

Ondas gravitacionales: 10 años después de la primera detección directa

Pep B. Covas y David Keitel

Las ondas gravitacionales han revolucionado nuestra manera de explorar el universo. Tras 10 años de avances, cientos de detecciones de fenómenos cósmicos, como los agujeros negros y las estrellas de neutrones, nos permiten investigar preguntas fundamentales de varios campos de la física.

El 14 de septiembre de 2015 LIGO detectó por primera vez ondas gravitacionales, confirmando una predicción centenaria de Einstein y abriendo una nueva ventana al cosmos. En este artículo repasaremos los hitos de este hallazgo, desde revelar la primera fusión de agujeros negros hasta testear la relatividad general en regímenes de gravedad extrema. También discutiremos la evolución de la astronomía de ondas gravitacionales en estos 10 años, llegando a múltiples detecciones a la semana, y exploraremos los posibles siguientes descubrimientos impulsados por la red global actual y futura de detectores.

Introducción

Albert Einstein predijo la existencia de las ondas gravitacionales en 1916 como una consecuencia directa de su nueva teoría de relatividad general [1], aunque estas ondas ya habían sido postuladas anteriormente por otros, como Heaviside y Poincaré. La comunidad científica internacional no alcanzó un acuerdo sobre su existencia física real hasta la conferencia de Chapel Hill de 1957, donde Feynman propuso el argumento de los abalorios con rozamiento, el cual demostraba intuitivamente que las ondas gravitacionales tienen energía y pueden realizar trabajo [2].

Las ondas gravitacionales son perturbaciones del propio espacio-tiempo que viajan a la velocidad de la luz en forma de onda transversal. Estas ondas interactúan muy levemente con la materia, y por esta razón viajan casi sin distorsión a través del cosmos, revelando información única sobre sus fuentes. Esta leve interacción dificulta a su vez su detección: las deformaciones máximas que son producidas (cuando las ondas llegan a la Tierra) son del orden de una milésima parte del tamaño de un protón, y detectores extremadamente sensibles son necesarios para su observación. Por esta razón, las ondas gravitacionales solo son detectables cuando son generadas por fenómenos astrofísicos muy energéticos, como la fusión de objetos extremadamente compactos (como estrellas de neutrones o agujeros negros).

Las estrellas de neutrones son remanentes estelares extremadamente densos que quedan después de una supernova

producida por una estrella de entre 8 y 30 masas solares. Un agujero negro es una región del espacio-tiempo donde el campo gravitacional es tan intenso que ni la materia ni la radiación pueden escapar de ella. Esta región está descrita por las soluciones de la relatividad general de Karl Schwarzschild (1916) para agujeros negros sin rotación y de Roy Kerr (1963) incluyendo rotación [3,4]. A diferencia de las estrellas de neutrones, que han sido observadas directamente mediante astronomía electromagnética, los agujeros negros son invisibles al no emitir luz. Solo pueden ser detectados si están rodeados de material que emite radiación, como discos de acreción. Esto no es así para la astronomía de ondas gravitacionales, que nos permite detectar agujeros negros incluso sin la mediación de materia circundante.

La primera evidencia indirecta de la existencia de ondas gravitacionales fue debida al púlsar PSR B1913+16. Un púlsar es una estrella de neutrones que es detectada mediante ondas de radio recibidas en la Tierra de manera periódica. Este púlsar, parte de un sistema binario (junto a otra estrella de neutrones), fue detectado por Hulse y Taylor en 1974 mediante el radiotelescopio de Arecibo, Puerto Rico [5]. Con esta detección se pudo medir el ritmo al que decae el periodo orbital del sistema binario, medición que coincidió perfectamente con la predicción hecha por la relatividad general. El periodo orbital decae debido a que la emisión de ondas gravitacionales extrae energía del sistema. Las ondas gravitacionales son generadas debido al cambio en función del tiempo del cuadrupolo del sistema binario a medida que las dos masas orbitan su centro de masas y la distancia entre los dos objetos decrece. Las ondas tienen una frecuencia igual a dos veces la frecuencia orbital y una deformación adimensional del espacio-tiempo dada por [6]:

$$h_{ij}(t) = \frac{2G}{rc^4} \ddot{Q}_{ij}(t - r/c),$$

donde t indica el tiempo, los índices i y j van desde 1 hasta 3, G es la constante gravitacional, c es la velocidad de la luz, r es la distancia a la fuente, y Q es su momento cuadrupolar, con los dos puntos superiores indicando dos derivadas respecto del

