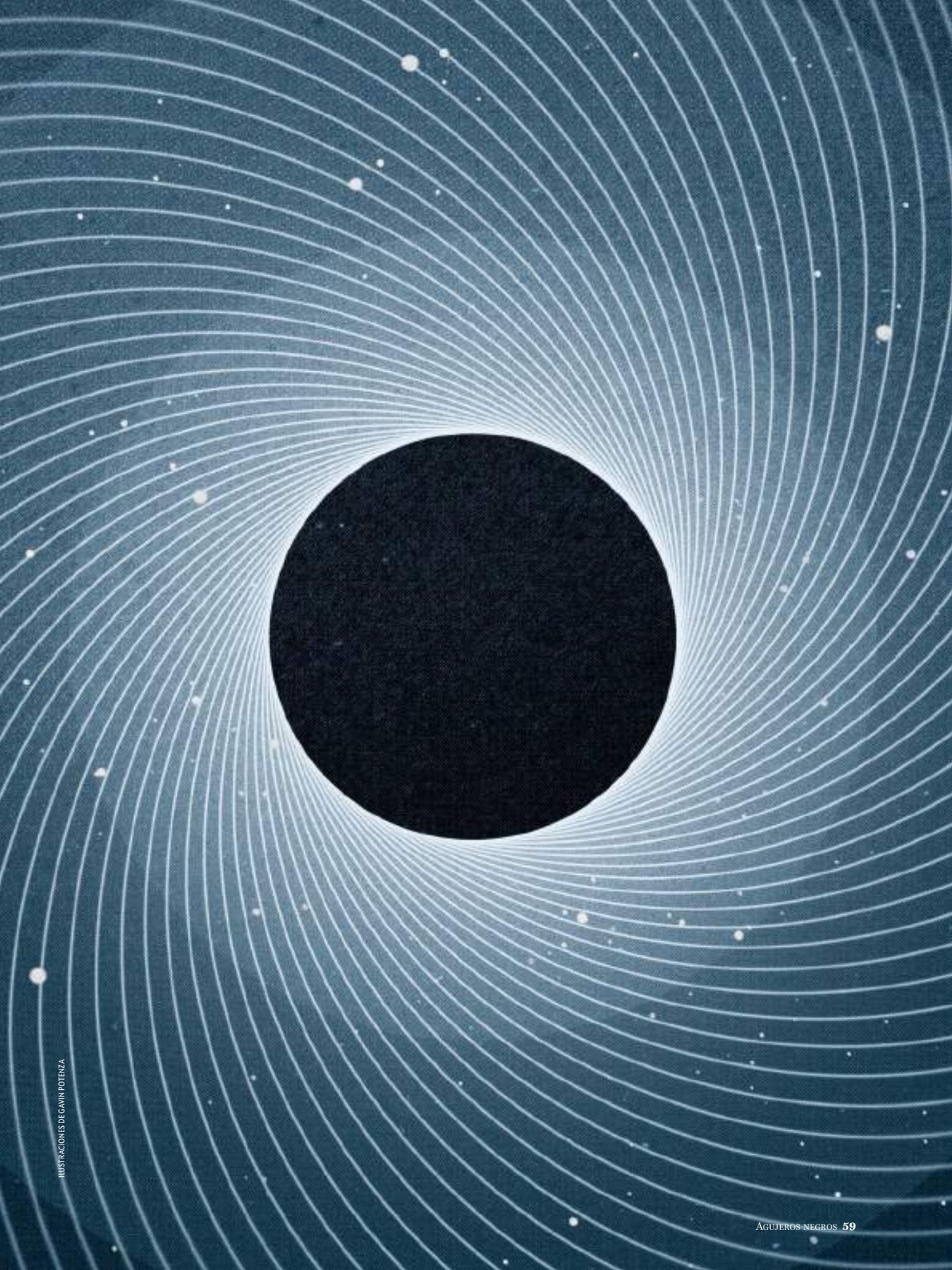


AGUJEROS NEGROS ASTROFÍSICOS

AGUJEROS NEGROS DE MASA INTERMEDIA

Los agujeros negros con una masa inferior a un millón de veces la del Sol podrían resultar clave para entender cómo se formaron sus hermanos supermasivos y las galaxias que los albergan

Jenny E. Greene



DESDE PRINCIPIOS DE SIGLO SABEMOS QUE CASI todas las galaxias de gran tamaño albergan un inmenso agujero negro: un objeto cuya atracción gravitatoria exhibe una intensidad tal que ni siquiera la luz puede escapar. Al morir, algunas estrellas pueden convertirse en agujeros negros con masas de entre tres y cien veces la del Sol. Sin embargo, tales objetos resultan minúsculos en comparación con los descomunales titanes de miles de millones de masas solares que habitan los núcleos galácticos.

Los agujeros negros supermasivos plantean grandes interrogantes. ¿Por qué tantas galaxias poseen uno? ¿Qué fue primero, la galaxia o el agujero negro? ¿Cómo se formaron? El misterio se intensifica si tenemos en cuenta que los agujeros negros supermasivos ya poblaban el universo cuando este era muy joven. De hecho, en 2011 se publicó el descubrimiento del ejemplo más antiguo conocido hasta entonces: un agujero negro de 2000 millones de masas solares que ya existía hace unos 13.000 millones de años, apenas 770 millones de años después de la gran explosión. ¿Cómo es posible que un agujero negro alcanzase un tamaño semejante en tan poco tiempo?

Un proceso de formación tan rápido deja perplejos a los expertos porque, a pesar de su fama como potentes aspiradores, los agujeros negros astrofísicos actúan más bien como un ventilador: el gas que cae hacia ellos acaba arremolinándose a su alrededor y forma un inmenso disco de acreción, el cual se calienta y emite radiación, sobre todo a medida que el gas se aproxima a la zona de no retorno. Dicha radiación barre parte del gas hacia fuera, lo que limita la tasa de crecimiento del objeto. Los cálculos indican que un agujero negro que absorba materia a la máxima velocidad posible duplicaría su masa cada 50 millones de años. Ese ritmo es demasiado lento para que un remanente estelar se convierta en un monstruo de 1000 millones de masas solares en menos de 1000 millones de años.

A grandes rasgos, existen dos teorías para explicar el origen de los agujeros negros supermasivos. La primera, considerada durante muchos años, supone que los primeros agujeros negros nacieron a partir de remanentes estelares. Las primeras estrellas que se formaron en el universo probablemente fueron mucho mayores que las que vinieron después, ya que las nubes de gas primordial carecían de los elementos químicos que contribuyen al enfriamiento del gas y, con ello, a su fragmentación en nubes menores. Estos colosos estelares habrían consumido todo su combustible con rapidez y se habrían convertido en agujeros negros de tal vez cien veces la masa del Sol. Después, algún proceso de acreción más rápido que el ordinario habría acelera-

do su crecimiento. Si uno de estos objetos se formase en el interior de un cúmulo estelar denso, podría fusionarse con otras estrellas y agujeros negros y alcanzar unas 10.000 masas solares a una velocidad mucho mayor que la habitual. El desarrollo posterior podría explicarse por medio de

los procesos de acreción ordinarios, a los que quizá cupiese añadir la fusión con algún que otro agujero negro.

Sin embargo, el descubrimiento de que los agujeros negros supermasivos ya poblaban el cosmos en épocas tan tempranas obligó a replantearse la viabilidad de los mecanismos propuestos para explicar el crecimiento acelerado. Los expertos comenzaron a preguntarse qué otros procesos podrían desembocar en la creación de agujeros negros; en particular, qué mecanismos podrían dar lugar a «semillas» mayores que las que aparecen tras la muerte de una estrella.

Se propuso una segunda teoría, basada en modelos que originaban grandes agujeros negros sin necesidad de pasar por una fase estelar intermedia. En su lugar, una nube de gas lo suficientemente grande colapsaría y se convertiría en un agujero negro mucho mayor que el producido por cualquier estrella. Este mecanismo permitiría que el objeto alcanzase las 10.000 o incluso las 100.000 masas solares con rapidez, lo que aliviaría en cierta medida el problema de la formación de agujeros negros supermasivos en un universo muy joven. El proceso de colapso directo no se observa hoy en día, pero las condiciones del cosmos primitivo eran muy distintas de las actuales.

Por desgracia, no resulta fácil decidir entre el modelo de colapso estelar y el basado en la implosión de gigantescas nubes de gas. Por más que podamos escudriñar el pasado apuntando nuestros telescopios hacia lugares muy distantes, las semillas de los agujeros negros supermasivos se encuentran hoy demasiado lejos como para poder observarlas de manera directa, al menos con los telescopios actuales. Así las cosas, mis colaboradores y yo decidimos adoptar otra estrategia: buscar semillas que, por una razón u otra, hubiesen sobrevivido hasta nuestros días sin convertirse en agujeros negros supermasivos.

Si los progenitores de los agujeros negros supermasivos procediesen del colapso estelar, deberíamos encontrar un gran número de semillas tanto en el centro como en la parte externa de las galaxias, pues las estrellas que las originaron podrían haber muerto en cualquier lugar. También cabría esperar un abanico

EN SÍNTESIS

Los agujeros negros mil millones de veces más masivos que el Sol ya existían cuando el universo era muy joven. ¿Cómo pudieron formarse con tal rapidez? ¿Qué proceso originó los agujeros negros «semilla» a partir de los cuales crecieron?

Quizá esas semillas se formasen a partir de la fusión de agujeros negros menores, procedentes de remanentes estelares. Otras teorías propugnan el colapso de nubes gigantescas de gas primordial, sin una fase estelar intermedia.

Para resolver la cuestión, los astrónomos buscan agujeros negros de tamaño intermedio: progenitores potenciales que no habrían alcanzado el estado supermasivo. Su estudio parece sugerir que se habrían formado por colapso directo de nubes de gas.

¿Cuál es el origen de los agujeros negros supermasivos?

Los agujeros negros supermasivos, de miles de millones de masas solares, ya existían pocos cientos de millones de años después de la gran explosión. Sin embargo, los procesos habituales no permiten que un remanente estelar (*naranja*) se convierta en un agujero negro supermasivo (*azul*) en un tiempo tan breve. Por tanto, estos debieron crecer a partir de agujeros negros «semilla» (*amarillo*) mucho mayores que una estrella. Pero ¿cómo se formaron esos agujeros negros de tamaño intermedio?



Según la teoría tradicional, un agujero negro de masa estelar podría alcanzar con rapidez las 10.000 masas solares si engullese otras estrellas y se fusionase con otros agujeros negros. Después crecería al ritmo habitual, absorbiendo gas, hasta convertirse en un agujero negro supermasivo.



Otros modelos proponen el colapso gravitatorio de una nube gigantesca de gas primordial. El proceso podría originar un agujero negro de masa intermedia directamente, sin pasar por la fase estelar.



La búsqueda de agujeros negros de masa intermedia pretende determinar cuál de los dos procesos tuvo lugar.

continuo de masas entre 100 y 100.000 veces la del Sol, ya que su crecimiento hacia el estado supermasivo podría haberse interrumpido por inanición en cualquier momento. En cambio, si se hubieran formado mediante el colapso directo de nubes de gas, sus restos escasearían, pues tales procesos habrían ocurrido con mucha menos frecuencia que la muerte estelar. Y en lugar de un amplio intervalo de masas, la mayoría de las semillas supervivientes rondaría las 100.000 masas solares, el valor que los modelos teóricos arrojan como más probable.

Así pues, algunos investigadores hemos estado rastreando el cielo en busca de un nuevo tipo de agujero negro, ni de masa estelar ni supermasivo, al que hemos bautizado como «peso medio». Nuestro objetivo consiste en descubrir si la abundancia y las masas observadas se ajustan mejor al modelo de colapso estelar o al gaseoso. Cuando nos embarcamos en la empresa, a principios de este siglo, la aventura no se antojaba muy prometedora: tan solo se conocía un agujero negro de masa intermedia y la mayoría lo consideraba una casualidad. Desde entonces, sin embargo, hemos detectado centenares de ellos.

¿Qué agujeros negros pertenecen a la categoría de los pesos medios? En este artículo consideraremos como tales aquellos con masas comprendidas entre mil y dos millones de veces la del Sol. El límite superior resulta un tanto arbitrario, pero excluye los objetos supermasivos más pequeños conocidos, como el agujero de cuatro millones de masas solares que ocupa el centro de la Vía Láctea. La frontera es necesariamente difusa, ya que, entre otras razones, las estimaciones de la masa de un agujero negro sufren una gran imprecisión. Hace unos años, por ejemplo, algunas mejoras en la técnica de medida nos obligaron a corregir al alza, en un factor dos, las masas de nuestro primer muestreo de pesos medios. En cualquier caso, el límite exacto se torna irrelevante siempre y cuando centremos nuestra atención en los agujeros negros que no alcanzan la categoría de supermasivos. Lo que hemos aprendido hasta ahora nos está abriendo una nueva perspectiva sobre la interacción entre los agujeros negros y las galaxias en las que habitan.

PESOS MEDIOS ESQUIVOS

Un agujero negro puede delatar su presencia de diversas maneras. Las estrellas que orbitan a gran velocidad cerca del centro galáctico constituyen un claro indicador de la presencia de un agujero negro supermasivo. Sin embargo, los de masa intermedia no ejercen una atracción gravitatoria lo bastante intensa como para manifestarse de esa manera. Por ello, nuestro método se basa en la búsqueda de agujeros negros activos, aquellos que se encuentran engullendo materia, ya que cuando esta cae y se calienta emite una ingente cantidad de luz.

Tras décadas de estudios, los astrónomos habían llegado a la conclusión de que los agujeros negros activos residían en un tipo muy concreto de galaxias. En general, las galaxias de mayor tamaño pueden clasificarse en dos grandes grupos: algunas, como la nuestra, poseen un gran disco de estrellas en rotación; otras, las galaxias elípticas, adoptan el aspecto de una gran bola de estrellas. Numerosas galaxias discoideas incluyen también un bulbo, una región central que se asemeja a una pequeña galaxia elíptica. Los agujeros negros activos se hallan, sobre todo, en grandes galaxias elípticas o en galaxias de disco con bulbos prominentes. Casi todos los bulbos galácticos situados lo bastante cerca de nosotros como para poder examinarlos han resultado contener un agujero negro de entre millones y miles de millones de masas solares. Por lo general, la masa del agujero negro suele ascender al uno por mil de la masa del bulbo.

Agujeros negros y galaxias hospedadoras

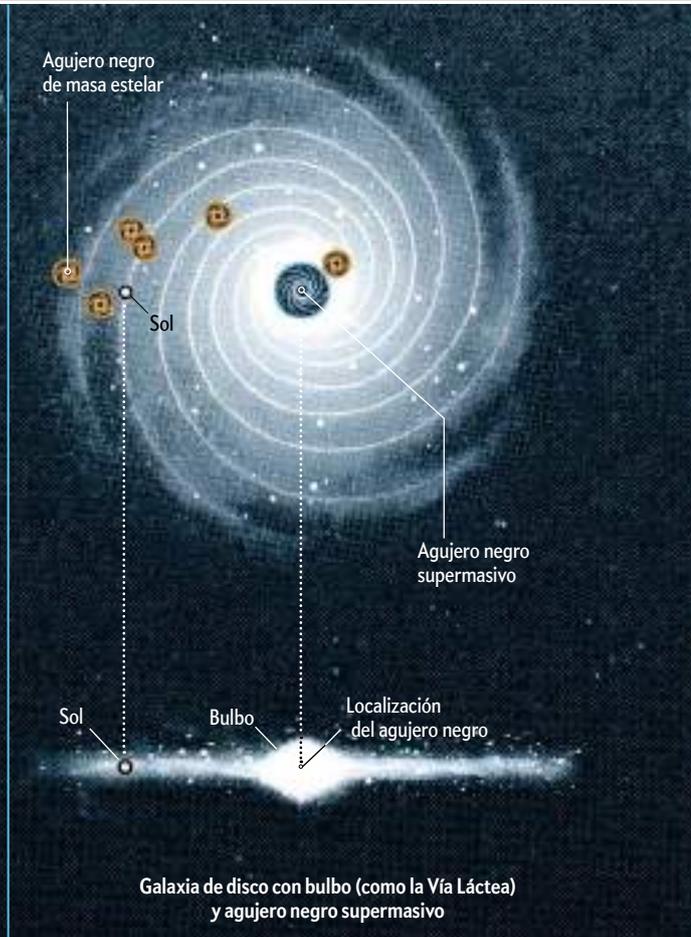
Existen varias clases de galaxias, algunas de las cuales suelen albergar agujeros negros supermasivos. La Vía Láctea (izquierda) es una galaxia espiral, con forma de disco y un bulbo central (una gran bola de estrellas muy densa). Este alberga un agujero negro supermasivo de 4 millones de masas solares (azul). También se han detectado agujeros negros de masa estelar (naranja). Todas las galaxias con bulbo y las grandes galaxias elípticas (centro) parecen acoger un agujero negro supermasivo en su centro. En cambio, los de tamaño intermedio (amarillo, a la derecha) suelen encontrarse en las galaxias discoideas sin bulbo. Los agujeros negros de masa estelar son comunes a todas ellas.

Clases de agujeros negros

Los agujeros negros conocidos se clasifican en tres tipos según su masa:



Los agujeros negros no están representados a escala



Esta sorprendente correlación plantea no pocos interrogantes, pues sugiere que las galaxias y los agujeros negros supermasivos habrían evolucionado a la par, algo para lo que carecemos de explicación satisfactoria. A efectos prácticos, sin embargo, este patrón nos indica dónde buscar los pesos medios: en las galaxias con los bulbos de menor tamaño.

Una pequeña galaxia muy intrigante nos sugirió una idea. Mi antiguo director de tesis, Luis C. Ho, del Observatorio Carnegie, estudió para su propia investigación doctoral, en 1995, 500 de las galaxias brillantes más cercanas. Halló que la mayoría de las que poseían grandes bulbos contenían un agujero negro activo, pero no así las carentes de bulbo... con una interesante excepción: NGC 4395, una galaxia sin bulbo pero que poseía un agujero negro activo. Los directores de tesis de Ho ya habían advertido esta excentricidad en 1989, pero la mayoría lo tomó por una anomalía sin interés. A excepción de NGC 4395, el estudio de Ho no hizo sino confirmar la regla general según la cual las galaxias sin bulbo carecen de agujero negro.

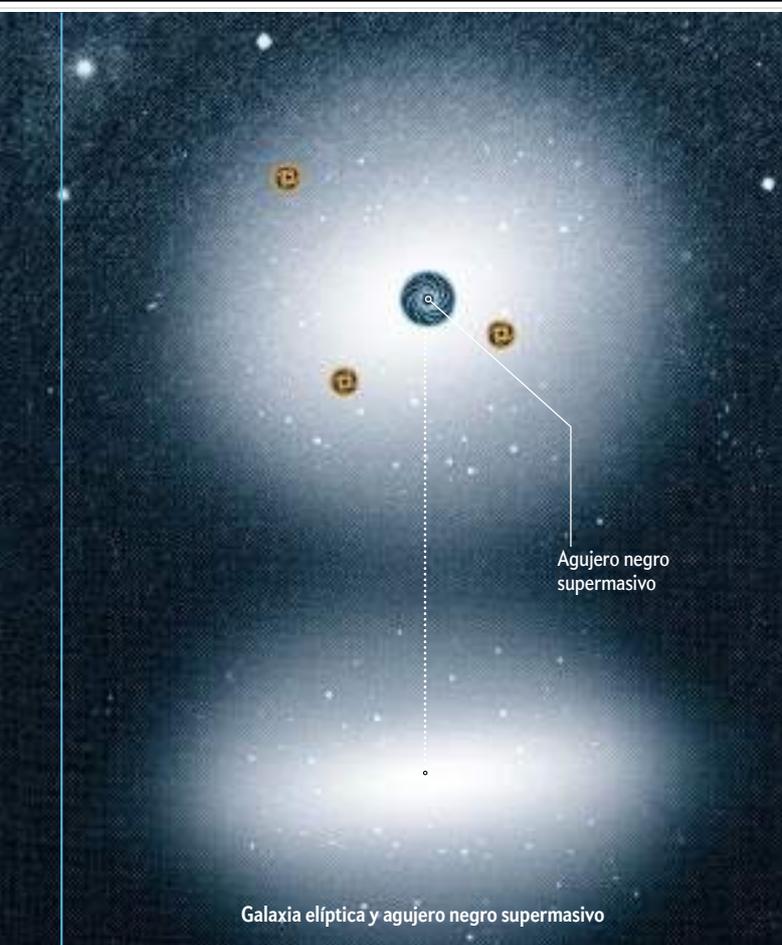
Medir con precisión la masa del agujero negro de NGC 4395 plantea todo un reto. En astronomía, las estimaciones más directas de la masa de un objeto se basan en los movimientos orbitales de los cuerpos circundantes. Del mismo modo que la velocidad de un planeta y el diámetro de su órbita permiten calcular la masa del Sol, las órbitas de las estrellas en una galaxia pueden revelar la masa del agujero negro central. Pero, para ello, su masa debe ser lo suficientemente elevada como para generar efectos que nuestros instrumentos puedan detectar. El agujero

negro de NGC 4395, sin embargo, resulta demasiado pequeño para este propósito.

