

GWTC-3, TERCER CATÁLOGO DE DETECCIONES DE ONDAS GRAVITACIONALES

Introducción

GWTC-3 es el tercer catálogo de ondas gravitacionales transitorias de [LIGO](#), [Virgo](#) y [KAGRA](#). GWTC-3 actualiza nuestros catálogos anteriores con observaciones de ondas gravitacionales de la segunda parte del tercer período de observación (llamado O3b), que duró desde noviembre de 2019 hasta marzo de 2020. GWTC-3 contiene el mayor número de observaciones de ondas gravitacionales reunidas hasta la fecha.

Entonces, ¿qué catálogos de ondas gravitacionales ha habido hasta ahora?

- [GWTC-1](#), que contiene un total de 11 eventos del primer y segundo **períodos de observación** (O1 y O2).
- [GWTC-2](#), que añadió 39 eventos a GWTC-1, aumentando el número total de eventos a 50 (de O1, O2 y O3a, la primera parte de O3).
- [GWTC-2.1](#) revisó el análisis de O3a y encontró 8 candidatos adicionales, pero también reclasificó 3 de los candidatos de GWTC-2 originales porque su **probabilidad de ser señales astrofísicas** reales se redujo a menos del 50% (consulte la sección "Detectando ondas gravitacionales" a continuación). Esto cambió el número total de eventos a 55.
- GWTC-3 (esta publicación) añade otros 35 eventos de ondas gravitacionales de O3b, lo que aumenta el número total de eventos observados hasta la fecha a la friolera de 90 (la [Figura 3](#) ilustra esta gran cantidad y nuestra creciente población de eventos detectados).

En O3b, KAGRA se unió a LIGO y Virgo para la parte final del período de observación y en abril de 2020 completó un [período de observación de dos semanas](#) con el detector [GEO 600](#) ubicado en Alemania. Los resultados de este período de observación se presentarán por separado.

Todas nuestras observaciones de ondas gravitacionales hasta ahora provienen de la fusión de sistemas binarios que consisten en **agujeros negros** y **estrellas de neutrones**. Son los llamados **objetos compactos** y creemos que son restos de estrellas masivas. Los eventos incluyen fusiones de sistemas **binarios de agujeros negros**, fusiones de sistemas **binarios de estrellas de neutrones** y fusiones entre **estrellas de neutrones** y **agujeros negros**. A medida que nuestros detectores se han vuelto más sensibles, nuestra tasa de descubrimiento se ha acelerado. Hemos recorrido un largo camino desde que hicimos nuestra primera detección en 2015.

En este resumen, puede leer sobre cómo recopilamos nuestros datos, cómo hacemos las detecciones, cómo estimamos las propiedades de los eventos de fusión, los aspectos más destacados de GWTC-3 y los períodos de observación planificados para el futuro.

Detectores de ondas gravitacionales

A lo largo de los años, la sensibilidad de LIGO y Virgo ha mejorado debido a actualizaciones de detectores y mejoras en las técnicas de análisis y calidad de los datos. Hay varias formas de medir la sensibilidad de un detector de ondas gravitacionales. Una es estimando el rango aproximado al que un observatorio puede detectar una fusión típica de sistemas binarios de estrellas de neutrones: cuanto mayor es el rango, más señales lejanas se pueden detectar y, por lo tanto, más detecciones podemos esperar. O3 se dividió en dos mitades (denominadas O3a y O3b), separadas por un mes de inactividad en octubre de 2019. Durante este mes se completaron muchas mejoras y reparaciones, [incluida la limpieza de espejos en LIGO Livingston](#), [la sustitución del equipo de vacío en LIGO Hanford](#), y [el aumento de potencia del láser en Virgo](#). Este trabajo, así como el mantenimiento continuo durante los períodos de observación, permite que los detectores mantengan o aumenten su sensibilidad. La [Figura 1](#) muestra que la **mediana** de los rangos de binarios de estrellas de neutrones ha cambiado para cada detector. Entre O3a y O3b, aumentó en un 13,3% para Virgo, un 6,5% para LIGO Hanford, y se mantuvo aproximadamente igual para LIGO Livingston (nuestro detector más sensible) con una ligera disminución en la sensibilidad del 1,5%.