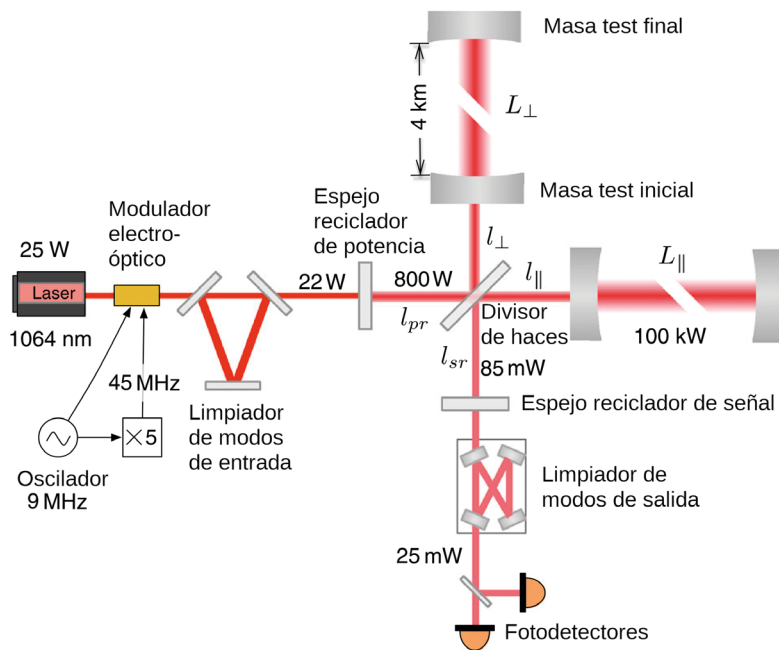


Figura 1. Disposición de un detector LIGO avanzado. Las anotaciones muestran la potencia óptica utilizada durante la primera detección (esta potencia ha aumentado desde entonces). Gráfico adaptado de [9].

tiempo. En 1993 el premio Nobel fue otorgado a estos dos científicos debido al descubrimiento de este sistema binario y por posibilitar la primera detección indirecta de ondas gravitacionales.

Los primeros detectores que fueron usados para intentar detectar ondas gravitacionales de manera directa fueron las llamadas barras de Weber, o barras resonantes. Estas barras (hechas de aluminio al principio) comenzaron a ser construidas por Joseph Weber después de la conferencia de Chapel Hill. Cuando una onda gravitacional con una frecuencia cercana a la frecuencia de resonancia de la barra pasa a través de ella, esta empieza a vibrar y esta vibración se puede detectar mediante un transductor. En 1969, Weber afirmó haber detectado una señal producida por ondas gravitacionales procedentes del centro de la galaxia, pero desafortunadamente esta detección no pudo ser replicada por otros científicos que disponían de barras resonantes similares, y nunca fue considerada como una detección real de ondas gravitacionales [7]. Una parte de la comunidad siguió usando y mejorando (principalmente mediante criogenia) estas barras, pero otra parte de la comunidad empezó a estudiar un camino alternativo hacia la detección de ondas gravitacionales: detectores interferométricos.

Detectores interferométricos

Los detectores interferométricos como LIGO (observatorio de ondas gravitacionales por interferometría láser, por sus siglas en inglés), que fueron sugeridos como posibles detectores de ondas gravitacionales a principios de los años sesenta [8], son actualmente los detectores más sensibles en el rango de frecuencias de aproximadamente 20 a 2000 Hz (en lugar de ser sensibles solo en un rango de frecuencias muy estrecho, como las barras resonantes). Estos interferómetros utilizan luz lá-

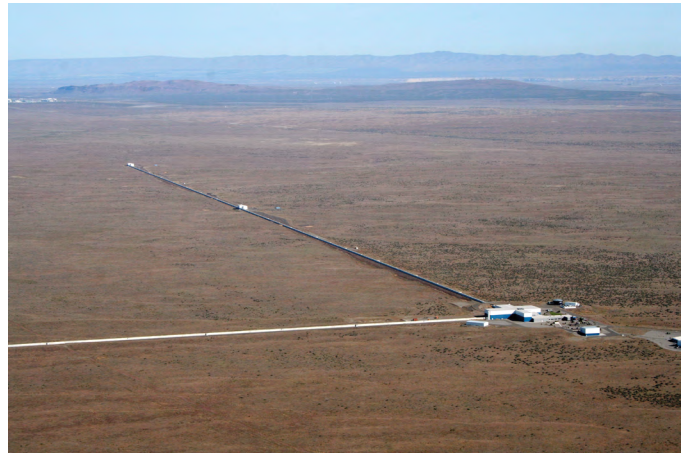
ser, que es dividida en dos haces perpendiculares que viajan a través de dos brazos (de 4 kilómetros, en el caso de LIGO). Al final de estos brazos la luz rebota en espejos suspendidos con una reflectividad muy alta, para volver a juntarse al principio de los brazos. La idea básica es que si pasa una onda gravitacional a través del detector, la fase relativa entre los haces provenientes de cada brazo será ligeramente diferente y un fotodetector podrá registrar el cambio correspondiente en el patrón de interferencia. Un esquema del detector y sus partes se puede ver en la figura 1.

