

# Observación de ondas gravitacionales procedentes de la fusión de un sistema binario de agujeros negros

La teoría de la relatividad general de Einstein, publicada por primera vez hace ya un siglo, fue descrita por el físico Max Born como “el mayor hito del pensamiento humano sobre la naturaleza”. En este artículo se describen dos descubrimientos de extrema relevancia científica ambos directamente relacionados con algunas de las predicciones más significativas de la teoría de Einstein: la primera detección directa en la Tierra de ondas gravitacionales y la primera observación de la colisión y fusión de una pareja de agujeros negros.

El evento catastrófico que produjo la onda gravitacional GW150914, tuvo lugar en una galaxia lejana a más de mil millones de años luz de la Tierra. Fue observado el 14 de septiembre de 2015 por los dos detectores del Observatorio de Interferometría Láser de Ondas Gravitacionales (LIGO, por sus siglas en inglés), indiscutiblemente uno de los instrumentos científicos más sensibles jamás construido. En dicha observación, LIGO estimó que el pico de energía liberado en forma de ondas gravitacionales durante los momentos finales de la fusión de los agujeros negros fue diez veces mayor que la luminosidad combinada de todas las galaxias en el universo observable. Este importante descubrimiento marca el inicio de una excitante nueva era en la astronomía y, al mismo tiempo, abre una ventana de observación al universo totalmente nueva en forma de ondas gravitacionales.

## Introducción y contexto

Las ondas gravitacionales son oscilaciones del espacio-tiempo originadas en algunos de los fenómenos más violentos del cosmos, como colisiones y fusiones de estrellas masivas compactas. Su existencia fue predicha por Einstein en el año 1916, cuando demostró que los objetos masivos acelerados debían distorsionar el espacio-tiempo en forma de radiación gravitacional que se alejaba de la fuente. Estas oscilaciones viajan a través del universo a la velocidad de la luz, llevando consigo información sobre sus orígenes, así como inestimables pistas acerca de la naturaleza de la gravedad misma.

Durante décadas los astrónomos han acumulado evidencias claras de que las ondas gravitacionales pueden existir, principalmente mediante el estudio de su efecto en las órbitas de parejas de estrellas ligadas gravitatoriamente y que observamos en nuestra galaxia. Los resultados de estos estudios indirectos coinciden extremadamente bien con los de la teoría de Einstein – se observa exactamente el mismo decaimiento orbital predicho por la teoría y que se debe a la pérdida de energía transportada por las ondas gravitacionales. Por ello, la detección directa de las ondas gravitacionales en la Tierra ha sido sumamente anhelada por la comunidad científica ya que nos proporciona nuevas y más robustas formas de testar la relatividad general bajo las condiciones más extremas, abriéndose una vía totalmente nueva de explorar el universo.

En el mismo año que Einstein predijo la existencia ondas gravitacionales, el físico Karl Schwarzschild demostró que el trabajo de Einstein admitía la existencia de agujeros negros: extraños objetos tan densos y compactos que ni la luz puede escapar su atracción gravitatoria. Aunque por definición no podemos “ver” la luz que proviene de un agujero negro, los astrónomos han reunido una importante colección de evidencias de su existencia mediante el estudio de los efectos que los candidatos a agujeros negros producen en sus alrededores. Por ejemplo, se cree que la mayoría de las galaxias, incluyendo la Vía Láctea, contienen un agujero negro supermasivo en su centro - con masas de millones o incluso miles de millones mayores a la masa del Sol. También existen candidatos a agujeros negros con masas más pequeñas (desde unas pocas veces, hasta una docena de veces la masa del Sol), que podrían proceder de los restos de estrellas muertas que han sufrido una explosión catastrófica conocida como supernova de colapso de núcleo.