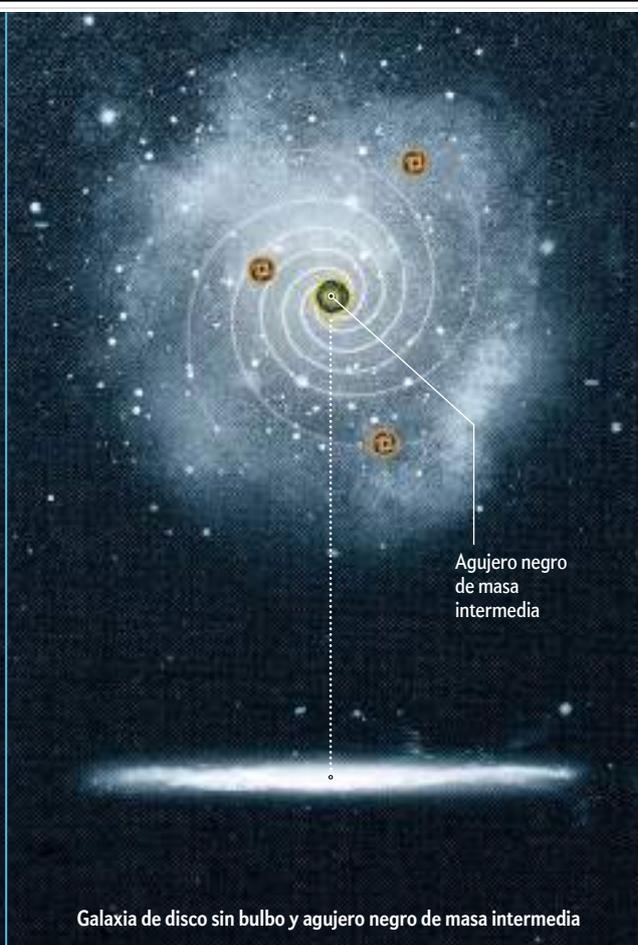
Ante tales casos hemos de recurrir a indicios menos directos. Uno de ellos se basa en la intensidad de los rayos X emitidos por el disco de acreción del agujero negro. En general, esta varía con el tiempo y, cuanto mayor es el agujero negro, más lentos se muestran dichos cambios. En 2003, David C. Shih, por entonces en la Universidad de Cambridge, y sus colaboradores constataron que la intensidad de los rayos X procedentes de NGC 4395 variaba con tal rapidez que su agujero negro debía poseer entre 10.000 y 100.000 masas solares. Ese mismo año, Ho dedujo un abanico de masas similar a partir de otro tipo de pruebas.

Una medición algo más directa fue realizada en 2005 por Bradley M. Peterson, de la Universidad Estatal de Ohio, y sus colaboradores. Para ello utilizaron el telescopio espacial Hubble y una técnica denominada «mapas de reverberación», en la que las nubes de gas que se arremolinan en torno al agujero negro desempeñan un papel análogo al de los planetas alrededor del Sol. En este caso, es el desfase temporal de los ecos de luz procedentes de las nubes lo que determina el radio de sus órbitas. Peterson y su equipo concluyeron que la masa del agujero negro de NGC 4395 ascendería a unas 360.000 masas solares, si bien este resultado sufre una gran incertidumbre que podría llegar a alterar su valor en un factor tres, debido a las múltiples suposiciones que deben hacerse en el proceso de cálculo.

La galaxia sin bulbo NGC 4395 parecía albergar justo el tipo de agujero negro de masa intermedia que estábamos buscando.



Galaxia elíptica y agujero negro supermasivo



Galaxia de disco sin bulbo y agujero negro de masa intermedia

Aun así, de las 500 galaxias examinadas por Ho, esta era la única sin bulbo que mostraba signos inequívocos de la presencia de un agujero negro activo. La segunda apareció en 2002: Aaron J. Barth, por entonces en el Instituto de Tecnología de California, empleó el telescopio Keck II, en Hawái, para obtener un espectro de POX 52, una galaxia muy peculiar pero poco estudiada. Al igual que NGC 4395, esta mostraba indicios de poseer un agujero activo, a pesar de no contarse entre los sospechosos habituales, ya que se trataba de una galaxia esferoidal, distinta de las elípticas y las discoidales con bulbo.

Barth envió el nuevo espectro de POX 52 a Ho. Al recibirlo, este le preguntó cómo había obtenido un espectro tan hermoso: el resultado mostraba tantas semejanzas con el de NGC 4395 que Ho no lograba distinguirlos. Son justamente los rasgos característicos de este tipo de espectros los que revelan la presencia de un agujero negro.

Dado que POX 52 se halla a 300 millones de años luz, unas veinte veces más lejos que NGC 4395, las estimaciones de la masa de su agujero negro resultan, por fuerza, más indirectas. A pesar de ello, varias investigaciones independientes apuntaban a un agujero negro de unas 100.000 masas solares. Con POX 52, la familia de galaxias sin bulbo y con un agujero negro de peso medio pasó a tener dos miembros.

Sin embargo, aún debíamos hallar más objetos de tamaño intermedio para poder afrontar algunas cuestiones básicas. ¿Cuán abundantes son los pesos medios? ¿Poseen uno todas las galaxias sin bulbo, o la mayoría carecen de él? ¿Existen en otros lugares?

¿Los hay de menor tamaño que los de NGC 4395 y POX 52? Solo respondiendo a estas preguntas podremos averiguar cuál fue el proceso de formación de las semillas de los agujeros negros supermasivos y qué papel desempeñaron en el universo primitivo.

¿ABUNDAN LOS PESOS MEDIOS?

Por desgracia, las técnicas habituales no se muestran demasiado efectivas a la hora de buscar agujeros negros activos de masa intermedia. Cuanto mayor es un agujero negro, más masa absorbe y más luz emite esta. Los de menor tamaño, en cambio, no resultan tan fáciles de detectar. Pero la situación se plantea mucho peor. Las galaxias elípticas, donde suelen residir los agujeros negros de mayor tamaño, gozan de una gran ventaja: contienen poco gas y en ellas no se están formando nuevas estrellas, lo que proporciona una visión muy limpia del centro galáctico. En cambio, las galaxias de disco, donde sospechábamos que podrían esconderse la mayoría de los agujeros negros de tamaño intermedio, presentan altas tasas de formación estelar. Y la luz de las estrellas jóvenes, así como el gas y el polvo asociados, tienden a ocultar el agujero negro.

Para sortear estas dificultades, Ho y yo acudimos en el año 2004 a una inestimable base de datos diseñada para encontrar agujas en el pajar cósmico: el Sondeo Digital del Cielo Sloan. Desde hace años, un telescopio de Nuevo México, dedicado en exclusiva a este proyecto, ha estado tomando imágenes de más de una cuarta parte del cielo y ha obtenido los espectros de millones de estrellas y galaxias.

Tras examinar los espectros de 200.000 galaxias, encontramos 19 candidatas similares a NGC 4395: galaxias menores y con agujeros negros cuya masa estimamos en menos de un millón de masas solares. En los años posteriores, estudios similares basados en datos más recientes del muestreo Sloan han aumentado el total a unas tres docenas de agujeros negros por debajo de un millón de masas solares, y más de un centenar justo por encima de ese umbral.

Los espectros del sondeo Sloan nos indican la velocidad a la que el gas caliente orbita en torno al agujero negro. Pero esta cantidad solo aporta la mitad de la información necesaria para calcular la masa del objeto; el dato restante es el radio de la órbita. Sin embargo, después de haber observado los mismos procesos en un gran número de agujeros negros supermasivos, sabemos cómo suele relacionarse la velocidad de rotación del gas con la masa del objeto: cuanto menor es esta, con mayor lentitud gira aquel. Si extrapolamos esa relación a masas más bajas, podemos identificar los agujeros negros de menor tamaño entre los datos del muestreo Sloan.

La búsqueda confirmó las sospechas que habían despertado NGC 4395 y POX 52: existe toda una población de agujeros negros de masa intermedia que, además, suelen encontrarse en

las galaxias sin bulbo. No obstante, no parece que esta clase de objetos abunde en el universo: solo una de cada 2.000 galaxias lo bastante brillantes como para poder estudiarlas presenta indicios de un agujero negro activo de masa intermedia.

Cabe pensar que las búsquedas basadas en el muestreo Sloan no revelen todos los agujeros negros existentes, puesto que, al ceñirse este al intervalo óptico (las longitudes de onda que podemos percibir con nuestros ojos), quizás estemos pasando por alto agujeros negros escondidos tras nubes de polvo. Para sortear este obstáculo, se examinan las longitudes de onda que pueden atravesar el polvo, como los rayos X, las ondas de radio o el infrarrojo medio. Shobita Satyapal, de la Universidad George Mason, y sus colaboradores han realizado medidas en el infrarrojo. La luz ultravioleta extrema emitida por el material que cae hacia el agujero negro haría estragos en el medio circundante, con lo que generaría especies poco comunes, como estados excitados de neón muy ionizado. A su vez, la emisión de estos iones dejaría una impronta característica en el espectro del infrarrojo medio. Pero no existen demasiadas galaxias que se presten a este tipo de estudios, por lo que el equipo de Satyapal apenas detectó un par de nuevos agujeros negros activos de masa intermedia. Otras investigaciones en rayos X y ondas de radio han hallado algunos indicios de pesos medios, así como de agujeros negros supermasivos no demasiado grandes.

Los resultados obtenidos parecen sugerir que, en efecto, las observaciones en el óptico habrían pasado por alto algunos agujeros negros de peso intermedio en galaxias sin bulbo. Sin embargo, estos no abundarían tanto como para ser la norma. Aún estamos a la espera del veredicto definitivo, pero puede que solo entre el 5 y el 25 por ciento de las galaxias sin bulbo albergue un agujero negro por encima del umbral de detección.

GALAXIAS Y AGUJEROS NEGROS

El estudio de los agujeros negros de tamaño intermedio en las galaxias sin bulbo quizá nos ayude a entender la relación entre los agujeros negros supermasivos y los grandes bulbos galácticos. Tal y como mencionábamos antes, los agujeros supermasivos suelen contener en torno a una milésima parte de la masa del bulbo en el que residen, lo que parece apuntar a un vínculo entre el crecimiento del agujero negro y el de la galaxia que lo hospeda. Si dicha correlación se establece durante la formación del bulbo, entonces las propiedades de las galaxias sin bulbo y las de sus pesos medios deberían ser independientes.

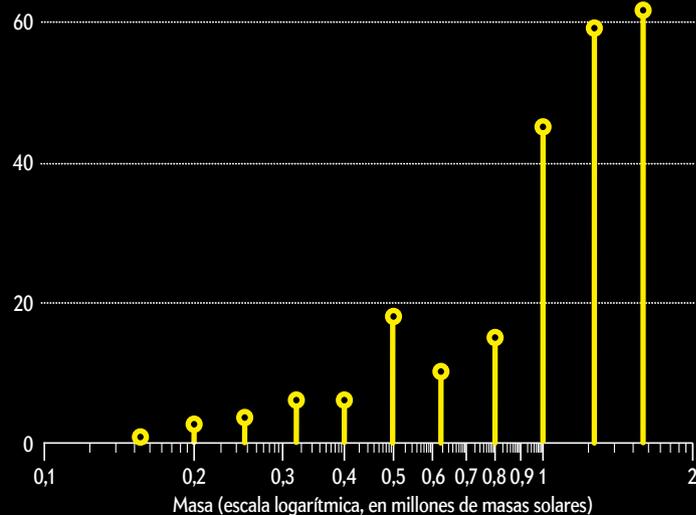
Una de las principales teorías para explicar el nexo entre las galaxias con bulbo y sus agujeros negros sostiene que tanto las galaxias elípticas como los grandes bulbos se habrían formado a partir de la fusión de galaxias de disco. En el proceso, las fuerzas gravitatorias deforman los discos, las órbitas de las estrellas abandonan su plano original y se redistribuyen de manera aleatoria, lo que explicaría la forma elíptica característica del bulbo o de la galaxia resultante. Durante la fusión, las nubes de gas colisionan

«PESOS MEDIOS» CONOCIDOS

Indicios del colapso directo de nubes de gas

Los estudios en el óptico de 500.000 galaxias han revelado más de un centenar de agujeros negros cuya masa se estima inferior a los dos millones de masas solares (gráfico). Otras búsquedas en el infrarrojo, rayos X y ondas de radio han detectado candidatos adicionales. Hasta ahora, todo apunta a que la mayoría de las galaxias sin bulbo no albergan un agujero negro de tamaño intermedio. Estas observaciones apoyan la teoría del colapso directo como principal mecanismo de formación de los agujeros negros semilla. Si estos se debiesen al colapso estelar, deberían haberse hallado muchos más candidatos con masas entre diez mil y un millón de veces la del Sol.

Número de agujeros negros de masa intermedia detectados mediante observaciones en el óptico



y son canalizadas hacia el centro de la galaxia, lo que desencadena una elevada tasa de formación estelar. Al mismo tiempo, los agujeros negros de ambas galaxias también se fusionan y se alimentan del gas que se acumula en el centro. Así, los grandes bulbos y sus agujeros negros supermasivos evolucionarían a la par, de la mano de los procesos a gran escala que rigen la fusión entre galaxias. Por último, cuando el agujero negro alcanza una milésima parte de la masa del bulbo, su faceta de ventilador comienza a cobrar importancia: expulsa el gas del centro galáctico e inhibe su propio crecimiento.

Los agujeros negros de tamaño intermedio que residen en galaxias sin bulbo, como NGC 4395, no habrían gozado de semejantes banquetes. Estas semillas supervivientes habrían tenido que conformarse con el gas del centro galáctico, un proceso de pequeña magnitud que apenas guarda relación con los sucesos a gran escala que gobiernan la evolución global de la galaxia. Algunas galaxias sin bulbo podrían, de hecho, no haber alimentado ningún agujero negro. Este parece ser el caso de M33, una galaxia de aspecto muy similar a NGC 4395, que no contiene ningún agujero negro de masa superior a las 1500 masas solares. Cada vez más datos avalan esta relación entre el crecimiento del agujero negro y la formación del bulbo, si bien numerosos detalles quedan aún por elaborar y la cuestión no puede darse en absoluto por zanjada.

Con respecto a la creación de semillas, la escasez de agujeros negros de masa intermedia favorece la teoría del colapso directo de gas en el universo primitivo. Si los agujeros negros supermasivos hubiesen evolucionado a partir de remanentes estelares, casi todas las galaxias deberían contener un agujero negro de al menos 10.000 masas solares en su centro. Sin embargo, parece ser un hecho que la mayoría de las galaxias sin bulbo no albergan este tipo de objetos.

Existen otros indicios que apuntan asimismo al escenario de colapso directo. Por un lado, la débil correlación entre las masas de los pesos medios y las de sus galaxias se ajusta bastante mejor a las predicciones de este modelo. Además, resulta mucho más fácil crear un agujero de 1.000 millones de masas solares en apenas unos cientos de millones de años si partimos de una semilla de gran masa.

PREGUNTAS ABIERTAS

Por supuesto, estas conclusiones quizá cambien a medida que vayamos recabando más datos. Si observásemos galaxias más débiles que las registradas en el catálogo Sloan, la fracción de galaxias que contienen un agujero negro de tamaño intermedio podría aumentar o disminuir. O tal vez algunas galaxias contengan agujeros negros de masa intermedia lejos de su centro. La búsqueda presenta aún varios frentes abiertos.

Numerosas cuestiones clave distan de estar resueltas. ¿Son los agujeros negros de peso medio más comunes en unos tipos de galaxia que en otros? Una dependencia tal permitiría postular nuevas formas de interacción entre un agujero negro y su galaxia anfitriona, antes incluso de que los procesos de fusión provocasen la formación del bulbo y del agujero negro supermasivo. ¿Carecen de agujero negro la mayoría de las galaxias sin bulbo, o poseen uno, pero por debajo del umbral de detección actual? En tal caso, estaríamos hablando de objetos del orden de varios miles de masas solares que no podrían haberse formado por colapso directo, sino a partir de remanentes estelares. ¿O hay quizás en todas esas galaxias un agujero negro de tamaño considerable, de entre 10.000 y 100.000 masas solares, el cual no se encuentra engullendo materia y, por tanto, su en-



LA GALAXIA NGC 4395, una galaxia de disco sin bulbo, fue la primera en mostrar signos de la presencia de un agujero negro de masa intermedia en su centro.

torno tampoco emite luz? Semejante posibilidad cambiaría por completo la conclusión de que los pesos medios escasean. Las respuestas a estas preguntas podrían alterar de manera radical nuestras teorías sobre la génesis de las galaxias y sobre el origen de los grandes agujeros negros supermasivos. ■

Artículo publicado en *Investigación y Ciencia*, marzo de 2012

LA AUTORA

Jenny E. Greene es profesora de astrofísica en la Universidad de Princeton, donde investiga la evolución de las estructuras galácticas. Ha sido pionera en el estudio de los agujeros negros de tamaño intermedio, un tema que formó parte de su tesis doctoral en Harvard.

PARA SABER MÁS

A low-mass central black hole in the bulgeless Seyfert 1 galaxy NGC 4395.

A. V. Filippenko y L. C. Ho en *Astrophysical Journal*, vol. 588, n.º 1, págs. L13-L16, 1 de mayo de 2003.

Active galactic nuclei with candidate intermediate-mass black holes.

J. E. Greene y L. C. Ho en *Astrophysical Journal*, vol. 610, n.º 2, págs. 722-736, agosto de 2004.

Nuclear activity in nearby galaxies.

L. C. Ho en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 46, págs. 475-539, septiembre de 2008.

Formation of supermassive black holes.

M. Volonteri en *Astronomy and Astrophysics Review*, vol. 18, n.º 3, págs. 279-315, julio de 2010.

Supermassive black holes do not correlate with galaxy disks or pseudobulges.

J. Kormendy, R. Bender y M. E. Cornell en *Nature*, vol. 469, págs. 374-376, enero de 2011.

Big black hole found in tiny galaxy.