Estos detectores deberían reaccionar solo al paso de ondas gravitacionales, pero también se ven afectados por diversas fuentes de ruido, tanto elementales como las llamadas técnicas [9]. Las tres fuentes de ruido elementales más importantes son:

- ruido sísmico (importante en frecuencias menores a unos 20 Hz): el suelo está en constante vibración, haciendo que todos los componentes del detector se muevan.
- ruido térmico (importante en frecuencias medias, de unos 20 a 200 Hz): los componentes ópticos del detector están a temperatura finita, haciendo que sus átomos estén vibrando constantemente.
- ruido cuántico (importante en frecuencias mayores a unos 200 Hz): los fotones del láser están sujetos a fluctuaciones cuánticas, haciendo que tengan un comportamiento estadístico.

Estas fuentes de ruido (además de muchas otras) están afectando al detector constantemente y forman lo que se denomina el suelo de ruido, que describe la sensibilidad del detector en función de la frecuencia. Las fuentes de ruido técnicas (como el ruido generado por el bucle de retroalimentación electrónico que intenta mantener la longitud del detector constante) se suman a las elementales, complicando aún más la detección.

Al inicio de los años 2000 se había conseguido construir 6 detectores interferométricos diferentes: dos detectores en Estados Unidos de 4 km (ver figura 2) y uno de 2 km ("Initial LIGO"), un detector en Italia de 3 km (Virgo), un detector en Alemania de 600 m (GEO600), y un detector en Japón de 300 m (TAMA). Los observatorios LIGO, que son los más sensibles debido principalmente a su longitud, empezaron a observar el 23 de agosto del 2002. En esta primera etapa estos detectores llevaron a cabo múltiples periodos científicos, mientras que su sensibilidad se iba incrementando entre cada uno de estos debido a diversas mejoras, como la potencia del láser, el recubrimiento de los espejos, etc. En el año 2010 se terminaron las operaciones con estos detectores de primera generación, y se llevaron a cabo mejoras sustanciales hasta el año 2015, donde empezó la nueva etapa con detectores de segunda generación, con una sensibilidad aproximadamente 10 veces ma-



yor. Uno de los cambios más importantes en LIGO fue el sistema de suspensión de los espejos, que pasó de ser un péndulo simple con fibras de acero y un espejo de 11 kg a ser un péndulo cuádruple con fibras de cuarzo fundido y un espejo de 40 kg.

GW150914

El primer periodo de observación con los nuevos detectores tenía que empezar el 18 de septiembre de 2015, pero antes había un periodo llamado “de ingeniería” para comprobar que el detector estaba funcionando correctamente y empezar a recoger datos. Afortunadamente, el 14 de septiembre los dos detectores “Advanced LIGO” estaban en funcionamiento normal, ya que ese día marcó el inicio de la revolución de las ondas gravitacionales mediante la detección de GW150914.

Esta onda gravitacional, con una duración de décimas de segundo, fue detectada mediante diferentes algoritmos computacionales que supervisan constantemente el flujo de datos de los detectores. El primer algoritmo en detectar GW150914 (los números del nombre indican la fecha en que fue detectada, año/mes/día) fue uno diseñado para detectar cualquier tipo de ráfagas de ondas gravitacionales, sin relación con ningún modelo teórico específico. Este algoritmo pudo detectar la señal porque esta tenía una relación señal-ruido bastante alta. Por esa razón, muchos investigadores de LIGO-Virgo pensaron inicialmente que era una señal artificial, añadida manualmente por los científicos de la colaboración para testear los procedimientos de detección, pero se confirmó que no había podido ser, ya

que el sistema encargado de ellas aún no estaba en funcionamiento.

La mayoría del conocimiento que derivamos de esta señal viene de la técnica llamada *matched-filtering*, que se basa en comparar los datos obtenidos por el detector con un patrón teórico de onda gravitacional, el cual depende de los diversos parámetros que definen la fuente (masas y espines de los agujeros negros, posición en el cielo, orientación del sistema binario, distancia, etc.). Estos patrones teóricos se obtienen a partir de la relatividad general, usando algunas aproximaciones (como las llamadas posnewtonianas) para poder derivar resultados analíticos que predigan la evolución del sistema y su emisión de ondas gravitacionales. Estas aproximaciones se calibran con los resultados de simulaciones de relatividad numérica, que son más precisas pero tan costosas computacionalmente que necesitan los mejores superordenadores disponibles (y aún así solo se pueden generar para un número reducido de combinaciones de parámetros).