Además de este substancial progreso en la observación indirecta de agujeros negros, nuestro conocimiento teórico de estos extraños objetos ha sido drásticamente mejorado – en esta última década se han obtenido notables avances en nuestra capacidad de modelar parejas de agujeros negros (llamadas binarias de agujeros negros) desde una serie de órbitas cercanas hasta su fusión final. Estos modelos numéricos nos han permitido crear patrones de ondas gravitacionales muy precisos – es decir, modelos de ondas gravitacionales emitidas por agujeros negros que evolucionan a medida que se acercan para finalmente fundirse en un único y mayor agujero negro - de acuerdo con las predicciones de la relatividad general. Así pues, una observación directa de una fusión de agujeros negros ofrece un poderoso laboratorio cósmico para testar la teoría de Einstein.

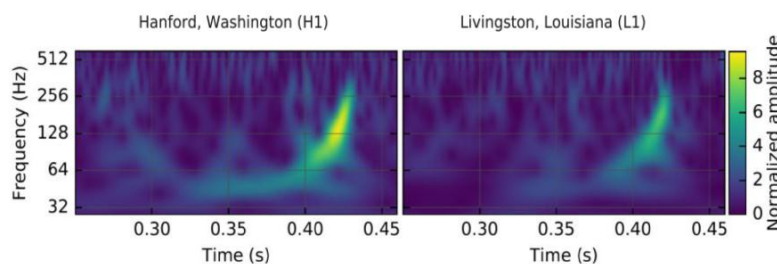


Figura 1. (Adaptada de la figura 1 de nuestra publicación). El evento GW150914 observado por los detectores de LIGO Hanford (H1, panel izquierdo) y LIGO Livingston (L1, panel derecho). Las dos figuras muestran la evolución temporal de la amplitud (ver abajo) y frecuencia (en hercios, o número de ciclos de ondas por segundo) de la onda gravitacional observada en cada detector de LIGO. En las figuras se muestra

*como la frecuencia de GW150914 crece monótonamente, desde 35 Hz hasta aproximadamente 150 Hz durante dos décimas de segundo. GW150914 fue detectado primero en L1 y aproximadamente siete milisegundos después en H1 – consistente con el tiempo que tarda la luz (y las ondas gravitacionales) en viajar entre los dos detectores.*

## Los detectores LIGO

LIGO es el mayor observatorio de ondas gravitacionales y uno de los experimentos de la física más sofisticados en el mundo. Compuesto por dos enormes interferómetros láser localizados a miles de kilómetros de distancia, uno en Livingston, Louisiana y otro en Hanford, Washington State, LIGO usa las propiedades físicas de la luz y el espacio mismo para detectar las ondas gravitacionales - un concepto que fue propuesto por primera vez en los años 60 y 70. En el año 2000 ya se disponía de un conjunto completo de interferómetros, incluyendo TAMA300 en Japón, GEO600 en Alemania, LIGO en los Estados Unidos y Virgo en Italia. Entonces, haciendo uso de las combinaciones de estos detectores, se hicieron observaciones conjuntas entre los años 2002 y 2011 sin obtenerse ninguna detección de ondas gravitacionales. Tras realizarse mejoras importantes, en 2015 los detectores de LIGO empezaron a operar como "Advanced LIGO": el primero de una red global de detectores significativamente más sensibles.

Un interferómetro como LIGO consiste en dos brazos perpendiculares (en el caso de LIGO estos brazos son de 4km) en los que un rayo láser es enviado y reflejado por espejos (suspendidos como masas de prueba) al final de los brazos. Cuando una onda gravitacional pasa por el detector, el ensanchamiento y encogimiento del espacio hace que los brazos del interferómetro se alarguen y encojan alternativamente, uno haciéndose más largo mientras el otro se hace más pequeño y viceversa. A medida que los brazos cambian de longitud, los rayos láser viajan diferentes distancias a través de los brazos - lo que significa que los dos rayos ya no se encuentran sincronizados (o en fase) y se produce lo que llamamos patrones de interferencia. De ahí a que llamemos a los detectores interferómetros.

