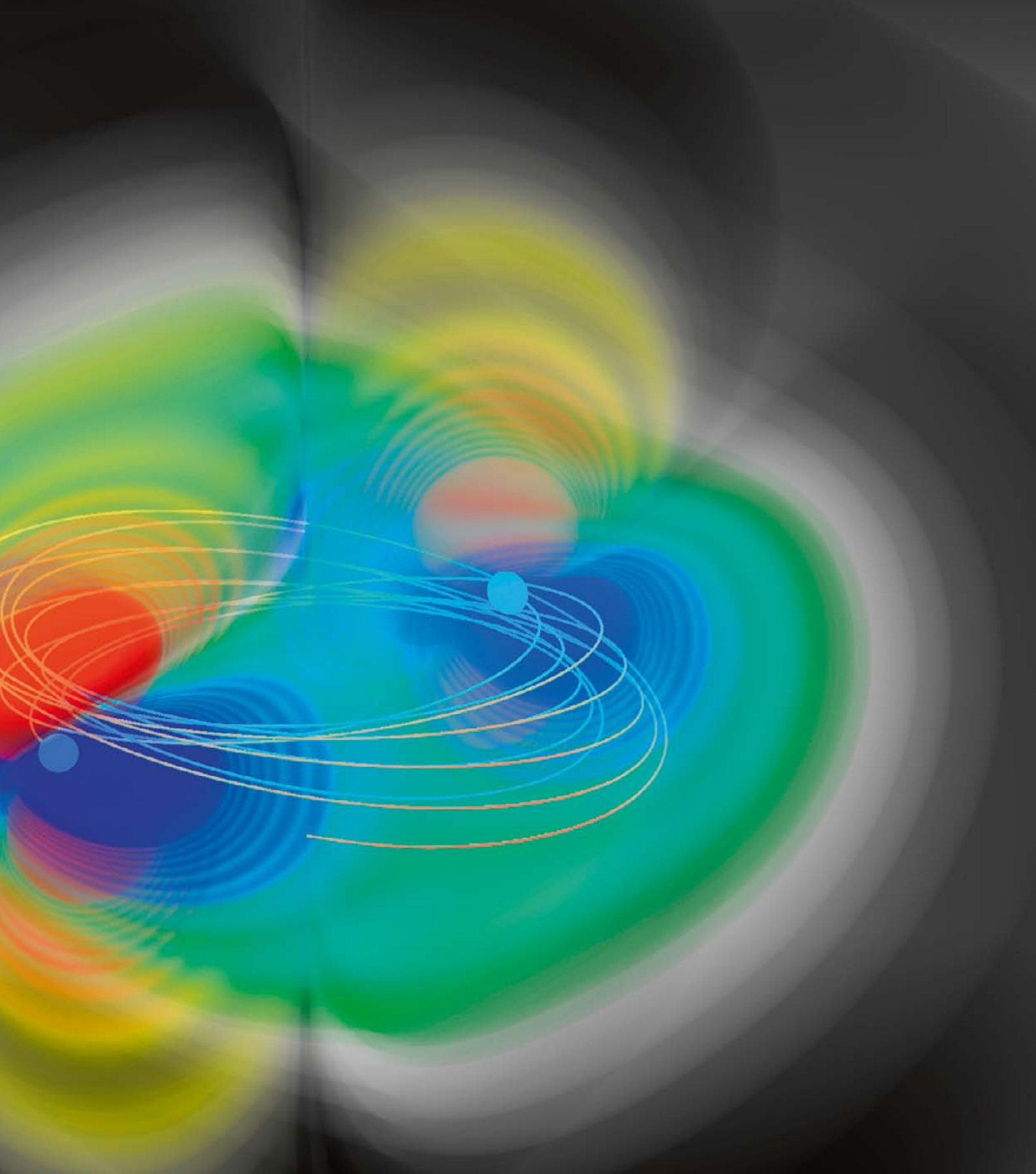


FÍSICA

# LA OBSERVACIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES CON LIGO

Hace un año se anunció la primera detección de las «arrugas» del espaciotiempo predichas por la teoría de Einstein. ¿Qué avances técnicos lo hicieron posible?

*Alicia M. Sintés y Borja Sorazu*



LA PRIMERA ONDA GRAVITACIONAL detectada en la Tierra fue generada por una colisión de agujeros negros de 36 y 29 masas solares ocurrida a 1300 millones de años luz de distancia. Las deformaciones del espaciotiempo creadas por aquel cataclismo pueden apreciarse en esta simulación por ordenador, creada por el grupo de LIGO de la Universidad de las Islas Baleares.

**Alicia M. Sintes** es profesora de la Universidad de las Islas Baleares e investigadora del Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña. Es miembro del consejo de LIGO, del comité ejecutivo de GEO y copreside el grupo de trabajo para la búsqueda de señales gravitacionales continuas, uno de los cuatro grupos de análisis de las colaboraciones LIGO y Virgo.



**Borja Sorazu** es investigador posdoctoral en el Instituto de Investigación Gravitacional de la Universidad de Glasgow y miembro de las colaboraciones LIGO y GEO. Su trabajo se centra en técnicas de interferometría avanzada, en la caracterización de las suspensiones de los espejos principales de los detectores de LIGO y en los métodos para la reducción de ruido térmico.



**H**ACE AHORA UN AÑO, EL 11 DE FEBRERO DE 2016, LOS CIENTÍFICOS DEL OBSERVATORIO de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), en EE.UU., y del observatorio Virgo, en Italia, anunciábamos un descubrimiento histórico: la primera observación directa de ondas gravitacionales, las perturbaciones del espaciotiempo predichas por la teoría de la relatividad general de Albert Einstein. La publicación del hallazgo llegaba cinco meses después de la detección, acontecida el 14 de septiembre de 2015 a las 09:50 horas UTC. El hito coronaba una búsqueda experimental de más de cinco décadas y marcaba el inicio de una nueva era para la astronomía.