A partir de la relatividad general y en el orden dominante del desarrollo posnewtoniano, se puede derivar que la onda gravitacional procedente de un sistema binario (durante la fase inicial, cuando los agujeros negros aún están bastante separados) tiene una frecuencia en función del tiempo que viene dada por [6]:

$$\frac{df}{dt} = \frac{96}{5} \pi^{8/3} \left(\frac{GM}{c^3} \right)^{5/3} f^{11/3},$$

donde f es la frecuencia de la onda gravitacional y M es la masa *chirp*, una combinación de las dos masas del sistema binario. A diferencia de la detección indirecta hecha por Hulse y Taylor, en el caso de las detecciones hechas por los interferó-

Figura 2. LIGO Livingston (izquierda) y LIGO Hanford (derecha). Créditos: Caltech/MIT/LIGO Lab.

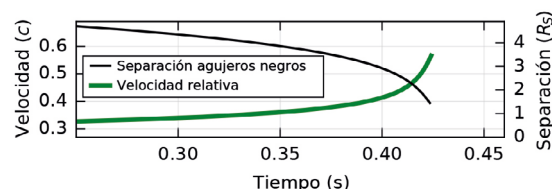
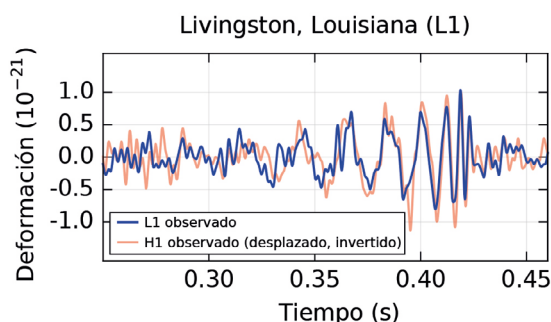


Figura 3. Deformación adimensional en función del tiempo observada en los detectores Livingston (azul) y Hanford (rojo) (izquierda). Velocidad (verde) y separación (negro, en unidades del radio de Schwarzschild) de los agujeros negros en función del tiempo (derecha). Gráficos adaptados de [10].

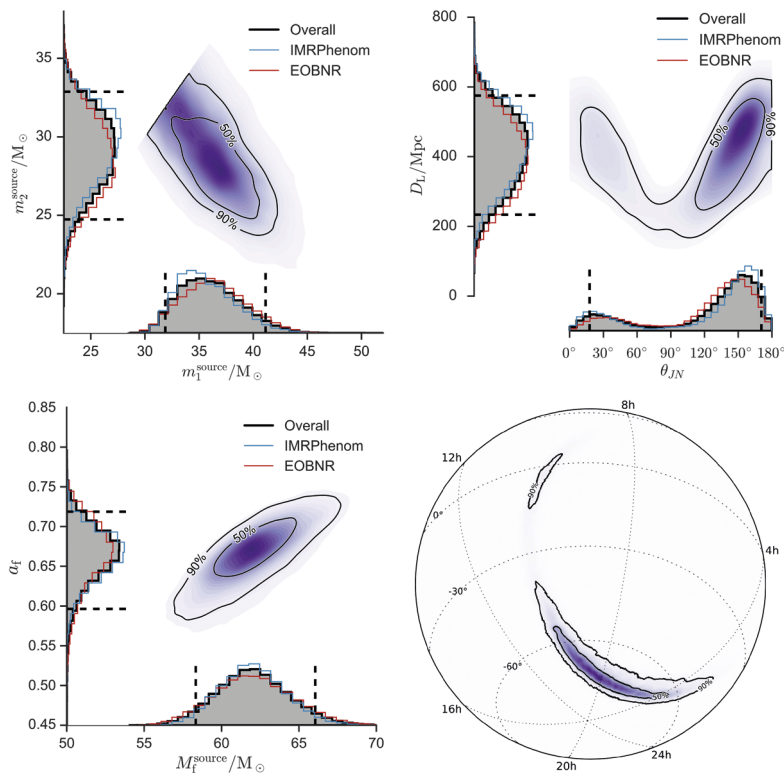


Figura 4. Distribuciones de diferentes parámetros de GW150914 para los dos modelos teóricos analizados [11,12,13]. Arriba izquierda: masas (en masas solares) de los dos agujeros negros. Arriba derecha: ángulo de inclinación del sistema binario y distancia al sistema. Abajo izquierda: masa y espín (como fracción de c) del agujero negro final. Abajo derecha: posición en el cielo (ascensión recta y declinación en coordenadas ecuatoriales) del sistema. Gráficos adaptados de [14].

metros se puede observar la evolución del sistema hasta el final, donde los agujeros negros se tocan y se fusionan. En el caso de GW150914, el patrón teórico coincidía perfectamente con los datos recogidos por el detector, como la figura 3 muestra.