La diferencia entre la longitud de los dos brazos es proporcional a la amplitud de la onda gravitacional que lo está atravesando, o amplitud de deformación, siendo esta amplitud extremadamente pequeña. En una onda gravitacional típica, suponemos que dicha amplitud de deformación debe de ser aproximadamente una entre diez mil veces menor que el tamaño de un protón! Aún así los interferómetros LIGO son tan sensibles que pueden medir valores tan sumamente pequeños.

La figura 2 muestra un diagrama simplificado de un detector Advanced LIGO.

Para detectar con éxito una onda gravitacional como GW150914 los detectores de LIGO necesitan combinar una magnífica sensibilidad con la habilidad de aislar las señales reales de las fuentes de ruido instrumental: pequeñas perturbaciones, debidas por ejemplo a efectos ambientales o a los propios instrumentos, podrían imitar - o simplemente superar - los patrones de ondas gravitacionales que estamos buscando. Esta es una de las razones principales por las que hay dos detectores Advanced LIGO, ya que nos permite distinguir las ondas gravitacionales de los mencionados efectos ambientales e instrumentales: solo una señal de una onda gravitacional real aparecería en los dos detectores - si bien separadas por unas milésimas de segundo, teniendo en cuenta el tiempo que tarda la luz (o una onda gravitacional) en viajar entre los dos detectores.

En el recuadro (b) de la figura 2 se muestra como el ruido instrumental en los detectores de LIGO depende de la frecuencia. Se puede ver que el ruido del instrumento es mínimo en el llamado 'punto dulce' ('sweet spot' en inglés) alrededor de los cien hercios y que se incrementa bruscamente a bajas y altas frecuencias. Se observan también una serie de picos estrechos en los que el ruido instrumental es particularmente elevado y que son generados, por ejemplo, por las fibras de las que cuelgan los espejos y de las masas de prueba en cada interferómetro.

Para alcanzar la gran sensibilidad de Advanced LIGO se requirió la actualización de casi cada aspecto del diseño inicial de LIGO. Estas actualizaciones incluyen:

- Incrementar significativamente la potencia del láser, para reducir la principal fuente de ruido a altas frecuencias
- Rediseñar las cavidades recicladoras para contener mejor la distribución espacial del láser
- Usar mayores y más pesadas masas de prueba de sílice fundido, para reducir los movimientos aleatorios de los espejos
- Suspender las masas de prueba usando fibras de sílice fundido, para reducir el ruido térmico
- Suspender las masas de prueba con un péndulo de cuatro fases, mejorando su aislamiento sísmico
- Usar una estrategia activa de "medir y cancelar" para reducir el impacto de los movimientos del suelo

Operar con una red de dos o más detectores también nos permite, por triangulación, localizar la onda gravitacional observada en el cielo una vez conocida la diferencia entre el tiempo de llegada de la onda en cada detector. Cuantos más detectores tenga la red, más precisa será la localización en el cielo de la fuente emisora de dicha onda gravitacional. Se prevé que en el año 2016 el detector Advanced Virgo, en Italia, se una a la red global - además de estar ya proyectada la construcción de otros interferómetros avanzados. Para más detalles ver <http://www.ligo.org/science/Publication-ObservingScenario/index.php>

