

GW170814: OBSERVANDO ONDAS GRAVITACIONALES PROCEDENTES DE UNA BINARIA DE AGUJEROS NEGROS EN COALESCENCIA MEDIANTE TRES DETECTORES

El evento GW170814 es la cuarta detección confirmada de ondas gravitacionales comunicada por la Colaboración Científica LIGO y la Colaboración Virgo. La señal, procedente de una pareja coalescente de agujeros negros de masas estelares, es la primera que ha sido observada por el detector Virgo avanzado. Esta detección ilustra la capacidad mejorada de una red global de tres detectores (los detector gemelos LIGO avanzado más Virgo avanzado), en particular a la hora de localizar la fuente de ondas gravitacionales en el cielo y de poner a prueba la teoría de la Relatividad General. Así, GW170814 marca un nuevo y emocionante avance en el emergente campo de las astronomía de ondas gravitacionales.

INTRODUCCIÓN

El día 1 de agosto de 2017, el detector [Virgo avanzado](#) se unió al segundo periodo de observación (O2) de [LIGO avanzado](#), que duró desde el 30 de noviembre de 2016 hasta el 25 de agosto de 2017. El 14 de agosto de 2017 a las 10:30:43 UTC, una señal transitoria de onda gravitacional, etiquetada como **GW170814**, fue detectada por un software automático que analiza los datos recogidos por los dos detectores LIGO avanzado. Se dedujo que la señal era consistente con los momentos finales de la coalescencia de dos [agujeros negros](#) de masas estelares. Análisis posteriores con toda la información disponible de los tres detectores mostraron evidencia de que la señal también se encontraba presente en los datos del detector Virgo avanzado. Esto convierte a GW170814 en el primer evento confirmado de onda gravitacional que ha sido visto por tres detectores.

DETECTORES Y CALIDAD DE DATOS

Los detectores LIGO y Virgo son gigantes [interferómetros láser de tipo Michelson](#) con brazos de 4 y 3 kilómetros respectivamente. Los detectores LIGO se encuentran en los EEUU (en Hanford, Washington y Livingston, Louisiana), mientras que Virgo se encuentra en Cascina, Italia, cerca de Pisa. Estos tres detectores fueron diseñados en los años 90, construidos alrededor del año 2000 y operados durante la siguiente década en su configuración inicial - junto con el detector [GEO600](#), situado en Alemania. Estos detectores han sido mejorados significativamente durante varios años para incrementar su sensibilidad en un factor 10 aproximadamente (incrementando el volumen del universo que pueden observar en un factor 1000).

El programa de mejora de LIGO empezó en 2010 y fue completado en 2015, permitiendo que el primer periodo de observación O1 empezará en septiembre de ese año - con el [primer evento de onda gravitacional](#) detectado unos días después. Dos detecciones confirmadas siguieron en [diciembre de 2015](#) y en [enero de 2017](#) (O2).

El programa de mejora de Virgo empezó un año después, en 2011. Todo el aparato - desde los espejos y el sistema de vacío hasta los fotodiodos que detectan el haz láser - fue mejorado y, después de un año de comisionado, el nuevo instrumento se unió a O2 el 1 de agosto de 2017. Aunque los detectores LIGO y Virgo usan el mismo método (interferometría) para detectar ondas gravitacionales, y comparten muchos elementos de diseño, han sido construidos y son operados de manera independiente.

La figura 1 compara las [curvas de sensibilidad](#) obtenidas por los tres detectores alrededor del instante del evento GW170814. Los datos han sido limpiados, usando fuentes de ruido bien identificadas que contaminan la sensibilidad de una manera conocida¹. Chequeos exhaustivos del estado instrumental y medioambiental en las tres localizaciones de los detectores no mostraron ningún indicio de problemas.



Vista aérea del detector de ondas gravitacionales Virgo, situado en Cascina, cerca de Pisa (Italia). Virgo es un interferómetro láser con brazos de 3 kilómetros de longitud. (Crédito de la imagen: Nicola Baldocchi / Colaboración Virgo.)

FIGURAS DE LA PUBLICACIÓN

Para más información sobre el significado de las figuras, consulte la publicación [aquí](#).