Después de la detección inicial los detectores continuaron funcionando normalmente, y el periodo de observación oficial empezó. Después de unas semanas, se habían recogido datos suficientes para poder hacer una estimación de la significancia estadística del evento, que resultó ser mayor que las 5 sigmas que se requieren habitualmente [10]. A partir de aquí empezaron los análisis en profundidad de todos los subsistemas del detector, para comprobar si alguna fuente de ruido podría haber causado la señal detectada. Después de realizar exhaustivas investigaciones que confirmaron el origen astrofísico de la señal, el descubrimiento se anunció el 11 de febrero de 2016.

Los diferentes parámetros (y sus correlaciones) que describen el sistema fueron medidos mediante la inferencia Bayesiana, comparando millones de patrones teóricos con los datos observados e identificando los más compatibles, obteniendo resultados ejemplificados por la figura 4.

Según estos resultados, la señal que se detectó fue originada por un sistema binario situado a unos 410^{+160}_{-180} megaparsecs de dos agujeros negros con masas de $29,1^{+3.8}_{-4.3}$ y $35,8^{+5.3}_{-3.9}$ masas solares (con una confianza estadística del 90 %). Después de la fusión quedó un agujero negro de unas $62^{+4.1}_{-3.7}$ masas solares, y se puede ver que la suma de las masas iniciales no es igual a la masa final, ya que una parte de la energía fue emitida en forma de ondas gravitacionales (aproximadamente

unos 5×10^{47} J, usando la ecuación relativista $E = mc^2$ y 3 masas solares). La posición en el cielo del sistema se puede determinar mediante el tiempo al que llega la señal a diferentes detectores, en el caso de que la observación se haya hecho con más de un detector, como fue el caso de GW150914. Conociendo el tiempo que pasó entre la detección en LIGO Livingston y LIGO Hanford (separados por 3002 km), que fue de unos $6.9^{+0.5}_{-0.4}$ milisegundos, se pudo determinar la región en el cielo del evento en un área de 610 grados al cuadrado. También se pudo medir la rotación de cada agujero negro, que resultó ser bastante pequeña y alineada con el momento angular del sistema binario, en contraste con la rotación del agujero negro final, que tiene una velocidad de aproximadamente el 67^{+5}_{-7} % de la velocidad de la luz. A partir del evento se pudieron hacer otras estimaciones, como por ejemplo la relacionada a la tasa de fusión de agujeros negros, que se estimó en un rango de aproximadamente 10–100 fusiones por gigaparsec por año.

Esta primera detección resultó fundamental al validar simultáneamente múltiples predicciones teóricas:

- la primera detección directa de ondas gravitacionales, confirmando la predicción teórica, y probando que los detectores interferométricos funcionan correctamente.
- la existencia de agujeros negros de masas similares a la del Sol, y la existencia de sistemas binarios de agujeros negros (también probando que estos sistemas binarios pueden fusionarse en tiempos inferiores a la edad del universo).
- la relatividad general funciona bien en el régimen de gravedad extrema, hecho comprobado mediante una batería de tests que usan formas de onda diferentes a las predichas por la relatividad general, y que no encontraron ninguna evidencia a favor de estos patrones modificados.