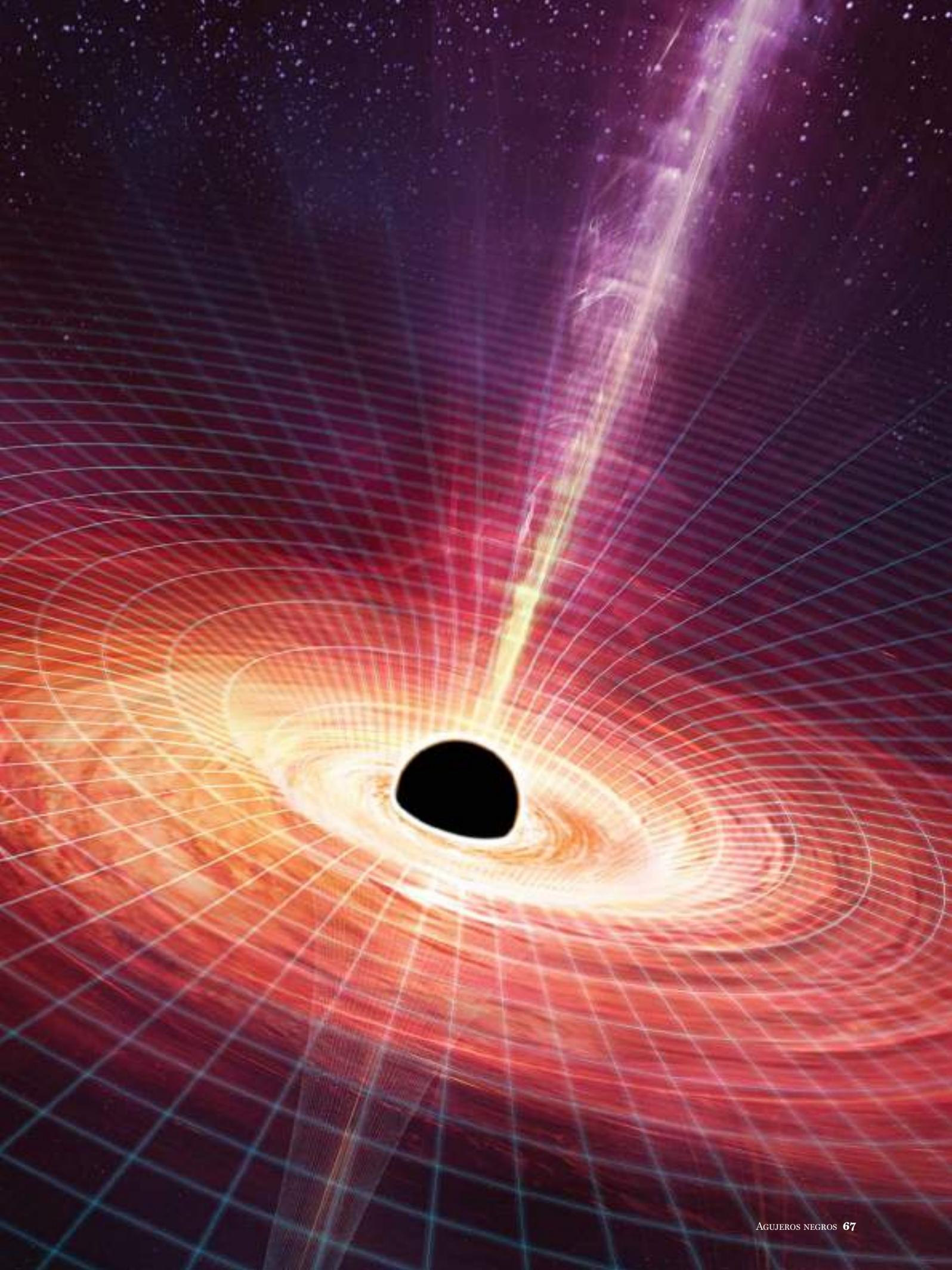
J. E. Greene en *Nature*, vol. 470, págs. 45-46, febrero de 2011.

AGUJEROS NEGROS ASTROFÍSICOS

LOS PRIMEROS AGUJEROS NEGROS SUPERMASTIVOS

Varias pruebas indican que estos colosos cósmicos comenzaron a poblar el universo mucho antes de lo que se creía posible. ¿Cómo se formaron?

Priyamvada Natarajan



IMAGINE EL UNIVERSO EN SU INFANCIA. HOY CREEMOS QUE EL ESPACIO Y EL TIEMPO SE ORIGINARON en la gran explosión. A partir de ese inicio caliente y denso, el cosmos se expandió y se enfrió. Sin embargo, las estrellas y las galaxias aún tardarían un tiempo en comenzar a motear el cielo. Los primeros átomos neutros se formaron unos 380.000 años después de la gran explosión, momento en que el universo se llenó de hidrógeno gaseoso. Unos cientos de millones de años más tarde, ese gas se aglomeró y dio lugar a las primeras estrellas. Estas se formaron en cúmulos que después se agruparon en galaxias, las primeras de las cuales aparecieron unos 400 millones de años después de la gran explosión. Pero, para nuestra sorpresa, hemos descubierto que hacia la misma época comenzaron a surgir otros objetos astronómicos: los cuásares.

Los cuásares son extremadamente brillantes. La luz que emiten es producida por una ingente cantidad de gas que se precipita hacia un agujero negro supermasivo, lo que hace que sean visibles desde los confines del espacio. Los más distantes son también los más antiguos, y los primeros de ellos constituyen un verdadero misterio. Para resultar visibles desde distancias tan vastas, tales cuásares han de estar alimentados por agujeros negros con masas del orden de mil millones de masas solares. El problema reside en que, según las teorías al uso, un agujero negro tan masivo necesitaría unos mil millones de años para formarse. En 2001, sin embargo, el Sondeo Digital del Cielo Sloan comenzó a encontrar cuásares que databan de tiempos más remotos. El más antiguo y distante que conocemos, anunciado en 2017, ya existía 690 millones de años después de la gran explosión, mucho antes de lo que creíamos posible.

Las teorías tradicionales postulan que los primeros agujeros negros se formaron cuando algunas de las primeras estrellas explotaron en forma de supernova. No obstante, la masa de esos cadáveres estelares se estima en pocos cientos de masas solares, y es difícil imaginar un escenario en el que los agujeros negros supermasivos presentes en los cuásares más antiguos pudieran formarse tan rápido a partir de «semillas» tan pequeñas.

Hacia 2008, varios astrónomos y la firmante de este artículo propusimos un mecanismo que explicaba la formación de los primeros cuásares sin recurrir al nacimiento y la muerte de estrellas. Según esta hipótesis, las semillas que más tarde darían lugar a los primeros cuásares se habrían formado directamente a partir del colapso de grandes nubes de gas. En un entorno propicio, estos agujeros negros habrían nacido con masas de entre 10^4 y 10^5 masas solares unos pocos cientos de millones de años después de la gran explosión. Con esa ventaja inicial, sí podrían haber alcanzado las 10^9 o 10^{10} masas solares lo suficientemente rápido como para explicar los primeros cuásares.

La pregunta es si dicho proceso ocurrió realmente. Por fortuna, el lanzamiento del telescopio espacial James Webb, previsto para dentro de poco, debería sacarnos de dudas.

LAS PRIMERAS SEMILLAS

Los agujeros negros son objetos enigmáticos: regiones donde la gravedad ha deformado el espaciotiempo hasta tal punto que ni siquiera la luz puede escapar. Hasta el descubrimiento de los cuásares, los cuales nos permiten ver la luz emitida por la materia que cae hacia un agujero negro, carecíamos de pruebas de su existencia, por lo que no sabíamos si se trataba de objetos reales o de una simple curiosidad matemática derivada de la teoría de la relatividad general de Albert Einstein.

Se cree que la mayoría de los agujeros negros se forman cuando las estrellas muy masivas —aquellas con masas superiores a unas diez veces la del Sol— agotan su combustible nuclear y comienzan a enfriarse y, por tanto, a contraerse. En cierto momento, la gravedad se impone y la estrella colapsa, lo que resulta en una catastrófica explosión que deja tras de sí un agujero negro.

Las teorías al uso postulan que los agujeros negros que más tarde dieron lugar a los primeros cuásares se formaron también de esa manera. Habrían nacido a partir de la defunción de las primeras estrellas del universo, conocidas como estrellas de la población III, las cuales se gestaron cuando el gas primordial se enfrió, unos 200 millones de años después de la gran explosión. Las estrellas de la población III eran probablemente mayores que las que surgieron más tarde, por lo que pudieron haber engendrado agujeros negros hasta cientos de veces más masivos que el Sol. Además, esas primeras estrellas seguramente se formaron en cúmulos, lo que habría facilitado que los agujeros negros engendrados tras su muerte se fusionaran entre sí y dieran lugar a agujeros negros de varios miles de masas sola-

EN SÍNTESIS

Los agujeros negros supermasivos más antiguos que se conocen ya poblaban el cosmos unos cientos de millones de años después de la gran explosión. Sin embargo, las teorías al uso predicen que un objeto tan masivo habría necesitado mucho más tiempo para formarse.

En los últimos años, varios trabajos han propuesto un nuevo mecanismo para explicar la formación de los primeros agujeros negros. En vez de nacer a partir de la muerte de estrellas masivas, se habrían generado a partir del colapso directo de grandes nubes de gas.

En caso de existir, los agujeros negros formados por colapso directo de nubes de gas deberían poder observarse dentro de poco con el futuro telescopio espacial James Webb. El hallazgo ayudaría a entender mucho mejor la física de estos enigmáticos astros.

res. Sin embargo, y a pesar de tratarse de objetos descomunales, esta masa es aún muy inferior a la que hace falta para explicar los primeros cúasares.

Hay teorías que sugieren la existencia de otro tipo de agujeros negros: los llamados «primordiales». Estos habrían surgido en los primeros instantes de universo, durante el proceso de expansión exponencial del espacio conocido como inflación cósmica. Se habrían formado a partir de las pequeñas fluctuaciones iniciales en la densidad de materia y habrían crecido a medida que el universo se expandía [véase «Agujeros negros primordiales y materia oscura», por Juan García-Bellido y Sébastien Clesse, en *este mismo número*]. Con todo, tales semillas habrían tenido masas de entre 10 y 100 veces la del Sol, por lo que presentarían el mismo inconveniente que los remanentes de la población III.

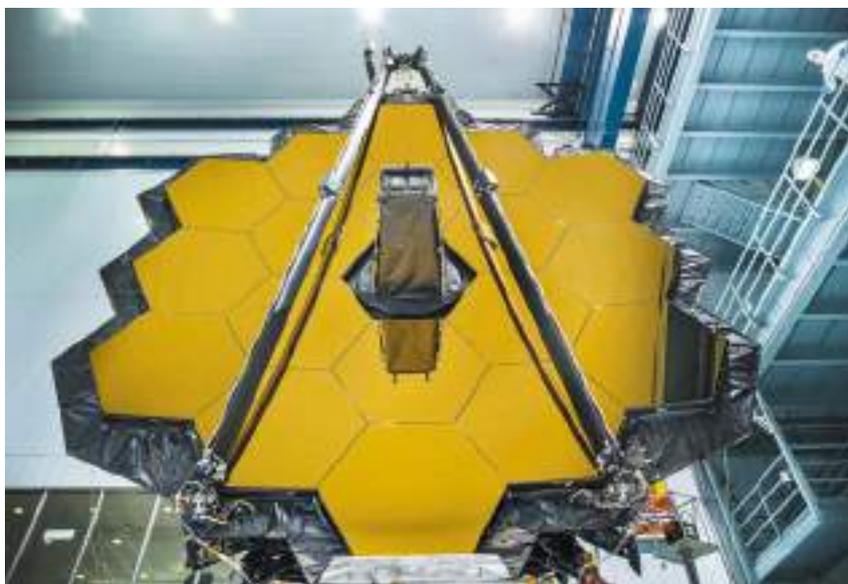
A la hora de explicar los primeros cúasares, todos estos escenarios adolecen del mismo problema: los primeros agujeros negros tendrían que haber crecido extraordinariamente rápido durante los primeros mil millones de años del universo para dar lugar a los cúasares más antiguos. No obstante, todo lo que sabemos sobre el crecimiento de los agujeros indica que algo así es muy poco probable.

ALIMENTAR UN AGUJERO NEGRO

De acuerdo con nuestra comprensión actual de las leyes físicas, existe un ritmo de crecimiento máximo, conocido como límite de Eddington, que determina la mayor velocidad a la que un agujero negro puede ganar masa. Cuando eso ocurre, el objeto crece de manera exponencial, doblando su masa cada 10^7 años aproximadamente. Para alcanzar las 10^9 masas solares, un agujero negro de 10 masas solares tendría que engullir estrellas y gas al ritmo que marca el límite de Eddington durante mil millones de años. Resulta difícil explicar cómo una toda una población de agujeros negros pudo haberse alimentado de manera ininterrumpida y tan eficiente durante tanto tiempo.

De hecho, si los primeros cúasares se formaron a partir de los agujeros negros de la población III, tendrían que haber crecido aún más rápido. En teoría, el límite de Eddington puede superarse en circunstancias especiales, en entornos densos y ricos en gas. Tales condiciones pudieron darse en el universo primitivo, pero no habrían sido comunes y habrían durado poco tiempo. Además, un crecimiento tan veloz puede provocar que el agujero negro «se atragante», ya que la radiación emitida durante el proceso puede alterar e incluso interrumpir el flujo de masa que se precipita hacia el agujero negro. Con estas restricciones, parece que este tipo de atracones cósmicos podrían dar cuenta de unos pocos cúasares anómalos, pero no de toda la población detectada hasta ahora.

Por tanto, cabe preguntarse si las semillas de los primeros agujeros negros supermasivos pudieron haberse formado de otra manera. Junto con mi colaborador Giuseppe Lodato, y a partir del trabajo de otros grupos de investigación, en 2006 y 2007 publicamos una serie de artículos en los que propusimos un mecanismo alternativo. En ellos consideramos los grandes discos de gas prístino que, en principio, se habrían enfriado y fragmen-



EL TELESCOPIO ESPACIAL JAMES WEBB, cuyo lanzamiento está previsto para dentro de poco, podría obtener indicios sobre la formación de agujeros negros en el universo temprano.

tado para dar lugar a las primeras estrellas y galaxias. Nuestro trabajo demostró que esos discos podían eludir dicho proceso y, en su lugar, colapsar directamente en densas aglomeraciones de material, las cuales generarían agujeros negros de entre 10^4 y 10^6 masas solares. Esto puede ocurrir si algo interfiere con el proceso normal de enfriamiento que conduce a la formación de estrellas, haciendo que todo el disco se vuelva inestable y canalizando con rapidez la materia hacia el centro.

Los discos de gas que contienen hidrógeno molecular se enfrían más rápido que los que contienen hidrógeno atómico. Si la radiación de las estrellas de una galaxia vecina incide sobre el gas, puede dissociar el hidrógeno molecular y convertirlo en atómico, lo que inhibe el enfriamiento y mantiene el gas demasiado caliente para formar estrellas. Sin estrellas, el disco irradiado podría volverse inestable. La materia se acumularía con rapidez en el centro, lo que conduciría a la formación por colapso directo de un agujero negro masivo. Dado que este escenario requiere la presencia de estrellas cercanas, esperamos que estos «agujeros negros de colapso directo» (ANCD) se formen, por lo general, en galaxias satélite que estén orbitando en torno a otra galaxia principal de mayor tamaño, en las que las estrellas de la población III ya se hayan formado.

Tanto las simulaciones de los flujos de gas a gran escala como la física de los procesos que tienen lugar a escalas menores respaldan este modelo de formación de ANCD. Por tanto, la existencia de agujeros negros masivos en el universo temprano parece factible. Y tales semillas atenúan el problema relacionado con el tiempo necesario para formar los agujeros responsables de los cúasares más brillantes y lejanos.

EN BUSCA DE PRUEBAS

Por supuesto, el hecho de que los ANCD sean viables no significa que hayan existido. Para confirmarlo necesitamos pruebas observacionales. Estos objetos aparecerían como diminutos cúasares brillantes en el universo primitivo. Deberíamos poder detectarlos cuando el ANCD se funde con la galaxia principal, un proceso seguramente común. Ello proporcionaría al ANCD

ESCENARIO TRADICIONAL

Cuando las estrellas de la población III (las primeras del universo) agotaron su combustible nuclear, explotaron en forma de supernova y dieron lugar a agujeros negros. Estos objetos habrían crecido al engullir estrellas y gas.



Gran explosión

~180 millones de años

~270 millones de años

~370 millones de años

ESCENARIO DE COLAPSO DIRECTO

Si la formación de estrellas se hubiera detenido en una galaxia incipiente, todo el disco de gas podría haber colapsado en un agujero negro. Al colisionar con una galaxia cercana, el objeto habría crecido mucho más rápido que en el escenario tradicional.



una copiosa fuente de gas, por lo que el objeto comenzaría a crecer con rapidez. De hecho, se convertiría por un momento en un tipo especial de cuásar.

Esos agujeros negros no solo serían más brillantes que todo el conjunto de estrellas de su alrededor, sino también más masivos, lo que supondría una inversión con respecto al orden habitual de las cosas. En general, las estrellas de una galaxia presentan una masa unas mil veces mayor que la del agujero negro central. Sin embargo, después de que una galaxia que albergase un ANCD se fusionase con la galaxia principal alrededor de la cual orbitaba, la masa del agujero negro superaría a la de las estrellas durante un breve tiempo. El objeto resultante sería una galaxia con un agujero negro «obeso» y mostraría una firma espectral muy característica, sobre todo en la región infrarroja de entre 1 y 30 micrómetros. Es precisamente en esta banda donde operarán el Instrumento para el Infrarrojo Medio (MIRI) y la Cámara para el Infrarrojo Cercano (NIRCam) del James Webb. Este telescopio será la herramienta más potente que hayamos tenido nunca para estudiar las primeras etapas de la historia cósmica. Si detecta estas galaxias con un agujero negro masivo, obtendremos indicios sólidos de nuestra teoría sobre la formación de ANCD. En cambio, los agujeros negros considerados por las teorías tradicionales, originados a partir de estrellas muertas, probablemente sean demasiado tenues para que el James Webb u otros telescopios puedan verlos.

Nuestra teoría podría verse confirmada por otros indicios. En el raro caso en el que la galaxia que se fusiona con el ANCD albergue un agujero negro central, ambos objetos colisionarán y emitirán ondas gravitacionales. Tales ondas podrían ser detectadas en un futuro por la Antena Espacial de Interferometría

Láser (LISA), una misión de la Agencia Espacial Europea y la NASA cuyo lanzamiento se prevé para la década de 2030.

UN PROYECTO MÁS AMBICIOSO

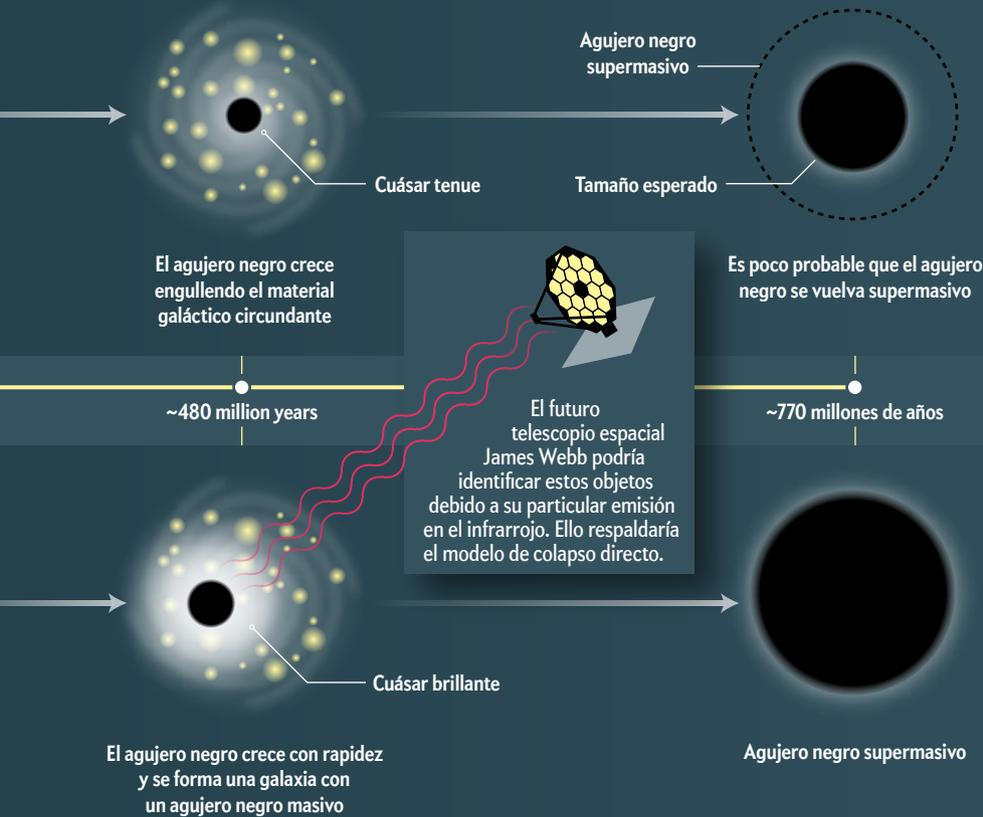
Es muy posible que en el universo primitivo hubiera tanto ANCD como pequeños agujeros negros que crecieran a un ritmo superior al impuesto por el límite de Eddington. De hecho, las primeras semillas probablemente se formasen a través de ambas vías. La pregunta es cuál de ellas produjo la mayor parte de los cuásares más antiguos que observamos. Resolver este misterio no solo nos ayudaría a entender el cosmos primitivo, sino también a abordar la pregunta más general de cómo afecta un agujero negro supermasivo a la galaxia que lo contiene.