Los datos brutos de un detector de ondas gravitacionales proceden de la variación de la intensidad de un láser, medida a la salida del interferómetro. Estos datos sin procesar deben [calibrarse](#) para obtener la correspondiente amplitud de las ondas gravitacionales. La calibración debe realizarse con cuidado. Usamos luz láser que se refleja con precisión en los espejos para medir cómo cambia la salida del interferómetro. La calibración inicial se realiza casi en tiempo real. Si es necesario, se utiliza una recalibración y substracción del ruido de larga duración para producir los mejores datos de amplitud disponibles, utilizados en este análisis.

Después de la calibración y la eliminación de ruido, es necesario verificar la calidad de los datos. El problema más común que tenemos al evaluar dicha calidad para las señales de fusión de binarios son los *glitches*: ruido de corta duración (de segundos a minutos) en los datos. Algunos *glitches* tienen un origen conocido, como la **dispersión de la luz**, pero a veces su origen es un misterio. Los *glitches* en ocasiones se superponen con una señal de onda gravitacional y, en estos casos, podemos realizar un proceso para eliminarlos de los datos, como se muestra en la [Figura 2](#). Esta fue una parte importante de nuestro análisis de la primera señal de un sistema binario de estrella de neutrones, [GW170817](#) y en GWTC-3, 7 eventos de 35 necesitaron también este proceso. Para descubrir más sobre los *glitches* y ayudarnos en nuestra búsqueda para entenderlos mejor, diríjase al proyecto de ciencia comunitaria, [Gravity Spy](#).

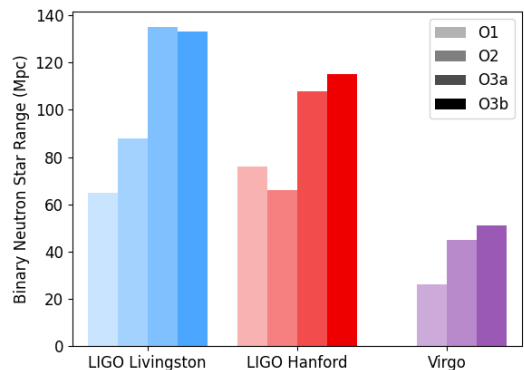


Figura 1: La mediana de los rangos de binarios de estrellas de neutrones para cada detector durante el segundo período de observación (O2), la primera parte del tercer período (O3a) y la segunda parte del tercer período (O3b). Los rangos se muestran en megaparsecs. Créditos: Colaboraciones LIGO-Virgo-KAGRA / Hannah Middleton / OzGrav.

Detectando ondas gravitacionales

A lo largo de O3a y O3b emitimos [alertas públicas](#) de detecciones iniciales de candidatos a ondas gravitacionales. Las alertas públicas rápidas permiten a la comunidad astronómica buscar señales de múltiples mensajeros de los eventos utilizando telescopios [electromagnéticos](#) y detectores de [neutrinos](#). Por lo general, las alertas públicas se publicaron a los pocos minutos de las detecciones en O3b. El reanálisis posterior de los datos de ondas gravitacionales puede llevar a que algunos eventos se retiren y otros se descubran. El análisis final presentado en GWTC-3 se beneficia de las mejoras en la calibración, la calidad de los datos y el análisis de los datos de la totalidad del período de observación para evaluar si los candidatos son interesantes o no. En O3b se anunciaron 39 alertas públicas, de las cuales 18 sobreviven al nuevo análisis y se incluyen en GWTC-3 como candidatos con una probabilidad superior al 50% de ser reales. Otros 17 eventos se anuncian por primera vez en este análisis. Usamos dos tipos de análisis para buscar candidatos a ondas gravitacionales: búsquedas con plantillas y búsquedas mínimamente modeladas. Las búsquedas con plantillas utilizan una selección de señales de sistemas binarios de objetos compactos procedentes de simulaciones (o plantillas), que usamos para filtrar los datos en busca de elementos que coincidan con la forma de la plantilla y cómo cambia con el tiempo. Las búsquedas mínimamente modeladas no buscan un tipo exacto de señal, pero requieren que la misma señal aparezca en múltiples detectores. La estrategia de utilizar plantillas suele ser mejor para seleccionar señales de sistemas binarios (ya que sabemos cómo deberían verse), pero la estrategia de modelado mínimo asegura que no perdamos nada por no tener la plantilla correcta. Al evaluar si un candidato podría ser una señal real, calculamos la probabilidad de que el ruido aleatorio se parezca al azar a la señal del candidato. Cuanto más consistente es la señal entre detectores, más seguros podemos estar de que es real.