Bautizada como GW150914, aquella onda gravitacional había sido generada por una violenta colisión de agujeros negros ocurrida a 1300 millones de años luz de distancia. Una segunda señal, GW151226, detectada el 26 de diciembre, se convertía poco después en nuestro mejor regalo de Navidad. Tras los análisis necesarios para comprobar que se trataba de una verdadera señal, los detalles de este evento se publicaron el 15 de junio. Una vez más, el fenómeno había sido causado por la fusión de dos agujeros negros de masa estelar en una galaxia distante.

El experimento LIGO, diseñado y construido por el Instituto de Tecnología de California (Caltech) y el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), comenzó a tomar datos en 2002. Su primera fase de operaciones se prolongó hasta 2010. Aunque sin éxito desde el punto de vista de la detección, aquellos años resultaron indispensables para cimentar la experiencia y desarrollar nuevas técnicas. Durante la década siguiente, la implementación de esas mejoras permitió triplicar la sensibilidad de los instrumentos. El nuevo experimento, conocido como LIGO Avanzado, empezó a tomar datos en 2015. De hecho, el éxito llegó nada más ponerlo en marcha: las dos detecciones mencionadas se produjeron durante su primer período de observación, entre septiembre de 2015 y enero de 2016. En los próximos tres años, nuevas fases de observación se alternarán con otras de optimización, durante las cuales el experimento aumentará su sensibilidad otras tres veces más.

Los detectores de LIGO Avanzado son los primeros de una futura red global de observatorios de ondas gravitacionales que entrarán en funcionamiento durante los próximos años. Cuando esta red alcance su sensibilidad de diseño, asistiremos a una revolución en nuestra comprensión del universo. Hace unos meses, el 30 de noviembre de 2016, comenzó el segundo período de toma de datos de LIGO Avanzado. A este experimento se unirá en 2017 el detector europeo Virgo Avanzado y, en los años siguientes, el japonés KAGRA y el observatorio LIGO-India.

Lo anterior no es más que el principio. En un futuro cercano, nuevas generaciones de detectores permitirán hacer astronomía de ondas gravitacionales de gran precisión. Entre los proyectos previstos se encuentra el Telescopio Einstein, concebido por varias instituciones europeas, y el observatorio espacial LISA, de la Agencia Espacial Europea, cuya puesta en marcha se espera para la década de los treinta. Una vez en funcionamiento, estos instrumentos ampliarán aún más la nueva ventana al universo gravitacional.

## ONDAS DE ESPACIOTIEMPO

Las ondas gravitacionales constituyen una consecuencia directa de las ecuaciones de campo de la teoría de la relatividad general, formulada en 1915 por Albert Einstein. Tales ondas, que pueden imaginarse como «arrugas» del espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz, son generadas por objetos

### EN SÍNTESIS

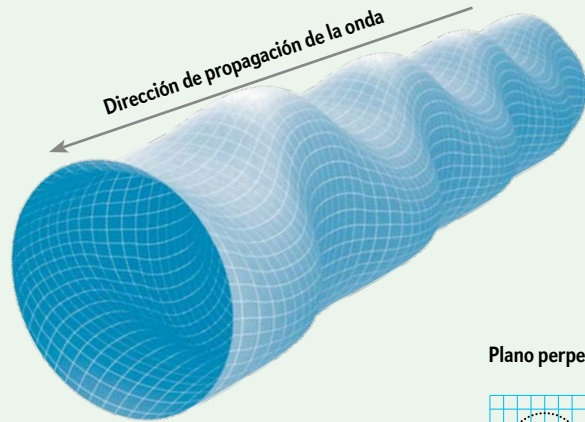
**Las ondas gravitacionales** son perturbaciones del espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Se generan a amplitudes detectables en algunos de los fenómenos más violentos del universo, como las colisiones de agujeros negros.

**Tales ondas constituyen** una consecuencia inevitable de la teoría de la relatividad general de Einstein. Sin embargo, y a pesar de décadas de búsqueda experimental, hasta hace poco no habían sido detectadas de forma directa.

**Ese objetivo fue logrado** hace poco más de un año por el experimento estadounidense LIGO. El éxito fue posible gracias a numerosos avances clave en las técnicas de detección, modelización y análisis de los datos.

## El espacio se mueve

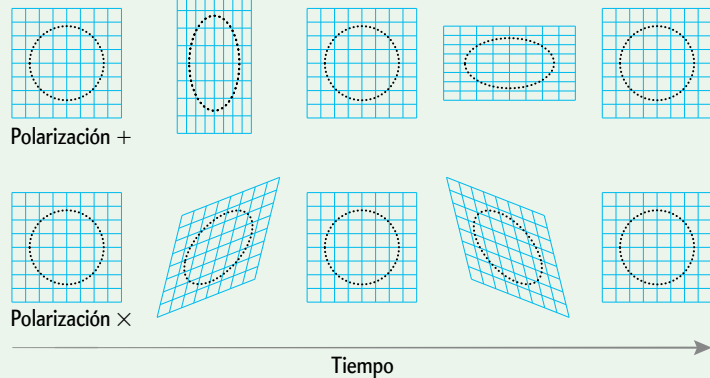
Las ondas gravitacionales constituyen una consecuencia directa de la teoría de la relatividad general de Einstein. Según esta, el espaciotiempo puede entenderse como una entidad maleable cuya geometría se deforma por la presencia de materia y energía: eso origina el fenómeno que percibimos como gravedad. Las ondas gravitacionales son oscilaciones del espaciotiempo mismo causadas por cuerpos masivos acelerados. Dado que el espaciotiempo es extremadamente rígido, las únicas ondas que resulta posible detectar son las producidas por fenómenos astrofísicos violentos, como colisiones de agujeros negros o explosiones de supernova.