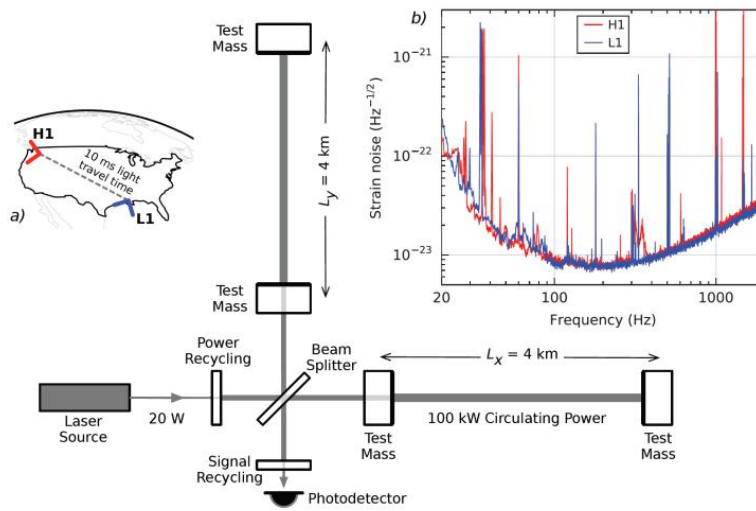


Figura 2. Diagrama simplificado de un detector de Advanced LIGO (sin escalas), en el que se incluyen varias de las mejoras principales respecto al diseño básico: una cavidad óptica que refleja la luz láser repetitivamente hacia delante y atrás en cada brazo, multiplicando el efecto de la onda gravitacional en la fase de la luz láser; un espejo de reciclaje de potencia que incrementa la potencia del láser en el interferómetro como un todo; un espejo de reciclaje de señal, que optimiza aún más la señal extraída en el fotodetector. Estas mejoras aumentan la potencia del láser en la cavidad óptica en un factor de 5000 e incrementan el tiempo total en el que la señal está circulando en el interferómetro.

En el recuadro (a) se muestran las localizaciones y las orientaciones de los dos observatorios LIGO en el que también se indica el tiempo que tarda la luz en viajar entre ellos. En el recuadro (b) se muestra como la amplitud de ruido del instrumento varió en función de la frecuencia en cada detector en los tiempos del evento. Cuanto más bajo es el ruido del instrumento, mayor sensibilidad tiene el detector. Los picos altos indican rangos pequeños de frecuencia donde el ruido del instrumento es particularmente grande.

## Nuestras observaciones de LIGO y su significado

A fecha de 14 de Septiembre de 2015 a las 09:50:45 (GMT) los observatorios LIGO en Hanford y Livingston detectaron la señal del evento GW150914. La señal fue identificada por primera vez mediante lo que llamamos métodos de búsqueda de latencia baja, diseñados para analizar rápidamente los datos del detector en los que se buscan patrones de ondas gravitacionales sin precisar aún los detalles exactos modelo de onda. Estas búsquedas casi instantáneas descubrieron al evento candidato solo tres minutos después de que la señal llegase a los detectores. Los datos de la amplitud de la onda gravitacional adquiridos por los interferómetros LIGO fueron comparados con un extenso banco de modelos de onda predichos de forma teórica - un proceso conocido como filtrado de coincidencia - con el objetivo de encontrar el modelo de onda más similar a los datos observados.

La figura 3 presenta los principales resultados de estos análisis detallados - todos ellos apuntando firmemente a GW150914 como la coalescencia de dos agujeros negros. En la parte media de la figura se muestra nuestra reconstrucción de la amplitud de deformación de la onda gravitacional vista por el detector de Hanford. Nótese, en particular, la impresionante correspondencia entre este patrón de ondas (en gris) y de una onda gravitacional generada en la coalescencia de dos binarias de agujeros negros consistentes con nuestros datos y calculada usando la relatividad general (en rojo).

En la parte superior de la figura se muestran los diferentes estados de los horizontes de los agujeros negros durante su evolución: la fase de evolución suave, cuando los dos agujeros negros se aproximan; la fusión y la fase final de estabilización en la que el nuevo agujero negro remanente oscila brevemente hasta su estabilización.

La comparación de los datos de la amplitud con las predicciones teóricas nos permite testar si la relatividad general es capaz de describir totalmente el evento observado. La conclusión es que supera los test de forma exitosa: todas nuestras observaciones son consistentes con la relatividad general.

También podemos usar los datos para estimar características físicas específicas de GW150914: las masas de sus dos agujeros negros antes de la fusión, la masa del agujero negro remanente y la distancia al evento.

