

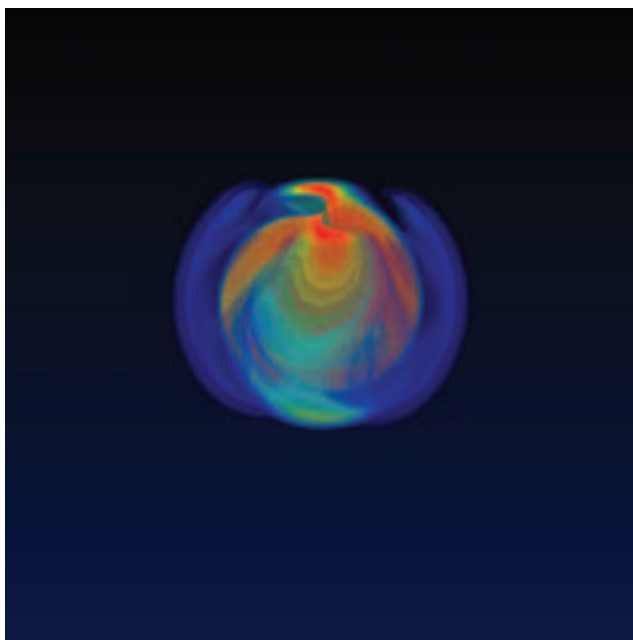
La detección de las ondas gravitatorias

Una red global de detectores medirá pronto, quizá, las débiles ondas del propio espaciotiempo. Entonces, una nueva era de la investigación astrofísica habrá empezado

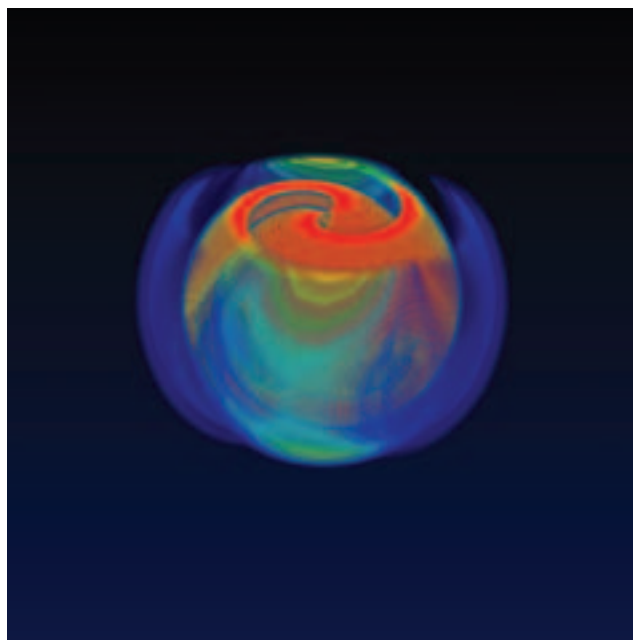
Peter S. Shawhan

En algún lugar, dos agujeros negros podrían estar chocando en este preciso momento. Sus potentes campos gravitatorios se entrelazarían en una espiral de muerte, que los arrastraría a fundirse en uno. Por ser agujeros negros, no emitirían delatadoras ráfagas de rayos X, ni tan siquiera un destello de luz, nada que pudiesen ver los potentes telescopios de hoy en día. Pero la energía liberada en este violento suceso se radiaría por el cosmos en forma de ondulaciones en la geometría del espacio y del tiempo.

Cada vez son más los investigadores que esperan detectar, por fin, los débiles ecos gravitatorios que, según se cree, llegan a la Tierra desde cataclismos astrofísicos como éste. Las señales serán tan pequeñas, que los aparatos que las detecten habrán de registrar cambios de longitud mucho menores que un núcleo atómico. Es técnicamente posible. Aunque deben superarse dificultades sustanciales para alcanzar las precisiones necesarias, los próximos años verán la aparición de una red global de instrumentos capaces de medir la radiación gravitacional que ahora se pierde sin haber sido observada.



1. LOS OBJETOS DE MASA GRANDE EN MOVIMIENTO crean ondas en el espaciotiempo, a las que se denomina ondas gravitatorias. Aunque la manifestación directa de tales ondas aún se ha



de detectar, una simulación numérica, realizada por miembros del Proyecto Lazarus, muestra de qué modo se perturba la estructura del espaciotiempo, en el caso que se ve aquí por un par de

ELKE MUELLER, INSTITUTO DE FÍSICA GRAVITACIONAL MAX PLANCK (simulación numérica); W. BENDER, INSTITUTO ZUSE DE BERLÍN
E INST. DE FÍSICA GRAVITACIONAL MAX PLANCK (visualización)/American Scientist

Así se curva el espacio

A fin de entender el origen de la radiación gravitacional y qué tipo de aparato físico se necesita para detectarla, se requiere por lo menos un conocimiento rudimentario de la teoría general de la relatividad de Einstein. Esta teoría establece que el tiempo es una magnitud similar a las tres dimensiones del espacio y que la combinación de estas cuatro dimensiones en un “espaciotiempo” se puede describir con el lenguaje de la geometría.

La historia completa de la posición de un objeto en función del tiempo se representa con una “línea de universo”, que atraviesa el sistema coordinado cuatridimensional desde el pasado hasta el presente y el futuro. Si sobre el objeto no actúa ninguna fuerza, se moverá con una velocidad constante y su línea de universo será una línea recta que formará un ángulo fijo respecto a los ejes de coordenadas.

Un objeto experimenta cerca de una masa grande una aceleración debida a la fuerza de la gravedad, de manera que su línea de universo sigue una trayectoria curvada en relación al sistema de coordenadas. Por ejemplo, si se lanza al aire una bola desde el suelo verticalmente, la gráfica de su altura en función

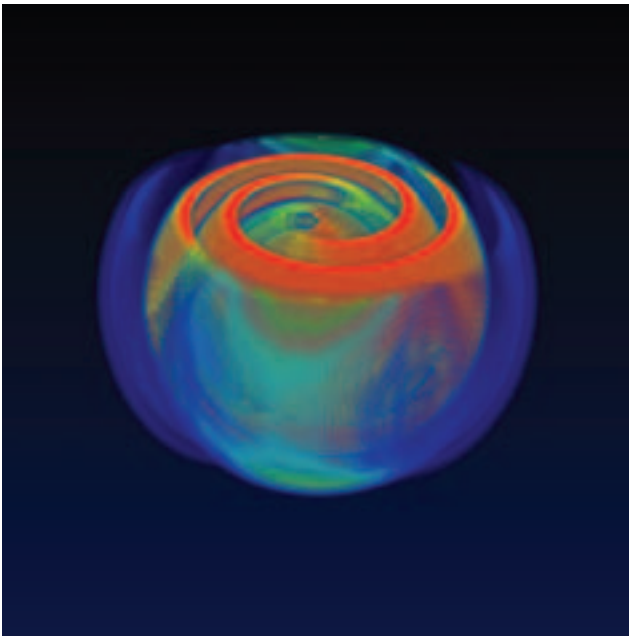
del tiempo describe una parábola. Por lo menos, éste es el punto de vista ordinario, que viene de la época de Newton. Einstein dio el enorme salto de abandonar esta manera de ver las cosas: propuso que un cuerpo masivo curva el propio sistema de coordenadas. En vez de seguir una trayectoria curvada en un sistema de coordenadas cartesianas, la bola realmente sigue una trayectoria “recta” (una *geodésica*) en un sistema de coordenadas curvado. Vuelve en un instante posterior a la mano de quien la ha lanzado porque la geodésica le lleva allí. La gravedad, por tanto, no es realmente una fuerza, sino una manifestación de la curvatura en la geometría del espaciotiempo.