Las ondas gravitacionales se propagan a la velocidad de la luz. A su paso, provocan que el espacio se estire y se encoja en el plano perpendicular a la dirección de propagación.

Este esquema muestra la forma que adoptaría un anillo de partículas libres (*negro*) en un plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Cuando esta alcanza el anillo, las partículas se mueven en una combinación de las dos polarizaciones mostradas. El área que encierra el anillo no cambia y no existe movimiento de las partículas en la dirección de propagación de la onda gravitacional.

Plano perpendicular a la dirección de propagación



masivos sujetos a una aceleración sin simetría esférica. El efecto de esas perturbaciones en una zona fija del espacio hace que este se estire y se encoja: esas dilataciones y contracciones del espacio son las que intentan observar los detectores de ondas gravitacionales.

Tales distorsiones son mayores cuanto más masa y energía intervienen en el proceso. Dado que el espaciotiempo es extraordinariamente rígido, las únicas ondas gravitacionales que podemos esperar detectar son aquellas producidas en los fenómenos más violentos del universo, como colisiones de agujeros negros o explosiones de supernova. Con todo, las ondas que llegan a nuestro planeta revisten una intensidad minúscula; en ello radica la dificultad de su detección.

En términos físicos, una onda gravitacional emitida durante la fusión de dos estrellas de neutrones en el cúmulo de Virgo (una agrupación de unas 1500 galaxias cuyo centro se halla a unos 50 millones de años luz, a la cual debe su nombre el experimento italiano) produciría en la Tierra, en detectores de tipo LIGO, una distorsión del orden de  $10^{-18}$  metros: mil veces menor que el tamaño de un protón. LIGO Avanzado, Virgo Avanzado y KAGRA podrán observar ondas gravitacionales generadas por sistemas binarios de estrellas de neutrones hasta distancias de unos 600 millones de años luz; fusiones de agujeros negros

ocurridas a miles de millones de años luz; así como las ondas asociadas a estallidos de rayos gamma, supernovas o estrellas de neutrones en rotación en nuestra galaxia.

La búsqueda experimental de ondas gravitacionales se remonta al trabajo pionero de Joseph Weber, físico de la Universidad de Maryland. En los años sesenta, Weber concibió unos detectores cilíndricos resonantes para medir las oscilaciones que, a su paso, debería causar el «golpeteo» de una onda gravitacional; un fenómeno similar al que tiene lugar en las campanas de una iglesia. Los detectores de LIGO se basan en un principio diferente: usan interferometría láser para medir los cambios en la distancia que separa dos cuerpos libres. En estos interferómetros, de tipo Michelson, dichos cuerpos son los espejos situados en los extremos de los dos brazos del dispositivo. En LIGO, cada uno de los brazos mide cuatro kilómetros, los espejos pesan unos 40 kilogramos y cuelgan de un complejo sistema de suspensión que amortigua las vibraciones generadas por otras fuentes.

La idea de usar interferometría láser para medir el movimiento relativo de espejos libres fue sugerida en 1962 por los físicos soviéticos Mijaíl Gertsenshtein y Vladislav Pustovoi, y, años más tarde y de forma independiente, por Weber y Rainer Weiss, del MIT. En 1972, Weiss identificó la mayor parte de las fuentes de ruido que limitarían la sensibilidad de estos instru-

mentos. A finales de los años setenta y durante la década de los ochenta, las ideas clave para mejorar su funcionamiento fueron sugeridas, entre otros investigadores, por Ronald Drever y Brian Meers, por entonces ambos en la Universidad de Glasgow; así como por Roland Schilling, Lise Schnupp y Albrecht Rüdiger, por entonces en el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica de Garching. Entre los años ochenta y la primera década del siglo XXI, Vladímir Braginsky, de la Universidad de Moscú, y Kip Thorne, del Caltech, determinaron que los interferómetros avanzados funcionarían en un nuevo régimen tecnológico, en el que los espejos macroscópicos se tornarían sensibles a los efectos cuánticos, y propusieron métodos para su operación.

Durante los años noventa del siglo pasado se inició la construcción de las enormes infraestructuras que alojarían la primera generación de detectores interferométricos con brazos de cientos de metros (TAMA, en Japón, y GEO, en Alemania) y varios kilómetros (Virgo, en Italia, y LIGO, en EE.UU.). Fue la experiencia

acumulada con esa primera generación de instrumentos lo que, más tarde, garantizaría el éxito de sus sucesores.