Nuestros resultados describen GW150914 como la fusión de dos agujeros negros con masas de aproximadamente 36 y 29 veces la masa del Sol respectivamente y en el que el agujero negro remanente tendría una masa alrededor de 62 veces la del Sol. Además, se infiere que el agujero negro remanente está rotando - dichos agujeros negros en rotación fueron formulados de manera teórica el año 1963 por el matemático Roy Kerr. Finalmente, nuestros resultados indican que GW150914 ocurrió a una distancia de más de mil millones de años luz. Así que los detectores de LIGO han observado un evento ciertamente destacable que ocurrió un tiempo muy lejano y en una galaxia muy muy lejana!

Si comparamos las masas de los agujeros negros antes y después de la fusión, vemos que la coalescencia convirtió aproximadamente tres veces la masa del Sol (o casi seis millones de billones de billones de kilogramos) en energía en forma de onda gravitacional, la mayoría emitida en una fracción de segundo. En contraste, el Sol emite el equivalente a cuatro mil millones de kilogramos de radiación electromagnética cada segundo. De hecho, el pico de energía liberado por GW150914 fue más de seis veces mayor que la luminosidad de todas las galaxias en el

universo observable.

### ¿Cómo sabemos que GW150914 fue una fusión de agujeros negros?

Los valores estimados de las masas de los dos componentes de GW150914 antes de la fusión son en sí mismos un argumento muy potente para asegurar que los dos son agujeros negros – más aún si se consideran la enorme velocidad y la pequeña separación de sus dos componentes tal y como se muestra en la parte inferior de la figura 3. En esta figura se ve que las velocidades estimadas de los dos componentes son una fracción importante de la velocidad de la luz. De forma similar, su separación aproximada es de solo unas pocas veces el tamaño característico de un agujero negro, conocido como su radio de Schwarzschild.

Estos gráficos indican que los dos componentes estuvieron separados a unos escasos cientos de kilómetros justo antes de fusionarse, es decir, cuando la frecuencia de la onda gravitacional era aproximadamente de unos 150 Hz. Los agujeros negros son los únicos objetos conocidos que son lo suficientemente compactos como para estar tan cerca sin fusionarse. Así pues, y basado en nuestra estimación de la masa total de los dos componentes, una pareja de estrellas de neutrones no sería lo suficientemente masiva, y una pareja compuesta por una estrella de neutrones y un agujero negro se habría fusionado a una frecuencia menor que 150 Hz.