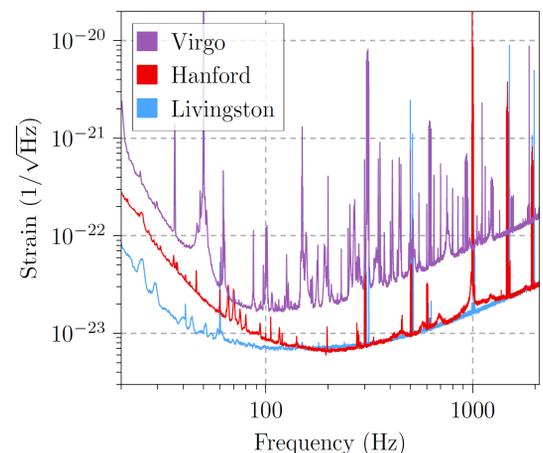


Figura 1: Esta figura (figura 2 en la [publicación](#)) compara la sensibilidad (llamada "Strain" en el eje vertical) de los tres detectores en función de la frecuencia (en Hertz, en el eje horizontal). Los dos ejes están en escala logarítmica. A una frecuencia dada, cuanto más abajo esté la curva de sensibilidad señales de onda gravitacional más débiles podrán ser detectadas. La curva azul muestra la sensibilidad de LIGO Livingston, la roja la de LIGO Hanford y la morada la de Virgo.

1. El mismo principio es usado en los auriculares con supresión de ruido, los cuales detectan el ruido del ambiente con unos sensores adheridos al aparato y eliminan ese ruido enviando la señal "opuesta" a las orejas.

LA SEÑAL OBSERVADA GW170814

La identificación de una nueva señal transitoria de onda gravitacional sigue varios pasos. El primero tiene lugar justo después de adquirir los datos y se basa en búsquedas de baja latencia, las cuales usan técnicas de [filtrado adaptado](#) para buscar eventos coincidentes (señales candidatas) en los dos interferómetros LIGO. Los datos de Virgo no fueron usados en esta etapa ya que actualmente la sensibilidad de Virgo no es tan buena como la de los detectores LIGO.

GW170814 fue observada con alta [significación estadística](#) 30 segundos después de su llegada; una alerta fue generada y enviada a los telescopios asociados a la colaboración LIGO-Virgo. Después, la significancia del evento fue calculada con más precisión, usando unos seis días de datos coincidentes de LIGO y un [procedimiento similar](#) a los usados en las detecciones previas - permitiendo el cálculo de la [tasa de falsa alarma](#) asociada al evento, i.e. cuánto se ha de esperar para que el ruido de los detectores pueda producir una señal tan fuerte y significativa como la observada. Con GW170814, la correspondiente tasa de falsa alarma es menor a 1 en 27000 años, haciendo que esta detección sea muy fiable.

Virgo también vio este evento de onda gravitacional, hecho demostrado por dos análisis independientes. El primero, basado en el filtrado adaptado, compara dos modelos: un modelo que asume una observación como GW170814 (fusión de agujeros negros) en los tres detectores y otro modelo que asume una señal solo en los dos detectores LIGO y puro ruido en el detector Virgo. Nuestros cálculos señalan que el primer modelo es unas 1600 veces más probable que el segundo modelo. El segundo método busca eventos transitorios no modelados con una frecuencia que incrementa con el tiempo - i.e. como la [señal](#) producida por la fusión de dos objetos compactos pero sin asumir esa forma de onda en particular - y el uso combinado de los datos de todos los interferómetros nos permite reconstruir la señal de onda gravitacional. Para todas las detecciones confirmadas hasta la fecha, las formas de onda reconstruidas se parecen mucho al modelo de binaria de agujeros negros.

Dos reconstrucciones diferentes no modeladas fueron comparadas para GW170814 - una usando solo los dos detectores LIGO y la otra basada en la red de tres detectores. La amplitud reconstruida de esta señal puede convertirse a una tasa de falsa alarma, señalando la frecuencia a la que fluctuaciones de ruido producirían una señal al menos tan fuerte. Usando solo dos detectores, la tasa de falsa alarma calculada fue de 1 cada 300 años aproximadamente; con la red completa, esta tasa fue reducida a 1 cada 5700 años. Así, la hipótesis de los tres detectores está claramente favorecida frente a la de solo dos detectores. La figura 2 muestra tres maneras diferentes de inspeccionar los datos recogidos por los tres detectores alrededor del momento en que GW170814 fue detectada.