Los datos indican que los agujeros negros centrales podrían cumplir una función importante a la hora de determinar cuántas estrellas se forman en una galaxia. Por un lado, la energía generada cuando la materia cae hacia el agujero negro puede calentar el gas circundante, lo que evita que este se enfríe y detiene la formación de estrellas en el centro de la galaxia. Pero los efectos pueden ir más allá del centro galáctico, ya que los agujeros negros supermasivos emiten potentes chorros de radiación. Tales chorros, detectables en longitudes de onda de radio, podrían también calentar el gas de las regiones exteriores e interrumpir allí la formación de estrellas. Sin embargo, se trata de un proceso complejo que nos gustaría entender mejor. Descubrir las semillas de los primeros agujeros supermasivos nos ayudaría a comprender cómo evolucionó la relación entre estos colosos cósmicos y sus galaxias anfitrionas.

Tales ideas se encuadran dentro de un programa más general para entender mejor los agujeros negros. Cuando el Observato-

Dos maneras de crear un agujero negro

La idea tradicional sobre el proceso que generó los agujeros negros supermasivos más antiguos (*arriba*) comienza con la muerte de las primeras estrellas del universo. Sin embargo, este mecanismo no logra explicar el enorme tamaño de los agujeros negros asociados a los cuásares más viejos que se conocen. Una hipótesis más reciente (*abajo*) postula que algunos discos de gas primitivos colapsaron directamente en agujeros negros, sin pasar por la fase de formación de estrellas.



rio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO) detectó por primera vez ondas gravitacionales en 2015, los investigadores pudieron determinar que se habían originado durante la colisión de dos agujeros negros de 36 y 29 masas solares, los «primos ligeros» de los agujeros negros supermasivos que encontramos en los cuásares. Desde entonces, LIGO ha continuado detectando eventos similares y ofreciendo detalles sobre lo que ocurre cuando estos agujeros negros chocan y deforman el espaciotiempo a su alrededor [véase «La observación de ondas gravitacionales con LIGO», por Alicia Sintés y Borja Sorazu; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2017].

Mientras tanto, el proyecto bautizado como Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT) pretende usar varios observatorios de radio dispersos por todo el mundo para obtener imágenes del agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea. Los científicos esperan detectar la «sombra» del agujero negro rodeada por un brillante anillo que, según la relatividad general, se produciría debido al efecto que la intensa gravedad del objeto ejerce sobre la luz. La observación de cualquier diferencia con respecto a las predicciones de la relatividad general cuestionaría lo que sabemos sobre estos objetos [véase «La prueba del agujero negro», por Dimitrios Psaltis y Sheperd S. Doeleman; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2015]. Al mismo tiempo, los experimentos conocidos como «baterías para la medición de la cadencia de púlsares» podrían detectar el temblor del espaciotiempo causado por la acumulación de colisiones de agujeros negros [véase «Púlsares y ondas gravitacionales», por Michael Kramer y Norbert Wex; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2013]. Y, por último, el telescopio James Webb abrirá muy pronto una nueva ventana para estudiar el universo primitivo.

El futuro inmediato promete revelarnos todo tipo de nuevos datos sobre los agujeros negros. Es posible que las sorpresas que nos aguardan transformen lo que sabemos sobre estos enigmáticos astros. ■

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, abril de 2018

Los primeros resultados del proyecto EHT, mencionado al final de este artículo, se hicieron públicos en abril de 2019

LA AUTORA

Priyamvada Natarajan es astrofísica teórica en Yale. Su investigación se centra en la cosmología, las lentes gravitacionales y la física de los agujeros negros.

PARA SABER MÁS

New observational constraints on the growth of the first supermassive black holes. Ezequiel Treister et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 778, n.º 2, art. 130, diciembre de 2013.

Seeds to monsters: Tracing the growth of black holes in the universe. Priyamvada Natarajan en *General Relativity and Gravitation*, vol. 46, n.º 5, art. 1702, mayo de 2014.

Mapping the heavens: The radical scientific ideas that reveal the cosmos. Priyamvada Natarajan. Yale University Press, 2016.

Unveiling the first black holes with JWST: Multi-wavelength spectral predictions. Priyamvada Natarajan et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 838, n.º 2, art. 117, abril de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Agujeros negros de masa intermedia. Jenny E. Greene, en este mismo número.
La benevolencia de los agujeros negros. Caleb Scharf en *IyC*, octubre de 2012.





AGUJEROS NEGROS ASTROFÍSICOS

Nuevas técnicas permiten observar
cómo los agujeros negros supermasivos
destruyen estrellas enteras

S. Bradley Cenko y Neil Gehrels

DEVORAR UN SOL

E

N EL CORAZÓN DE LA VÍA LÁCTEA Y DE PRÁCTICAMENTE CUALQUIER OTRA GRAN galaxia se esconde un profundo misterio cósmico: un agujero negro supermasivo. Estos objetos, que concentran masas entre millones y miles de millones de veces mayores que la del Sol en una región más pequeña que el sistema solar, resultan tan extraños que parecen casi místicos. Todavía nadie entiende bien cómo la naturaleza logra comprimir tanta materia en un espacio tan diminuto. Lo que sí sabemos es que los agujeros negros supermasivos extienden sus manos gravitatorias y, con ello, moldean de una manera profunda y sutil las galaxias que los albergan. Al estudiar cómo crecen y se comportan estos objetos, los astrónomos esperan descubrir las claves que rigen el nacimiento y la evolución de las propias galaxias.

El problema radica en que, dado que no emiten luz, los agujeros negros supermasivos pasan la mayor parte del tiempo inactivos e invisibles a nuestros ojos. Solo cobran vida cuando engullen materia. Pero estos festines son muy poco frecuentes, ya que el gas, el polvo y las estrellas que giran a su alrededor suelen hacerlo en órbitas estables, por lo que nunca serán devorados. No obstante, en las pocas ocasiones en que un objeto de tamaño considerable cae en su interior, su frenética actividad puede observarse desde muy, muy lejos.

Durante la mayor parte del último medio siglo, los científicos han observado principalmente una sola variedad de agujeros negros activos: los cuásares. Descubiertos en 1963 por el astrónomo Maarten Schmidt, del Instituto de Tecnología de California, estos objetos corresponden a los centros ultraluminosos de galaxias distantes. Pueden verse hasta en los confines del universo, ya que cada uno brilla más que miles de millones de soles. Se cree que se producen cuando enormes nubes de gas y polvo se precipitan hacia un agujero negro supermasivo: un proceso que se prolonga durante cientos de miles o millones de años y durante el cual la materia se comprime, se calienta y brilla mientras gira y cae. No obstante, los cuásares no son objetos de estudio ideales: están asociados a procesos extremos, por lo general muy lejanos, relativamente poco frecuentes y que apenas dan cuenta de una pequeña parte de la vida de un agujero negro. Por tanto, no nos permiten saber cómo se alimentan y crecen estos colosos en circunstancias normales. Otra manera de estudiar los agujeros negros supermasivos consiste en medir la

velocidad de las estrellas que pasan zumbando a su alrededor; sin embargo, esta técnica solo funciona bien para casos muy cercanos (en la Vía Láctea o en una de sus galaxias vecinas), donde los telescopios todavía son capaces de resolver estrellas individuales.

En 1988, Martin Rees, de la Universidad de Cambridge, propuso una tercera vía para estudiar estos objetos; una que hace poco ha comenzado a dar sus frutos. En lugar de observar cuásares lejanos o medir la velocidad a la que orbitan las estrellas cercanas a un agujero negro, la idea consiste en buscar breves y brillantes destellos luminosos procedentes de las inmediaciones de uno de estos astros. Tales fenómenos, conocidos como «eventos disruptivos de marea» (EDM), se producen cuando un agujero negro supermasivo devora una estrella. En lugar de milenios, solo tardan meses en completarse, lo que permite seguir el proceso de principio a fin. Además, su gran brillo hace que sea posible observarlos en galaxias tanto próximas como distantes.

LA DESTRUCCIÓN DE UNA ESTRELLA

Los eventos disruptivos de marea resultan mucho más impresionantes que el suave flujo y reflujos de los océanos; pero, en el fondo, no son tan diferentes. Las mareas se deben principalmente a la gravedad de la Luna, la cual «tira» con mayor intensidad del lado de nuestro planeta que tiene más cerca. Esa diferencia de la atracción lunar entre caras opuestas de la Tierra recibe el nombre de fuerza de marea. Este fenómeno genera un pequeño abultamiento, o marea alta, tanto en el lado del planeta que se

EN SÍNTESIS

Casi todas las grandes galaxias albergan en su centro un agujero negro supermasivo. Para investigar sus propiedades, los astrónomos deben observar con detalle los procesos mediante los cuales estos astros engullen materia.

Un tipo de proceso muy limpio y de corta duración es el que tiene lugar cuando el agujero negro destroza y devora una estrella cercana. Tales fenómenos reciben el nombre de «eventos disruptivos de marea».

Una nueva generación de telescopios está permitiendo estudiar tales eventos con gran precisión. Los resultados ayudarán a entender mucho mejor la física de los agujeros negros supermasivos y su influencia sobre las galaxias.



LOS CUÁSARES, brillantes faros cósmicos, se generan cuando un agujero negro supermasivo engulle grandes cantidades de gas (*arriba, una recreación artística*). Sin embargo, se trata de procesos lentos, poco frecuentes y que acontecen en galaxias distantes, por lo que no permiten estudiar de manera precisa la dinámica del agujero negro. Una alternativa consiste en captar el momento en el que estos colosos cósmicos devoran una estrella.

encuentra más próximo al satélite como (de manera un tanto paradójica) en el opuesto. Al mismo tiempo, ello produce una correspondiente marea baja en la dirección perpendicular al eje Tierra-Luna. En el caso de una estrella que se encuentra en las inmediaciones de un agujero negro supermasivo, las deformaciones «de marea» que este induce sobre aquella pueden llegar a despedazarla.

Los detalles de semejante defunción estelar dependen de los tamaños de la estrella y del agujero negro. Y, del mismo modo que resulta más sencillo desgarrar un algodón de azúcar que una bola de billar, un objeto pequeño y denso, como una enana blanca, resistirá las fuerzas de marea mucho mejor que una estrella como el Sol. No es fácil que los agujeros negros supermasivos más grandes (aquellos con miles de millones de masas solares) produzcan EDM: debido a su monstruoso tamaño, engullirán la estrella entera antes de destrozarla. Sin embargo, los objetos con una masa de pocos millones de soles harán añicos la mayoría de las estrellas que se aproximen a menos de unos 50 millones

de kilómetros; aproximadamente, la distancia que media entre Mercurio y el Sol.

Pero, por espectacular que pueda parecernos el desmembramiento de una estrella, este fenómeno no es más que el comienzo del espectáculo. Poco después, los restos estelares se extenderán y empezarán a desviarse de su trayectoria inicial. La mecánica orbital básica dicta que en torno a la mitad de los desechos serán expulsados en forma de largos filamentos de material. Mientras, la otra mitad continuará orbitando en torno al agujero negro y formará un disco de acreción: una estructura de anillos espirales que irá cayendo hacia el objeto. En el proceso, el material del disco se acelerará hasta casi la velocidad de la luz y, a medida que las fuerzas gravitatorias y de rozamiento lo compriman y lo calienten, brillará y su temperatura aumentará hasta los 250.000 grados centígrados. Durante un período de semanas o meses, un EDM típico hará que un agujero negro previamente inactivo e invisible eclipse a todas las estrellas de su galaxia.

LOS PRIMEROS HALLAZGOS

Aunque los teóricos predijeron los EDM hace decenios, los primeros fenómenos de este tipo solo se detectaron en los años noventa y a principios de este siglo. Ese retraso se debió, en parte, a que se trata de procesos muy poco comunes. Según los cálculos, en una galaxia como la Vía Láctea ocurren una vez cada 100.000 años. También puede ser complicado verlos. Algunos modelos teóricos indicaban que el brillo máximo del disco de acreción de un EDM se produciría en la banda de los rayos X «blandos» o en el ultravioleta lejano, longitudes de onda difíciles de observar desde la superficie terrestre debido a las interferencias causadas por el polvo interestelar y la atmósfera. Esos mismos modelos también sugerían que los astrónomos podrían usar un EDM para estimar con relativa precisión la masa del agujero negro que lo produce, un dato fundamental para descubrir cómo influye el tamaño de estos objetos en su comportamiento y en su entorno galáctico. Para calcular la masa de un agujero negro, los investigadores pueden medir cuánto tarda un EDM en alcanzar su brillo máximo, lo cual revela con qué velocidad se forma el disco de acreción y a qué ritmo se alimenta el coloso. Dado que los EDM son tan brillantes, permiten determinar las masas de un abanico muy amplio de agujeros negros supermasivos, un aspecto en el que superan a cualquier otro fenómeno conocido.

Los primeros candidatos a EDM aparecieron en los datos de los telescopios espaciales ROSAT (de rayos X) y Explorador de Evolución Galáctica (ultravioleta) en forma de eventos brillantes, localizados en los centros de galaxias previamente inactivas y con una duración de entre semanas y meses. Como primeras manifestaciones de un fenómeno predicho largo tiempo atrás, estos hallazgos fueron especialmente importantes para asentar un nuevo campo de investigación. Sin embargo, debido a que se descubrieron sobre todo en datos antiguos, los astrónomos no pudieron estudiarlos en tiempo real en diversas longitudes de onda. Para captar un EDM en el momento de producirse, los investigadores habrían de tener mucha suerte o ser capaces de explorar de manera continuada franjas mastodónticas de cielo.

Al final, la fortuna quiso que los constantes avances en sensores y en almacenamiento de datos hicieran posible este tipo de estudios. En la actualidad, una cámara óptica puntera puede captar un grado cuadrado o más del cielo en una sola instantánea. El cambio que esto supone puede equipararse a ver el firmamento con una lente panorámica después de llevar años mirándolo a través de una pajita de bebida. Ahora, al poder explorar grandes áreas de cielo y combinar digitalmente las imágenes para identificar elementos temporales casi imperceptibles, los astrónomos pueden descubrir y estudiar con mucha mayor facilidad tanto EDM como toda otra serie de fenómenos astrofísicos transitorios. Estos nuevos estudios de gran campo, con nombres como Telescopio de Sondeo Panorámico y Sistema de Respuesta Rápida (Pan-STARRS), Factoría Transitoria de Palomar (PTF) y Sondeo Automatizado de Todo el Cielo en Busca de Supernovas (ASAS-SN), fueron diseñados principalmente para identificar supernovas y asteroides, pero pueden llegar mucho más lejos. Dado que cada noche consiguen fotografiar millones de galaxias, también se muestran sensibles a eventos transitorios más exóticos, como los EDM.

NUEVAS PREGUNTAS PARA UNA NUEVA ERA

En 2010, poco después del comienzo del sondeo Pan-STARRS, un equipo dirigido por Suvi Gezari, astrónoma de la Universidad de Maryland, descubrió un nuevo EDM. Bautizado como

EVENTOS DISRUPTIVOS DE MAREA

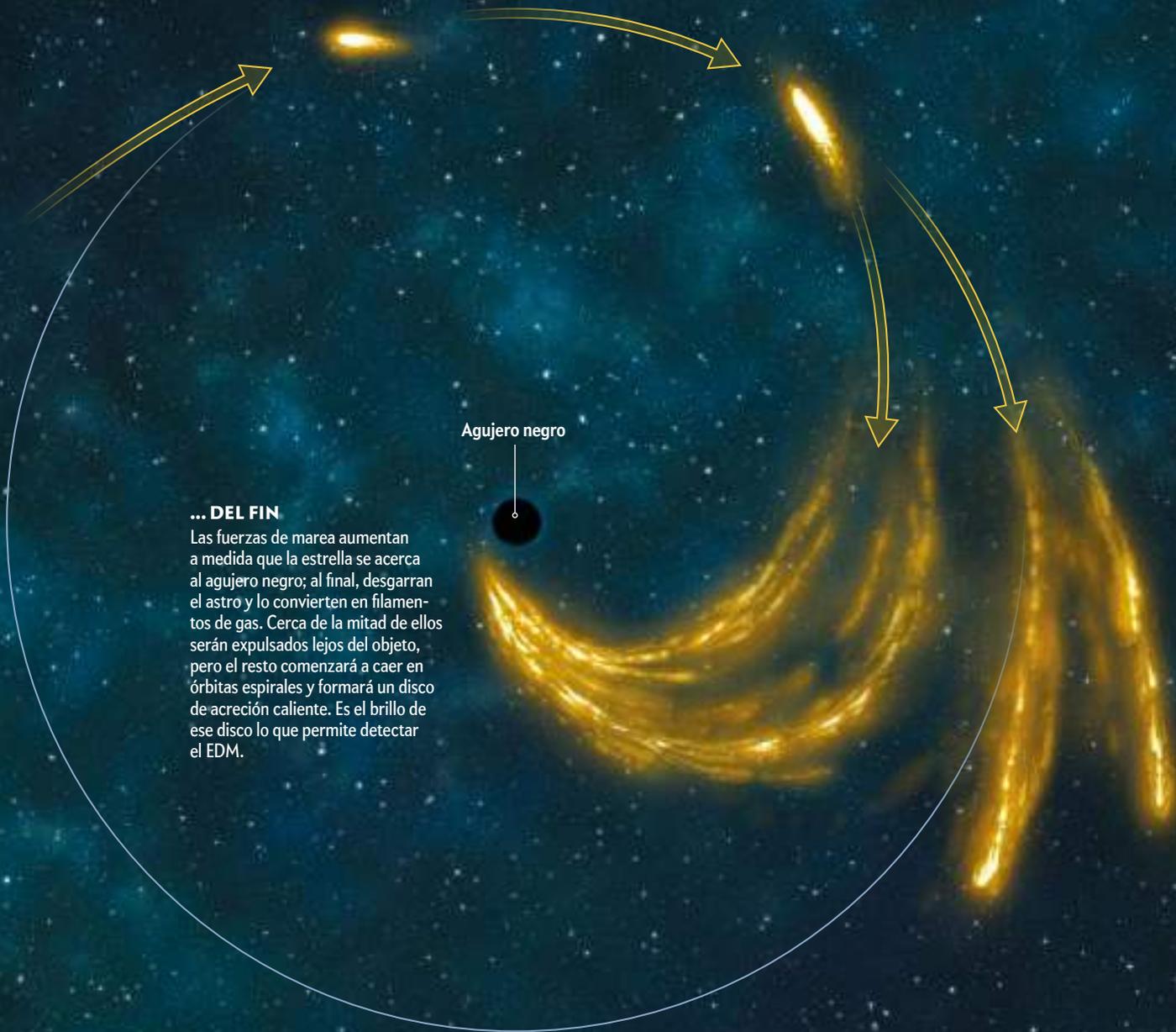
Morir en un agujero negro

Aunque los agujeros negros no emiten luz, pueden ser causa de algunos de los fenómenos más luminosos del universo. Así ocurre con los agujeros negros supermasivos: misteriosos objetos con masas entre millones y miles de millones de veces mayores que la del Sol que habitan en el centro de la mayor parte de las galaxias. Si una estrella errante se aproxima demasiado a uno de ellos, el intenso campo gravitatorio la despedazará y arrancará una corriente de gas, el cual se comprimirá y se calentará. Estos fenómenos, conocidos como eventos disruptivos de marea (EDM), pueden verse a través de todo el cosmos y proporcionan valiosa información sobre la manera en que los agujeros negros supermasivos se alimentan y crecen.

Estrella

EL PRINCIPIO ...

Un EDM comienza cuando un agujero negro supermasivo ejerce una mayor atracción gravitatoria sobre el hemisferio más próximo de una estrella cercana. La magnitud de estas fuerzas de marea depende de la masa del agujero negro y de la densidad de la estrella. Aquí, una estrella similar al Sol comienza a deformarse cuando se acerca a un agujero negro de un millón de masas solares.



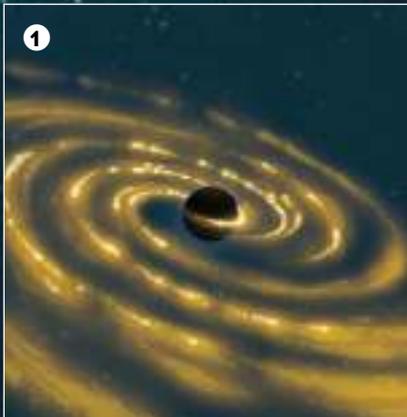
... DEL FIN

Las fuerzas de marea aumentan a medida que la estrella se acerca al agujero negro; al final, desgarran el astro y lo convierten en filamentos de gas. Cerca de la mitad de ellos serán expulsados lejos del objeto, pero el resto comenzará a caer en órbitas espirales y formará un disco de acreción caliente. Es el brillo de ese disco lo que permite detectar el EDM.