### EL RETO TECNOLÓGICO

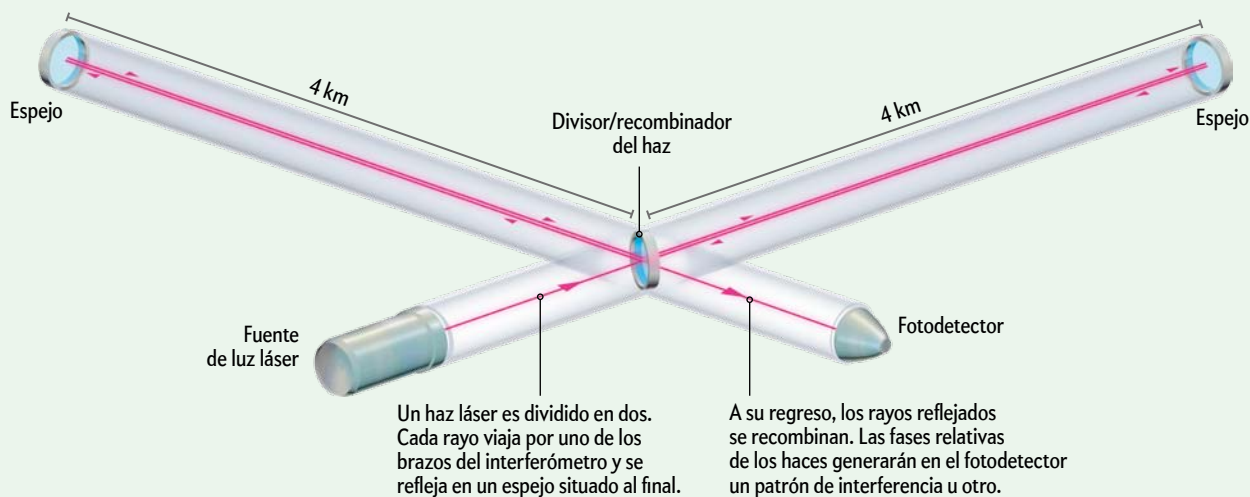
LIGO consta de dos grandes interferómetros situados a 3000 kilómetros de distancia: uno de ellos se encuentra en Hanford, en el estado de Washington, y el otro en Livingston, en Luisiana. Aunque ambos operan de forma independiente, es necesario disponer de al menos dos observatorios a fin de que uno pueda confirmar las observaciones del otro, así como para triangular parcialmente la posición celeste del sistema astrofísico que genera las ondas gravitacionales.

A su paso por la Tierra, una onda gravitacional provocará ligeros cambios periódicos en la longitud de los brazos del interferómetro, estirando uno y encogiendo el otro de forma alternativa. Tales perturbaciones modifican el patrón de interferencia generado por la luz láser que va y vuelve por los

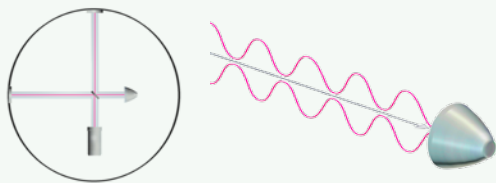
### ASÍ FUNCIONA

## Interferometría con ondas gravitacionales

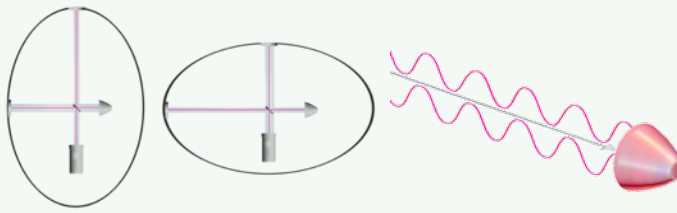
El Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO), en EE.UU., se compone de dos gigantes interferómetros situados a 3000 kilómetros de distancia. Son idénticos y operan de manera independiente, pero ambos son necesarios para que cada uno pueda comprobar las observaciones del otro. Cada instrumento (*arriba, un esquema simplificado*) posee dos brazos perpendiculares de cuatro kilómetros de longitud. Al llegar a la Tierra, las ondas gravitacionales alargan y encogen los brazos del interferómetro (*abajo*). Tales cambios de longitud modifican el patrón de interferencia, lo que permite detectar la onda.



Si la longitud de los brazos no cambia (sin onda gravitacional), los rayos láser se cancelan.



Si la longitud relativa de los brazos cambia (debido al paso de una onda gravitacional), los rayos no se cancelan y se observa una señal.



La distorsión relativa de los brazos del interferómetro no se reproduce a escala

brazos y que, al regresar, se recombina en un solo haz. Con todo, es importante señalar que estos instrumentos no funcionan como una regla de medir distancias, ya que, del mismo modo que las ondas gravitacionales estiran y encogen la longitud de los brazos, hacen lo propio con la longitud de onda de la luz láser que circula por ellos. Se comportan más bien como un cronómetro: dado que la velocidad de la luz es constante, los cambios en el patrón de interferencia permiten deducir las pequeñas diferencias en el tiempo que tarda el láser en propagarse por cada brazo.

Una onda gravitacional puede caracterizarse por dos parámetros: su amplitud y su frecuencia. La primera cuantifica la magnitud que reviste el estiramiento del espacio, y disminuye con la distancia a la fuente. La segunda corresponde al número de oscilaciones por unidad de tiempo y depende del tipo de fenómeno físico que genera la onda. LIGO Avanzado ha sido diseñado para detectar ondas gravitacionales con frecuencias comprendidas entre los 10 y los 10.000 hercios (Hz), pudiendo observar variaciones en la posición de los espejos de hasta  $3,5 \times 10^{-20}$  metros/ $\sqrt{\text{Hz}}$  en el intervalo comprendido entre 100 y 300 Hz, el de máxima sensibilidad. Para alcanzar esta precisión, equivalente a medir el diámetro de nuestra galaxia con una regla del tamaño de una pelota de baloncesto, los instrumentos operan al borde de los límites fundamentales de la física.

Los detectores han sido diseñados para que las diversas perturbaciones (sísmicas o térmicas, por ejemplo) desplacen los espejos menos que la onda gravitacional, así como para que el ruido asociado al proceso de medida no enmascare sus efectos. Con este objetivo, los brazos de los interferómetros y los componentes ópticos están integrados en uno de los mejores sistemas de ultravacío del mundo, con una presión inferior a  $10^{-11}$  atmósferas. De esta forma se minimizan los efectos acústicos y la dispersión de Rayleigh (el fenómeno causante, por ejemplo, del color azul del cielo).