En GWTC-3, enumeramos todos los candidatos que estimamos que tienen al menos un 50% de posibilidades de ser reales, a diferencia de señales de ruido. Esta estimación se basa no solo en la comprensión del ruido en nuestros detectores, sino también en la frecuencia con la que estos deben observar las señales de ondas gravitacionales. Como solo estamos comenzando a aprender sobre la población de objetos compactos fusionados, estos números pueden ser inciertos. A medida que aprendamos más sobre la población al hacer más observaciones en el futuro, podremos volver para verificar los candidatos sobre los que actualmente tenemos menos certeza.

Además, GWTC-3 incluye una lista de señales más débiles que no superan el umbral del 50% de posibilidades de ser reales. Al igual que en [GWTC-2.1](#), la lista de subumbrales para GWTC-3 incluye cualquier evento candidato con una **tasa de falsas alarmas** inferior a 2 por día. Hay 1.048 candidatos de subumbral, la mayoría de los cuales esperamos sean ruido; sin embargo, esta lista puede ser útil para ayudar a los astrónomos a identificar eventos potenciales de múltiples mensajeros.

Nombrando ondas gravitacionales

Los nombres de ondas gravitacionales representan la fecha y la hora en que se detectan las señales en la [hora universal coordinada \(UTC\)](#). Varios nombres de eventos anteriores solo incluyen la fecha, pero a medida que los detectores mejoran su sensibilidad, es posible que detectemos más de un evento por día. Entonces, tal y como hicimos con GWTC-2 y GWTC-2.1, ahora añadimos el tiempo a los nombres para que podamos distinguirlos más fácilmente. Como ejemplo, se observó GW200208_222617 el 8 de febrero de 2020 a las 22:26:17 hora UTC.

Propiedades de nuestras fuentes de ondas gravitacionales

Nuestras observaciones de ondas gravitacionales contienen información sobre las propiedades de los sistemas binarios que las produjeron. Las propiedades pueden ser *intrínsecas* o *extrínsecas*. Las propiedades intrínsecas describen la fuente en sí, como las masas y los **espines** de los objetos compactos. Las propiedades extrínsecas describen cómo observamos el evento desde la Tierra e incluyen la localización de la fuente en el cielo, su distancia a la Tierra y la orientación del plano en el que los dos objetos compactos orbitan entre sí.

Conocemos las propiedades de los sistemas binarios a través de la **estimación de parámetros**. Esta es una técnica estadística en la que comparamos muchas **formas de ondas gravitacionales** posibles (con diferentes propiedades) con los datos de observación. La comparación nos dice qué valores de las propiedades de la fuente son consistentes con los datos (asumiendo que tenemos una señal de onda gravitacional real). En nuestros resultados seleccionamos los intervalos de confianza al 90% de estos rangos, lo que significa que tenemos un 90% de certeza de que las propiedades del sistema se encuentran dentro de ese rango.

Los contornos de la **Figura 4** muestran las regiones del 90% para dos propiedades: la **masa total** y la **relación de masa**. La masa total nos dice qué tan masivo es el sistema binario en conjunto, en unidades de **masas solares** M_{\odot} . La relación de masas nos dice qué tan asimétricas eran las masas de los dos objetos que se fusionaron. Una relación cercana a 1 significa que los dos tenían aproximadamente la misma masa.

El estudio de las propiedades de la población en su conjunto nos ayuda a entender cómo se formaron estos sistemas. También podemos usar estas observaciones para poner a prueba la teoría de la Relatividad General de Albert Einstein e incluso medir la velocidad a la que se expande el universo.

A continuación se incluye una selección de eventos destacados de O3b.