UNA VISTA SIN IGUAL

Debido a su brevedad, los EDM constituyen la única manera de presenciar cómo un agujero negro supermasivo despierta, engulle materia y regresa a la inactividad. Al medir el tiempo que tarda el disco de acreción en formarse ❶, alcanzar su brillo máximo ❷ y desaparecer ❸, los astrónomos pueden calcular el tamaño de la estrella devorada, así como la masa y el momento

angular del agujero negro. El proceso también permite estudiar las ondas de choque generadas en el disco de acreción o la generación de chorros relativistas (corrientes de partículas lanzadas a velocidades próximas a la de la luz desde los polos del agujero negro). Ningún otro fenómeno cósmico permite estudiar la manera en que un agujero negro engulle materia.



PS1-10jh, el evento tuvo lugar en torno a un agujero negro de unos dos millones de masas solares situado en una galaxia a 2700 millones de años luz de distancia. Debido a que el evento fue identificado poco después de la toma de datos, Gezari y sus colaboradores pudieron ver, por vez primera, cómo continuaba su desarrollo en el óptico y en el ultravioleta. Lo que encontraron fue sorprendente.

Las mediciones del espectro indicaron que el EDM parecía ser demasiado frío. Su temperatura, de unos 30.000 grados, era más de ocho veces menor que la predicha por la mayoría de las teorías básicas sobre discos de acreción. Además, en vez de desvanecerse en unas semanas a medida que el disco de acreción se enfriaba y se disipaba, PS1-10jh mantuvo una temperatura constante durante varios meses tras el descubrimiento inicial. Y lo más extraño de todo: Pan-STARRS había detectado en el brillo residual del fenómeno signos de helio ionizado, el cual solo podría generarse a temperaturas superiores a los 100.000 grados. Y aunque el EDM parecía ser rico en helio, también parecía estar desprovisto de hidrógeno, el elemento más abundante del universo y el ingrediente principal de las estrellas. Los teóricos se pusieron manos a la obra para intentar averiguar qué podía estar originando estos resultados tan desconcertantes.

Para explicar la falta de hidrógeno de PS1-10jh, el equipo de Pan-STARRS sugirió la posibilidad de que la estrella destruida hubiera perdido su gruesa envoltura de hidrógeno en algún mo-

Las enrevesadas propiedades de PS1-10jh dejaron algo muy claro: los eventos disruptivos de marea constituían un fenómeno mucho más complejo de lo que nadie había imaginado

mento del pasado; posiblemente, en una interacción previa con el agujero negro. Eso habría dejado solo el núcleo de la estrella, rico en helio, para generar el disco de acreción. Pero esto, por sí solo, no podía explicar las curiosas discrepancias térmicas del evento (su temperatura sorprendentemente baja frente a la abundancia de helio ionizado, solo posible a temperaturas mucho mayores). Para resolver ese misterio, otros teóricos postularon que, en realidad, no estábamos observando directamente el disco de acreción del agujero negro de PS1-10jh. En su lugar, se trataría de un velo de gas que rodeaba al objeto a una distancia mucho mayor, el cual absorbía la intensa radiación producida por el disco y la volvía a emitir a temperaturas más bajas. Como ventaja añadida, dicho velo explicaría la aparente ausencia de hidrógeno sin necesidad de que el progenitor del EDM fuese un núcleo exótico rico en helio: a una temperatura adecuada y con una densidad lo suficientemente elevada, un velo de este tipo podría ocultar la presencia de hidrógeno.

El único problema radicaba en que un espeso velo de gas que se encontrase a la distancia necesaria del agujero negro no sería estable: con el tiempo, el gas se precipitaría hacia el agujero

negro o se disiparía hasta resultar invisible. Los oscuros orígenes de este material son todavía objeto de un intenso debate, pero en términos generales existen dos posibilidades. Por un lado, a medida que los restos de la estrella destruida giran alrededor del astro y van formando un disco de acreción cada vez mayor, una serie de ondas de choque pueden propagarse hacia fuera a gran distancia del disco; eso evitaría que algunos de los escombros periféricos cayesen de inmediato, lo que crearía temporalmente una pantalla de material. Por otro, un disco de acreción recién formado podría canalizar de tal modo el material hacia el interior que superaría brevemente la capacidad de ingestión del agujero negro; eso crearía, justo fuera del coloso, vientos transitorios o emisiones de material que empujarían los restos estelares mucho más allá del disco de acreción.

Mientras los astrónomos consideraban estas enrevesadas posibilidades para PS1-10jh y otros EDM descubiertos poco después, algo quedó muy claro: los EDM constituían un fenómeno mucho más complejo de lo que nadie había imaginado. Con todo, la mayor sorpresa estaba aún por llegar.

LA CONMOCIÓN DE SWIFT

Dicha sorpresa llegó en la madrugada del 28 de marzo de 2011, con una alerta automática enviada a los buscadores y los teléfonos móviles de un equipo de astrónomos de todo el mundo. El satélite Swift acababa de detectar un pulso de radiación de

alta energía procedente de las profundidades del espacio. Construido por la NASA en colaboración con instituciones italianas y británicas, Swift es un telescopio espacial ágil diseñado para estudiar explosiones celestes. Su objetivo principal son los estallidos de rayos gamma (GRB, por sus siglas en inglés), catastróficas explosiones estelares que se encuentran entre los eventos astrofísicos más luminosos del universo. Cada vez que un torrente de rayos gamma llega a los sensores de Swift, el instrumento se reorienta con rapidez para observar la fuente en rayos X y en luz óptica; después, envía datos que desencadenan una compleja cadena de acontecimientos en tierra. Tras una alerta de Swift, los astrónomos pugnan por hacerse con los servicios de los mayores y más potentes telescopios del mundo para buscar el brillo residual asociado a un

GRB antes de que desaparezca para siempre de la vista. Desde su lanzamiento en 2004, Swift ha descubierto más de mil GRB. Sin embargo, este evento particular, más tarde denominado Swift J1644+57, resultaría ser diferente de todo lo que el satélite había visto hasta entonces.

Como su nombre indica, los estallidos de rayos gamma tienden a ser breves, con una duración típica de entre una fracción de segundo y algunos minutos. Cuando orientamos nuestros telescopios hacia Swift J1644+57 en aquella madrugada de marzo, esperábamos ver el típico brillo residual evanescente de un GRB de corta duración. En vez de eso, observamos brillantes y erráticos destellos de rayos gamma durante un día, a los que siguieron meses de emisiones de rayos X, intensas pero cada vez más débiles. Pronto descubrimos que la explosión provenía de una galaxia situada a 3800 millones de años luz, en la dirección de la constelación del Dragón. Uno de nuestros colaboradores, Joshua S. Bloom, de la Universidad de California en Berkeley, sugirió que habíamos sido testigos de un EDM y predijo, con acierto, que la fuente de rayos gamma se encontraría en el centro de la galaxia, el territorio de los agujeros negros supermasivos. Pero, mientras

que todos los EDM anteriores se habían detectado en longitudes de onda más largas (de menor energía), correspondientes a la emisión térmica del disco de acreción de una estrella destrozada, en este caso ocurría algo totalmente distinto.

¿Cómo podía un EDM producir rayos gamma? La mejor respuesta que se nos ocurrió fue que los agujeros negros son «comensales sucios». En principio, estos objetos deberían devorar la mayor parte del gas de la estrella destruida, encerrándolo para siempre tras el horizonte de sucesos (la frontera más allá de la cual nada puede escapar). Sin embargo, lo más probable es que todos los agujeros negros roten, lo que puede provocar que un pequeño porcentaje del gas de la estrella destrozada salga despedido desde los polos del astro. Allí el gas es acelerado y expulsado en forma de haces de partículas que se mueven a una velocidad cercana a la de la luz, los cuales emiten rayos X y gamma. Al parecer, Swift se encontraba, por casualidad, en la dirección del haz expulsado por el objeto. Fue un hallazgo afortunado, ya que no parece que todos los EDM generen dichas emisiones relativistas, y la mayoría de los que lo hagan probablemente no se encuentren en nuestra línea de visión.

Inspirado por la detección de Swift J1644+57, el equipo de operaciones del instrumento comenzó una búsqueda coordinada de más eventos. Desde entonces se han descubierto otros EDM que emiten chorros de rayos gamma. Estos intensísimos y poco frecuentes estertores estelares constituyen una nueva manera de estudiar uno de los principales objetos de interés en la astrofísica de altas energías moderna: la formación y el comportamiento de los chorros de partículas relativistas.

LA MUERTE DE LOS MUNDOS

Ya sea a través de las emisiones térmicas de los discos de acreción o del torrente de rayos gamma emitidos por los chorros relativistas, los EDM nos ofrecen una nueva ventana al comportamiento y la evolución de los agujeros negros supermasivos y sus alrededores. Y lo que es más importante: a diferencia de los chorros y los discos de acreción de los cuásares, los cuales se producen cuando inmensas nubes de gas se precipitan sobre un agujero negro supermasivo de manera caótica y a lo largo de escalas de tiempo enormes, los EDM constituyen fenómenos breves y limpios, lo que permite estudiarlos con gran facilidad. Ningún ser humano vivirá lo suficiente para presenciar el ciclo de vida completo de un cuásar. Sin embargo, ya hemos descubierto y estudiado más de veinte EDM de principio a fin. Y en esas catástrofes estelares hemos vislumbrado aspectos de gran interés que piden a gritos investigaciones más detalladas. Al medir con precisión los destellos fluctuantes de los EDM, no solo aprendemos sobre las propiedades de los agujeros negros, sino también sobre la composición y la estructura interna de estrellas que están siendo despedazadas a miles de millones de años luz de distancia.

Incluso podríamos llegar a ver a los acompañantes de esas estrellas: planetas devorados por agujeros negros. Cada fluctuante destello procedente de un centro galáctico lejano podría señalar la muerte de mundos enteros. Las investigaciones sobre las estrellas de nuestra galaxia han revelado que casi todas ellas albergan planetas, así que probablemente lo mismo ocurra con las estrellas de otras galaxias, incluidas las que sufren EDM. Incluso si no son engullidos directamente, los planetas también podrían encontrarse en la trayectoria de los chorros relativistas transitorios producidos por algunos EDM, los cuales abarcan varios años luz. Si cualquier sistema planetario con tan mala suerte como para ser golpeado por uno de ellos poseyese vida,

esta se extinguiría con rapidez. Y puede que algún día los astrónomos presencien un EDM en nuestro vecindario cósmico, cuando el inactivo agujero negro de cuatro millones de masas solares que se esconde en el centro de la Vía Láctea devore una estrella errante. Llegado el caso, se trataría de un evento muy luminoso, pero también muy seguro, ya que nuestro planeta se encuentra a una distancia suficiente como para permanecer a salvo de los efectos más peligrosos del EDM.

La llegada de instrumentos aún más potentes anuncia una nueva era de descubrimientos sobre los EDM. El Gran Telescopio para Rastreo Sinóptico (LSST), un instrumento de ocho metros y con un campo de visión de 10 grados cuadrados que se está construyendo en Chile, descubrirá por sí solo miles de estas explosiones en sus primeros diez años de funcionamiento. En cierto modo, el mayor desafío científico del LSST será cribar el apabullante número de sucesos transitorios. Algunos radioobservatorios previstos, como la Batería del Kilómetro Cuadrado (SKA), que se instalará en Australia y Sudáfrica, serán particularmente adecuados para identificar chorros relativistas, incluso si estos no se emiten directamente a lo largo de nuestra línea de visión.

En un futuro no muy lejano, los astrónomos quizá hayan compilado un catálogo de EDM con miles y miles de eventos, más de los que una persona podría estudiar en el curso de su vida. Ello nos brindará nueva información sobre el abanico de masas y comportamientos de los agujeros negros supermasivos que habitan en el corazón de las galaxias, esquivos fantasmas hambrientos a los que no podemos acceder de ningún otro modo. A partir de ese rico y cada vez mayor corpus de conocimiento, solo podemos soñar con los nuevos y revolucionarios hallazgos que sobrevendrán. ■

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, junio de 2017

LOS AUTORES

S. Bradley Cenko es investigador del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA, donde ejerce como director adjunto de la misión Swift. **Neil Gehrels** fue jefe del Laboratorio de Física de Astropartículas del Centro de Vuelos Espaciales Goddard e investigador principal de la misión Swift. Falleció en febrero de 2017, justo antes de que la versión original de este artículo fuese enviada a imprenta.

PARA SABER MÁS

Tidal disruption of stars by black holes of 10^6 - 10^8 solar masses in nearby galaxies. Martin J. Rees en *Nature*, vol. 333, págs. 523-528, junio de 1988.

A possible relativistic jetted outburst from a massive black hole fed by a tidally disrupted star. Joshua S. Bloom et al. en *Science*, vol. 333, págs. 203-206, julio de 2011.

An ultraviolet-optical flare from the tidal disruption of a helium-rich stellar core. Suvi Gezari et al. en *Nature*, vol. 485, págs. 217-220, mayo de 2012.

PS1-10jh continues to follow the fallback accretion rate of a tidally disrupted star. Suvi Gezari et al. en *Astrophysical Journal Letters*, vol. 815, n.º 1, art. L5, diciembre de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Agujeros negros en los centros galácticos. Martin Rees en *IyC*, enero de 1991.

Retrato de un agujero negro. Avery E. Broderick y Abraham Loeb en *IyC*, febrero de 2010.

La prueba del agujero negro. Dimitrios Psaltis y Sheperd S. Doeleman en *IyC*, noviembre de 2015.

AGUJEROS NEGROS ASTROFÍSICOS

AGUJEROS NEGROS PRIMORDIALES Y MATERIA OSCURA



¿Se compone la materia oscura de agujeros negros creados justo después de la gran explosión?

Juan García-Bellido y Sébastien Clesse

EN SÍNTESIS

Muchos físicos creen que la materia oscura se compone de algún tipo de partícula elemental aún por descubrir. Sin embargo, tras décadas de búsqueda, dichas partículas siguen sin aparecer.

Otra posibilidad reside en que la materia oscura se componga de agujeros negros. Esa hipótesis perdió fuelle hace una década, cuando se vio desfavorecida por varias observaciones astronómicas. No obstante, tales resultados solo invalidaban agujeros negros con masas de hasta diez masas solares.

Desde 2015, el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO) ha detectado fusiones de agujeros negros de hasta 30 masas solares. Nadie sabe cómo pudieron formarse esos objetos tan masivos.

Un modelo reciente en cosmología inflacionaria predice que grandes cantidades de agujeros negros de gran masa debieron crearse poco después de la gran explosión. Sus propiedades podrían explicar tanto la materia oscura como otros enigmas cósmicos aún sin resolver.



ACE MÁS DE MIL MILLONES DE AÑOS, DOS AGUJEROS NEGROS remotos ejecutaron una danza mortal girando en espiral uno alrededor del otro hasta fusionarse. Aquella colisión fue tan violenta que hizo temblar el tejido del espaciotiempo, lo que generó ondas gravitacionales que se propagaron a través del cosmos a la velocidad de la luz. En septiembre de 2015, después de viajar más de mil millones de años luz, esas ondulaciones bañaron nuestro planeta y produjeron un breve «gorjeo» en los sensores del Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), en Estados Unidos.

Aquella fue la primera detección directa de ondas gravitacionales, lo que confirmaba uno de los fenómenos predichos por la teoría de la relatividad general de Einstein, formulada hace un siglo. Sin embargo, los datos revelaron que cada uno de los agujeros negros que colisionaron era unas 30 veces más masivo que el Sol: entre dos y tres veces más de lo que cabría esperar de los agujeros negros ordinarios, aquellos nacidos en explosiones de supernova. Hablamos de objetos tan grandes que resulta difícil explicar cómo pudieron formarse a partir de estrellas. Y aunque se hubiesen gestado de manera independiente a partir de estrellas muy masivas, luego habrían tenido que encontrarse y fusionarse. Sin embargo, la probabilidad de que algo así ocurra en un tiempo igual a la edad actual del universo resulta extremadamente baja. Por tanto, parece razonable sospechar que quizá se creasen en un proceso más exótico, en el que tal vez las estrellas no desempeñaron ningún papel. Más allá de haber detectado ondas gravitacionales, LIGO podría haber descubierto algo mucho más extraordinario: agujeros negros anteriores a la formación de las propias estrellas.

Aunque nunca hayamos visto tales agujeros negros, denominados «primordiales», algunos modelos teóricos indican que una enorme cantidad de ellos pudo haberse formado a partir del plasma denso y caliente que llenaba el cosmos menos de un segundo después de la gran explosión. Esta población hasta ahora oculta de agujeros negros podría explicar varios misterios de la cosmología moderna. En particular, tales objetos podrían dar cuenta de una parte o incluso de la totalidad de la materia oscura, la masa invisible que sabemos que compone el 85 por ciento de toda la materia del universo y que actúa como «pegamento gravitatorio» que mantiene unidas las galaxias y los cúmulos de galaxias. En los próximos años, las observaciones

de LIGO y de otros instrumentos permitirán poner a prueba estas ideas, lo que podría conducir a una nueva revolución en nuestra comprensión del cosmos.

¿AGUJEROS NEGROS O PARTÍCULAS?

En principio, los agujeros negros parecerían candidatos ideales para dar cuenta de la materia oscura, ya que no emiten luz. De hecho, junto con planetas y enanas marrones, fueron propuestos hace tiempo como posible solución al problema. Según esta idea, los centros de las galaxias y los halos esféricos que las rodean albergarían grandes cantidades de MACHO, acrónimo inglés de «objetos compactos masivos del halo». Estos astros generarían la atracción gravitatoria que hace falta para explicar el extraño movimiento de las estrellas y el gas en la periferia de las galaxias. En general, las galaxias rotan más rápido de lo que deberían si su única masa fuese la que podemos ver. La materia oscura proporciona esa atracción adicional que evita que las galaxias en rotación acaben arrojando sus estrellas fuera de sí.