Por su parte, las fuentes de ruido pueden ser de cuatro tipos: sísmico, gravitacional, térmico y cuántico. El ruido sísmico es el debido al movimiento ocasionado por terremotos, vientos, olas oceánicas y la actividad humana. Los instrumentos de LIGO son tan sensibles que, en principio, podrían detectar sismos en cualquier parte del mundo, olas marinas rompiendo a cientos de kilómetros de distancia o el tráfico rodado de las carreteras cercanas. Para evitarlo, los espejos, de 40 kilogramos, cuelgan de un sistema de suspensión en péndulo de cuatro etapas (un péndulo que cuelga de otro, suspendido a su vez de otro, etcétera). Dicho sistema «pasivo» se mantiene fijo gracias a un sistema de aislamiento activo de tres etapas: mediante sensores de posición, velocidad y aceleración, así como dispositivos mecánicos de actuación, este último mantiene fijo el sistema en péndulo, compensando el ruido sísmico local causado por el movimiento de las mareas y la actividad microsísmica de las olas en océanos y lagos. Gracias a ello, el ruido de origen sísmico se ve reducido en diez órdenes de magnitud a 10 Hz.

Otra fuente de ruido corresponde al gradiente gravitacional; es decir, a los ligeros cambios en la fuerza gravitatoria que actúa sobre los espejos. Estos son debidos a las alteraciones en la densidad de la Tierra y de la atmósfera, causadas, a su vez, por las perturbaciones sísmicas, térmicas y de presión atmosférica. El gradiente gravitacional limita la sensibilidad del instrumento en el extremo inferior de frecuencias, en torno a los 10 Hz. Una colección de sismómetros distribuidos en la vecindad de las instalaciones permite estimar el efecto generado en la señal, tras lo cual este puede sustraerse.

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Ondas gravitacionales*, el nuevo número de nuestra colección ESPECIAL (solo en PDF), donde podrás encontrar los mejores artículos publicados en *Investigación y Ciencia* sobre la búsqueda científica y técnica de uno de los fenómenos más elusivos predichos por la relatividad general de Einstein.



[www.investigacionyciencia.es/revistas/especial/numero/26](http://www.investigacionyciencia.es/revistas/especial/numero/26)

El ruido térmico es el ocasionado por las vibraciones microscópicas de los átomos que forman los espejos y los sistemas de suspensión. Enmascara la señal a frecuencias bajas, por debajo de los 40 Hz, y en la banda en la que el instrumento goza de mayor sensibilidad, entre 50 y 100 Hz. Para minimizar sus efectos, en la suspensión se emplean materiales de muy baja disipación mecánica: tanto es así que, si no atenúásemos activamente la oscilación de péndulo de los espejos, esta tardaría 17 años en amortiguarse al 37 por ciento, mientras que las oscilaciones «de violín» (transversales) de las fibras de cristal que sostienen los espejos tardarían 7 días en mitigarse en la misma proporción. Como consecuencia, el ruido térmico se concentra en las resonancias de péndulo, violín y en los modos internos de los espejos, minimizando su efecto en el resto de la banda de detección. La última etapa de la suspensión en péndulo es monolítica (de una sola pieza, lo que evita el rozamiento entre componentes) y se encuentra fabricada en sílice fundido, un cristal de extrema pureza que reduce enormemente las fricciones internas en su estructura microscópica. Este diseño ha resultado clave para mejorar la sensibilidad de LIGO Avanzado con respecto a la de su predecesor en el intervalo de frecuencias de las señales detectadas. La Universidad de Glasgow, donde trabaja uno de nosotros (Sorazu), desempeñó un papel decisivo en su diseño, desarrollo e instalación.

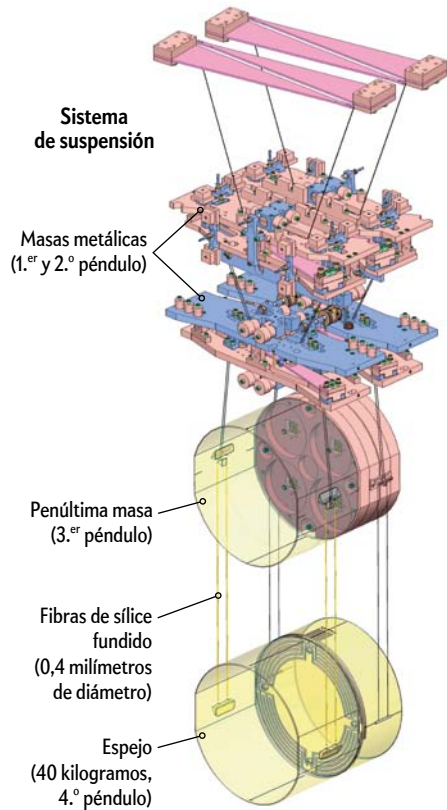
Por último, el ruido cuántico limita la detección a casi todas las frecuencias. Es debido a la naturaleza discreta de la luz y a sus fluctuaciones cuánticas, y constituye una manifestación macroscópica del principio de incertidumbre de Heisenberg. Se divide en dos: el ruido de disparo, o incertidumbre estadística en el «recuento de fotones» llevado a cabo por los fotodetectores, y el de presión de radiación, o las alteraciones en la transferencia de momento a los espejos debido a las fluctuaciones en el número de fotones que los golpean. Este último puede reducirse incrementando la masa de los espejos, mientras que el primero se atenúa aumentando la potencia de la luz láser que circula en el detector. La fuente láser de alta potencia debe, a su vez, satisfacer estrictos requisitos de estabilidad en amplitud, frecuencia y posicionamiento del haz.