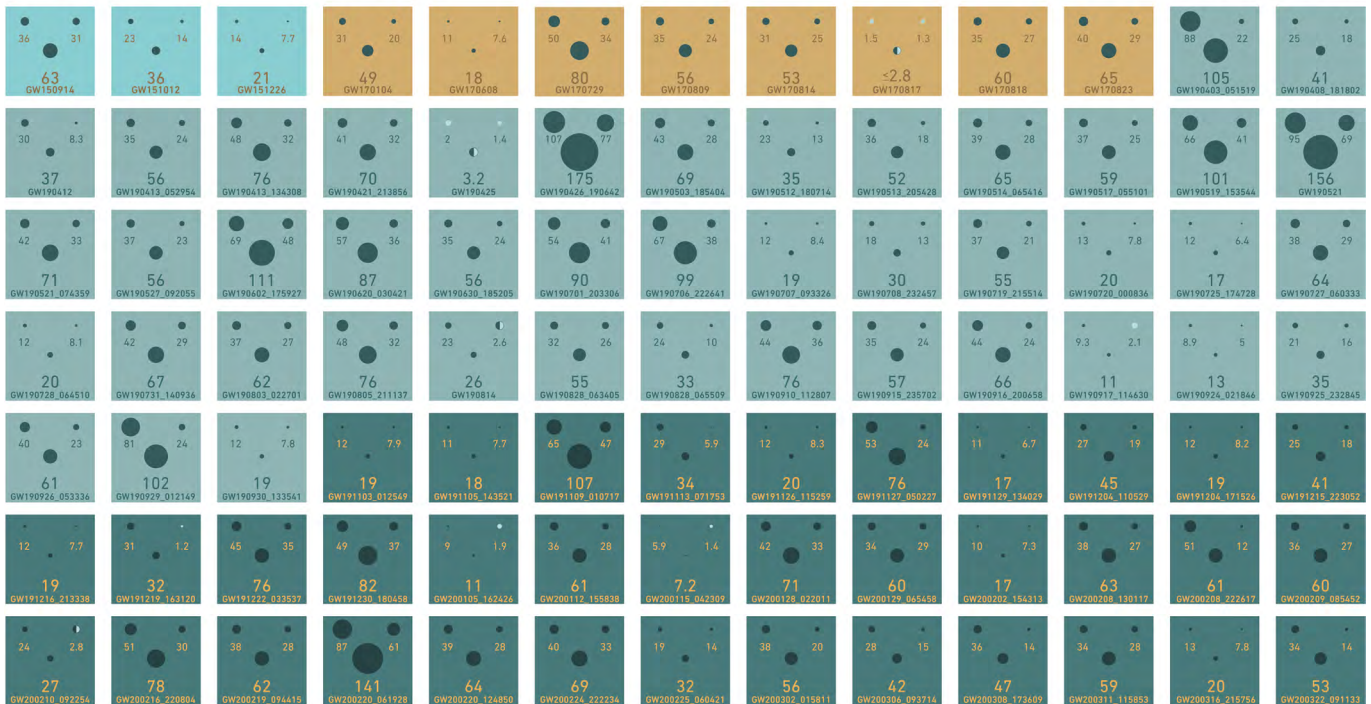
El impacto presente y futuro

GW150914 marcó el inicio de la astronomía de ondas gravitacionales, un nuevo campo que ha seguido dando nuevos descubrimientos. Durante el primer periodo de observación (O1) se detectaron dos señales más de ondas gravitacionales procedentes de sistemas binarios de agujeros negros (GW151012 y GW151226). En un total de cuatro periodos de observación hasta ahora (uno todavía en curso) se han detectado más de 300 señales diferentes (algunas mostradas en la figura 5), entre ellas más fusiones de agujeros negros (incluyendo sistemas binarios masivos como GW190521 y GW231123 con más de 100 masas solares), fusiones de agujeros negros y estrellas de neutrones (como GW200115), y fusiones de dos estrellas de neutrones (GW170817 y GW190425). Esta diversidad de detecciones ha ampliado significativamente nuestro conocimiento en múltiples

01 2015-2016

02 2016-2017

03a+b 2019-2020



ámbitos, desde la población de agujeros negros y estrellas de neutrones en el universo hasta los límites de precisión de la relatividad general. A la red de detectores también se sumaron desde el periodo de observación 02 la versión avanzada de Virgo y en partes de 03 y 04 el nuevo detector subterráneo de 3 km en Japón, KAGRA.

Un hito especialmente llamativo fue la primera detección de una fusión de dos estrellas de neutrones, GW170817, que marcó el inicio de la astronomía multimensajera [15], ya que la señal electromagnética fue detectada por unos 70 observatorios, tanto en la Tierra como en el espacio. Este sistema binario estaba localizado a unos 40 megaparsecs (mucho más cercano que GW150914), y las estrellas de neutrones tenían masas de entre 1,36-1,60 y 1,17-1,36 masas solares (con una confianza estadística del 90 %). Esta señal pudo ser detectada por unos 100 segundos, mucho mayor que la fracción de segundo que GW150914 duró. Al comparar la señal recibida en rayos gamma con la onda gravitacional se pudo comprobar que las ondas gravitacionales viajan a la misma velocidad que la luz, con una diferencia máxima de entre -3×10^{-15} y 7×10^{-16} veces la velocidad de la luz.