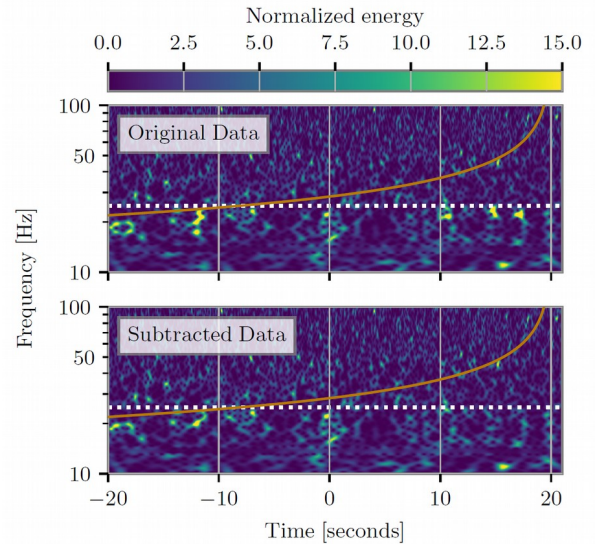


Figura 2: (Fig. 14 de nuestra publicación) Un ejemplo de eliminación de glitches. Los gráficos muestran los datos de tiempo-frecuencia para el evento GW200115_042309 y el color indica la energía en cada intervalo de tiempo-frecuencia. El gráfico superior muestra datos sin tratar y el gráfico inferior muestra los resultados del proceso. La pista de señal estimada se muestra con la línea naranja y no se ve afectada por dicho proceso.

Eventos destacados de GWTC-3

Según las propiedades de los nuevos 35 eventos enumerados en GWTC-3, 32 de ellos probablemente sean fusiones de binarios de agujeros negros, y tres son posibles fusiones entre estrellas de neutrones y agujeros negros. Consideramos que los objetos compactos que probablemente tengan masas inferiores a $3M_{\odot}$ son posibles candidatos a estrellas de neutrones. No se detectaron candidatos a binarios de estrellas de neutrones en O3b. La **Figura 5** también resume los valores más probables de tres parámetros clave para ocho eventos seleccionados.

Fusiones de estrella de neutrones - agujero negro

Las tres posibles fusiones entre una estrella de neutrones y un agujero negro son:

- **GW191219_163120** es una fusión de estrella de neutrones y agujero negro con componentes de masa extremadamente desiguales. El agujero negro tiene una masa de aproximadamente $31M_{\odot}$ y la estrella de neutrones aproximadamente $1,2M_{\odot}$. Esto la convierte en una de las menos masivas jamás observadas.
- **GW200115_042309** es una fusión clara de estrella de neutrones y agujero negro anunciada previamente [en su propio artículo](#). Estimamos que la masa del agujero negro es de $6M_{\odot}$ y la masa de la estrella de neutrones es de aproximadamente $1,4M_{\odot}$.
- **GW200210_092254** es otro posible sistema binario de estrella de neutrones y agujero negro. Consideramos que el objeto más masivo es un agujero negro debido a su masa, de aproximadamente $24M_{\odot}$. Sin embargo, el objeto más ligero tiene aproximadamente $2,8M_{\odot}$, lo que podría indicar una estrella de neutrones masiva o un agujero negro ligero. Este evento es bastante similar al **GW190814** de O3a. Dado lo que sabemos sobre las estrellas de neutrones, la fuente de GW200210_092254 es probablemente un sistema binario de agujeros negros, pero no podemos estar seguros.

Los observadores de ondas gravitacionales más entusiastas pueden notar la ausencia de GW200105_162426, de la que se informó junto con GW200115_042309 en una [publicación anterior](#). Cuando consideramos todos los eventos de O3b juntos, encontramos que la probabilidad de que GW200105_162426 sea una señal astrofísica real es del 36%, que está por debajo del umbral del 50% para su inclusión en el catálogo. Para obtener más información sobre esto, consulte la entrada en el glosario **GW200105_162426** más abajo. A pesar de no pasar el umbral GWTC-3, el evento se destaca del ruido de fondo, por lo que definitivamente lo consideramos un evento de interés. Si GW200105_162426 es real, entonces su fuente comprende un agujero negro de $9M_{\odot}$ y una estrella de neutrones de $1,9M_{\odot}$.