La diferencia entre estos dos puntos de vista puede parecer un mero asunto de definición, pero la teoría de Einstein hace algunas predicciones específicas que se han verificado experimentalmente. Por ejemplo, el astrofísico británico Arthur Eddington aprovechó un eclipse solar de 1919 para medir la desviación de la luz de una estrella al pasar cerca del Sol. Su resultado coincidió con la predicción de la teoría. De esta concordancia se informó en las primeras páginas de los periódicos de todo el mundo. La reputación popular de Einstein quedó así establecida.

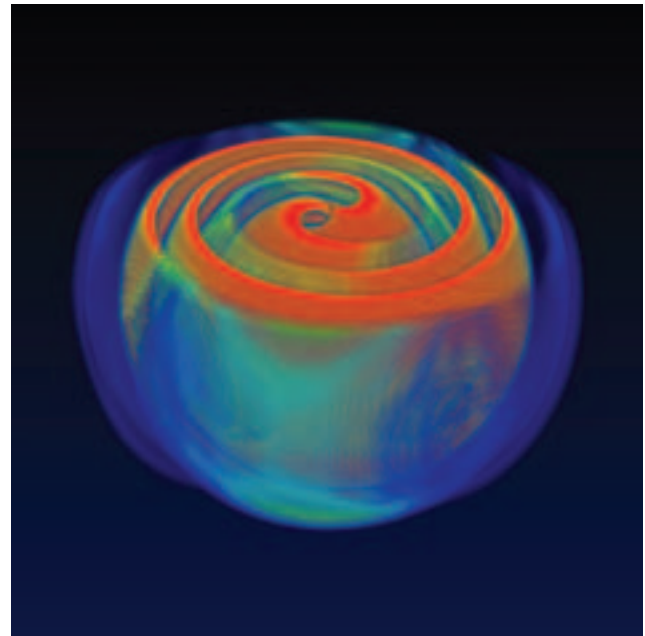
La relatividad general afirma que la curvatura geométrica inducida por un objeto masivo no surge instantáneamente en todas partes. Por el contrario, se propaga a partir de su fuente a la velocidad de la luz. De esta forma, si un objeto masivo altera su forma o su orientación, o si un conjunto de objetos cambia su disposición espacial, el efecto gravitacional —la curvatura del espaciotiempo— se propaga en forma de una *onda gravitatoria*.

Una onda gravitatoria se puede describir como una distorsión, variable con el tiempo, de la geometría del espacio: modifica la distancia efectiva entre cualquier par de puntos y esa modificación va cambiando con el tiempo. Si el cambio de masa que la causa es brusco, la onda tomará la forma de un corto pulso, muy parecido a la ola producida al lanzar una piedra en un estanque en reposo. En el caso de un cambio periódico, la onda se mantendrá, de manera parecida a la onda portadora de la señal de radio de una emisora. En cualquier caso, la amplitud de la onda será inversamente proporcional a la distancia a la fuente.

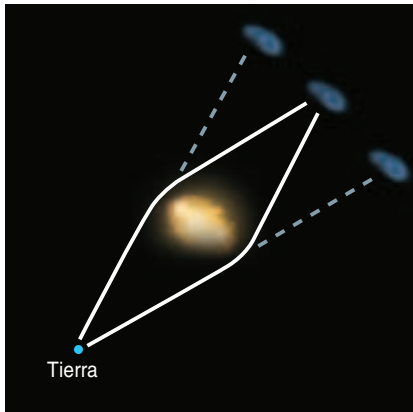
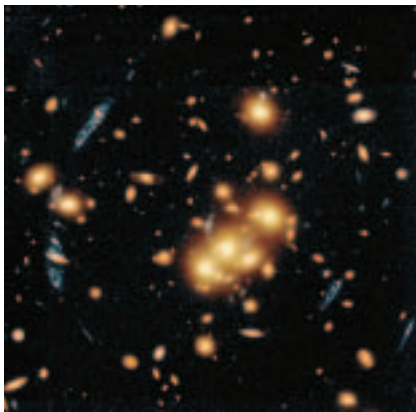
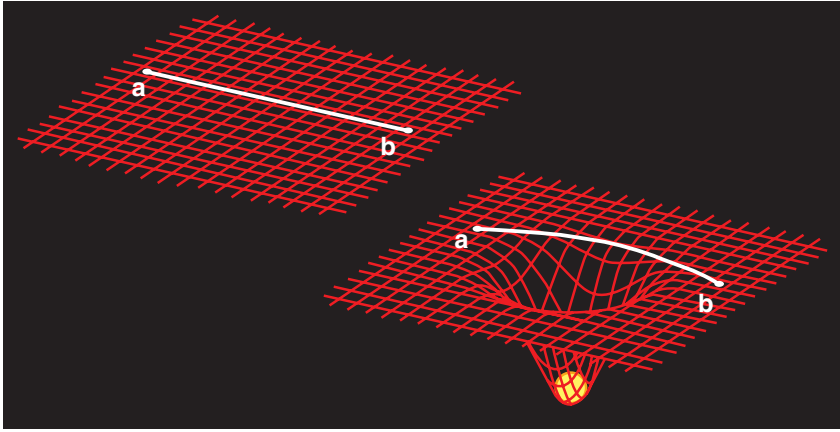
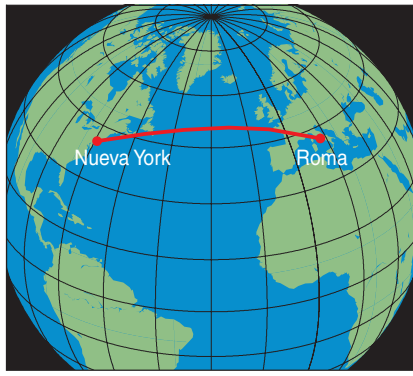
Al revés de lo que sucede con la aceleración gravitacional ordinaria, que siempre se dirige hacia la fuente, una onda gravitatoria actúa perpen-



agujeros negros que orbitan uno alrededor del otro. La pérdida de energía en forma de radiación gravitatoria hace que sus órbitas vayan menguando poco a poco, hasta que acaban fundidas.