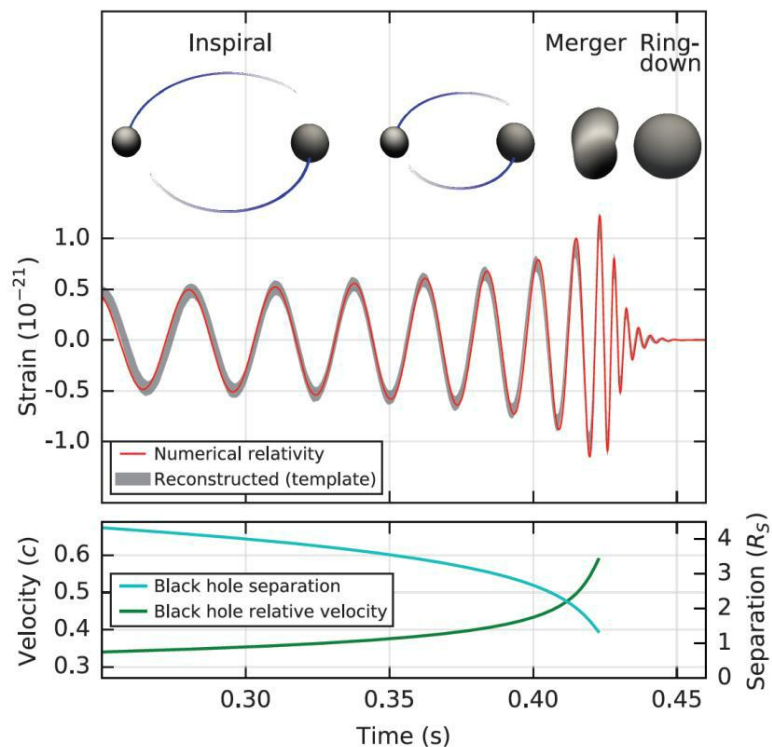


Figura 3. Algunos resultados principales de nuestro análisis de GW150914, en los que se compara la amplitud de la onda gravitacional estimada (vista por H1 en Hanford) con las predicciones de los modelos de onda teóricos más similares obtenidos de la relatividad general durante las tres fases del evento: fase de evolución suave, fusión y estabilización. Se muestra también la separación y la velocidad de los agujeros negros, y cómo cambian a medida que la fusión tiene lugar.

### ¿Estamos seguros de que GW150914 fue un evento astrofísico real?

La respuesta corta es “sí”, sin embargo, para resolver una tan pregunta crucial la Colaboración Científica LIGO y la Colaboración Virgo han hecho conjuntamente un gran esfuerzo para contestarla, llevando a cabo una serie cuidadosos test independientes - que contribuyen a reforzar el caso de detección de GW150914.

En primer lugar, como ya hemos mencionado, la diferencia temporal entre las observaciones hechas en cada detector LIGO fue consistente con el tiempo de viaje de la luz entre los dos detectores. Además, como se ve en la figura 1, las señales de Hanford y Livingston encontraron un patrón similar, como sería de esperar teniendo en cuenta el alineamiento de los interferómetros, además de ser en ambos lo suficientemente potentes como para destacar en comparación al ruido de fondo durante el tiempo del evento – como una carcajada que puede ser oída por encima del ruido.

Entender este ruido de fondo es una parte esencial de nuestro análisis e implica monitorear una gran colección de datos ambientales grabados en los dos emplazamientos: movimientos del suelo, variaciones de la temperatura y fluctuaciones de la potencia del láser,

nombrando solo unos pocos. Paralelamente, diversos canales de datos monitorean en tiempo real el estado de los interferómetros - comprobando, por ejemplo, que los rayos láser están centrados correctamente. Si en alguno de estos canales ambientales o instrumentales aparece un problema, los datos recogidos por el detector son descartados. Aún así, a pesar de estudios exhaustivos, ninguno de estos problemas fueron encontrados en el análisis de dicho evento.

Sin embargo, ¿pudo ser GW150914 una fluctuación de ruido poco común, que ocurrió de forma azarosa y con características similares en los dos sitios? Para descartar esta posibilidad necesitamos conocer cuán inusual sería esta fluctuación: cuanto menor sea la probabilidad de esta hipotética coincidencia, con más seguridad podremos descartar esta posibilidad en favor de otra alternativa – es decir, que GW150914 fue realmente un evento de onda gravitacional real.

Para llevar a cabo este análisis estadístico fueron usados 16 días de datos estables y de gran calidad pertenecientes al mes siguiente del evento. GW150914 fue de lejos la señal más fuerte observada en ambos detectores durante ese periodo. Para ello, se aplican una serie de desplazamientos de tiempo artificiales entre los datos de H1 y L1 para crear un conjunto de datos de mayor duración en el que se puedan buscar señales tan fuertes que GW150914 (o más). Usando solo desplazamientos de tiempo mayores que 10 milisegundos (el tiempo de viaje de la luz entre los dos detectores) nos aseguramos de que estos conjuntos de datos artificiales no contienen ninguna señal real, y así pueden ser usados para determinar cuán poco probable sería una fluctuación estadística de ruido capaz de imitar a GW150914. A dicha probabilidad se le llama ‘ritmo de falsa alarma’ - i.e. cuál es la probabilidad de confundir por error una fluctuación de ruido con un evento real (una “falsa alarma”).