Fusiones de sistemas binarios de agujeros negros

Algunas fusiones destacadas de sistemas binarios de agujeros negros son:

- **GW200220_061928** es probablemente el sistema binario de agujeros negros con la masa total más alta en O3b (pero menos que **GW190521** y **GW190426_190642** en O3a). La masa combinada de los dos agujeros negros fue de $148M_{\odot}$ ($87M_{\odot}$ y $61M_{\odot}$ para cada uno). El agujero negro final formado a partir de la fusión tiene una masa de $141M_{\odot}$, superando el umbral de $100M_{\odot}$ para ser clasificado como un [agujero negro de masa intermedia](#).
- **GW191204_171526** es una fusión binaria de agujeros negros en la que podemos estar seguros de que su **espín efectivo** es positivo. Este es un parámetro que es conveniente medir a partir de una señal de onda gravitacional. Un valor positivo indica que al menos uno de los agujeros negros está girando y que, en general, los espines están alineados con la dirección de la rotación orbital. Esta información del espín es una pista clave de cómo se formó el sistema binario. La primera observación que tenemos de un sistema con espín inspiral efectivo positivo fue **GW151226**. Para **GW191204_171526**, las masas de los dos agujeros negros fusionados eran de aproximadamente $12M_{\odot}$ y $8M_{\odot}$ y la masa final del agujero negro resultante era de aproximadamente $19M_{\odot}$.
- **GW191129_134029** tiene la masa total más baja de los eventos de O3b que confiamos son agujeros negros binarios, unas $17,5M_{\odot}$ (aproximadamente $10,7M_{\odot}$ y $6,7M_{\odot}$ por cada agujero negro). El agujero negro resultante de la fusión tiene una masa de aproximadamente $16,8M_{\odot}$.
- **GW191109_010717** es un sistema binario de agujeros negros que parece poseer un espín efectivo negativo. Esto indicaría que, en general, los giros de los agujeros negros están alineados en la dirección opuesta al momento angular orbital (los dos objetos compactos pueden haber estado girando en la dirección opuesta a su movimiento orbital en el sistema binario). La probabilidad de que su espín sea negativo es del 90%. El espín efectivo negativo parece ser más raro entre nuestras detecciones que el espín efectivo positivo.

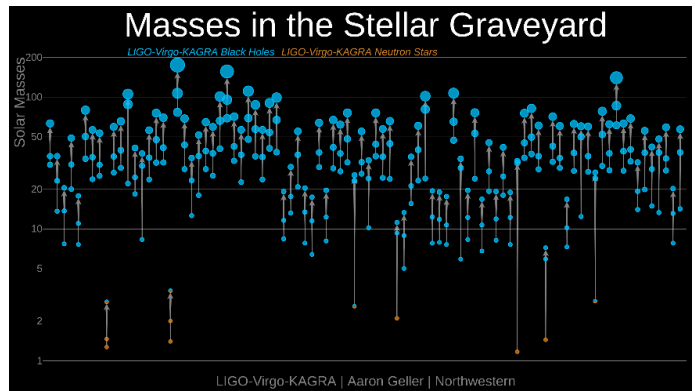


Figura 3: Masas de objetos compactos. Cada círculo representa un objeto compacto diferente y la escala vertical indica la masa como un múltiplo de la masa de nuestro Sol. Los círculos azules representan agujeros negros y los círculos naranjas representan estrellas de neutrones. Los círculos grises son objetos compactos cuya clasificación es incierta. Cada fusión implica tres objetos compactos: dos objetos de fusión y el objeto resultante final. Las flechas indican qué objeto compacto se fusionó y el remanente que produjeron. Créditos: Colaboración LIGO Virgo / Frank Elavsky, Aaron Geller / Northwestern.

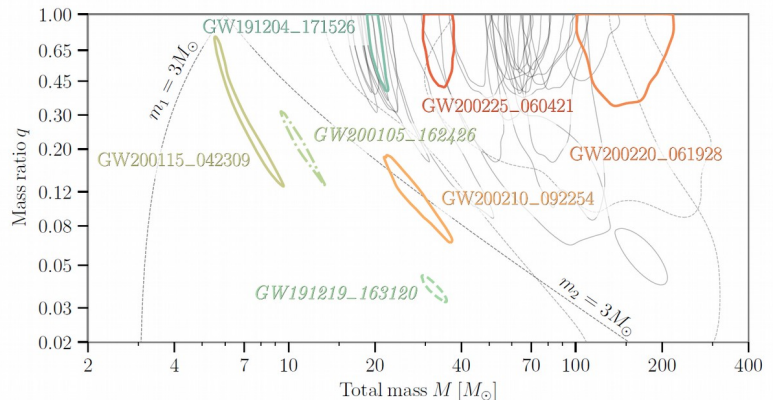


Figura 4: (Fig. 8 de nuestra publicación) Estimaciones de la masa total (M) y la razón de masas (q) entre el componente menos masivo y el más masivo, para todos los eventos de O3b. Cada contorno representa un evento diferente y encierra los valores más probables de los parámetros con un 90% de probabilidad (la región con un 90% de credibilidad). Varios eventos están resaltados en color debido a sus interesantes propiedades (ver texto principal y nuestro artículo).