Sin embargo, si los MACHO constituyen la mayor parte de la materia oscura del universo, deberían también dar cuenta de otras observaciones. Sabemos que la materia oscura da forma a las mayores estructuras del universo, ya que determina el origen y el crecimiento de las galaxias, los cúmulos y los supercúmulos. Estas estructuras se agregan a partir de las acumulaciones de gas que hay en el interior de los halos de materia oscura. Los cosmólogos han cartografiado con precisión la distribución espacial de dichas acumulaciones y la han correlacionado con las fluctuaciones de temperatura del fondo cósmico de microondas, la radiación fósil de la gran explosión. Además, la masa asociada a las grandes «nubes» de materia oscura de las galaxias y de los cúmulos curva el espacio y distorsiona la luz de objetos

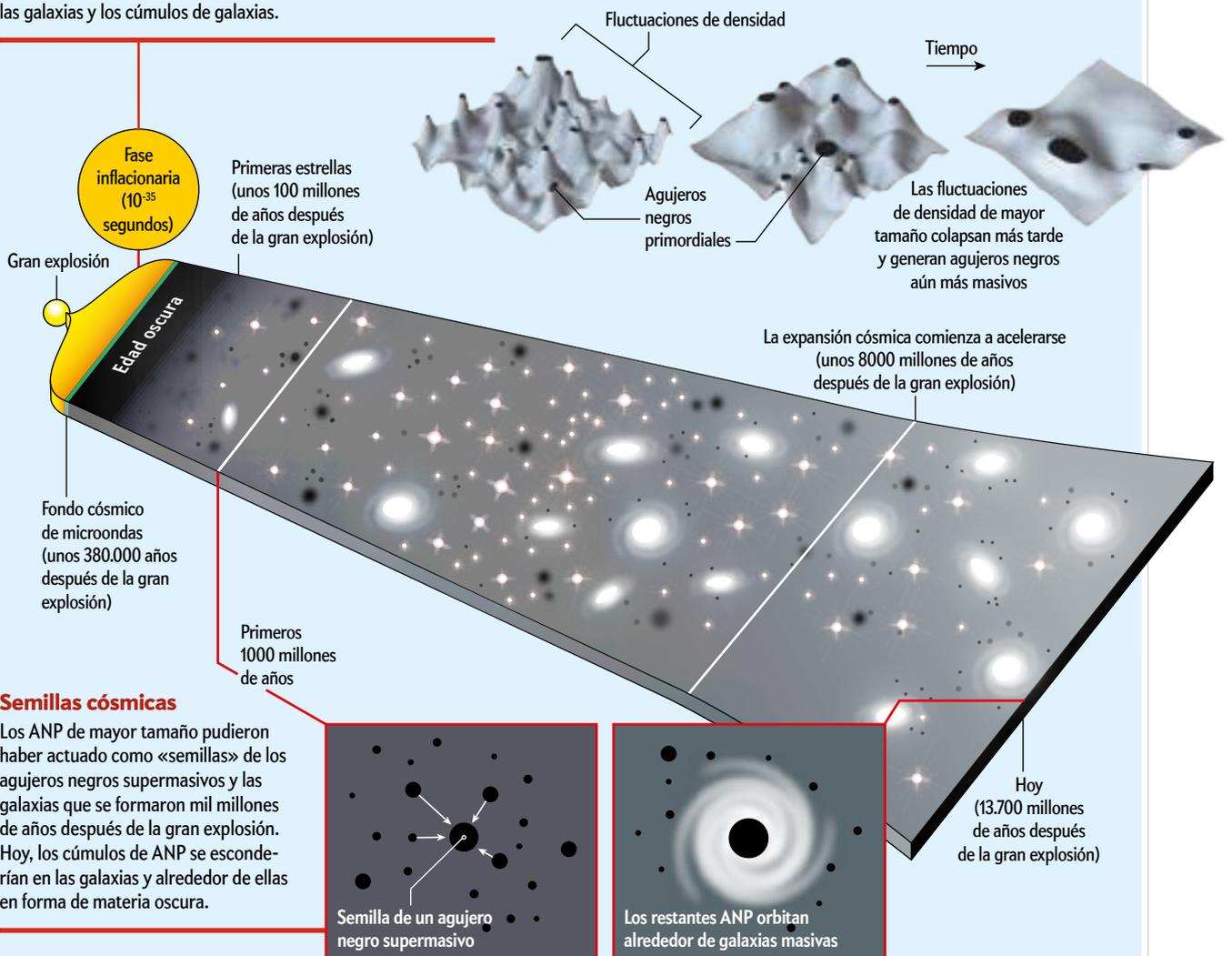
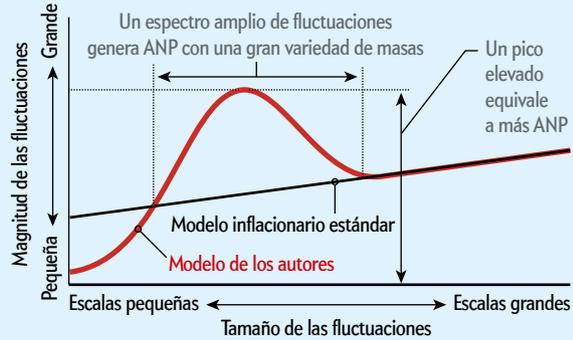
Agujeros negros nacidos en la gran explosión

Los primeros agujeros negros del universo pudieron haberse creado un instante después de la gran explosión, cuando el cosmos no era más que una densa niebla de partículas elementales. En los años setenta, los físicos se percataron de que las regiones más densas de dicha niebla podrían colapsar bajo su propia gravedad y convertirse en agujeros

negros «primordiales» (ANP), así llamados debido a su origen. A medida que el universo evolucionaba y se expandía, estos objetos habrían dado forma a las grandes estructuras cósmicas. Hoy por hoy, los ANP de más de 10 masas solares siguen siendo candidatos viables para explicar la materia oscura.

Agujeros negros primordiales e inflación cósmica

La inflación (una hipotética fase de expansión hiperacelerada que estiró el universo durante la primera fracción de segundo tras la gran explosión) amplificó las fluctuaciones cuánticas hasta escalas inmensas. Al acabar la inflación, dichas fluctuaciones generaron grandes «grumos» de materia, los más densos de las cuales habrían colapsado bajo su propia gravedad para convertirse en ANP. El modelo inflacionario propuesto por los autores predice un pico muy ancho de fluctuaciones (gráfica), lo que se traduce en agujeros negros con un amplio espectro de masas (entre 0,01 y 10.000 masas solares) agrupados en cúmulos. Medio millón de años después de la gran explosión, cada uno de esos cúmulos se extendería cientos de años luz y contendría millones de ANP. Tales objetos habrían influido de manera decisiva en el crecimiento de las galaxias y los cúmulos de galaxias.



lejanos, un fenómeno conocido como lente gravitatoria.

La hipótesis de los MACHO, sin embargo, perdió popularidad hace una década, cuando se comprobó que tales objetos masivos no aparecían en las búsquedas indirectas. En particular, los astrónomos intentaron detectarlos por medio de «microlentes», un tipo de lente gravitatoria que tiene lugar cuando un agujero negro, una enana marrón o incluso un planeta pasa por delante de una estrella y amplifica temporalmente su luz. Diferentes sondeos de varios años de duración efectuados sobre millones de estrellas de las Nubes de Magallanes, las principales galaxias satélite de la Vía Láctea, permitieron descartar que los MACHO de hasta 10 masas solares diesen cuenta de la mayor parte de la materia oscura. Al mismo tiempo, los físicos teóricos hallaron argumentos a favor de una hipótesis alternativa: que la materia oscura estuviese formada por «partículas masivas que interactúan débilmente», o WIMP, por sus siglas en inglés.

Las WIMP constituyen una predicción de algunas extensiones del modelo estándar de la física de partículas. Sin embargo, hasta la fecha se han mostrado tan escurridizas como los MACHO. Pese a décadas de búsqueda con aceleradores de partículas, detectores subterráneos y telescopios espaciales, hoy por hoy no contamos con ningún indicio de la existencia de estas partículas. A medida que se iban acumulando los resultados negativos, algunos investigadores comenzaron a reconsiderar la hipótesis de los MACHO, con énfasis en la idea de que se tratase de agujeros negros primordiales. Pero ¿qué proceso podía haber esparcido estos extraños objetos a lo largo de todo el universo observable? ¿Y cómo podían haber escapado a las observaciones durante tanto tiempo?

AGUJEROS NEGROS DE LA GRAN EXPLOSIÓN

Los agujeros negros primordiales fueron propuestos en los años setenta por los físicos Bernard Carr y Stephen Hawking. Su trabajo consideró agujeros negros con masas menores que la de una montaña. Sin embargo, a lo largo de los casi 14.000 millones de años de vida del universo, esos diminutos objetos ya se habrían «evaporado» como consecuencia de un proceso descubierto por Hawking y conocido con el apropiado nombre de radiación de Hawking. Sin embargo, Carr y Hawking también investigaron la posibilidad de que agujeros negros más masivos y aún sin evaporar diesen cuenta de la masa que parecía faltar en los cúmulos de galaxias.

¿Se compone la materia oscura de agujeros negros primordiales?

Las siguientes observaciones darán la respuesta:

1. Ondas gravitacionales

Cabe esperar que los detectores de ondas gravitacionales, como LIGO, en EE.UU., y Virgo, en Italia, registren nuevas fusiones de agujeros negros. La detección de un número inesperadamente elevado de fusiones de agujeros negros de gran masa apuntaría a un origen primordial de estos, aunque no demostraría que dichos objetos compongan la materia oscura; esa prueba tendrá que llegar por medio de otras observaciones. En última instancia, detectar un agujero negro con una masa inferior al límite de Chandrasekhar (1,45 masas solares), por debajo del cual una estrella no puede dar lugar a un agujero negro, constituiría una prueba irrefutable de su origen primordial. Por fortuna, LIGO podría alcanzar pronto la sensibilidad necesaria para observar un agujero negro así si su compañero es lo suficientemente masivo (más de 10 masas solares). Por último, a escalas cósmicas, una gran población de sistemas binarios de agujeros negros debería generar un fondo difuso de ondas gravitacionales. Dicho fondo podría ser detectado por futuros observatorios espaciales, como la Antena Espacial de Interferometría Láser (LISA), proyectada por la ESA, y por redes terrestres de cronometraje de púlsares.

2. Galaxias enanas ultratenues

En 2015, un grupo de astrónomos descubrió decenas de galaxias enanas ultratenues en el halo de la Vía Láctea a partir de los datos del Sondeo de la Energía Oscura (DES). Este hallazgo hace pensar que alrededor de nuestra galaxia podría haber cientos de estos objetos, los cuales contienen una proporción muy elevada de materia oscura. Si esta se compone de agujeros negros primordiales, una gran parte de ellos debería residir en estas galaxias enanas, lo que ofrecería una oportunidad de detectarlos con algunos instrumentos espaciales futuros, como el proyectado por la misión Euclid, de la ESA, y el Telescopio para Sondeos Infrarrojos de Campo Amplio (WFIRST), de la NASA.

3. Variaciones en la posición de las estrellas

La misión Gaia, también de la ESA, fue lanzada para medir las posiciones y velocidades de unos mil millones de estrellas de la Vía Láctea con una precisión sin precedentes. Sus resultados podrían revelar la existencia de numerosos agujeros negros masivos aislados, los cuales se manifestarían a través de las pequeñas variaciones que inducirían en el movimiento de las estrellas cercanas.

4. Distribución del hidrógeno cósmico neutro

Antes y durante la formación de las primeras estrellas, el universo estaba compuesto principalmente por hidrógeno neutro, el cual emite una radiación característica con una longitud de onda de 21 centímetros, en la banda de radio. En la década de 2020, el Conjunto del Kilómetro Cuadrado (SKA, que se convertirá en el mayor radiotelescopio de todos los tiempos), comenzará a elaborar un mapa celeste de esta señal de 21 centímetros. La acreción de materia por parte de agujeros negros primordiales generaría una intensa radiación de rayos X que, a su vez, ionizaría el hidrógeno neutro circundante, lo que dejaría una impronta característica en dicho mapa. Si los agujeros negros primordiales masivos componen la materia oscura, el SKA debería poder detectarlos.

5. Distorsiones en el fondo cósmico de microondas

En el universo primitivo, la emisión de rayos X por parte de agujeros negros primordiales que estuviesen engullendo gas y polvo tendría que haber inducido distorsiones en el espectro del fondo cósmico de microondas. La importancia de este efecto es por el momento motivo de controversia, sobre todo en aquellos modelos que predicen que los agujeros negros primordiales han de aparecer en cúmulos. Con todo, una de las misiones propuestas de la NASA, el Explorador de la Inflación Primordial (PIXIE), proyecta medir con precisión tales distorsiones. Sus resultados deberían imponer fuertes restricciones a los modelos que postulan que la materia oscura consta de agujeros negros primordiales.

Esa idea fue retomada en los años noventa en el contexto de la teoría de la inflación cósmica, una propuesta formulada por Alan Guth a principios de los años ochenta. La inflación hace referencia a una hipotética fase inmediatamente posterior a la gran explosión, durante la cual el espacio se habría expandido de manera descomunal: en 10^{-35} segundos, dos puntos inicialmente separados por una distancia inferior a un radio atómico habrían acabado a cuatro años luz, una escala similar a la que nos separa de las estrellas más cercanas. Además, esa expansión habría amplificado las fluctuaciones cuánticas del universo primitivo hasta hacerlas macroscópicas, lo que habría generado las irregularidades necesarias para que más tarde se formasen las grandes estructuras que hoy pueblan el cosmos. Por extraña que parezca, la teoría de la inflación cósmica se encuentra fuertemente respaldada por la observación de las huellas que tales fluctuaciones de densidad dejaron en el fondo cósmico de microondas.

En 1996, uno de nosotros (García-Bellido), junto con Andrei Linde, de Stanford, y David Wands, de la Universidad de Portsmouth, descubrió que la inflación podía generar picos muy abruptos en el espectro de fluctuaciones de densidad del universo primitivo. Es decir, las fluctuaciones cuánticas, enormemente magnificadas por la inflación, producirían de manera natural regiones muy densas. Estas colapsarían bajo su propia gravedad y, menos de un segundo después del final de la inflación, darían lugar a toda una población de agujeros negros. Esos agujeros negros se comportarían como la materia oscura y dominarían el contenido de materia del universo actual.

Aquel modelo predecía una población de agujeros negros en la que todos ellos tenían la misma masa, determinada a su vez por la cantidad de energía presente en la región que sufría el colapso. Más tarde, muchos otros grupos comenzaron a explorar estas ideas con diferentes modelos de inflación cósmica.

En 2015, los dos autores de este artículo propusimos un escenario similar al de 1996, pero en el que las fluctuaciones primordiales exhibían una distribución más ancha de densidades de energía. Como consecuencia, ello daba lugar a agujeros negros primordiales con todo un abanico de masas: entre 0,01 y 10.000 masas solares. Otro aspecto fundamental de este escenario es que las grandes fluctuaciones de densidad colapsan a muy poca distancia unas de otras, por lo que esos agujeros negros de diferentes masas se generan en cúmulos. Medio millón de años después de la gran explosión, cada uno de esos cúmulos podría albergar millones de agujeros negros primordiales en un volumen de pocos cientos de años luz de diámetro.

Dichos cúmulos serían lo suficientemente densos como para explicar las fusiones observadas por LIGO, que de otro modo ocurrirían con muy poca frecuencia. De vez en cuando, las trayectorias de dos agujeros negros de un mismo cúmulo podrían cruzarse, con lo que ambos objetos quedarían ligados gravitacionalmente. Después, orbitarían en espiral durante algunos millones de años y acabarían fusionándose.

En enero de 2015, antes de que LIGO efectuase su primera detección, predijimos que este experimento observaría las ondas gravitacionales generadas en esas enormes fusiones: ondas idénticas a las que aparecieron más tarde, en septiembre de aquel año. Además, nuestros cálculos para la tasa de fusiones de agujeros negros primordiales en estos cúmulos cuadran a la perfección con los límites establecidos por LIGO. Si este y otros observatorios similares registran muchas más fusiones durante los próximos años, tal vez logremos determinar el intervalo de masas y momentos angulares de todos los agujeros negros progenitores. Un análisis estadístico de este tipo aportaría infor-

mación clave para poner a prueba el posible origen primordial de estos agujeros negros.

Un aspecto fundamental de este escenario es que elude los límites que los experimentos de microlentes habían impuesto sobre los MACHO. Como habíamos mencionado arriba, estos descartaban que la materia oscura estuviese compuesta en su mayor parte por agujeros negros de 10 masas solares o menos. Sin embargo, si los agujeros negros primordiales existen y presentan un espectro de masas amplio, los experimentos de microlentes solo podrían detectar una pequeña parte de ellos: la mayoría permanecerían invisibles. Además, si los agujeros negros primordiales se encuentran agrupados en cúmulos, la probabilidad de que uno de tales cúmulos se halle en la línea de visión de las galaxias satélite cercanas exploradas hasta ahora sería inferior a uno entre mil.

Para evitar este problema, podríamos intentar detectar microlentes en otras partes del cielo, como en las estrellas de la vecina galaxia de Andrómeda o incluso en cúmulos situados en galaxias distantes. Ello nos permitiría examinar una cantidad mucho mayor de halos galácticos en busca de MACHO; es decir, agujeros negros primordiales. Algunas observaciones recientes hacen pensar que, si bien los MACHO de 10 masas solares o menos no pueden dar cuenta de la totalidad de la materia oscura de un halo galáctico típico, aquellos de entre 0,1 y unas pocas masas solares sí podrían constituir alrededor del 20 por ciento de dichos halos. Este valor resulta compatible con nuestro escenario, en el que los agujeros negros primordiales abarcan un amplio espectro de masas.

En resumen, aún es demasiado pronto para descartar que la mayor parte de la materia oscura se componga de agujeros negros primordiales. Es más: la misma propuesta podría ayudar a resolver otros enigmas relacionados con la materia oscura y la formación de galaxias.

MUCHOS PROBLEMAS, UNA SOLUCIÓN

Los cúmulos de agujeros negros primordiales podrían esclarecer otro persistente misterio: la aparente ausencia de galaxias satélite enanas que deberían formarse alrededor de las galaxias masivas, como la Vía Láctea. Las simulaciones que modelizan la distribución cósmica de materia oscura reproducen con precisión la estructura a gran escala del universo. A escalas menores, sin embargo, las mismas simulaciones predicen que alrededor de las galaxias masivas tendría que haber numerosos subhalos de materia oscura, cada uno de los cuales debería albergar una galaxia enana. Como consecuencia, en las inmediaciones de la Vía Láctea tendría que haber cientos de galaxias enanas que, sin embargo, no se observan [véase «Galaxias enanas y materia oscura», por Pavel Kroupa y Marcel Pawłowski; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2011].

Se han propuesto varias soluciones al problema de las galaxias satélite perdidas; en particular, la idea de que las simulaciones no lograrían describir por completo la influencia de la materia ordinaria (el hidrógeno y el helio de las estrellas) en la formación y el comportamiento de las galaxias enanas predichas. Nuestro modelo parece indicar que, si la mayor parte de la materia oscura estuviese formada por cúmulos de agujeros negros primordiales, estos dominarían los subhalos que rodean a la Vía Láctea, por lo que absorberían parte de su materia ordinaria y reducirían la tasa de formación estelar. Por otro lado, incluso si los subhalos formasen estrellas a un ritmo considerable, sería fácil que estas acabaran expulsadas como consecuencia de los encuentros cercanos con los agujeros negros. Ambos efectos

reducirían de manera considerable el brillo de estas galaxias, lo que las haría muy difíciles de detectar sin cámaras de gran campo y extremada sensibilidad. Por fortuna, hoy contamos con tales instrumentos, los cuales nos han permitido descubrir docenas de galaxias enanas ultratenues alrededor de la Vía Láctea. Estos objetos parecen albergar hasta cientos de veces más materia oscura que estrellas, y según nuestro modelo, debería haber miles de ellos en torno a la Vía Láctea.

Las simulaciones también predicen una población de galaxias de un tamaño intermedio entre las enanas y las masivas. Se dice que estas galaxias son «demasiado grandes para desaparecer», ya que tendrían un tamaño suficiente para formar estrellas con facilidad y, por tanto, deberíamos verlas sin problemas. Sin embargo, nadie las ha encontrado en las inmediaciones de la Vía Láctea. Este problema admite una solución similar al anterior: los agujeros negros primordiales masivos situados en los núcleos de estas galaxias de tamaño intermedio podrían expulsar tanto estrellas como gas, lo que las haría invisibles para la mayoría de los experimentos.

Por último, los agujeros negros primordiales podrían también explicar el origen de los agujeros negros supermasivos. Con masas entre millones y miles de millones de veces mayores que la del Sol, estos colosales han sido observados en cúasares lejanos y en el centro de galaxias masivas en el universo temprano. Sin embargo, si se hubiesen formado a partir del colapso de las primeras estrellas del universo, no deberían haber adquirido masas tan descomunales en un tiempo tan corto (menos de mil millones de años desde la gran explosión).

En nuestro modelo, aunque la mayoría de los agujeros negros primordiales tienen la masa de unas decenas de soles, hay una pequeña fracción con masas mucho más elevadas, entre cientos y decenas de miles de veces mayores que la del Sol. Nacidos menos de un segundo después de la gran explosión, estos objetos habrían actuado como semillas para la formación de las primeras galaxias y cúasares, en cuyos centros habrían aparecido agujeros negros supermasivos con rapidez. Las mismas semillas podrían también explicar la existencia de los agujeros negros de masa intermedia (entre mil y un millón de masas solares) que se han observado orbitando alrededor de algunos agujeros negros supermasivos y en los centros de algunos cúmulos globulares [véanse «Agujeros negros de masa intermedia», por Jenny E. Green, y «Los primeros agujeros negros supermasivos», por Priyamvada Natarajan, en este mismo número].

En definitiva, los agujeros negros primordiales podrían constituir el eslabón perdido entre los agujeros negros de masa estelar y los supermasivos. Las pruebas a favor de este escenario están aumentando con rapidez. Por ejemplo, la manera más sencilla de explicar la reciente detección de una cantidad inesperada de fuentes de rayos X en el universo primitivo es mediante un gran número de agujeros negros primordiales (que, al engullir gas, emitirían rayos X) menos de mil millones de años después de la gran explosión.

VER EN LA OSCURIDAD

A pesar de que los agujeros negros primordiales masivos podrían resolver el misterio de la materia oscura y otros enigmas cósmicos, aún son posibles otras explicaciones. Los futuros experimentos deberían permitirnos discriminar entre las alternativas. En los próximos años, varias observaciones podrían poner a prueba el escenario basado en agujeros negros primordiales. Estas incluyen observar galaxias enanas ultratenues; detectar la posible influencia de los agujeros negros primordiales masivos

en las posiciones de las estrellas de la Vía Láctea; estudiar la distribución del hidrógeno neutro durante la primera época de formación estelar, y medir las distorsiones en el fondo cósmico de microondas.