Estas imágenes, dispuestas de izquierda a derecha, muestran la propagación de la perturbación del espaciotiempo hacia el exterior como una onda espiral (*colores fuertes*).



2. DOS PUNTOS DEFINEN UNA LINEA RECTA. Esta característica de la geometría euclídea hace que sea sencillo determinar el camino más corto entre dos puntos de una ciudad, *a* y *b* (*arriba a la izquierda*). Con independencia de dónde estén *a* y *b*, la línea entre ellos siempre cortará la red de coordenadas (aquí las calles y avenidas) con el mismo ángulo. A escala global, la curvatura de la Tierra hace inaplicable la geometría euclídea y la determinación del camino más corto entre puntos distantes resulta mucho más complicada. El camino más corto, en general, no forma con la red de coordenadas (en este caso las líneas de longitud y latitud) un ángulo constante, tal como se puede ver fácilmente cuando se proyecta el recorrido que tomaría un avión entre Nueva York y Roma, que están más o menos a la misma latitud (*arriba a la derecha*). De manera parecida, un rayo de luz, que siempre sigue la trayectoria más corta entre puntos, viaja en línea recta cuando no hay masas, tal como se ve en esta imagen de un universo bidimensional, en la que se representa un conjunto de líneas reticulares (*en medio a la izquierda*). Cuando una masa curva este espaciotiempo de dos dimensiones, un rayo de luz que vaya de *a* a *b* seguirá una trayectoria curva que proporcione el camino más corto entre estos puntos (*en medio a la derecha*). Los astrónomos pueden a veces observar directamente tales curvaturas del espacio; es lo que sucede en esta imagen del telescopio espacial Hubble (*abajo a la izquierda*). El cúmulo central (*amarillento*) de galaxias tiene tanta masa, que curva la luz de una galaxia más lejana blanco-azulada, hasta el punto de que aparece en distintas partes del cielo (*abajo a la derecha*).

dicularmente a la dirección en que se propaga; se dice por tanto que es una onda transversal. Coincide en eso con la luz y difiere del sonido, que se propaga por medio de ondas longitudinales.

En cualquier instante, una onda gravitatoria alarga el espacio en una dirección y lo contrae en la dirección perpendicular. La relatividad general predice dos posibles orientaciones para el alargamiento y la contracción, o dos “estados de polarización”. Una fuente dada puede producir, bien uno de los estados, bien una combinación de los dos, dependiendo de los movimientos específicos de la materia en las direcciones transversales a la línea de visión.

Cualquier objeto que sea alcanzado por una onda gravitatoria se alarga y contrae junto con el espacio que ocupa. En ello se fundamenta el diseño de un detector. La clave es que la amplitud de una onda se describe en términos físicos mediante una *deformación*, esto es, un cambio en longitud por unidad de longitud. Así, los objetos grandes serán los más afectados, en el sentido de que será mayor la magnitud absoluta de su cambio de tamaño.

Producción de ondas

¿Qué tipo de sucesos genera ondas gravitatorias? Una respuesta corta: cuando mucha masa se desplaza rápidamente. La emisión de radiación gravitatoria, al ser un efecto relativista, requiere que grandes masas se muevan a velocidades comparables a la velocidad de la luz. Ningún aparato fabricado por el hombre puede producir ondas gravitatorias suficientemente grandes para que las mida ningún instrumento realizable. Las únicas fuentes posibles son los sistemas astrofísicos de gran masa y energía. Pero no todo sistema así genera ondas gravitatorias. A fin de crear el tipo de distorsión espacial que se propaga como una onda, la fuente debe tener una distribución asimétrica de materia que rápidamente cambie de forma o de orientación.

A fin de captar mejor estos principios, consideremos un sistema binario en el que dos objetos de masa elevada pero no muy grandes espacialmente (estrellas de neutrones o agujeros negros) orbitan uno alrededor del otro a poca distancia.

Un tal sistema emite ondas gravitatorias a una frecuencia doble que la frecuencia de rotación. ¿Por qué doble? Porque desde la perspectiva de un observador que lo mire de canto, el sistema estelar binario pasa, a un ritmo que duplica la frecuencia orbital, de verse pequeño (con los dos objetos alineados según la visual del observador) a parecer “alargado” (con las masas colocadas una al lado de la otra).

Las ondas gravitatorias resultantes se llevan energía y momento angular; la distancia orbital y el período decrecen, por consiguiente. La órbita contraída, a su vez, hace que la frecuencia de las ondas gravitatorias emitidas se intensifique, a la vez que aumenta su amplitud. El ritmo de disminución orbital se acelera hasta que los objetos finalmente colisionan. Los astrofísicos denominan a esta disminución y colisión una “inspiral”.

Los sistemas binarios compactos han recibido mucha atención como fuentes de ondas gravitatorias, en parte debido a que la forma de la onda de sus emisiones puede modelarse con precisión, por lo menos en el caso de las estrellas de neutrones y de agujeros negros con masas que no excedan muchas veces la del Sol. Igualmente importante es que se sepa que existen unos cuantos de estos sistemas en nuestro entorno galáctico.

Russell Hulse y Joseph Taylor, los dos hoy en Princeton, ganaron un premio Nobel en 1993 por su descubrimiento y sus observaciones de uno de tales sistemas estelares binarios, PSR B1913+16. Lo componen dos estrellas de neutrones, una de las cuales es un *púlsar*, es decir, que emite pulsos de ondas de radio en nuestra dirección a intervalos sumamente regulares. Cada una de esas estrellas tiene una masa unas 1,4 veces la solar. El seguimiento cuidadoso del espaciado de los pulsos, realizado durante muchos años, ha determinado los parámetros orbitales completos del sistema con notable precisión. En particular, el período orbital, actualmente de unas 8 horas, decrece unos 77 microsegundos por año, lo que hará que estas dos estrellas se unan dentro de unos 300 millones de años.

Esta observación concuerda de manera exacta con las predicciones

de la relatividad general acerca de la disminución orbital debida a la radiación gravitatoria del sistema. Desde entonces se han identificado algunos otros púlsares binarios que se fusionarán en algunos miles de millones de años o menos, incluido el espectacular descubrimiento, hace un año, de PSR J0737-3039A/B, un sistema púlsar doble único, que actualmente tiene un período orbital de 2,45 horas y que se fusionará dentro de 85 millones de años.

Dado el conocimiento de las órbitas menguantes de estos púlsares binarios, no cabe poner en cuestión la existencia de la radiación gravitacional. Sin embargo, hasta ahora han faltado observaciones *directas* de las ondas gravitatorias. Es fácil entender por qué: ninguno de los detectores construidos con ese objetivo tiene la suficiente precisión. Pero cuando finalmente se hagan tales medidas, ayudarán a encarar ciertas cuestiones que no pueden contestarse por ningún otro medio.