### EL RETO DEL ANÁLISIS

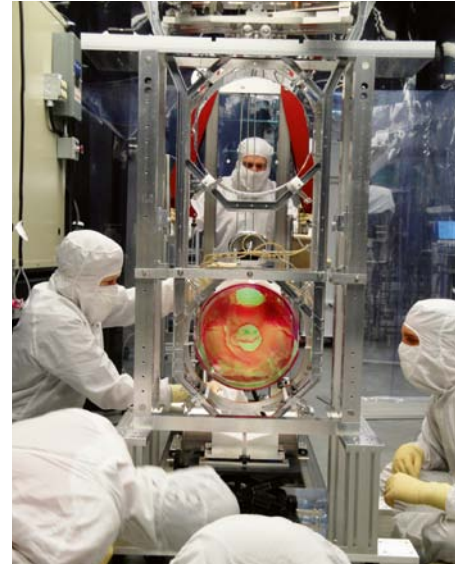
Cada proceso físico produce ondas gravitacionales características y muy distintas entre sí. Para cada una de ellas se han de desarrollar algoritmos específicos, optimizados para aislar la señal entre el ruido del detector. En el caso de la fusión de sistemas binarios de estrellas de neutrones o agujeros negros de masa estelar, la señal puede durar entre décimas de segundo y varios minutos, y la frecuencia de estas ondas aumenta

# Sensibilidad extrema

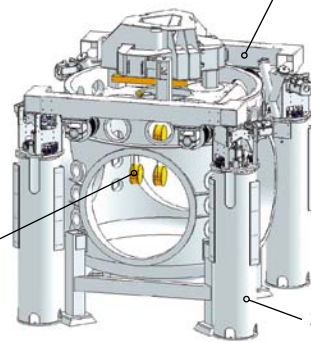
En LIGO, las perturbaciones generadas por el paso de una onda gravitacional típica son minúsculas: del orden de la milésima parte del tamaño de un protón. Para detectarlas, complejos sistemas de control, aislamiento y suspensión de los espejos se encargan de proteger el experimento de casi cualquier perturbación imaginable, desde microseísmos o la agitación térmica de los átomos de los instrumentos hasta ciertos efectos cuánticos. A continuación se muestran algunos detalles.



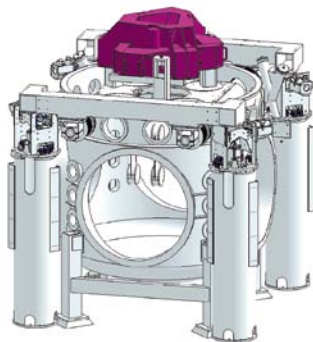
**RUIDO SÍSMICO:** Los instrumentos de LIGO son tan sensibles que, en principio, podrían detectar terremotos en cualquier parte del mundo u olas marinas rompiendo a cientos de kilómetros de distancia. A fin de proteger el experimento de esas perturbaciones externas, los espejos, de unos 40 kilogramos cada uno, cuelgan de un sistema de suspensión en péndulo de cuatro etapas (izquierda). A su vez, dicho sistema se halla integrado en una gran instalación de aislamiento activo (gris, abajo) que contrarresta el ruido sísmico local.



Sistema interno de aislamiento activo



**RUIDO TÉRMICO:** Con el objetivo de corregir la agitación térmica de los átomos de los espejos y sus suspensiones, la última etapa del sistema de suspensión (fotografía) es de una sola pieza y ha sido construida en su totalidad con sílice fundido.



**SISTEMA** del que cuelgan las cuatro etapas de suspensión en péndulo (fotografía) y su posición dentro del conjunto de aislamiento (esquema, violeta).



gradualmente hasta alcanzar un máximo en el momento en que los dos objetos se fusionan. En las supernovas, la magnitud de la radiación gravitacional depende del grado de asimetría del colapso estelar que origina la explosión. Las supernovas constituyen eventos relativamente cortos, por lo que las ondas gravitacionales que emiten son también transitorias. Por último, si se trata de una estrella de neutrones en rotación, la magnitud de la radiación gravitacional depende también del grado de asimetría y de la velocidad a la que gira el objeto. Dado que las estrellas de neutrones pueden permanecer largo tiempo en ese estado asimétrico, y que su velocidad de rotación varía con lentitud, las ondas que generan son continuas y casi monocromáticas. Todas estas señales pueden estar, a su vez, superpuestas con fondos astrofísicos gravitacionales de diverso origen.

Buscar esos eventos en los datos de los interferómetros reviste grandes dificultades. Todo ese cóctel de señales puede llegar simultáneamente desde cualquier lugar. Además, los detectores no pueden observar con la misma sensibilidad en todas las direcciones del cielo; tienen puntos ciegos, si bien estos cambian con el movimiento de la Tierra.