Más allá de estos experimentos, desde 2015 disponemos de una herramienta completamente nueva para desentrañar los misterios del universo: los detectores de ondas gravitacionales. Si es cierto que las observaciones de LIGO corresponden a la fusión de agujeros negros primordiales masivos, deberíamos avistar muchas más en los años venideros. En 2016, los científicos de LIGO anunciaron una segunda detección de ondas gravitacionales, emitidas durante la fusión de dos agujeros negros de 14 y 8 masas solares, así como indicios preliminares de otra colisión entre agujeros negros de 23 y 13 masas solares. En junio de 2017 se anunció un tercer suceso, correspondiente a la fusión de dos agujeros negros de 19 y 32 masas solares. Y en el momento de concluir este artículo, la colaboración refería indicios de otros siete eventos. Estos resultados parecen indicar que los sistemas binarios de agujeros negros son mucho más abundantes de lo que esperábamos y que las masas de estos objetos pueden abarcar un amplio abanico de valores, en consonancia con nuestra propuesta de agujeros negros primordiales.

En conjunto, estos nuevos experimentos y observaciones podrían confirmar la existencia de agujeros negros primordiales y su posible relación con la materia invisible del universo. Puede que pronto la materia oscura deje de estar sumida en la oscuridad. 📖

Artículo publicado en Investigación y Ciencia, septiembre de 2017

Este artículo fue galardonado en 2017 con el VIII Premio de Divulgación del Centro Nacional de Partículas y Astropartículas (CPAN).

LOS AUTORES

Juan García-Bellido es físico teórico del Instituto de Física Teórica, un centro mixto de la Universidad Autónoma de Madrid y el CSIC. Sus investigaciones se centran en la cosmología inflacionaria, la energía oscura, los agujeros negros y la gravedad cuántica. **Sébastien Clesse** es miembro del Instituto de Investigación Matemática y Física de la Universidad de Lovaina y del Instituto de Sistemas Complejos de la Universidad de Namur, en Bélgica. Su trabajo abarca la inflación cósmica, las teorías de gravedad modificada y los agujeros negros primordiales.

PARA SABER MÁS

Density perturbations and black hole formation in hybrid inflation. Juan García-Bellido, Andrei Linde y David Wands en *Physical Review D*, vol. 54, n.º 10, págs. 6040-6058, noviembre de 1996.

Massive primordial black holes from hybrid inflation as dark matter and the seeds of galaxies. Sébastien Clesse y Juan García-Bellido en *Physical Review D*, vol. 92, n.º 2, art. 023524, julio de 2015.

Did LIGO detect dark matter? Simeon Bird et al. en *Physical Review Letters*, vol. 116, n.º 20, art. 201301, mayo de 2016.

LIGO gravitational wave detection, primordial black holes, and the near-IR cosmic infrared background anisotropies. A. Kashlinsky en *Astrophysical Journal Letters*, vol. 823, n.º 2, art. L25, junio de 2016.

The clustering of massive primordial black holes as dark matter: Measuring their mass distribution with advanced LIGO. Sébastien Clesse y Juan García-Bellido en *Physics of the Dark Universe*, vol. 15, págs. 142-147, marzo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Materia oscura compleja. Bogdan A. Dobrescu y Don Lincoln en *IyC*, septiembre de 2015.

La observación de ondas gravitacionales con LIGO. Alicia Sintés y Borja Sorazu en *IyC*, febrero de 2017.

¿Es real la materia oscura? Sabine Hossenfelder y Stacy S. McGaugh en *IyC*, octubre de 2018.

SciLogs



www.scilogs.es  

La mayor red de blogs de investigadores científicos



En perspectiva

Del mundo subatómico al cosmos

Cristina Manuel Hidalgo
Instituto de Ciencias del Espacio



Power-ups

La conexión entre los juegos y el aprendizaje

Ruth S. Contreras Espinosa
Universidad Politécnica de Cataluña



El rincón de Pasteur

El mundo invisible de los microorganismos

Ignacio López Goñi
Universidad de Navarra



Perspectiva de Física y Universidad

Política científica, gran ciencia y mundo académico

Ramón Pascual de Sans
Universidad Autónoma de Barcelona



La bitácora del Beagle

Avances en neurobiología

Julio Rodríguez
Universidad de Santiago de Compostela



Cuantos completos

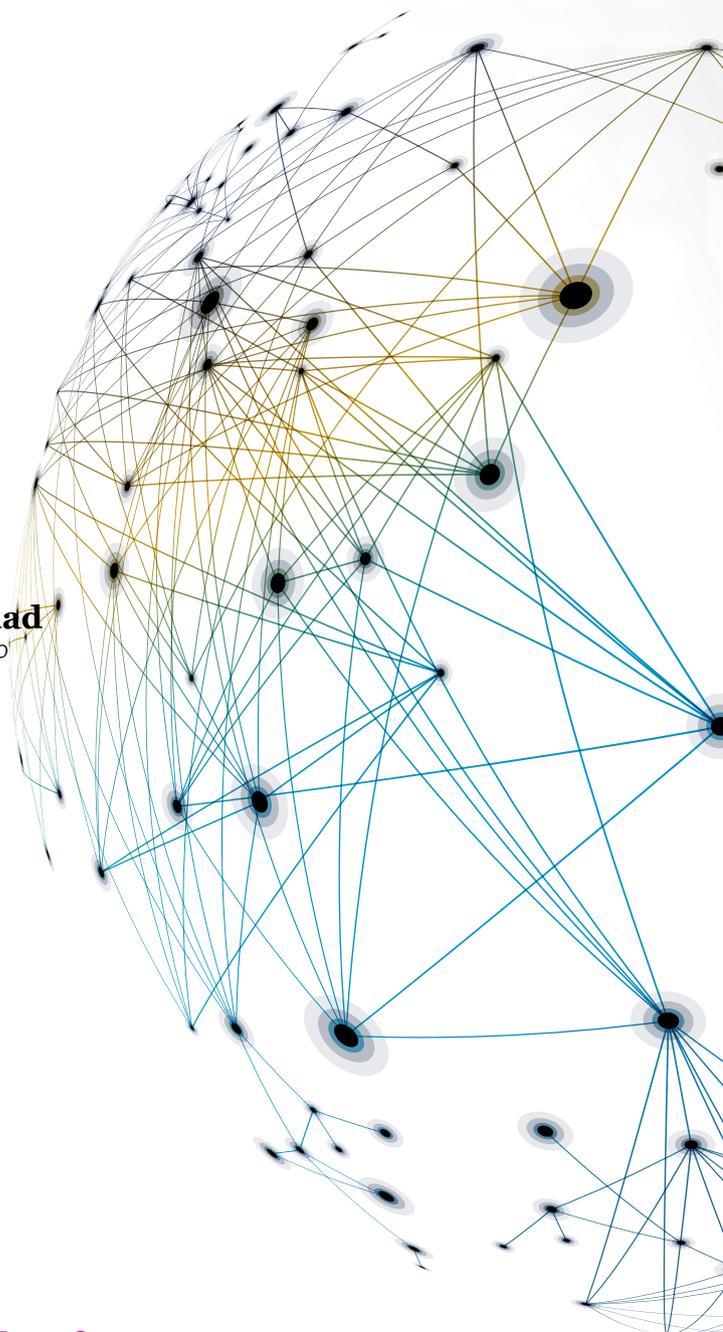
Tecnologías cuánticas y mucho más

Carlos Sabín
Instituto de Física Fundamental del CSIC

Y muchos más...

¿Eres investigador y te gustaría unirte a SciLogs?

Envía tu propuesta a redaccion@investigacionyciencia.es



AGUJEROS NEGROS ASTROFÍSICOS

ECOS DESDE EL HORIZONTE

La astronomía de ondas gravitacionales podrá responder pronto a una pregunta fundamental: ¿son los agujeros negros el tipo de objetos que predice la relatividad general?

Pablo Bueno y Pablo A. Cano



COLISIÓN CÓSMICA: Recreación artística de dos agujeros de gusano momentos antes de colisionar.

Aunque hipotéticos, el análisis de las ondas gravitacionales que generaría el choque y posterior fusión de este tipo de objetos está allanando el camino para sondear experimentalmente la existencia de objetos compactos alternativos a los agujeros negros.



S POSIBLE QUE LA PRIMERA DESCRIPCIÓN DE UN AGUJERO NEGRO SE DEBA al geólogo inglés John Michell, quien en 1783 imaginó una «estrella oscura» tan masiva y compacta que ni siquiera la luz podría escapar de su campo gravitatorio. Aunque esta versión primitiva de un agujero negro se basaba en un entendimiento incompleto de la gravedad y de la luz, con el paso del tiempo la intuición de Michell acabaría demostrándose correcta.

Casi un siglo y medio después, en 1915, Albert Einstein propuso la teoría de la relatividad general, la cual explicaba la gravedad como una manifestación de la curvatura del espaciotiempo. Y tan solo unos meses más tarde, en 1916, Karl Schwarzschild, mientras combatía en el frente de la Primera Guerra Mundial, resolvió las ecuaciones de Einstein y encontró la primera solución que describía el campo gravitatorio de un agujero negro tal y como lo entendemos hoy. Sin embargo, no fue hasta los años sesenta cuando los trabajos de Roger Penrose, Stephen Hawking y John Wheeler, entre otros, esclarecieron la verdadera naturaleza de la solución de Schwarzschild. Desde entonces, la posible existencia y las extrañas propiedades de los agujeros negros han fascinado y traído de cabeza a generaciones de físicos, al tiempo que han alcanzado un estatus casi místico en la cultura popular.

En las últimas décadas hemos acumulado importantes indicios experimentales que parecen confirmar la existencia de los agujeros negros. Hasta ahora, sin embargo, tales indicios han sido indirectos, ya que no se basaban en observaciones del agujero negro en sí, sino de su entorno más cercano. Al respecto cabe destacar las impresionantes imágenes de la «sombra» de un agujero negro supermasivo publicadas el pasado mes de abril por la colaboración Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT, por sus siglas en inglés). No obstante, y a pesar de lo espectacular de este resultado, tales observaciones no cuentan con la resolución suficiente para estudiar con detalle el elemento que realmente define a un agujero negro: su horizonte

de sucesos, la frontera más allá de la cual nada, ni siquiera la luz, puede escapar.

Esa situación está a punto cambiar. Ello es posible gracias al nacimiento de una nueva era en la física experimental: la de la astronomía de ondas gravitacionales. Estas ondas son perturbaciones en la geometría del espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Se producen en enormes cantidades en grandes cataclismos astrofísicos, como las explosiones de supernova o las colisiones de objetos de gran masa. Aunque constituyen una de las predicciones clave de la teoría de la relatividad general, su detección experimental tardó un siglo en llegar. La primera observación directa de ondas gravitacionales tuvo lugar en 2015 en el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO, por sus siglas en inglés), en Estados Unidos. Según todos los análisis, las ondas detectadas entonces fueron generadas durante el choque y posterior fusión de dos agujeros negros de masa estelar en una galaxia distante. Desde 2015 hasta ahora, aquel descubrimiento se ha visto complementado por más de una decena de observaciones similares, a las que además se han sumado los resultados del experimento gemelo Virgo, en Italia.

¿Por qué hablamos de una «nueva era» en astronomía? En cierto sentido, la mejor manera que tenemos los físicos de explorar las leyes fundamentales de la naturaleza consiste en hacer chocar objetos a energías muy elevadas y analizar qué ocurre. Así sucede en los aceleradores de partículas, como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, donde se hacen colisionar

EN SÍNTESIS

Desde 2015, los experimentos LIGO, en Estados Unidos, y Virgo, en Italia, han venido detectando las ondas gravitacionales procedentes de lo que parecen ser colisiones de agujeros negros en galaxias distantes.

Sin embargo, varios estudios recientes han argumentado que dichas señales podrían provenir de objetos muy distintos de los agujeros negros. Las posibles diferencias aparecerían en forma de ciertos «ecos» en la parte final de las ondas detectadas.

Tales astros podrían ser estrellas de bosones, estrellas de gravedad o agujeros de gusano, entre otras alternativas. De confirmarse, el descubrimiento supondría una revolución de dimensiones copernicanas en la comprensión de la gravedad.



DOS CIENTÍFICOS trabajan en las mejoras técnicas de unos de los detectores del Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO) en agosto de 2017. En los últimos años, varios autores han argumentado que las señales captadas por este tipo de experimentos deberían poder usarse para poner a prueba la existencia de horizontes de sucesos, el elemento característico de los agujeros negros.

protones a velocidades muy próximas a la de la luz. Al estudiar las propiedades de las partículas y la radiación emitidas en esos choques, podemos poner a prueba las leyes que describen los constituyentes elementales de la materia. Algo muy parecido sucede con las colisiones de agujeros negros. Por supuesto, tales cataclismos no se producen en laboratorios terrestres, pero sí ocurren de forma natural a lo largo y ancho del universo. Y, al igual que en los aceleradores de partículas, la posibilidad de analizar la radiación gravitatoria procedente de esos choques nos permite estudiar con detalle las propiedades de los objetos que colisionaron.

De hecho, la primera pregunta que deberíamos plantearnos es: ¿se trata realmente de agujeros negros? Desde hace tiempo, diversos trabajos teóricos han sugerido que los astros que habitualmente consideramos agujeros negros podrían ser objetos mucho más exóticos. Estos generarían un campo gravitatorio externo muy similar al de los agujeros negros, pero, al ser examinados más de cerca, revelarían diferencias notables. ¿Pueden las observaciones de los experimentos LIGO y Virgo distinguir entre las distintas posibilidades?

En los últimos tres años, varios investigadores hemos argumentado que la respuesta a dicha pregunta podría ser afirmativa.

Aunque los datos experimentales no son aún concluyentes, todo indica que la cuestión podrá zanjarse durante los próximos años. Por primera vez en la historia, nos hallamos en condiciones de responder experimentalmente a una cuestión clave que hasta ahora se hallaba restringida a la pura especulación teórica. En caso de que se demostrase que las ondas gravitacionales observadas por LIGO y Virgo no proceden de agujeros negros, sino de astros de otro tipo, el descubrimiento supondría una revolución de primer orden en nuestra comprensión de la gravedad y de las leyes físicas.

¿NUEVA FÍSICA EN EL HORIZONTE?

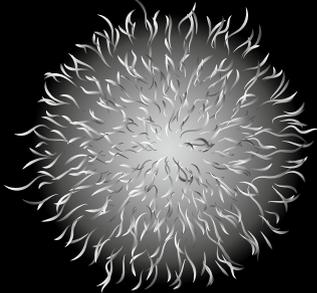
Para poder afrontar la pregunta sobre la verdadera naturaleza de los objetos observados por los experimentos LIGO y Virgo, lo primero que hemos de hacer es calcular en qué se diferenciarían las ondas gravitacionales producidas por agujeros negros genuinos y aquellas generadas por astros exóticos de otra clase. La característica principal de un agujero negro es la existencia de un horizonte de sucesos, la superficie que no permite que ninguna señal escape al exterior. Así pues, la cuestión de si existen o no los agujeros negros resulta equivalente a la pregunta de si existen o no los horizontes de sucesos.

Alternativas a los agujeros negros

Los agujeros negros constituyen una de las soluciones más sencillas de las ecuaciones de la gravedad de Einstein. Aunque la mayoría de los investigadores creen en su existencia, sus propiedades parecen ser incompatibles con las de la mecánica cuántica, por lo que a lo largo de los años se han propuesto varias

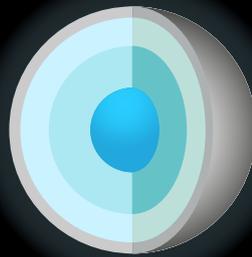
alternativas. Estas describen objetos que, aunque desde el exterior serían muy similares a un agujero negro, carecerían de un horizonte de sucesos, la superficie más allá de la cual nada puede escapar. A continuación se resumen algunas de las opciones más representativas.

«Bolas de pelusa»



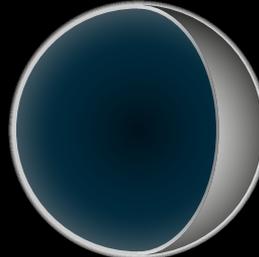
Se trata de un tipo de objeto predicho por la teoría de cuerdas. Su campo gravitatorio externo sería muy similar al de un agujero negro, pero al acercarnos a lo que sería el horizonte se abriría una quinta dimensión. En ese espacio habitarían las cuerdas, razón por la que en inglés reciben el nombre de *fuzzballs*, que puede traducirse como «bolas de pelusa» o simplemente «pelusos».

Estrellas de bosones



Estos hipotéticos astros serían parientes cercanos de las estrellas de neutrones. Si estas últimas se sustentan gracias a la presión ejercida por los neutrones de su interior, en el caso de una estrella de bosones sería la presión de otro tipo de partículas (de carácter bosónico, como el bosón de Higgs) lo que impediría el colapso gravitatorio del objeto.

Estrellas de gravedad



Este tipo de astros tendrían una región exterior y una interior en las que la gravedad se comportaría de manera muy diferente. En la zona externa la gravedad exhibiría las propiedades habituales. En la interna, sin embargo, la propia gravedad generaría una presión negativa (un comportamiento similar al de la energía oscura) que evitaría la formación de un horizonte de sucesos.

Agujeros de gusano



En lugar de un horizonte, estos objetos presentarían un «túnel» que conectaría dos partes alejadas del universo o incluso dos universos distintos. Muy populares en la ciencia ficción, su existencia sigue siendo especulativa. Según varias consideraciones teóricas, para que pudieran formarse haría falta un tipo de materia con propiedades exóticas cuya existencia resulta controvertida.

En 2016, pocos meses después de que se anunciara la primera detección de una onda gravitacional, un trabajo firmado por Vítor Cardoso, del Instituto Superior Técnico de Lisboa, y otros investigadores señaló que los resultados de LIGO podrían usarse para poner a prueba la existencia de horizontes de sucesos. La idea básica consiste en buscar ciertos «ecos» en la señal detectada: un patrón característico que aparecería en la parte final de la onda.

Las ondas gravitacionales registradas por LIGO y Virgo proceden de las colisiones entre astros decenas de veces más masivos que el Sol. Tras chocar, los dos objetos se fusionan en uno. La última parte de la señal detectada corresponde a las vibraciones del nuevo astro que se ha formado tras la colisión. Si este es un agujero negro, la señal debería extinguirse por completo poco después; en cierto sentido, podemos decir que el horizonte «se traga» el resto de las vibraciones. Sin embargo, si el supuesto horizonte exhibiese algún tipo de estructura, al cabo de cierto tiempo recibiríamos un primer «eco» de la señal inicial. Tales ecos se repetirían a intervalos más o menos regulares y su intensidad iría disminuyendo poco a poco. Así pues, la presencia de ecos en las señales detectadas por LIGO y Virgo supondría una prueba casi definitiva de que los astros que pensábamos que

eran agujeros negros corresponden, en realidad, a otra clase de objetos compactos sin horizonte.

La pregunta sobre la existencia de horizontes de sucesos es totalmente legítima desde un punto de vista científico, pues, como vemos, resulta posible ponerla a prueba mediante el experimento. Pero ¿hay realmente motivos para pensar que los horizontes —y, por tanto, los agujeros negros— tal vez no existan? Como mencionábamos al principio, los agujeros negros aparecen de forma natural como soluciones de la teoría de la relatividad general. En cambio, otro tipo de objetos compactos son más bien especulaciones teóricas. ¿Por qué darles crédito en detrimento de los agujeros negros?

La respuesta es que la teoría de la relatividad general resulta incompatible con la mecánica cuántica. En concreto, la existencia de horizontes de sucesos plantea serios problemas debido a lo que se conoce como «paradoja de la información», un enigma que se remonta a las investigaciones de Stephen Hawking en los años setenta y que viene ocupando a los físicos teóricos desde entonces. En términos muy simplificados, el origen de la paradoja es el siguiente. Un postulado elemental de la mecánica cuántica afirma que la información de un sistema físico siempre se conserva. Sin embargo, la presencia de un

horizonte de sucesos parece violar dicho principio, ya que la información asociada a un objeto que cayese en el interior de un agujero negro se perdería para siempre.