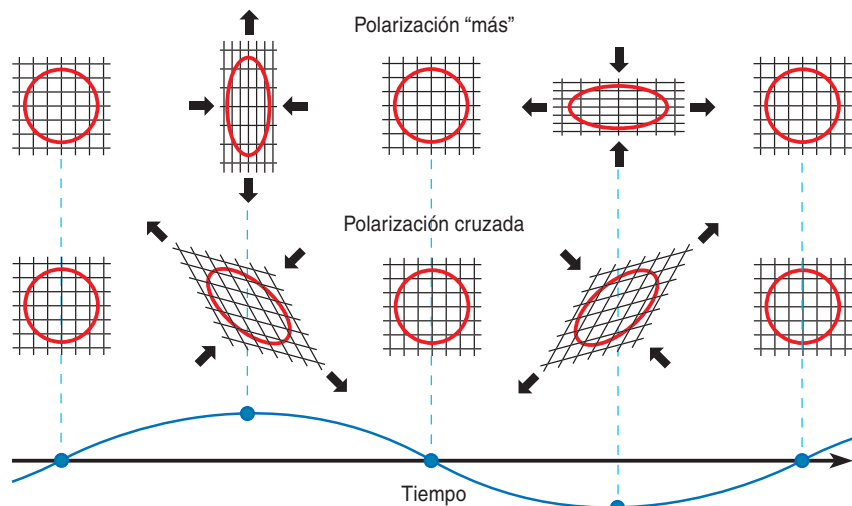
Resolución de enigmas cósmicos

Se espera que las futuras medidas de ondas gravitatorias ayudarán a determinar, por ejemplo, la abundancia de estrellas de neutrones binarias y de otros sistemas binarios compactos. Los radiotelescopios sólo pueden de-

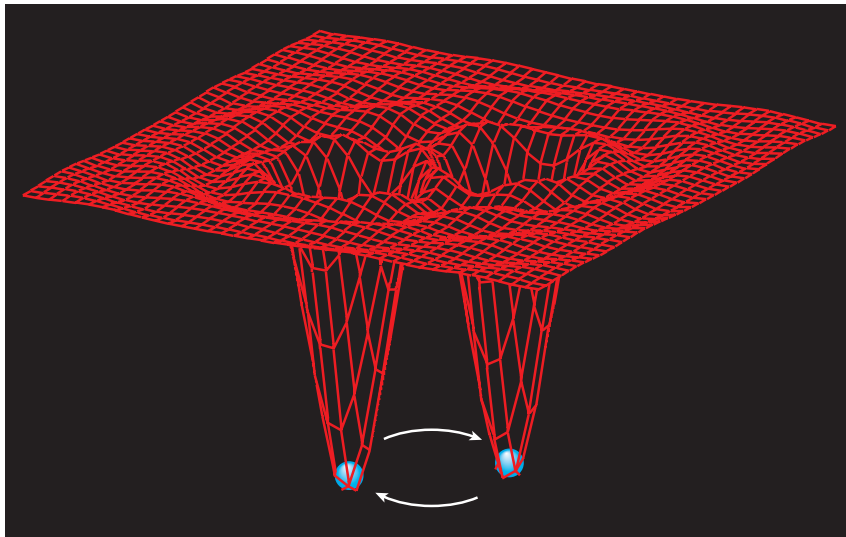
tectar tales sistemas si uno de los objetos es un púlsar. Esta limitación puede explicar por qué aún no se dispone de información observacional acerca de sistemas binarios que contengan un agujero negro o una estrella de neutrones, aunque tales sistemas deben de abundar. La astronomía de ondas gravitatorias tendría que detectar estas parejas, así como sistemas binarios que contengan dos agujeros negros, hallazgo que sería muy preciado también para la astronomía ordinaria.

Las mediciones de ondas gravitatorias deberían también ayudar a determinar cómo es realmente el material de las estrellas de neutrones. Por ejemplo, si la corteza de las estrellas de neutrones es lo bastante rígida para mantener formas que no sean axialmente simétricas, esos objetos, al girar, emitirán ondas gravitatorias. Incluso aunque la corteza no sea tan rígida, las estrellas de neutrones que giran rápidamente, piensan algunos, deberán emitir ondas gravitatorias, ya que generan una inestabilidad que conduce a movimientos masivos del material estelar interno.

La observación de ondas gravitatorias permitirá cartografiar los movimientos de materia que provocan explosiones de supernovas. Estos cataclismos empiezan con el



3. LA RELATIVIDAD GENERAL predice que las ondas gravitatorias pueden adoptar dos patrones, o estados de polarización, básicos. La polarización “más” (*arriba*) distorsiona transitoriamente un objeto circular (o un conjunto de masas separadas dispuestas en un círculo) de manera que se comprima horizontalmente y se estire según la vertical, o viceversa, en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Las direcciones de compresión y de estiramiento están giradas 45 grados en el caso de la polarización “cruzada” (*abajo*).



4. DOS OBJETOS DE MASA CONSIDERABLE LIGADOS ENTRE SI en una órbita cerrada no sólo deforman el espaciotiempo en sus cercanías, sino que también forman ondas gravitatorias que se propagan hacia el exterior a la velocidad de la luz. El Observatorio de Ondas Gravitatorias por Interferometría Láser (LIGO) y otros detectores captarán tales ondulaciones, provenientes de fuentes distantes, si la perturbación gravitacional que crean es lo bastante grande.

colapso del núcleo de una estrella de gran masa, que libera una enorme cantidad de energía. Se sabe mucho de estas explosiones, pero se ignora aún cómo puede escapar esta energía a través de las densas capas de material estelar. Aunque las simulaciones numéricas sugieren que la convección y la rotación del núcleo desempeñan un papel crucial, modelar fiablemente estos movimientos sigue siendo un problema computacional inabordable. Sin embargo, está claro que durante la explosión

se emitirán ondas gravitatorias si y sólo si la explosión es asimétrica. Las observaciones de ondas gravitatorias ofrecen así un medio de escrutar los mecanismos inductores de esas explosiones que complementará la astronomía corriente, capaz de descubrir el material despedido sólo algunas horas después de la explosión inicial.

Con mayor ambición aún, los cosmólogos esperan que las ondas gravitatorias les valgan para saber cómo se movía la masa en los primeros

momentos tras la gran explosión (Big Bang). Las ondas gravitatorias emitidas en aquel instante siguen bañando la Tierra con pequeñas fluctuaciones geométricas, análogas a la radiación de fondo cósmica de microondas, pero originadas mucho antes en la evolución del universo, en una época en que el cosmos seguía siendo opaco a las ondas electromagnéticas.

