

GWTC-2: UN CATÁLOGO EXTENDIDO DE DETECCIONES DE ONDAS GRAVITACIONALES

Presentamos GWTC-2 (siglas de “*Gravitational-Wave Transient Catalog 2*”, o “Catálogo de Ondas Gravitacionales Transitorias 2”), un catálogo actualizado de las ondas gravitacionales detectadas por los observatorios de [LIGO](#) y [Virgo](#) desde su primera observación en 2015 hasta el final de O3a, la primera mitad del tercer período de observación. O3a tuvo lugar desde el 1 de abril al 1 de octubre de 2019, y añadió 39 eventos de ondas gravitacionales a la lista de los 11 eventos ya confirmados en [GWTC-1](#), lo que hacen un total de 50 eventos en GWTC-2. Los descubrimientos en O3a cubren un amplio rango de parámetros astrofísicos, y presentan fuentes consistentes con la fusión de sistemas binarios de agujeros negros (BBH, por sus siglas en inglés, *Binary Black Holes*), sistemas binarios de estrellas de neutrones (BNS, por sus siglas en inglés, *Binary Neutron Stars*), y sistemas binarios de agujeros negros y estrellas de neutrones (NSBH, por sus siglas en inglés, *Neutron Star - Black Hole*).

Es importante destacar que durante O3a se han confirmado alrededor de 3 veces más detecciones de eventos de ondas gravitacionales con respecto a los dos períodos de observación previos (O1 y O2) juntos. Además, el detector Virgo ha acompañado a los dos detectores LIGO durante todo O3a, con al menos un detector activo el 97% del tiempo, y con al menos dos detectores activos el 82% del tiempo. Algunos eventos especialmente interesantes de O3a incluyen la segunda observación de ondas gravitacionales consistente con la fusión de un sistema binario de estrellas de neutrones, los primeros eventos con masas inequívocamente diferentes, y un sistema binario de agujeros negros muy masivo, con una masa total cercana a 150 veces la masa del Sol. En este resumen describimos las mejoras en LIGO y Virgo que han hecho esto posible, así como la relevancia de estos eventos en el campo de la astrofísica.

DETECTANDO ONDAS GRAVITACIONALES

Los 39 descubrimientos de O3a son el resultado de varias mejoras en los observatorios LIGO y Virgo, de un aumento en la calidad de los datos, y de la variedad de algoritmos de búsqueda de ondas gravitacionales. [Recientes mejoras](#) en la instrumentación para reducir el ruido y aumentar la sensibilidad incluyen láseres más potentes, espejos nuevos y mejorados, y un mejor control de la luz dispersa. Estos cambios han llevado a un aumento en los rangos de frecuencia y distancia para los tres detectores, extendiendo así nuestra visión del universo. Considerando los tres detectores, la **mediana*** del rango en el que podemos observar una fusión de estrellas de neutrones típica ha aumentado alrededor de un 63% de O2 a O3a, como se muestra en la **Figura 1**.

Otro paso vital para el descubrimiento de fuentes de ondas gravitacionales es el refinado de los datos que llegan directamente de los detectores. Este [proceso de acondicionamiento de los datos](#) comprende el calibrado de los datos, la sustracción de ruido, y la eliminación de los ruidos transitorios (*glitches*, en inglés).

Primero, y casi a tiempo real para las detecciones iniciales, calibramos las variaciones de potencia óptica medidas en los detectores para obtener una magnitud adimensional de la deformación detectada (*strain*, en inglés). Después, recalibramos los datos para reducir el error sistemático, y eliminamos el ruido para aumentar aún más el rango en el que podemos detectar fuentes de ondas gravitacionales, revelando así señales más débiles en los datos.

El problema más común en el análisis de datos de ondas gravitacionales, relacionado con la calidad de los datos, son los *glitches*. Son señales transitorias de ruido de corta duración, algunas de las cuales pueden ser producidas por el disparador mecánico de una cámara, o por la luz dispersa en el haz del láser. Otras, sin embargo, tienen un origen más misterioso, como los *glitches* de banda ancha y duración breve, conocidos como *blips*. Una forma en la que identificamos y clasificamos *glitches* en los datos de LIGO y Virgo es a través de la plataforma Gravity Spy, con la ayuda de miles de científicos ciudadanos (consulta cómo puedes ayudarnos a identificar *glitches* con [Gravity Spy](#)). Después de identificar los *glitches* más significativos en los datos, aplicamos un método de sustracción para eliminarlos de los candidatos a ondas gravitacionales, como se muestra en la **Figura 2**. Ocho de los 39 eventos observados en O3a se beneficiaron de este método de sustracción de *glitches* como un pre-procesado previo al análisis de estimación de parámetros.