LOCALIZACIÓN DE LA FUENTE GW170814

La localización de la fuente en el cielo puede ser estimada usando las diferencias en el tiempo de llegada de la señal de onda gravitacional a los diferentes detectores de la red. Estas diferencias se deben a la [velocidad finita de la luz](#), que introduce un desfase que puede llegar a ser de 10 milisegundos para los dos detectores LIGO que se encuentran a 3000 km de distancia. Asumiendo que los tiempos de llegada son conocidos con total precisión, cada diferencia temporal se puede asociar con un círculo en el cielo, que indica las posiciones en el cielo con las que es consistente. Con una red de tres detectores, uno obtiene tres diferencias temporales, y consecuentemente tres círculos, que interceptan en dos puntos².

En realidad, los tiempos de llegada no son conocidos con total certeza, lo que significa que los círculos son en realidad bandas con un grosor particular que está determinado por los errores en los tiempos de llegada; la intersección de estas bandas marca el área en el cielo en la que la fuente de ondas gravitacionales está localizada. Para mejorar la localización aún más, las diferencias en amplitud y forma de las señales detectadas pueden ser usadas. Para entender esto, es mejor pensar en el detector de ondas gravitacionales más como un micrófono que como un telescopio, en el sentido que puede ser sensible a señales llegando de todas las direcciones, aunque con algunas limitaciones. Por ejemplo, una onda gravitacional procedente de encima o debajo del detector sería la detectada con más sensibilidad, mientras que la misma onda procedente de la bisectriz de los dos brazos sería totalmente invisible. Generalmente, cuanto más arriba esté la fuente en el horizonte local, mejor será la respuesta del detector. Todos los detectores tienen cuatro puntos ciegos, situados en el plano de sus brazos. Si una onda gravitacional no es detectada por un instrumento que en principio es lo suficientemente sensible como para hacerlo, eso significa que la señal [procede de alguno de estos cuatro puntos ciegos](#).

2. Con cuatro o más detectores, todos los círculos se interceptan en un solo punto. Esta es una de las razones por las que añadir un cuarto interferómetro a la red (KAGRA en Japón) al final de esta década y un quinto detector (LIGO India) unos años después mejorará aún más la localización en el cielo.

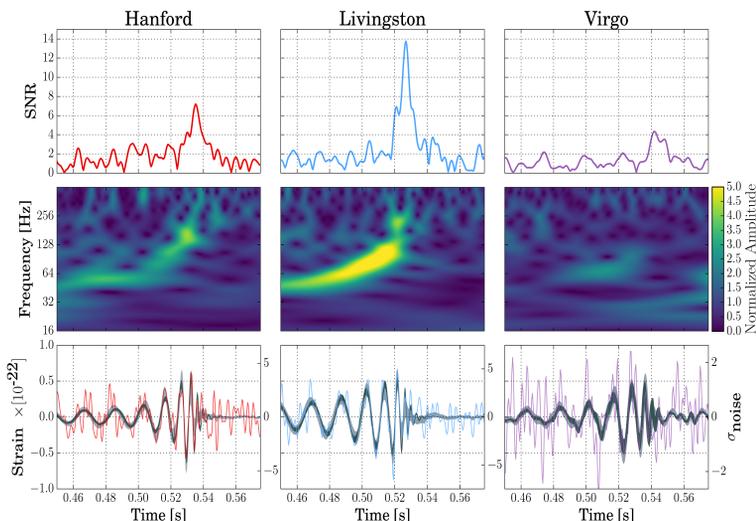


Figura 2 (figura 1 de la [publicación](#)):

Fila superior: relación señal-ruido en función del tiempo. El pico tiene lugar en tiempos diferentes en cada detector porque la onda gravitacional se propaga a la velocidad de la luz, que es finita; esto hace que la señal llegue en tiempo diferentes a cada detector. GW170814 llegó primero a LIGO-Livingston, 8 milisegundos después llegó a LIGO-Hanford, y 6 milisegundos después llegó a Virgo.

Fila central: representación tiempo-frecuencia de la amplitud de la señal. Cuanto más brilla un pixel en estos tres mapas 2D, más intensa es la señal a esa frecuencia y tiempo en particular con respecto al nivel de ruido esperado.

Fila inferior: serie temporal de la amplitud con los mejores modelos de onda seleccionados por la técnica de filtrado adaptado (curvas negras) y métodos de búsqueda sin modelos (bandas grises) superpuestos.