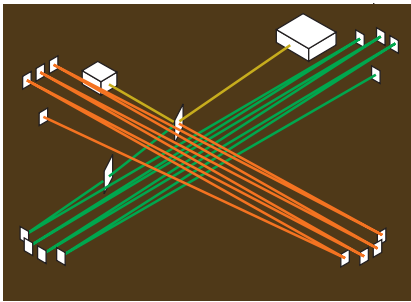
La captación de ondas gravitatorias deberá también mostrar la masa y el espaciotiempo en situaciones extremas. Se espera que las ecuaciones no lineales de la relatividad general den lugar a comportamientos complejos en tales casos: cuando la radiación gravitacional afecte profundamente la evolución de los sistemas astrofísicos. Estas predicciones se podrán comprobar con las observaciones de binarias compactas de masa elevada (especialmente si uno o ambos objetos giran deprisa) y por las observaciones de ondas intensas emitidas cuando dos objetos de gran masa se unen.

Finalmente, se espera que esta línea de investigación contribuya a determinar la verdadera naturaleza de la gravedad. La relatividad general, a pesar de su espectacular éxito en diversas comprobaciones experimentales, no es la única teoría posible de la gravedad. Están además las teorías “escalar-tensoriales”; en ellas, la naturaleza de la radiación gravitatoria difiere de la que le atribuye la relatividad general. En particular, estas teorías predicen más de dos estados de polarización. Observaciones simultáneas de una fuente de intensidad suficiente por medio de múltiples detectores contrastarían estas teorías.

Aunque la recompensa científica promete ser enorme, la detección directa de ondas gravitatorias supone un problema experimental extraordinario. Se espera que las fuentes sean raras o de por sí débiles (o las dos cosas a la vez). En consecuencia, los instrumentos deben ser muy sensibles; han de analizar un gran volumen de espacio en un tiempo razonable. La amplitud de la deformación causada por una onda gravitatoria típica que alcance la Tierra sería de alrededor de 10^{-21} . Este número es tan pequeño, que cuesta imaginarlo. Significa que la distancia entre dos objetos separados, digamos, por el

Púlsar	Año de descubrimiento	Período orbital (horas)	Excentricidad	Tiempo hasta la unión (millones de años)
B1913+16	1974	7,75	0,617	300
B2127+11C	1990	8,05	0,681	220
B1534+12	1990	10,10	0,274	2700
J0737-3039A,B	2003	2,45	0,088	85

5. CUATRO SISTEMAS BINARIOS, cada uno con un par de estrellas de neutrones, han sometido a prueba las predicciones de la teoría de la relatividad general de Einstein y confirmado la existencia de ondas gravitatorias. Como la radiación gravitacional emitida por estos sistemas se lleva energía, sus órbitas se contraen lentamente. Las dos estrellas de cada uno de estos sistemas acabarán fusionándose en una, tras un lapso que dependerá a la vez del período orbital (los períodos más largos suelen dar tiempos más largos hasta la unión) y de la excentricidad (las excentricidades grandes tienden a acortar los tiempos que tardan en unirse).



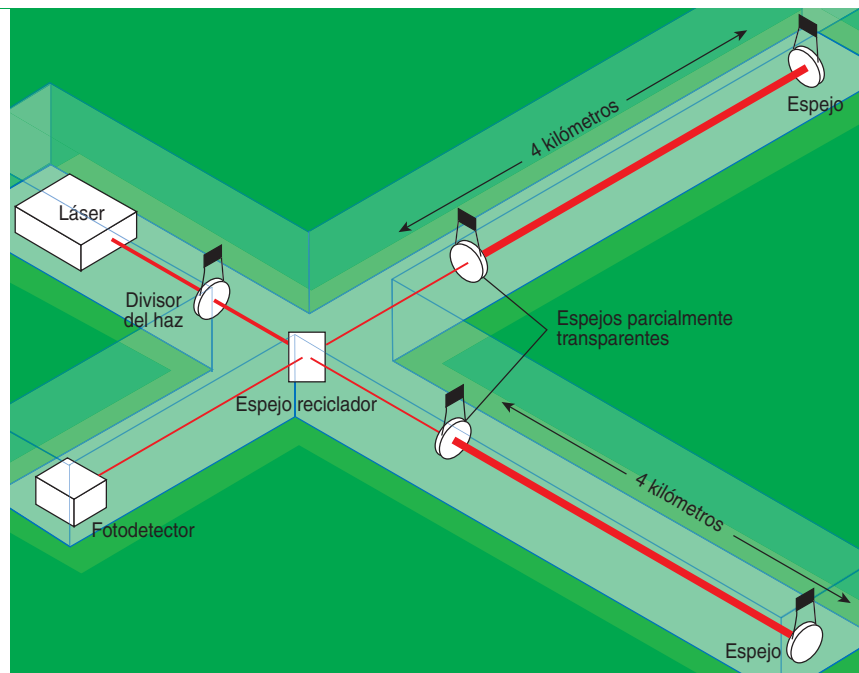
6. EL INTERFEROMETRO original de Michelson doblaba varias veces la trayectoria de la luz en cada brazo de su dispositivo mediante una serie de espejos (*arriba*). Los interferómetros del LIGO utilizan una técnica más compleja, en la que cada brazo sólo emplea dos espejos para crear una cavidad óptica resonante donde los fotones van y vienen unas 50 veces, en promedio (*derecha*). Cada una de las dos instalaciones LIGO, una en el estado de Washington y la otra en el de Louisiana, contiene un interferómetro con brazos de 4 kilómetros de largo; el observatorio de Washington también alberga un segundo interferómetro, con brazos de 2 kilómetros.

diámetro de la Tierra, se ampliarían y contraerían sólo en una cantidad igual al tamaño de un núcleo atómico. Sería fácil concluir que la detección directa de ondas gravitatorias es imposible. Pero algunos físicos lo consideran un reto.

Cilindros e interferómetros

Joseph Weber, físico de la Universidad de Maryland, acometió en los años sesenta los primeros intentos serios de medir las ondas gravitatorias. El detector de Weber consistía en un gran cilindro de aluminio sólido colgado horizontalmente por su punto medio de un cable. En un extremo se instaló un transductor sensible, que medía las vibraciones del cilindro a su frecuencia de resonancia; las podría inducir el paso de una onda gravitatoria.

Weber construyó muchos detectores y aportó algunos indicios de que se habían excitado simultáneamente, pero nadie pudo nunca reproducir sus resultados. Sin embargo, el diseño de la "barra" de Weber se ha ido refinando con el paso de los años y hoy funcionan varios de tales detectores. Dos de ellos operan a una fracción de grado sobre el cero absoluto, lo



que minimiza el ruido debido a los movimientos térmicos internos.