El proceso de operación y tratamiento de datos requiere enormes recursos, tanto humanos como computacionales. Cientos de miles de canales acumulan ingentes cantidades de información, que a menudo han de procesarse en tiempo real para identificar comportamientos irregulares o interferencias ambientales y evitar así interpretaciones erróneas. Ese es el motivo principal por el que LIGO cuenta con dos detectores: solo una verdadera onda gravitacional dejará la misma señal en ambos interferómetros de manera casi simultánea. Operar con una red de dos o más detectores también permite, por triangulación, identificar la dirección del cielo desde la que llega la onda. Esta se calcula a partir de la diferencia de tiempo con que se muestra la señal en uno y otro. Dado que las ondas gravitacionales se propagan a la velocidad de la luz, dichos retrasos suelen ser del orden de milisegundos (es decir, el tiempo que tardaría la luz en llegar de un laboratorio a otro). Cuantos más detectores tenga una red, más precisa será la localización de la fuente y menos probable será que ocurra un evento cuando no haya ningún instrumento operando. Por último, aunque la relación entre el nivel de señal y el de ruido suele ser pequeña, puede incrementarse sumando la señal de los diversos detectores.

La eficiencia y la fiabilidad de los diferentes algoritmos de búsqueda se verifican mediante experimentos de prueba, en los que se insertan artificialmente miles de señales falsas de ondas gravitacionales en los datos reales de los detectores. Estas señales ficticias pueden programarse o introducirse físicamente, moviendo la posición de los espejos e imitando el desplazamiento al que se verían sometidos si el detector fuese atravesado por una onda gravitacional.

Los primeros análisis se realizan mediante algoritmos rápidos que buscan señales transitorias de corta duración, como las generadas en la fusión de un sistema binario o una explosión de supernova. Estos algoritmos analizan los datos casi en tiempo real, identificando, por ejemplo, excesos de energía sin atender a la morfología, la dirección o la duración de la señal. Tales mé-



VISTA AÉREA de las instalaciones de LIGO en Hanford, en el estado de Washington. La fotografía muestra los dos brazos del interferómetro, de cuatro kilómetros de longitud.

todos no proporcionan detalles precisos de las fuentes, pero su extrema rapidez permite que, en un margen de pocos minutos, la detección de una posible señal sea comunicada a diversos observatorios astronómicos, los cuales podrán buscar la radiación electromagnética asociada al mismo sistema astrofísico. En estos momentos, más de 150 instrumentos que cubren todo el espectro electromagnético están dispuestos a hacer seguimientos de candidatos proporcionados por LIGO y Virgo.

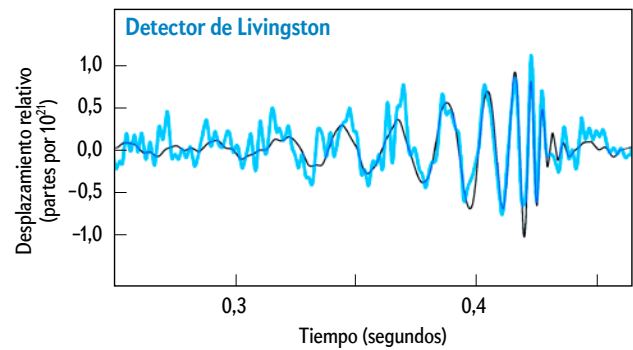
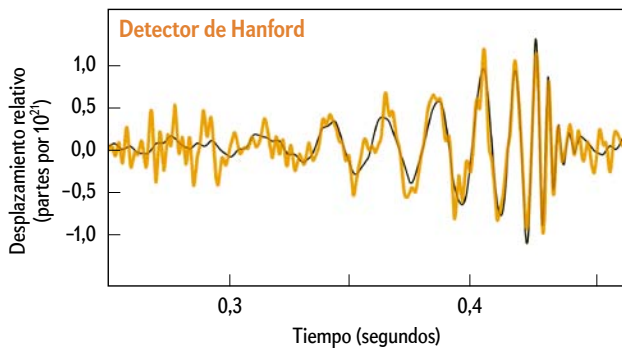
La primera onda gravitacional detectada, GW150914, fue identificada por dichos algoritmos rápidos: estos revelaron que la frecuencia de la señal aumentaba desde 35 Hz hasta aproximadamente 150 Hz en tan solo 0,2 segundos. La identificación de GW151226, en cambio, se produjo 70 segundos después de su llegada a la Tierra. Ello fue posible gracias a una técnica conocida como «filtrado adaptado», en la que los datos se comparan con un gran número de predicciones (catálogos de formas de onda) con el objetivo de encontrar el más similar. El filtrado adaptado se reveló esencial para la detección de GW151226, ya que su relación señal-ruido era menor que la de GW150914.

Análisis posteriores, efectuados con tres métodos independientes de filtrado adaptado, catálogos más precisos de formas de onda, una mejor calibración del instrumento y más información sobre la calidad de los datos, determinaron que ambos eventos habían sido producidos por la fusión de dos agujeros negros de masa estelar. En ambos casos se estableció que la tasa de falsos positivos era inferior a un evento cada 200.000 años, correspondiente a una significación estadística superior a 5 sigmas.

Los cálculos iniciales solo pueden dar estimaciones aproximadas de las propiedades de la fuente, como las respectivas masas de los dos objetos compactos y su velocidad de rotación, así como su orientación, distancia y posición en el cielo. Para determinar estos parámetros con mayor precisión se utilizan técnicas de inferencia bayesiana: se prueban numerosas combinaciones de valores y se compara cuánto se parece la forma de la onda calculada a la señal observada. Este método permite construir un «mapa» de los diferentes parámetros que podrían explicar la observación y calcular la probabilidad que tiene cada conjunto de ser el correcto.