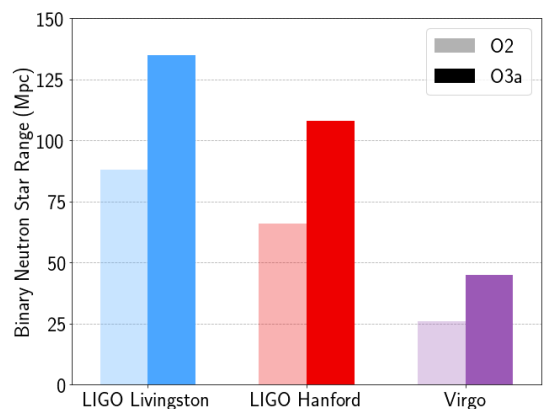


Figura 1: La mediana del rango de observación de un sistema binario de estrellas de neutrones para cada detector durante el segundo período de observación (O2), comparada con la primera mitad del tercer período de observación (O3a).

Nota: 1 megáparsec (Mpc) es alrededor de 3.26 millones de años luz.

(Créditos: LIGO-Virgo Collaboration / Eve Chase / Caitlin Rose / Northwestern / University of Wisconsin-Milwaukee.)

* Puedes encontrar las definiciones de algunos términos en negrita en el Glosario que se encuentra en la última página.

En la búsqueda de ondas gravitacionales, la identificación de los candidatos se produce en dos escalas de tiempo. En primer lugar, varios algoritmos de búsqueda procesan los datos de forma inmediata, con el fin de generar [alertas públicas de detección](#) en cuestión de minutos. Posteriormente, los datos se vuelven a analizar para producir la lista de candidatos de este catálogo, usando una calibración de datos mejorada, una evaluación de la calidad de los datos, y mejores métodos para calcular la significación estadística. Para decidir qué candidatos considerar, establecemos un umbral en la tasa de falsos positivos de dos eventos por año, el ritmo al que esperamos observar un evento como el considerado, pero generado fortuitamente debido al ruido. De los 39 eventos en O3a, 26 habían sido anunciados previamente en las alertas de detección casi en tiempo real, mientras que los otros 13 se presentan en el catálogo GWTC-2 por primera vez.

En GWTC-2 hemos introducido una nomenclatura revisada para los eventos de ondas gravitacionales anunciados. La convención previa de usar únicamente la fecha de observación se mantiene para los eventos publicados previamente, incluyendo los más recientes GW190412, GW190425, GW190521 y GW190814. Los nuevos eventos de GWTC-2, sin embargo, llevan añadido el tiempo UTC de su detección; por ejemplo, GW190701_203306 (ver **Figura 2**) fue detectado a las 20:33:06 UTC el 1 de julio de 2019. De esta forma, es posible tener nombres específicos para varios eventos detectados el mismo día, algo que ocurrió tres veces durante O3a.

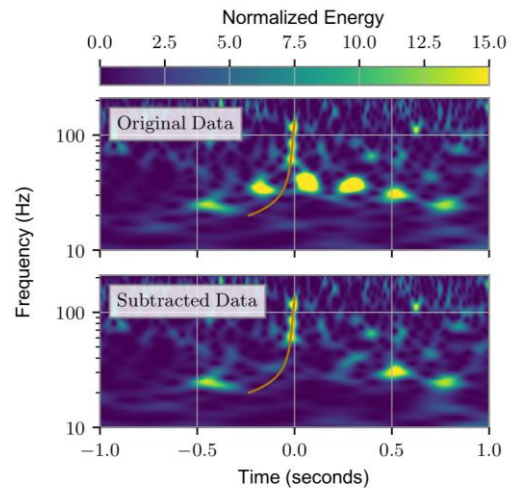


Figura 2: Los datos tiempo-frecuencia del evento GW190701_203306 antes y después de la sustracción de glitches. En este caso, la luz dispersa en el detector LIGO Livingston generó un glitch en forma de exceso de ruido a frecuencias menores de ~40 Hz. (Adaptado de la Fig. 5 de nuestro [artículo](#).)