La Figura 3 resume la localización de la fuente de GW170814 en el cielo proporcionada por sucesivos métodos de análisis de datos: en azul se muestra la localización inicial rápida sólo con los dos detectores LIGO, la adición de Virgo se muestra en naranja, y los resultados de la estimación completa de parámetros (ver abajo) se muestran en verde. La red también puede poner límites a la distancia de la fuente, como se muestra en la parte derecha de la Figura 3. Esta gráfica muestra que la localización de la fuente está realizada en tres dimensiones. Para casos favorables, puede ser que el volumen más fiable sólo contenga un número limitado de galaxias, lo que simplificaría la búsqueda de una contrapartida visible mediante telescopios asociados. Observaciones consecutivas de GW170814 fueron hechas por veinticinco observatorios, pero no se pudo identificar ninguna contrapartida. No obstante, no se espera que la fusión de agujeros negros binarios produzca ninguna otra emisión aparte de ondas gravitacionales.

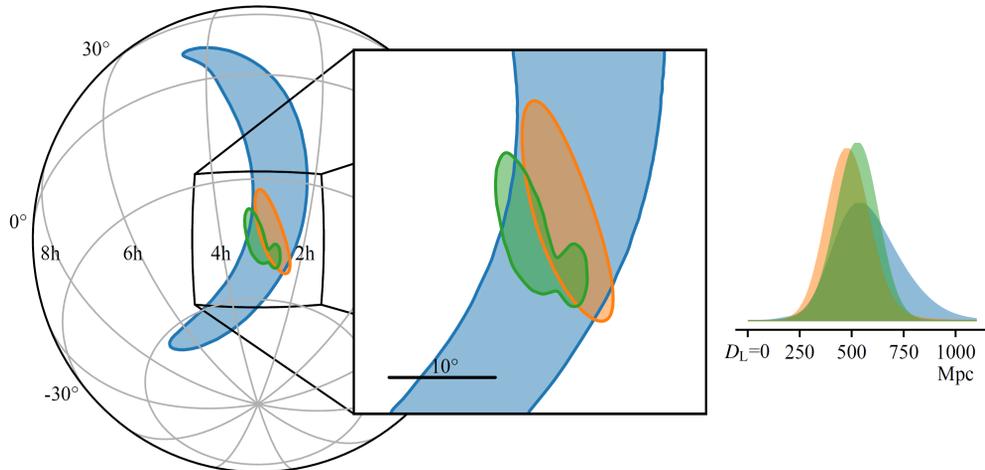


Figura 3: Localización de la fuente de GW170814 en el cielo. La parte izquierda de la figura compara las regiones celestes seleccionadas por los diferentes análisis como las más probables para contener la fuente de la señal GW170814. Son conocidas como [regiones de fiabilidad](#) del 90% ya que están definidas de forma que la probabilidad de que contengan la fuente es del 90%. El área azul corresponde a la localización rápida basada sólo en datos de los dos detectores LIGO. Añadir Virgo conduce al área naranja, que es un orden de magnitud más pequeña, 100 grados cuadrados comparados con 1160 grados cuadrados. La región verde es el resultado del análisis completo de estimación de parámetros usando los tres detectores: un área de 80 grados cuadrados. Este resultado puede ser comparado con el área de 700 grados cuadrados calculada a partir de la estimación de parámetros completa usando solamente datos de los dos detectores LIGO.

La parte derecha de la figura compara las distribuciones de probabilidad para la [distancia de luminosidad](#) de la fuente. Añadir Virgo estrecha la distribución recortando la cola correspondiente a largas distancias, siendo la distancia más probable entorno a 540 Mpc.

MEDIDA DE LOS PARÁMETROS DE GW170814

Los parámetros de GW170814 fueron estimados usando las [mismas técnicas](#) utilizadas en las otras detecciones confirmadas: las señales detectadas fueron comparadas con dos familias desarrolladas independientemente de modelos de perfil de onda, cuyas características dependen de los parámetros que están siendo medidos. Cuanto mejor coincide un perfil de onda generado para un determinado conjunto de parámetros con la señal, más se acercan estos parámetros a su valor verdadero.

Los detalles completos de los parámetros medidos para la fuente de GW170814 pueden ser encontrados en nuestra [publicación](#) o en la [ficha de GW170814](#). Por ejemplo, la Figura 4 muestra los límites en los parámetros inferidos para las masas de los agujeros negros primarios.