En el caso de GW150914, las técnicas de inferencia bayesiana establecieron que los dos agujeros negros que colisionaron pre-





**GW150914:** La identificación de ondas gravitacionales exige ingentes recursos de análisis y procesamiento de datos, así como numerosas simulaciones previas para poder comparar una posible señal con las predicciones teóricas. Esta imagen muestra la reconstrucción de la señal observada en los detectores de LIGO el 14 de septiembre de 2015 (naranja y azul) y las predicciones teóricas para una colisión de agujeros negros de 36 y 29 masas solares (negro). Puede observarse que, salvo por un desfase de milisegundos, debido al tiempo que las ondas gravitacionales tardan en propagarse entre ambos detectores, ambas señales son prácticamente idénticas entre sí y cuadran casi a la perfección con la predicción teórica. El evento marcó la primera detección de ondas gravitacionales de la historia.

sentaban masas de 36 y 29 masas solares, que el sistema se encontraba a unos 1300 millones de años luz y que de la fusión resultó un agujero negro de 62 masas solares: el mayor agujero negro estelar jamás observado (la masa restante, equivalente a unas 3 masas solares, fue convertida en energía y radiada en forma de ondas gravitacionales). En lo que respecta a GW151226, la señal duró aproximadamente un segundo en la banda de frecuencias a la que los detectores son sensibles, lo que contrasta con los 0,2 segundos de la primera detección. En este caso, la masa de los dos agujeros negros se estimó en 14 y 8 masas solares, el agujero negro resultante tenía una masa de 21 soles, y el evento ocurrió a unos 1400 millones de años luz.

El desarrollo de catálogos basados en las predicciones de la relatividad general resulta imprescindible para estudiar las fusiones de sistemas binarios de agujeros negros. Esta es una de las actividades principales del Grupo de Relatividad y Gravitación de la Universidad de las Islas Baleares (UIB), al que pertenece uno de nosotros (Sintes). Sus fórmulas son empleadas para generar los cientos de miles de patrones de onda usados en el análisis de los datos de LIGO y Virgo. Para calibrar estos catálogos es necesario utilizar simulaciones numéricas, generadas en muchos casos gracias a la infraestructura de la Asociación para la Computación Avanzada en Europa (PRACE) y la Red Española de Supercomputación.

### UNA NUEVA ASTRONOMÍA

Pero la astronomía de ondas gravitacionales va mucho más allá de las colisiones de agujeros negros. Las colaboraciones LIGO y Virgo han desarrollado algoritmos específicos para la búsqueda de supernovas, explosiones de rayos gamma y señales estocásticas de fondo. El grupo de la UIB está volcado en el análisis de los datos de LIGO a la caza de una posible señal gravitacional continua procedente de púlsares (estrellas de neutrones en rápida rotación). Una detección de este tipo aportaría información sobre la materia de la que se componen las estrellas de neutrones: objetos del tamaño de la isla de Menorca pero con una masa mayor que la del Sol, cuyo comportamiento se encuentra gobernado por las leyes cuánticas. No obstante, las ondas gravitacionales procedentes de púlsares son extremadamente débiles, lo que exige integrar los datos tomados durante varios meses o incluso años. Y, mientras que para la búsqueda de señales provenientes de púlsares conocidos puede emplearse la información proporcionada por los telescopios de rayos X

o gamma, en el caso de púlsares desconocidos es inevitable hacer un barrido de todo el espacio de parámetros. El enorme coste computacional de esta tarea ha motivado el desarrollo del proyecto de ciencia ciudadana Einstein@home, que aprovecha el tiempo de inactividad de los ordenadores de todo aquel usuario interesado en participar (<https://einsteinathome.org/es>).

La primera detección directa de ondas gravitacionales constituye, sin duda, uno de los mayores logros científicos del siglo. No solo nos ha permitido validar uno de los pilares de la física moderna, sino que ha abierto una ventana completamente nueva desde la que observar el universo, con el potencial de descubrir sistemas astrofísicos ahora inimaginables.

En los próximos años, a medida que los detectores LIGO y Virgo Avanzados se acerquen a su sensibilidad de diseño, podremos observar de forma regular algunos de los fenómenos más energéticos del universo. Ello permitirá avances revolucionarios en física fundamental, astrofísica y cosmología, y nos facultará para explorar cuestiones de primer orden. Entre ellas, cómo se forman los agujeros negros, cómo se comporta la materia bajo condiciones extremas, si la relatividad general constituye o no la descripción correcta de la gravedad, o mejorar nuestro entendimiento de la materia y la energía oscuras. ☒

#### PARA SABER MÁS

**Ondas gravitacionales: mensajeras del universo.** Gabriela González y Alicia M. Sintes en *Revista Española de Física*, vol. 29, n.º 4, págs. 14-18, 2015.

**Observation of gravitational waves from a binary black hole merger.** Colaboraciones LIGO y Virgo en *Physical Review Letters*, vol. 116, art. n.º 061102, febrero de 2016. Resumen en español: [www.ligo.org/sp/science/Publication-GW150914](http://www.ligo.org/sp/science/Publication-GW150914)

**GW151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence.** Colaboraciones LIGO y Virgo en *Physical Review Letters*, vol. 116, art. n.º 241103, junio de 2016. Resumen en español: [www.ligo.org/sp/science/Publication-GW151226](http://www.ligo.org/sp/science/Publication-GW151226)

Resúmenes científicos de las publicaciones de LIGO en español: [www.ligo.org/sp/science/outreach.php](http://www.ligo.org/sp/science/outreach.php)

#### EN NUESTRO ARCHIVO

**Observatorios de ondas gravitatorias.** A. D. Jeffries et al. en *lyC*, agosto de 1987.

**Ondas en el espacio-tiempo.** W. Wayt Gibbs en *lyC*, junio de 2002.

**La detección de las ondas gravitatorias.** Peter S. Shawha en *lyC*, octubre de 2005.

**Los sonidos del espaciotiempo.** Craig J. Hogan en *lyC*, marzo de 2007.