Los detectores de barra sólo son muy sensibles en una banda de frecuencias bastante estrecha (cerca de la frecuencia de resonancia de la barra); esta característica limita los tipos de fuentes que cabe esperar que se detecten con ellos. De ahí que en los últimos años los esfuerzos se hayan concentrado en la *interferometría*, el uso de luz para medir con precisión las distancias entre espejos muy distantes. Los interferómetros tienen la ventaja de ser sensibles a un intervalo de frecuencias comparativamente ancho.

Aunque las configuraciones ópticas difieren algo, todos estos interferómetros son variaciones del diseño básico que Albert A. Michelson utilizó, primero en 1881 y de nuevo seis años después con la ayuda de Edward Morley, en el famoso experimento de Michelson-Morley. Aquella prueba eliminó la existencia del "éter", el medio fantasmagórico que muchos físicos del siglo XIX pensaban que bañaba el firmamento para permitir el paso de las ondas luminosas a través del espacio.

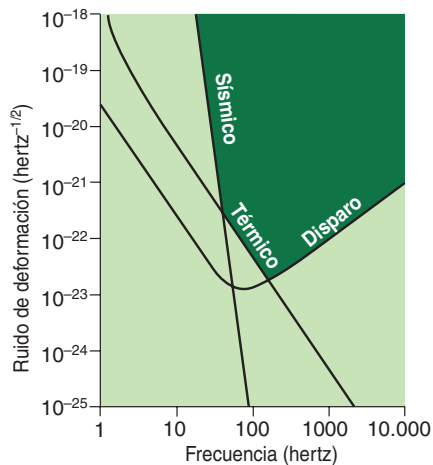
En esquema, un interferómetro de ondas gravitatorias funciona como sigue: un espejo parcialmente reflectante divide la luz de un láser en dos haces, que se propagan por los brazos perpendiculares del dispositivo. Unos espejos suspendidos libremente en

los extremos de estos brazos reflejan los dos haces de luz, devolviéndolos a un punto común del espejo que desdobló el haz. El resultado de esta separación de los haces depende de la fase relativa de las ondas de los dos haces cuando se recombinan, que a su vez dependerá de cuánto haya tenido que recorrer cada uno. Así, un interferómetro puede calibrar la diferencia de longitud entre los dos brazos con una precisión de una pequeña fracción de la longitud de onda de la luz empleada.

Una medición de este tipo se adecua perfectamente al carácter de los desplazamientos que induce una onda gravitatoria. La amplitud del desplazamiento en cada brazo depende de la dirección de llegada y de la polarización de la onda. Aunque un interferómetro no puede detectar ondas en ciertas direcciones y polarizaciones, responde apreciablemente en la mayoría de casos. En este sentido, un interferómetro de ondas gravitatorias no "mira" en una dirección particular. Más bien "escucha" el universo que lo rodea.

Los láseres, las ópticas, los fotodetectores y los sistemas de control de hoy permiten medidas mucho más estables y precisas que las de Michelson y Morley. Tras décadas de planificación y elaboración de prototipos, nos es dado ya poder construir interferómetros de gran escala capaces de detectar los tipos de señales que

7. LA SENSIBILIDAD DE LIGO está limitada por tres efectos diferentes. A bajas frecuencias, la vibración sísmica de los espejos suspendidos libremente limita las señales gravitatorias menores que se pueden detectar. A altas frecuencias, la vida media de los fotones en el interior de los brazos, combinada con un efecto cuántico, el “ruido de disparo”, determina el límite inferior. Entre ambos extremos, la agitación térmica en las suspensiones de los espejos establece el nivel de ruido que acota la región de sensibilidad.



cabe pensar que llegarán a la Tierra. En consecuencia, se han construido grandes interferómetros para la detección de ondas gravitatorias en Europa, Japón y los Estados Unidos.

De los planos a los haces

LIGO, el “Observatorio de Ondas Gravitatorias por Interferometría Láser”, es el proyecto de Estados Unidos en este campo. La Fundación Nacional de las Ciencias ha aportado los 300 millones de dólares que ha costado su construcción. Se ha tardado más de diez años en acabarlo. Es, pues, un proyecto de los considerados “ciencia a gran escala”, como los aceleradores de partículas. El Laboratorio LIGO (gestionado conjuntamente por el Instituto de Tecnología de California y el Instituto de Tecnología de Massachusetts) tiene instalaciones en Hanford, un emplazamiento del Departamento de Energía, en el estado de Washington, y en Livingston, Louisiana [esta sede, aunque quedó fuera de servicio, soportó bien el huracán Katrina; en los días anteriores a que éste tocara tierra, el interferómetro captó sus efectos microsísmicos].

En ambas instalaciones, un complejo central de edificios está conectado a dos estrechos túneles que discurren a lo largo de 4 kilómetros en direcciones perpendiculares. Estas largas conducciones albergan los haces láser. El Observatorio de Hanford dispone de dos interferómetros independientes, uno con brazos de 4 kilómetros y el otro de 2 kilómetros, colocados uno al lado del otro. En conjunto, los tres interferómetros del LIGO proporcionan un potente sistema de congruencia: la señal de una onda gravitatoria debe aparecer

en los dos detectores de Hanford al mismo tiempo y con la misma amplitud de desplazamiento (es decir, con un factor dos de diferencia en el cambio de longitud absoluto), y en el detector de Livingston, con el máximo tiempo de desplazamiento de la luz entre los dos lugares, 10 milisegundos, antes o después.

LIGO añade algunos refinamientos al diseño básico de Michelson. Hace que los fotones vayan y vengan por los brazos unas 50 veces (en promedio) antes de dirigirse hacia el separador del haz. El interferómetro de Michelson doblaba también la trayectoria de la luz en cada uno de sus brazos (ocho veces) con espejos múltiples que cambiaban ligeramente cada segmento. En LIGO la luz va y viene entre los dos espejos en la misma trayectoria y escapa finalmen-