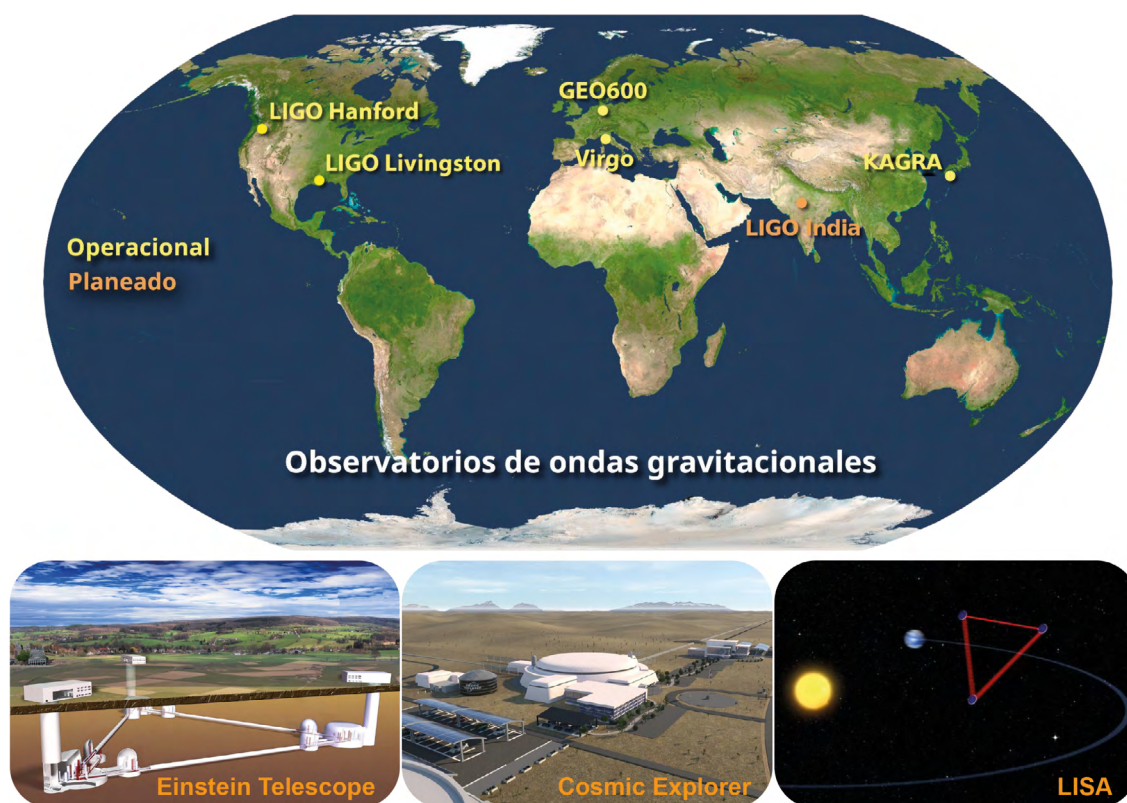
Debido a la primera detección de ondas gravitacionales, el premio nobel de 2017 se dividió en dos partes, una mitad otorgada a Rainer Weiss y la otra mitad conjuntamente a Barry C. Barish y Kip S. Thorne. Estos tres científicos fueron pioneros en el campo de las ondas gravitacionales, contribuyendo respectivamente al análisis de las diferentes fuentes de ruido de los detectores y su diseño, al modelado teórico de las distintas

fuentes astrofísicas de ondas gravitacionales, y a la organización efectiva de la colaboración internacional LIGO.

Aunque ya se han descubierto más de 300 señales, todas ellas comparten un mismo tipo: coalescencias de binarias compactas (CBC). Estas señales se caracterizan por su corta duración (del orden de segundos a minutos en el rango de frecuencia de los detectores actuales) y por su conocida evolución en el plano frecuencia-tiempo. Además de este tipo de onda gravitacional se suele hablar de al menos tres tipos adicionales, de los que no se ha descubierto aún ninguna onda. También de corta duración pero con un patrón de onda desconocido son las ráfagas, como por ejemplo las ondas creadas durante una supernova. Con una duración muy larga (virtualmente infinita) y un patrón de ondas más sencillo son las ondas continuas, como por ejemplo las ondas generadas por una estrella de neutrones en rotación con una asimetría alrededor de su eje de rotación. Finalmente tenemos el fondo estocástico de ondas gravitacionales, como por ejemplo la suma de todas las fusiones de agujeros negros que son demasiado débiles para ser detectadas individualmente (actualmente la colaboración IPTA ha señalado que existen evidencias de la detección de un fondo estocástico de muy baja frecuencia [16]). Todos estos tipos de ondas gravitacionales esperan a ser detectados, y cada uno de ellos nos aportará información adicional que ayudará a resolver otros misterios, como las ondas gravitacionales originadas por el Big Bang, que producen un fondo estocástico, o la ecuación de estado de las estrellas de neutrones, que se puede estudiar mediante las ondas continuas.

Figura 5. Detecciones de ondas gravitacionales en los periodos de observación 01-03, indicando las masas (en masas solares) de los componentes del sistema binario y del remanente de la fusión. El color negro indica un agujero negro, el color blanco indica una estrella de neutrones. Gráfico adaptado de un póster de la colaboración LIGO-Virgo-KAGRA y de OzGrav.

Figura 6. Mapa de la red actual de detectores láser-interferométricos, y tres detectores planeados para el futuro: Einstein Telescope, Cosmic Explorer, y LISA. Créditos: Caltech, LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration/ Einstein Telescope Consortium/Angela Nguyen, Virginia Kitchen, Eddie Anaya, California State University Fullerton, Cosmicexplorer.org/ Max Planck Institute for Gravitational Physics (Albert Einstein Institute), Milde Marketing Science Communication, Exozet Effects.