La figura 4 (adaptada de la figura 4 de nuestra publicación) muestra el resultado de este análisis estadístico, para una de las búsquedas llevadas a cabo con los datos de nuestro detector. Las curvas negra y morada representan propiedades estadísticas de nuestro ruido de fondo, las cuales describen (bajo hipótesis ligeramente distintas) el número esperado de “eventos” de ruido capaces de imitar una señal real de determinada potencia (representado por valores característicos de la detección estadística). La información principal que se extrae de esta figura es cuán lejos está GW150914 de las dos curvas negra y morada; esto significa que un evento de ruido imitando GW150914 sería extremadamente inusual - en efecto, para esta búsqueda estimamos que su ritmo de falsa alarma sería menor al de un evento cada 200,000 años. Este ritmo de falsa alarma se traduce a la conocida variable “sigma” (denotada por  $\sigma$ ), que es utilizado comúnmente en análisis estadístico para medir la significancia estadística de una de detección. Podemos ver en la figura que esta búsqueda identifica GW150914 como un evento real, con una significancia de más de cinco sigma.

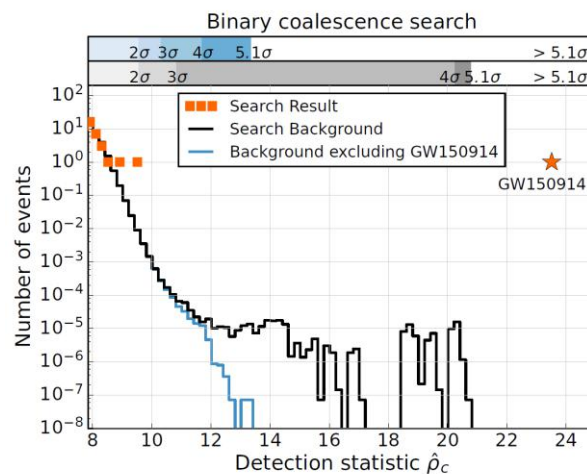


Figura 4. (Adaptada de la figura 4 de nuestra publicación). Resultados de nuestra búsqueda de coalescencias binarias cuantificando cuán inusual es GW150914 comparado con otros falsos “eventos” resultantes de fluctuaciones de ruido. Esta búsqueda concluyó que un evento de ruido imitando a GW150914 sería extremadamente raro - menos de una ocurrencia en aproximadamente 200,000 años - un valor que corresponde a una significancia de detección de más de cinco “sigma”.

## Conclusiones y perspectiva

La primera detección de ondas gravitacionales y la primera observación de la fusión de un agujero negro binario son logros significativamente destacables, pero solo representan la primera página en un nuevo excitante capítulo de la astronomía.

En la siguiente década los detectores Advanced LIGO serán optimizados además de extenderse la red global de detectores a Advanced Virgo en Italia, KAGRA en Japón y posiblemente un tercer detector LIGO en la India.

Esta modernizada red global de detectores mejorará significativamente nuestra capacidad de localizar la posición de las fuentes de ondas gravitacionales en el cielo y de estimar de forma más precisa sus propiedades físicas.

¡El naciente campo de la astronomía de las ondas gravitacionales tiene un futuro brillante por delante!

## Para más información

LIGO Scientific Collaboration (incluye un link a la principal publicación, publicada en Physical Review Letters): <http://www.ligo.org>

Advanced Virgo: <http://public.virgo-gw.eu/language/en/>

Algunos de los artículos que acompañan a la publicación principal son:

- Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions: <https://dcc.ligo.org/P1500229/>
- GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO: <https://dcc.ligo.org/P1500269/>
- Astrophysical implications of the binary black hole merger GW150914: <https://dcc.ligo.org/P1500262/>
- Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave candidate G184098: <https://dcc.ligo.org/P1500227/>
- GW150914: a black-hole binary coalescence as predicted by general relativity: <https://dcc.ligo.org/P1500213/>
- The rate of binary black hole mergers inferred from Advanced LIGO observations surrounding GW150914: <https://dcc.ligo.org/P1500217/>
- Properties of the binary black hole merger GW150914: <https://dcc.ligo.org/P1500218/>

LIGO Open Science Center (con acceso a los datos de GW150914): <https://losc.ligo.org/about/>