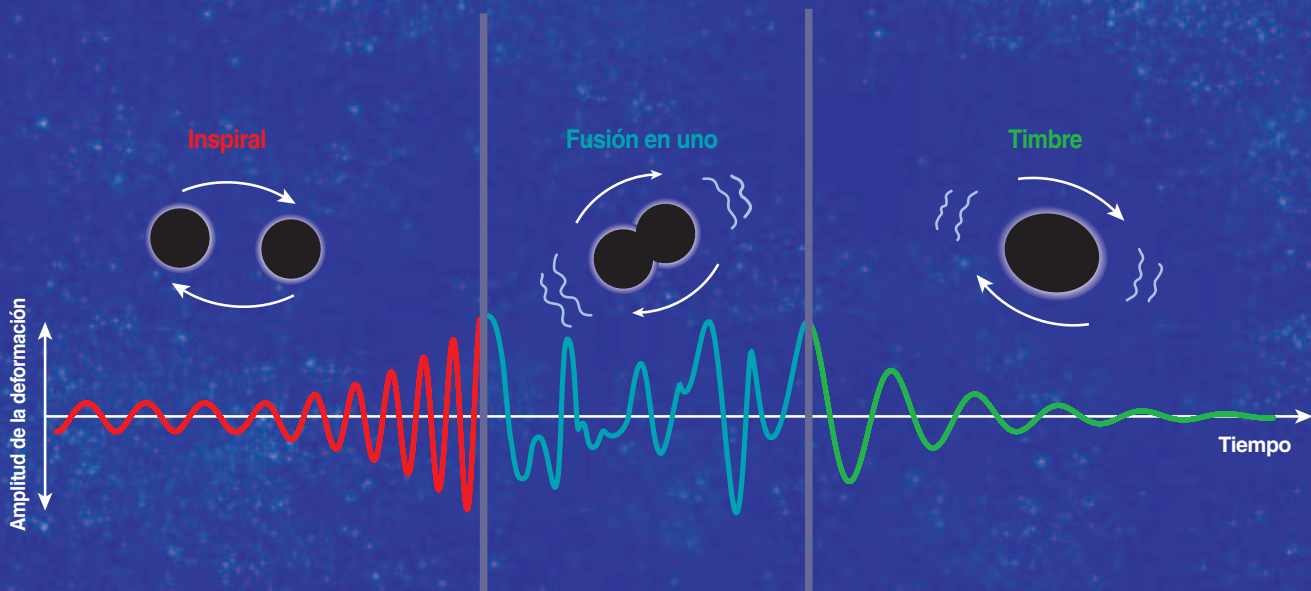
te por donde llegó a través de uno de los espejos reflectantes, que es parcialmente transparente.

El funcionamiento adecuado exige que la distancia entre estos dos espejos esté controlada con una tolerancia del orden del nanómetro; se necesita tanta precisión porque los dos espejos han de constituir una cavidad óptica mantenida muy cerca de la resonancia: de manera que entre los espejos quepa un número grande y fijo de longitudes de onda de la luz. Se mide la diferencia entre las longitudes de los brazos (indicada por la intensidad del haz de luz recombinado que llega al fotodetector) y se utiliza esta información para ajustar unos electroimanes que apartan o atraen unos imanes permanentes pegados a los espejos. Así se preserva la cavidad.

Este sistema de retroalimentación está cuidadosamente diseñado para que aplique fuerzas a los espejos sólo a bajas frecuencias, en las que el movimiento del suelo (el ruido sísmico) y las resonancias mecánicas son peores. A frecuencias superiores, en las que el interferómetro se halla bien aislado de las perturbaciones externas, los espejos tienen libertad para responder a cualquier posible señal. De este modo, la diferencia entre las longitudes de los brazos constituye un indicador muy sensible de una onda gravitatoria a altas frecuencias. Incluso a frecuencias algo más bajas, donde el sistema de retroalimentación ejerce alguna influencia, resulta



8. UNA FOTOGRAFIA AEREA de la instalación LIGO en Livingston, Louisiana, revela la gran escala del aparato, con sus brazos de 4 kilómetros.



posible dar con ondas gravitatorias, precisamente porque causarían la retroalimentación.

Cada uno de los tres interferómetros del LIGO usa un láser de 10 watt, cuya emisión debe estar bien estabilizada. Aunque 10 watt no es mucho, otra mejora con respecto al diseño de Michelson amplifica la intensidad de la luz que se interfiere: un espejo parcialmente reflectante entre el láser y el desdoblador del haz. Así, la luz, en vez de volver del separador del haz hacia el láser, se “recicla” dentro del interferómetro. El resultado equivale a aumentar la potencia del láser por 30.

A fin de evitar los problemas que causa la dispersión de la luz, los distintos componentes ópticos están instalados en cámaras de vacío que, en conjunto, abarcan toda la longitud de los brazos. Se trata del mayor sistema de ultraalto vacío del mundo. Su construcción se encargó a Chicago Bridge and Iron Company. Fabricó las largas cámaras uniendo muchas secciones cilíndricas cortas, que a su vez se construyeron soldando láminas planas de delgado acero inoxidable dobladas en espiral; se parece a como suelen estar hechos los tubos de cartón.

Aunque el ensamblaje del sistema de vacío fue bastante complicado, costó más aislar los espejos del suelo y del entorno del laboratorio, que vibra a frecuencias inferiores a unos cuantos hertz. Una suspensión por cables, de las llamadas de “péndulo”, que sujeta los espejos, proporciona la primera línea de defensa. Las bases sobre las que se apoyan los espejos suspendidos descansan en pesadas columnas con amortiguadores que

9. LA PRUEBA DIRECTA DE LA RADIACION GRAVITATORIA puede llegar de una fuente intensa, como la unión de dos agujeros negros que orbiten uno alrededor del otro. Las señales de un suceso así se espera que muestren una oscilación de amplitud creciente y longitud de onda decreciente a medida que los agujeros negros describan una espiral que tienda a unirlos (*izquierda*). Cuando se junten, puede que se emita un patrón caótico de ondas gravitatorias (*centro*). Finalmente, se espera que el agujero negro único resultante “sueñe”, que emita ondas con una o más frecuencias características que disminuirán con el tiempo (*derecha*).

protegen aún más los espejos de las vibraciones de alta frecuencia.

Gracias a todos estos ingenios, los interferómetros son muy sensibles a las ondas gravitatorias de una frecuencia de entre 40 hertz y 2 kilohertz. A frecuencias más bajas, los movimientos del suelo alimentan con una intensidad excesiva el sistema, a pesar de las suspensiones pendulares y los soportes que amortiguan las vibraciones. A frecuencias más elevadas, la naturaleza cuántica del haz láser (formado por fotones discretos, si bien muy numerosos) limita la precisión de la medida. Aunque el aumento de la potencia del láser reduciría el problema del ruido cuántico, los interferómetros del LIGO no sirven para medir ondas gravitatorias que estiren o contraigan los brazos mucho más deprisa que el tiempo que un fotón suele permanecer en sus cavidades ópticas, alrededor de un milisegundo.

Tamiz de bits

Las actividades científicas de este proyecto, incluido el análisis de los datos recogidos por los interferómetros, son responsabilidad de la Colaboración Científica LIGO, un grupo de más de 400 investigadores de docenas de instituciones de todo el mundo. Los datos obtenidos por

LIGO constan de muchos “canales”, cada uno de los cuales observa una parte distinta del aparato. Registran una serie continua de valores digitalizados. Un canal de cada interferómetro contiene la medición de la diferencia de longitud de los brazos, tomada con una frecuencia de 16.384 hertz; ahí es donde aparecería una onda gravitatoria. Centenares de canales auxiliares registran las señales de diagnóstico del interferómetro: señales de retroalimentación, así como datos de los sensores que registran distintas condiciones ambientales.