GW191109_010717 también tiene una de las fuentes más masivas; aproximadamente $65 M_{\odot}$ y $47 M_{\odot}$ para cada agujero negro y aproximadamente $107 M_{\odot}$ para el agujero negro final. Dado que su masa es cercana a la de GW200220_061928, en las gráficas destacamos GW200225_060421, que es nuestro otro candidato con una buena probabilidad (alrededor del 85%) de tener espín efectivo negativo.

Mirando hacia el futuro

Las colaboraciones LIGO y Virgo han revelado un universo abundante en fuentes de ondas gravitacionales. Hasta la fecha, hemos observado 90 eventos. GWTC-3 añade 35 eventos, incluidos nuestros mejores candidatos para fusiones de estrellas de neutrones y agujeros negros. A medida que continuemos observando más eventos, aprenderemos más y más sobre los objetos que los producen y sus propiedades, y los usaremos para seguir poniendo a prueba la Relatividad General. Detectar más eventos también significa que aumentamos nuestras posibilidades de ver a los miembros más inusuales de estas poblaciones.

Los detectores LIGO y Virgo ahora están inoperativos para realizar mejoras antes del próximo cuarto período de observación, [actualmente programado para comenzar en 2022](#). El detector [KAGRA](#) en Japón también se unirá a O4 durante toda la observación. Añadir más detectores a la red ayudará a mejorar nuestra capacidad de localizar fuentes potenciales.

Mientras tanto, continuamos analizando nuestros datos, aprendiendo de las observaciones de objetos compactos y buscando tipos de ondas gravitacionales aún no descubiertas, incluidas ondas gravitacionales continuas, ondas gravitacionales estocásticas y, por supuesto ¡algunas sorpresas!

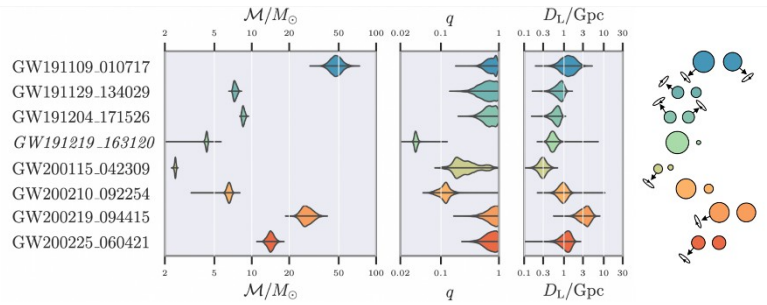


Figura 5: Gráficas que muestran los valores más probables de tres parámetros clave de ocho binarias de objetos compactos de GWTC-3: la masa de chirp binario, M , la relación de masa, q , entre el componente menos masivo y el más masivo; y la [distancia de luminosidad](#), D_L . Cada binaria se ilustra en el lado derecho del gráfico, con el tamaño del círculo que representa la masa y los giros de los componentes indicados (no a escala). Créditos: Colaboraciones LIGO-Virgo-KAGRA / Isabel Romero-Shaw / OzGrav

Para saber más

Lea el apartado de noticias en nuestras webs:

- <https://www.ligo.org/news.php>
- <https://www.virgo-gw.eu/#news>
- gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Lea el artículo completo:

- <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2000318/public/main>

Datos de GWTC-3 disponibles en:

- <https://www.gw-openscience.org/>

Visita nuestras páginas web

www.ligo.org, www.virgo-gw.eu,
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Traducción al castellano por Joan Moragues Roca e Isabel Cordero-Carrión (a partir de la versión original en inglés en <https://www.ligo.org/science/Publication-O3bCatalog/>)

Glosario

Sistema binario de agujeros negros: sistema que consta de dos agujeros negros en órbita cercana entre sí. (Mira [aquí](#).)

Sistema binario de estrellas de neutrones: sistema que consta de dos estrellas de neutrones en órbita cercana entre sí. (Mira [aquí](#).)

Agujero negro: una región del espacio-tiempo extremadamente deformada causada por una masa extremadamente compacta donde la gravedad es tan intensa que evita que cualquier cosa, incluida la luz, escape.