PONIENDO A PRUEBA LA RELATIVIDAD GENERAL CON GW170814

Se han realizado tests de la [Relatividad General](#) para GW170814; estos tests son similares a aquellos [llevados a cabo](#) para las anteriores detecciones confirmadas- con resultados similares que son de nuevo consistentes con las predicciones de la teoría de Einstein. Análisis más profundos se llevarán a cabo en próximas publicaciones.

Operar una red que comprende detectores que tienen diferentes orientaciones (los dos instrumentos de LIGO están casi coalineados, pero Virgo no), también permite estudiar las [polarizaciones](#) de las ondas gravitacionales, es decir, la manera en que las ondas gravitacionales distorsionan el [espacio-tiempo](#) cuando se propagan a través del mismo.

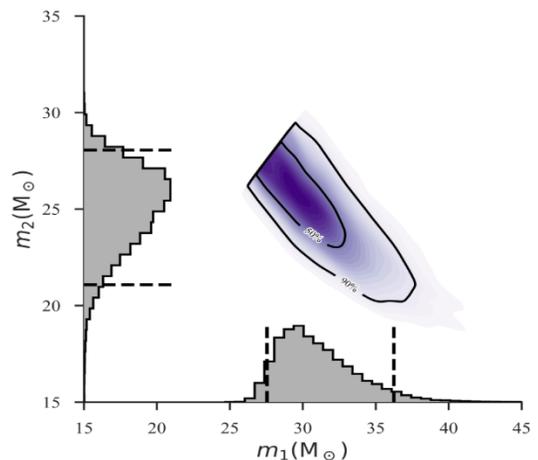


Figura 4 (Panel superior de la Figura 4 de nuestra [publicación](#)): Masas (expresadas en unidades de masa solar) de los dos agujeros negros iniciales para el evento GW170814. Estas masas son estimadas simultáneamente y los límites conjuntos resultantes se muestran en el plano m_2 vs. m_1 (donde la convención empleada es $m_2 \leq m_1$) donde el color más oscuro indica una probabilidad más alta de que las masas de los agujeros negros sean iguales al par de valores (m_1, m_2) correspondiente. Los contornos negros muestran las regiones de fiabilidad del 50% y del 90%, respectivamente. Además, distribuciones unidimensionales de probabilidad para la masa de cada agujero negro individual se muestran en gris en ambos ejes. Las más probables para ambos agujeros negros están en torno a las 30 y 25 masas solares, respectivamente.

La Relatividad General predice que las ondas gravitacionales son transversales. Esto significa que estiran y comprimen el espacio-tiempo en el plano perpendicular a la dirección de propagación. Las distorsiones permitidas son solo de dos tipos, llamadas polarizaciones “+” (“más”) y “x” (“cruz”). Su efecto en un anillo de partículas se muestra en los paneles (a) y (b) de la Fig. 5.

Matemáticamente hablando, una teoría “métrica” de gravitación genérica puede permitir hasta seis polarizaciones diferentes, incluyendo las dos permitidas por la Relatividad General. Cualquier estado adicional de polarización distorsionaría el espacio-tiempo de una forma diferente, lo cual cambiaría la forma en que un detector interferométrico responde a dicha señal. Este comportamiento se observaría al comparar las señales detectadas en dos instrumentos no paralelos, ya que sus diferencias no podrían ser descritas por la Relatividad General. Los paneles de (c) a (f) de la Fig. 5 muestran el efecto de estas otras polarizaciones. Mientras que el panel (c) muestra de nuevo una onda transversal, propagándose fuera del plano de distorsión, los paneles de (d) a (f) hacen referencia a ondas gravitacionales propagándose en el *mismo* plano que la distorsión espacio-temporal (como indica la flecha en estos casos).

Un primer test de la polarización de la onda gravitacional fue llevado a cabo usando los datos de GW170814. El análisis completo para la estimación de parámetros descrito arriba se realizó de nuevo, esta vez asumiendo diferentes polarizaciones de onda gravitacional prohibidas por la Relatividad General. Todas las posibles combinaciones de polarizaciones alternativas testeadas de esta forma fueron desfavorecidas por este análisis, indicando de nuevo que nuestros datos de GW170814 son consistentes con la teoría de Einstein.

CONCLUSIONES

GW170814 es la cuarta fusión de binaria de agujeros negros en ser confirmada por la Colaboración Científica LIGO y la Colaboración Virgo. Los agujeros negros identificados tienen masas similares a las de la primera (GW150914) y tercera (GW170104) detección; son consistentes con las abundancias astrofísicas y tasas de fusión inferidas por la detecciones previas.