Mediante el análisis de los datos se pretende detectar débiles señales enterradas en ruidosos datos. Si se sabe la forma de la onda de la señal, como se sabe en el caso de la inspiral de un sistema binario de estrellas de neutrones o de la onda continua de una estrella de neutrones asimétrica en rotación, cabe emplear un sistema de *filtrado coincidente* para lograr una óptima precisión; es decir, podemos buscar correlaciones entre las medidas y el supuesto patrón de señales. Si se desconoce la forma exacta de la onda de la señal, nos debemos basar en técnicas más generales, como la búsqueda de pulsos cortos de una señal de intensidad anormalmente grande en alguna banda de frecuencia. Hay que poner mucho

cuidado: esperamos que el detector experimentará señales falsas como resultado de perturbaciones del entorno o de problemas instrumentales. De manera que deberemos utilizar los canales auxiliares para “vetar” las detecciones que en realidad tengan orígenes más prosaicos.

Existe un creciente espíritu de colaboración entre los investigadores del LIGO y quienes trabajan con los otros tres interferómetros de ondas gravitatorias: GEO600 (un proyecto británico-alemán que está poniendo a punto un instrumento de 600 metros cerca de Hannover), TAMA300 (un interferómetro de 300 metros que ha estado funcionando a temporadas durante los últimos años en Japón) y Virgo (un interferómetro franco-italiano de brazos de 3 kilómetros cercano a Pisa). La combinación de datos de múltiples interferómetros posibilitará la realización de más pruebas de congruencia y que se comprueben las características fundamentales de las ondas gravitatorias una vez que se haya establecido una señal. En un futuro no muy distante, la red global quizá cuente con otros grandes interferómetros, cuya construcción se sopesa en Japón, China y Australia.

La voz del universo

Los investigadores del LIGO realizaron su primera “toma de datos” durante 17 días del verano del año 2002. Hubo un par de sesiones más durante 2003, cada una de dos meses de duración, y una cuarta a finales de 2004. El tiempo entre las sesiones se dedicó a rastrear las fuentes de ruido y a realizar varios cambios para mejorar el funcionamiento. Como resultado, las sensibilidades de los interferómetros han mejorado continuamente y se han acercado mucho al objetivo.

Incluso una vez que los interferómetros del LIGO empiecen a funcionar con toda la sensibilidad, no hay garantías de que encuentren algo. No se puede saber cuándo hallarán ondas gravitatorias; al fin y al cabo, se trata de una exploración en lo aún desconocido. Sin embargo, podemos hacer suposiciones razonables acerca de algunas de las posibles fuentes. Por ejemplo, la proporción de inspirales de estrellas de neutrones binarias que tendrán lugar tan cerca como

para proporcionar una señal detectable no llegará a una por decenio. Habríamos de tener suerte para que LIGO registrara pronto una inspiral. En el caso de otras fuentes, nos es más difícil calcular con qué frecuencia aparecerán. Nuestro objetivo para el próximo futuro es estar preparados para cualquier sorpresa que la naturaleza nos pueda ofrecer.

Las ondas gravitatorias no podrán seguir ocultas indefinidamente. Ya se están desarrollando mejores técnicas de detección para futuros interferómetros. Una de las mejoras propuestas, LIGO Avanzado, aprovechará esos desarrollos y aumentará las sensibilidades de los tres interferómetros en alrededor de un orden de magnitud; escrutará así un volumen de espacio mil veces mayor. Si se aprueba, tendríamos la seguridad de detectar inspirales binarias a un ritmo adecuado y sería mucho más probable identificar otras fuentes.

A modo de complemento de los detectores terrestres, pueden también rastrearse las ondas gravitatorias midiendo de manera continua y con precisión la distancia a una nave interplanetaria. En anteriores experimentos de este tipo, se emitía una señal de radio desde la Tierra y la

nave lejana la devolvía. Actualmente, la Agencia Europea del Espacio y la NASA están colaborando en el diseño de la Antena Espacial para el Interferómetro Láser (LISA), un conjunto de tres naves espaciales que muy probablemente se pondrán en órbita en torno al Sol en la próxima década. Esta manera de abordar la astronomía de ondas gravitatorias se libra de los problemas del movimiento del suelo y dispondría de brazos interferométricos de millones de kilómetros de longitud: los haces láser que se propagarían a través del vacío espacial. LISA rastrearía una banda de frecuencias más baja que la que LIGO puede esperar cubrir; buscaría fuentes distintas. Y contará, al contrario que cualquiera de los actuales detectores terrestres, con sensibilidad suficiente para registrar ondas gravitatorias de fuentes conocidas (como el doble púlsar descubierto hace poco). Ofrecerá así valiosos patrones de calibración.

La dificultad de detectar de forma directa ondas gravitatorias es imponente. Pero tantos años de paciente trabajo nos han acercado a ese objetivo. Esperamos observar por fin estas pequeñas ondas del espaciotiempo en un futuro no muy lejano.

El autor

Peter S. Shawhan se doctoró en física en 1999 por la Universidad de Chicago. Hoy trabaja en el Instituto de Tecnología de California. Ha realizado diversas contribuciones al LIGO, donde ahora se dedica al análisis de datos.

©American Scientist Magazine.

Bibliografía complementaria

A NEW TEST OF GENERAL RELATIVITY: GRAVITATIONAL RADIATION AND THE BINARY PULSAR PSR 1913+16. J. H. Taylor y J. M. Weisberg en *Astrophysical Journal*, vol. 253, págs. 908-920; 1982.

WAS EINSTEIN RIGHT? PUTTING GENERAL RELATIVITY TO THE TEST. C. M. Will. Basic Books; Nueva York, 1993.

FUNDAMENTALS OF INTERFEROMETRIC GRAVITATIONAL WAVE DETECTORS. P. R. Saulson. World Scientific; Singapore, 1994.

LIGO AND THE DETECTION OF GRAVITATIONAL WAVES. B. C. Barish y R. Weiss en *Physics Today*, vol. 52, n.º 10, págs. 44-50; 1999.

GRAVITATIONAL RADIATION AND THE VALIDITY OF GENERAL RELATIVITY. C. M. Will en *Physics Today*, vol. 52, n.º 10, págs. 38-43; 1999.

GRAVITY FROM THE GROUND UP. B. S. Schutz. Cambridge University Press; Cambridge, 2003.

A DOUBLE-PULSAR SYSTEM: A RARE LABORATORY FOR RELATIVISTIC GRAVITY AND PLASMA PHYSICS. A. G. Lyne, M. Burgay, M. Kramer, A. Possenti, R. N. Manchester, F. Camilo, M. A. McLaughlin, D. R. Lorimer, N. D'Amico, B. C. Joshi, J. Reynolds y P. C. C. Freire en *Science*, vol. 303, págs. 1153-1157; 2004.