Lo anterior ha llevado a algunos investigadores a conjeturar que los efectos cuánticos de la gravedad podrían impedir la formación de horizontes de sucesos. Como consecuencia, el astro resultante de un proceso de colapso gravitatorio no sería un agujero negro, sino un objeto sin horizonte que, como tal, evitaría la pérdida de información. Entre las posibles alternativas a los agujeros negros se han propuesto las «bolas de pelusa» (*fuzzballs*, cierto tipo de objetos predichos por la teoría de cuerdas), las estrellas de bosones (astros parecidos a las estrellas de neutrones pero sustentados por partículas similares al bosón de Higgs), las estrellas de gravedad (*gravastars*, en cuyo interior la propia gravedad generaría una presión negativa que evitaría la formación de un horizonte) o los más populares agujeros de gusano («atajos» espaciotemporales que comunicarían dos regiones distantes del universo). En los últimos años, el problema de reconciliar la mecánica cuántica con la física de los agujeros negros ha llevado a postular incluso otras modificaciones del horizonte de sucesos, como los denominados «muros de fuego», una región de alta energía que rodearía al astro [véase «Agujeros negros y muros de fuego», por Joseph Polchinski; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2015].

Hemos de advertir de que tales propuestas son radicales y muy especulativas. No obstante, el hecho de que podamos ponerlas a prueba por medio del experimento las hace dignas de consideración. Dado que nadie sabe qué tipo de objeto sin horizonte podría sustituir a un agujero negro, las investigaciones al respecto han considerado distintos modelos sencillos de estos astros hipotéticos.

ECOS DESDE LA GARGANTA

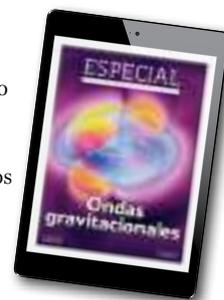
Todos los objetos alternativos que hemos mencionado producirían ecos gravitacionales. El problema radica en que, aunque tales ecos estén presentes en las señales detectadas por LIGO y Virgo, estas vienen siempre acompañadas por una gran cantidad de ruido de fondo, lo que enmascara el patrón que buscamos. Para identificarlo, hemos de determinar primero qué forma tendrá dicho patrón. Así pues, el primer paso consiste en caracterizar el tipo de ecos gravitacionales que generarían los diferentes objetos exóticos sin horizonte.

El trabajo original de Cardoso y sus colaboradores proponía varios modelos sencillos de objetos con simetría esférica. Desde entonces, se ha producido un gran avance en la caracterización de los ecos generados por astros de este tipo. En 2017, un estudio de Zachary Mark, del Instituto de Tecnología de California, y

Algunos autores afirman
que un tratamiento
estadístico apropiado
de las señales de LIGO
y Virgo ya revela
la existencia de ecos

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Ondas gravitacionales*, nuestro monográfico digital (en PDF) sobre la búsqueda científica y técnica de uno de los fenómenos más esquivos predichos por la teoría de la relatividad general de Albert Einstein.



www.investigacionyciencia.es/revistas/especial

otros autores presentó un método genérico para calcular los ecos emitidos por cualquier objeto con simetría esférica. No obstante, esta suposición adolece de un inconveniente: la simetría esférica implica que el objeto en cuestión no puede rotar sobre sí mismo (ya que toda rotación tiene lugar en torno a un eje determinado, lo que rompe dicha simetría). Sin embargo, sabemos que cuando dos astros chocan y se fusionan, la colisión ocurre tras una fase en la que ambos orbitan rápidamente en espiral en torno al centro de masas común. Como consecuencia, el objeto resultante se halla siempre en rápida rotación.

Para superar tales dificultades, en un trabajo publicado en 2018 junto con Frederik Goelen, Thomas Hertog y Bert Verhocke, de la Universidad Católica de Lovaina, consideramos el efecto que tendría la rotación en la forma de los ecos. Para ello nos centramos en el caso de los agujeros de gusano. En lugar de un horizonte de sucesos, estos objetos tendrían lo que los físicos denominan una «garganta»: una especie de túnel que conecta dos regiones distantes del universo. Aunque hipotéticos, los agujeros de gusano presentan una ventaja. No es necesario hacer ninguna suposición sobre su estructura interna, ya que lo que debería ser su «interior» es en realidad una zona exterior similar a la que conecta con la garganta. En concreto, nuestro trabajo consideró una clase de agujeros de gusano en rotación que, para un observador externo, serían muy parecidos a un agujero negro.

Para caracterizar los ecos generados por estos agujeros de gusano, calculamos sus modos cuasinormales, el equivalente a las «notas principales» que produce un sistema disipativo (uno que pierde energía con el tiempo). Cada uno de esos modos viene caracterizado por una frecuencia (el «tono» de la nota) y por el tiempo característico que esta tarda en extinguirse. Como analogía, consideremos que le damos un martillazo a una campana. Esta comenzará a vibrar y emitirá un sonido que, poco a poco, se irá desvaneciendo. Si conocemos todos los modos cuasinormales de la campana, podremos deducir el sonido que emitirá al golpearla. De igual modo, si sabemos cuáles son los modos cuasinormales de un agujero de gusano (o de cualquier otro tipo de objeto compacto), podremos determinar la forma de las ondas gravitacionales que generará.

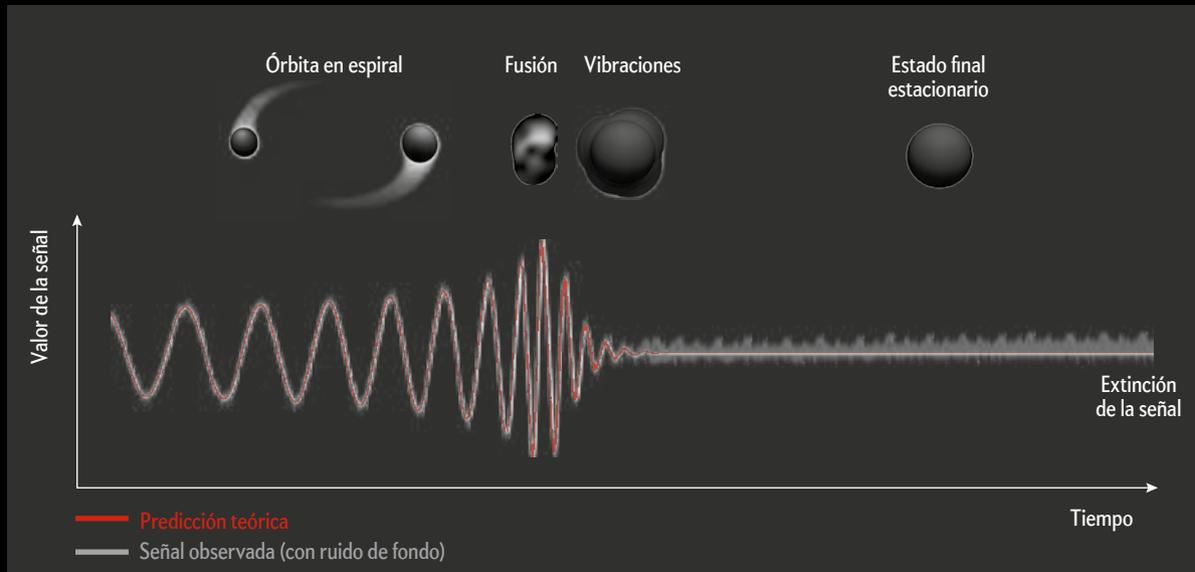
Nuestro trabajo halló que las frecuencias cuasinormales de los agujeros de gusano son muy distintas de las de un agujero negro. Sin embargo, los modos que más se excitan en los ecos son aquellos más cercanos al modo fundamental (el más relevante) del agujero negro. Esto último constituye una predicción concreta que podría ponerse a prueba experimentalmente y usarse como guía para caracterizar las señales. De hecho, esta propiedad nos permite establecer un algoritmo sencillo para modelizar la forma que tendrían los ecos gravitacionales. Aunque nuestro análisis se centra en el caso de los agujeros de gusano, la cons-

Cómo desenmascarar a un impostor

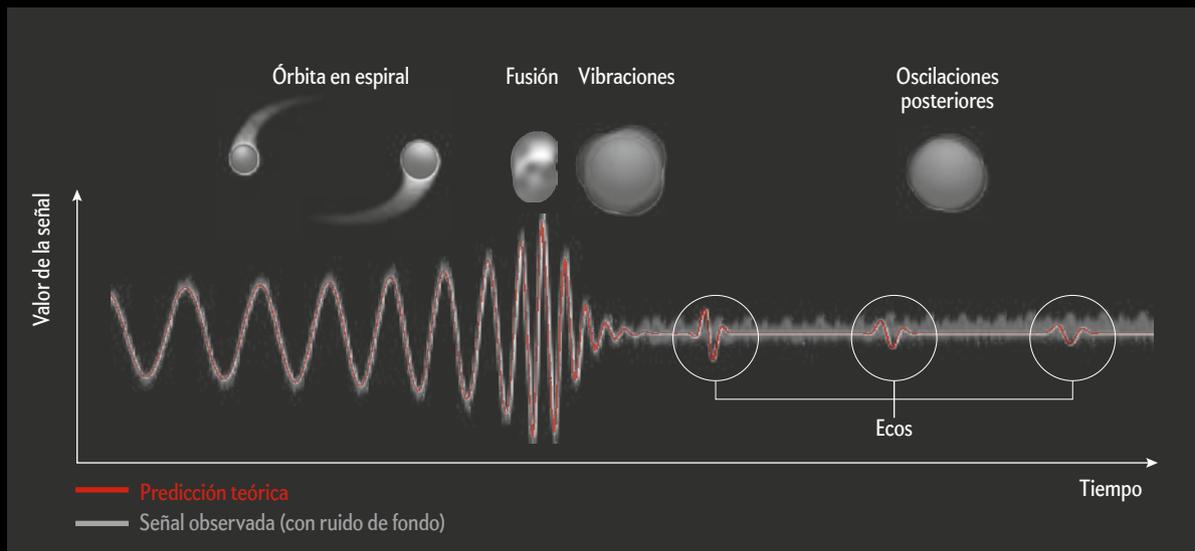
Las ondas gravitacionales procedentes de las colisiones de objetos compactos presentan tres regímenes diferenciados, cada uno de pocas fracciones de segundo de duración. El primero corresponde a la situación previa al choque, en la que ambos astros orbitan rápidamente en espiral en torno al centro de masas común. El segundo refleja la fusión de ambos objetos en uno solo, mientras que el último procede de las vibraciones del nuevo astro que se ha formado tras la colisión.

Si el objeto resultante fuese un agujero negro, la señal debería extinguirse por completo justo después, ya que el horizonte de sucesos «engulliría» todas las oscilaciones posteriores (*arriba*). Sin embargo, si el supuesto horizonte exhibiese algún tipo de estructura, al cabo de cierto tiempo comenzarían a observarse «ecos» atenuados de la señal inicial (*abajo*). Su detección supondría una prueba casi definitiva de que el objeto final no es un agujero negro.

Agujeros negros



Objetos compactos de otro tipo



¿Qué dicen los datos?

Varios estudios recientes han apuntado que los resultados obtenidos hasta ahora por los experimentos LIGO y Virgo serían compatibles con la existencia de ecos. Por el momento, la presencia de ruido de fondo impide distinguir entre ambas posibilidades, pero los datos futuros deberían permitir zanjar la cuestión.

Por primera vez, nos hallamos ante las puertas de responder empíricamente a una de las preguntas más fundamentales sobre la naturaleza de la gravedad

trucción puede extenderse a cualquier tipo de objeto exótico suficientemente compacto.

Al mismo tiempo, nuestro estudio considera por primera vez los efectos de la rotación en la señal. Estos son fundamentalmente dos: el «desdoblamiento» de las frecuencias características y la aparición de modos inestables. El primer fenómeno es similar al efecto Zeeman de la física atómica (la separación de las líneas espectrales de un átomo en presencia de un campo magnético). Quiere decir que, en ausencia de rotación, hay modos de vibración distintos que, por coincidencia, tienen la misma frecuencia. Sin embargo, cuando el objeto rota, esa coincidencia desaparece y las frecuencias se separan, lo que produciría efectos observables. Por su parte, la aparición de modos inestables implica que hay modos de vibración cuya magnitud crece con el tiempo en lugar de desvanecerse. No obstante, según nuestro cálculo, tales modos serían inobservables en la práctica.

SEÑAL Y RUIDO

Una limitación de nuestro estudio es que no proporciona la forma exacta de la onda gravitacional, sino la de otro tipo de onda conocida como «perturbación escalar», correspondiente al comportamiento de una partícula de prueba en el espaciotiempo que estamos considerando. Ello se debe a que calcular la forma precisa de las ondas gravitacionales generadas por objetos en rotación que no son agujeros negros constituye un problema de enorme complejidad que aún no está resuelto, por lo que este ha sido el enfoque adoptado hasta ahora por la mayoría de los investigadores. La idea es que las propiedades cualitativas de la señal que estamos analizando deberían quedar plasmadas en dicha aproximación. Con todo, esta dificultad deberá ser abordada si queremos deducir exactamente el patrón que veremos en los detectores.

Otra posibilidad consiste en ser agnóstico sobre el objeto que genera los ecos y tratar de describirlos de forma sistemática, como en 2018 hicieron Qingwen Wang y Niayesh Afshordi, del Instituto Perimeter de Física Teórica, en Waterloo. Aunque este método es más sencillo y práctico, también nos proporciona menos información, pues significa que, aunque detectemos los ecos, no sabremos con precisión a qué tipo de objeto corresponden.

Es importante señalar que la mayoría de alternativas propuestas a los agujeros negros, incluidos los agujeros de gusano, presentan algún tipo de dificultad. Entre ellas, la ausencia de modelos dinámicos que nos digan cómo se forman; la necesidad de incluir materia con propiedades exóticas para explicar su existencia; o problemas de estabilidad de la solución. Todo ello hace que la impresión mayoritaria entre la comunidad científica sea que la existencia de ecos resulta muy improbable. A

pesar de que los agujeros negros también representan desafíos teóricos importantes, sobre todo en situaciones en las que la mecánica cuántica desempeña un papel relevante, la mayoría de los expertos esperan que las señales detectadas por LIGO y Virgo sean plenamente compatibles con ellos. Sin embargo, la posibilidad de poner a prueba esta hipótesis hace imperativo considerar modelos alternativos.

Sorprendentemente, algunos autores, como Afshordi y sus colaboradores, aseguran que los ecos ya han sido detectados. Afirman que un tratamiento estadístico apropiado de las señales registradas por LIGO y Virgo revela que dichos ecos aparecen en todos los eventos observados hasta ahora. Otros investigadores, incluidos algunos de la propia colaboración LIGO, han planteado dudas sobre semejante conclusión, aunque hasta ahora no han podido refutarla de manera definitiva. En este sentido, es importante subrayar que LIGO y Virgo emplean complejísimo dispositivos y procedimientos para eliminar el ruido de fondo que empaña las señales, por lo que determinar si los presuntos ecos han sido detectados ya o no constituye una tarea extremadamente complicada.

En todo caso, en lo que sí parece haber consenso es en que la existencia de ecos podrá confirmarse o refutarse de forma casi definitiva en los próximos años. Ello será posible toda vez que LIGO y Virgo hayan acumulado más datos, mejoren la precisión de sus dispositivos y una nueva generación de detectores entre en funcionamiento. Por primera vez, nos hallamos ante las puertas de responder empíricamente a una de las preguntas más fundamentales sobre la naturaleza de la gravedad. Una respuesta contraria a las expectativas supondría una revolución de dimensiones copernicanas. ■

Artículo publicado en *Investigación y Ciencia*, junio de 2019

EL AUTOR

Pablo Bueno es físico teórico del Instituto Balseiro, en el Centro Atómico Bariloche. Sus investigaciones se centran en la física de los agujeros negros, gravedad e información cuánticas. **Pablo A. Cano** investiga en el Instituto de Física Teórica de Madrid, un centro mixto de la Universidad Autónoma de Madrid y el CSIC. Trabaja en física de agujeros negros y gravedad cuántica.

PARA SABER MÁS

Gravitational-wave signatures of exotic compact objects and of quantum corrections at the horizon scale. Vitor Cardoso et al. en *Physical Review D*, vol. 94, art. 084031, octubre de 2016.

A recipe for echoes from exotic compact objects. Zachary Mark et al. en *Physical Review D*, vol. 96, art. 084002, octubre de 2017.

Echoes from the abyss: Tentative evidence for Planck-scale structure at black hole horizons. Jahed Abedi, Hannah Dykaar y Niayesh Afshordi en *Physical Review D*, vol. 96, art. 082004, octubre de 2017.

Echoes of Kerr-like wormholes. Pablo Bueno, Pablo Cano et al. en *Physical Review D*, vol. 97, art. 024040, enero de 2018.

Black hole echology: The observer's manual. Qingwen Wang y Niayesh Afshordi en *Physical Review D*, vol. 97, art. 124044, junio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

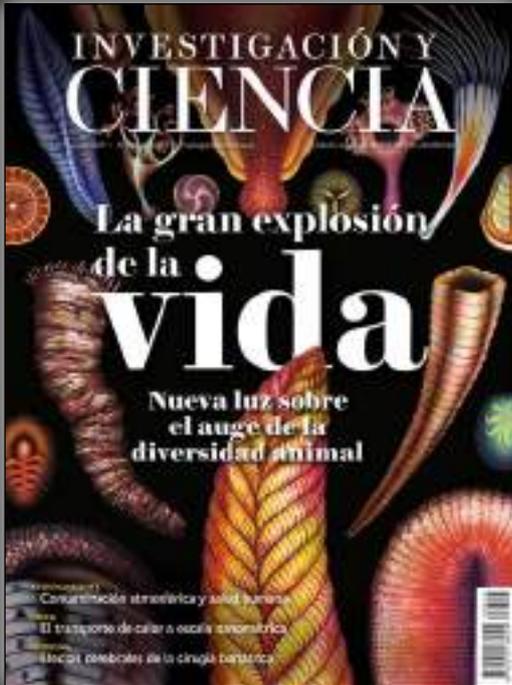
Singularidades desnudas. Pankaj S. Joshi en *lyC*, abril de 2009.

La prueba del agujero negro. Dimitrios Psaltis y Sheperd S. Doeleman en *lyC*, noviembre de 2015.

La observación de ondas gravitacionales con LIGO. Alicia M. Sintes y Borja Sorazu en *lyC*, febrero de 2017.

Las teorías de la gravedad tras la tormenta cósmica. Miguel Zumalacárregui Pérez en *lyC*, junio de 2018.

NUESTRAS PUBLICACIONES



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Desde 1976, divulga el desarrollo de la ciencia y la técnica con la colaboración de los mejores expertos internacionales

Revista mensual

Formatos: papel y digital



MENTE Y CEREBRO

Desde 2002, divulga los avances más sólidos en el dominio de la psicología y las neurociencias

Revista bimestral

Formatos: papel y digital

Consulta promociones, suscripciones,
packs y otros productos en

investigacionyciencia.es/catalogo

MONOGRÁFICOS



TEMAS de IyC

Monografías sobre los temas clave que guían el desarrollo de la ciencia

Revista trimestral

Formatos: papel y digital

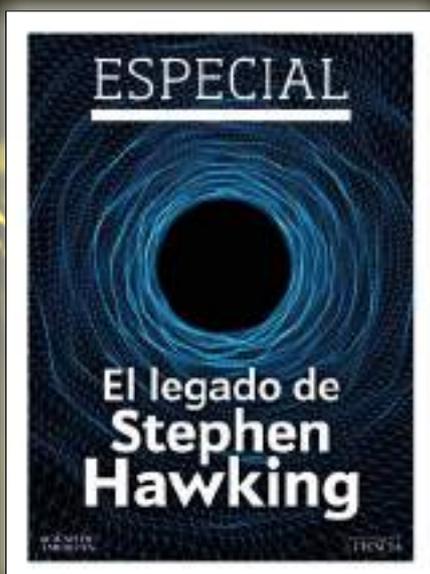


CUADERNOS de MyC

Monografías sobre los grandes temas de la psicología y las neurociencias

Revista cuatrimestral

Formatos: papel y digital



ESPECIAL

Recopilaciones de nuestros mejores artículos (en PDF) sobre temas de actualidad

Formato: digital



N.º 98
en tu
quiosco



www.menteycerebro.es
administracion@investigacionyciencia.es


Prensa Científica, S.A.