Masa de chirp: una combinación matemática de masas para cada objeto compacto en un sistema binario (consulte [aquí](#) la fórmula). La masa de chirp dicta el aumento en la frecuencia característica de un chirrido gravitacional para binarias de menor masa.

Objeto compacto: un objeto astrofísico extremadamente denso, como un agujero negro, una estrella de neutrones o una [enana blanca](#).

Espín efectivo: parámetro que codifica la información de giro en una señal de onda gravitacional. Describe cuánto del giro de cada agujero negro individual está girando de la misma manera que la rotación orbital (por ejemplo, si el giro y la órbita son ambos en sentido horario o antihorario).

Tasa de falsas alarmas: frecuencia con la que una fluctuación de ruido del detector podría producir una señal similar al evento candidato considerado. Cuanto menor sea esta tasa de falsas alarmas, más probable será que el evento candidato sea astrofísico.

Forma de onda gravitacional: Representación de la evolución de una señal de onda gravitacional con el tiempo.

GW200105_162426: Posible coalescencia estrella de neutrones-agujero negro ya [reportada](#). Este candidato tiene un 36% de probabilidad de ser una señal real. Es una fuente particularmente difícil de analizar porque se trata de una observación de un solo detector (LIGO Livingston). En el momento del evento, LIGO Hanford no estaba tomando datos. Virgo sí, pero no se pudo identificar tal señal (hubo una situación similar con [GW170817](#)). Además, en esta etapa se sabe poco sobre la población de sistemas binarios de estrellas de neutrones y agujeros negros, ya que no tenemos muchas observaciones de ellos. Esto dificulta la clasificación confiable de las fusiones entre estrellas de neutrones y agujeros negros. A medida que observemos más sistemas así, aprenderemos más sobre estas binarias y podremos volver para verificar candidatos como GW200105_162426.

Dispersión de la luz: cuando la luz láser incide en un componente óptico, una pequeña

proporción de ella se puede dispersar (reflejar en un ángulo aleatorio). Después puede reflejarse en otras superficies y regresar al rayo láser del detector y causar errores. Para obtener más información sobre estos fallos y otros, eche un vistazo a [Gravity Spy](#).

M_{\odot} (masa solar): la masa del Sol (alrededor de 2×10^{30} kilogramos). La masa solar es una unidad común para representar masas en astronomía.

Relación de masa: Relación entre la masa del objeto compacto más ligero y la masa del objeto compacto más pesado.

Mediana: el valor exactamente en el medio de una distribución, de modo que la mitad de los demás valores se encuentran por encima y la mitad por debajo.

Megaparsec: unidad de distancia. Un megaparsec (1 Mpc) equivale aproximadamente a 3,26 millones de años luz.

Estrella de neutrones: Remanente de una estrella masiva que ha agotado su combustible y muere de forma catastrófica (supernova), que puede resultar en la formación de una estrella de neutrones: un objeto tan masivo y denso que los átomos no pueden sostener su estructura como normalmente los percibimos en la Tierra. Son tan masivas como nuestro sol, pero con un radio de unos diez kilómetros.

Sistema binario de estrella de neutrones y agujero negro: sistema que consta de un agujero negro y una estrella de neutrones en órbita cercana entre sí. (Mira [aquí](#).)

Período de observación: período de tiempo en el que los detectores de ondas gravitacionales toman datos para observaciones astrofísicas.

Estimación de parámetros: técnica estadística utilizada para inferir los parámetros astrofísicos correspondientes a una señal de onda gravitacional.

Probabilidad de ser astrofísico: probabilidad de que una señal sea una onda gravitacional real. Depende de la intensidad de la señal en comparación con el ruido de fondo como de nuestra comprensión de la población a la que pertenece la fuente. Tener muchas observaciones de sistemas binarios nos ayuda a comprender su población y a calcular la probabilidad de que las señales candidatas sean astrofísicas. Para el caso de fusiones de estrellas de neutrones y agujeros negros, esta cantidad es más difícil de calcular y es posible que debamos revisar las estimaciones actuales una vez que tengamos más observaciones y sepamos más sobre la población.

Espín: la velocidad y la dirección de rotación (es decir, el momento angular) de un agujero negro alrededor de su centro de masa.

Masa total: la suma de las masas de los dos objetos compactos en un sistema binario.