Está planeado que el periodo de observación actual (O4) acabe a finales de 2025, seguido por la instalación de nuevas mejoras instrumentales y otro periodo de observación (O5). Concretamente, para los detectores “Advanced LIGO” estas mejoras (con nombre A+) están relacionadas con una reducción del ruido cuántico y sísmico (además del ruido técnico), que podrían incrementar su sensibilidad en un factor dos. Otras mejoras sustanciales consideradas más allá de O5 (con nombre A#), cómo usar espejos más masivos y con mejores recubrimientos, y más potencia en los láseres, contribuirán a incrementar la sensibilidad de LIGO más allá de la sensibilidad de diseño planeada inicialmente para esta segunda generación de detectores, posiblemente en otro factor dos. Además de estas mejoras y de planes similares para Virgo y KAGRA, se espera que en 2030 esté en funcionamiento un nuevo detector interferométrico en India con el mismo diseño que los detectores A+.

En el largo plazo existen planes para el diseño y la construcción de detectores interferométricos terrestres de tercera generación, llamados “Einstein Telescope” (en Europa) y “Cosmic Explorer” (en Estados Unidos). Estos detectores prometen mejorar la sensibilidad en aproximadamente un orden de magnitud en comparación a la sensibilidad de diseño de los detectores actuales, mejora que incrementa mucho las probabilidades de detectar nuevos fenómenos y de realizar tests aún más precisos de la relatividad general. Se planea que estos detectores estén en funcionamiento alrededor del año 2035. Además, la agencia espacial

europea ha confirmado la misión LISA, que consiste en tres satélites separados por millones de kilómetros en formación triangular. Este detector será sensible a un rango de frecuencias distinto al de los interferómetros terrestres (de unos 0,1 mHz a 0,1 Hz), complementando los detectores actuales y siendo sensible a otras fuentes de ondas gravitacionales, como agujeros negros más masivos o sistemas binarios con dos enanas blancas. Los detectores actuales y planeados se pueden ver en la figura 6. Todos estos planes y mejoras muestran el gran porvenir de la astronomía de ondas gravitacionales, con GW150914 marcando el inicio de esta nueva manera de estudiar el universo.

Referencias

- [1] A. EINSTEIN, Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation, *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, **688** (1916).
- [2] D. RICKLES y C. M. DEWITT, The Role of Gravitation in Physics: Report from the 1957 Chapel Hill Conference, *Berlin: Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften* (2011).
- [3] K. SCHWARZSCHILD, Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie, *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, **189** (1916).
- [4] R. KERR, Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics, *Physical Review Letters* **11**, 237 (1963).
- [5] R. A. HULSE y J. H. TAYLOR, Discovery of a pulsar in a binary system, *Astrophysical Journal* **195**, L51 (1975).

- [6] LIGO Scientific Collaboration y Virgo Collaboration, The basic physics of the binary black hole merger GW150914, *Annalen der Physik (Berlin)* **529**, 1600209 (2017).
- [7] J. L. CERVANTES-COTA *et al.*, A Brief History of Gravitational Waves, *Universe* **2**(3), 22 (2016).
- [8] M. E. GERTSENSHTEIN y V. I. PUSTOVORT, On the Detection of Low-Frequency Gravitational Waves, *Soviet Physics JETP* **16**, 433 (1962).
- [9] D. V. MARTYNOV *et al.*, Sensitivity of the Advanced LIGO detectors at the beginning of gravitational wave astronomy, *Physical Review D* **93**, 112004 (2016).
- [10] LIGO Scientific Collaboration y Virgo Collaboration, Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Physical Review Letters* **116**, 061102 (2016).
- [11] S. HUSA *et al.*, Frequency-domain gravitational waves from nonprecessing black-hole binaries. I. New numerical waveforms and anatomy of the signal, *Physical Review D* **93**, 044006 (2016).
- [12] S. KHAN *et al.*, Frequency-domain gravitational waves from nonprecessing black-hole binaries. II. A phenomenological model for the advanced detector era, *Physical Review D* **93**, 044007 (2016).
- [13] A. TARACCHINI *et al.*, Effective-one-body model for black-hole binaries with generic mass ratios and spins, *Physical Review D* **89**, 061502 (2014).
- [14] LIGO Scientific Collaboration y Virgo Collaboration, Properties of the Binary Black Hole Merger GW150914, *Physical Review Letters* **116**, 241102 (2016).
- [15] LIGO Scientific Collaboration *et al.*, Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, *The Astrophysical Journal Letters* **848**, 2 (2017).
- [16] J. ANTONIADIS *et al.*, The International Pulsar Timing Array second data release: Search for an isotropic gravitational wave background, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **510**, 4 (2022).

Pep B. Covas

Departament de Física – IAC3,
Universitat de les Illes Balears

**David Keitel**

Departament de Física – IAC3,
Universitat de les Illes Balears


madrimasd.org/feriamadridesciencia

Organiza



19-21 2026
marzo | **LA NAVE**
MADRID

Entrada gratuita



XV FERIA 2026
madridesciencia

Colaboran



Fundación Pfizer