Este evento resulta único ya que es la primera detección realizada por tres detectores: los dos interferómetros de LIGO Avanzado y Virgo Avanzado. Una red de tres detectores tiene un enorme potencial científico, y esto ha sido ilustrado adecuadamente por GW170814 con su gran mejora en la localización, en términos tanto de la posición en el cielo como de la distancia, y la posibilidad de realizar tests adicionales de relatividad general. Con el tercer periodo de observación de LIGO-Virgo, “O3”, programado para 2018, las expectativas para la astronomía de ondas gravitacionales son extremadamente brillantes.

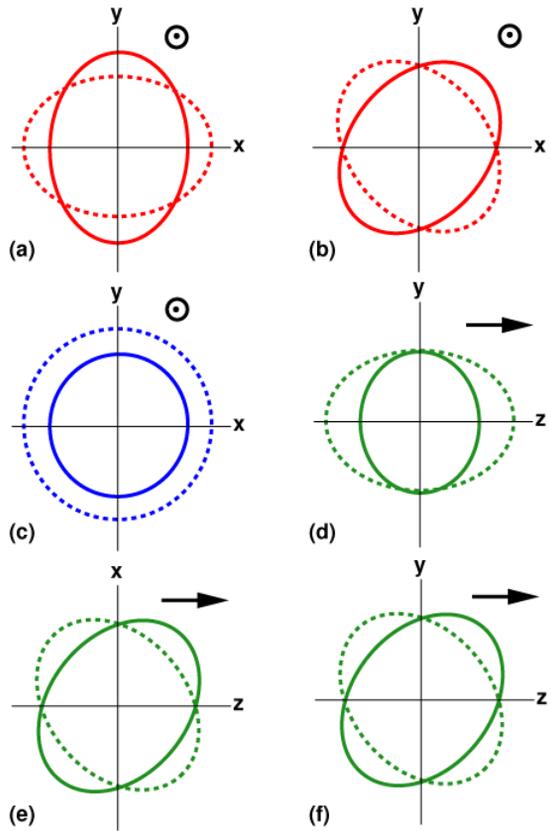


Figura 5: Representación de las seis polarizaciones permitidas en las teorías “métricas” generales de gravedad. Los paneles (a) y (b) describen, respectivamente, la “+” y “x” polarizaciones permitidas por Relatividad General. En estos dos casos, la distorsión espacio-temporal se produce en el plano perpendicular a la dirección en la que la onda gravitacional viaja (i.e. fuera de la página): un anillo de partículas inicialmente circular es estirado en una dirección en este plano mientras es comprimido en la dirección perpendicular al plano, antes de que el patrón se invierta. Los paneles de (c) a (f) ilustran las polarizaciones que no están permitidas en Relatividad General. El panel (c) muestra de nuevo una polarización transversal, mientras que los paneles (d) a (f) ilustran distorsiones que se propagan en una dirección (indicada por la flecha) que se encuentra en el mismo plano que la distorsión espacio-temporal. (Crédito: Clifford Will, Living Reviews in Relativity)



Visita nuestras webs:
<http://www.ligo.org>
<http://www.virgo-gw.eu>



Puedes leer el artículo completo, el cual ha sido aceptado para publicación en **Physical Review Letters** [aquí](#).

GLOSARIO

- Agujero negro:** Región del espacio-tiempo causada por una masa extremadamente compacta donde la gravedad es tan intensa que impide que nada, incluyendo la luz, pueda salir .
- Pefil de onda gravitacional:** Curva que describe cómo la distorsión causada por la onda gravitacional varía con el tiempo.
- Ruido:** Fluctuación en la medición de la señal de onda gravitacional debida a varios efectos instrumentales y ambientales. La sensibilidad de un detector de ondas gravitacionales está limitada por el ruido.

- Periodo de observación:** Periodo en el que los detectores de ondas gravitacionales están tomando datos.
- Sensibilidad:** Descripción de la capacidad de un detector para detectar una señal. Los detectores con menos ruido son capaces de detectar señales más débiles y por lo tanto se dice que tienen una más alta (o mayor) sensibilidad.
- Amplitud:** Cambio relativo de la distancia entre dos puntos de medida debido a la deformación del espacio-tiempo por una onda gravitacional entrante.