MIDIENDO PARÁMETROS ASTROFÍSICOS

Investigamos la naturaleza astrofísica de cada evento a través de un proceso llamado estimación de parámetros, que revela los valores de distintas propiedades astrofísicas características de cada evento. Medimos *parámetros extrínsecos* que describen la relación entre un sistema binario y nosotros en la Tierra, como la distancia a la fuente, la localización de la fuente en el cielo, y la orientación del sistema binario desde nuestro punto de vista como observadores. También medimos *parámetros intrínsecos*, propiedades como las masas y espines de cada **objeto compacto** del sistema binario. A partir de los parámetros del evento calculamos las **formas de onda gravitacionales**, que representan la evolución temporal de la deformación debida a una onda gravitacional. Posteriormente comparamos esta predicción con los datos medidos en LIGO y Virgo, teniendo en cuenta cualquier ruido presente en los detectores. A través de estas técnicas de estimación de parámetros producimos [intervalos de credibilidad](#) del 90%, que representan el intervalo de valores razonablemente consistentes con los datos.

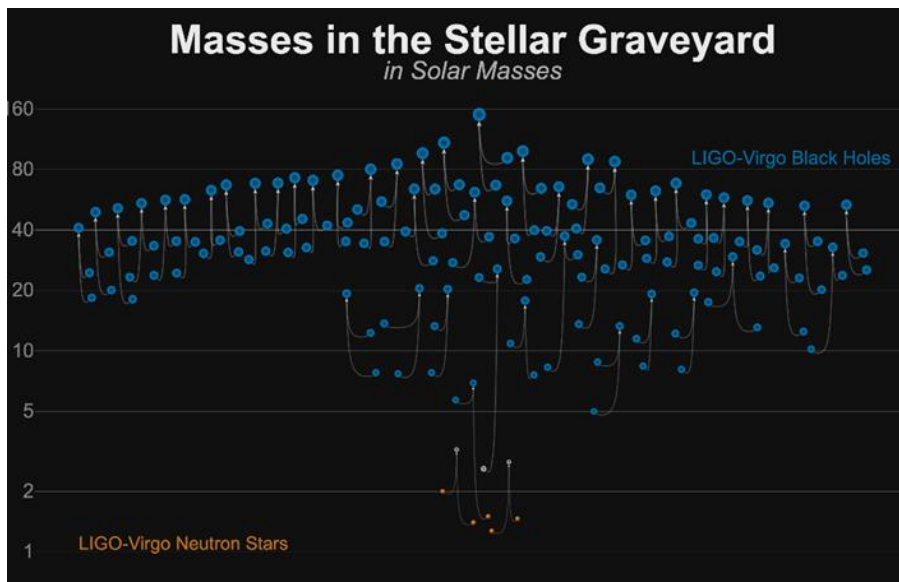


Figura 3: Una colección de masas para un amplio rango de objetos compactos. En la gráfica se muestran agujeros negros (azul), estrellas de neutrones (naranja), y objetos compactos de naturaleza incierta (gris) detectados mediante ondas gravitacionales. Cada fusión de sistemas binarios de objetos compactos corresponde a tres de estos objetos: los dos objetos que se fusionan y el remanente final de la fusión. (Créditos: LIGO Virgo Collaboration / Frank Elavsky, Aaron Geller / Northwestern).

Nuestros 39 eventos cubren un amplio rango de masas, codificando abundante información acerca de la historia y la formación de los agujeros negros y estrellas de neutrones en el universo. Las señales de ondas gravitacionales generadas mucho antes de la fusión dependen principalmente de una combinación especial de las masas individuales de los componentes, llamada “**masa de gorjeo**” (*chirp mass*, en inglés). Otros parámetros importantes relacionados con la masa incluyen la **masa total** de cada sistema binario (la suma de las masas de los componentes), y el **razón de masas**, que representa la razón de la masa del objeto compacto más ligero y la del más masivo.

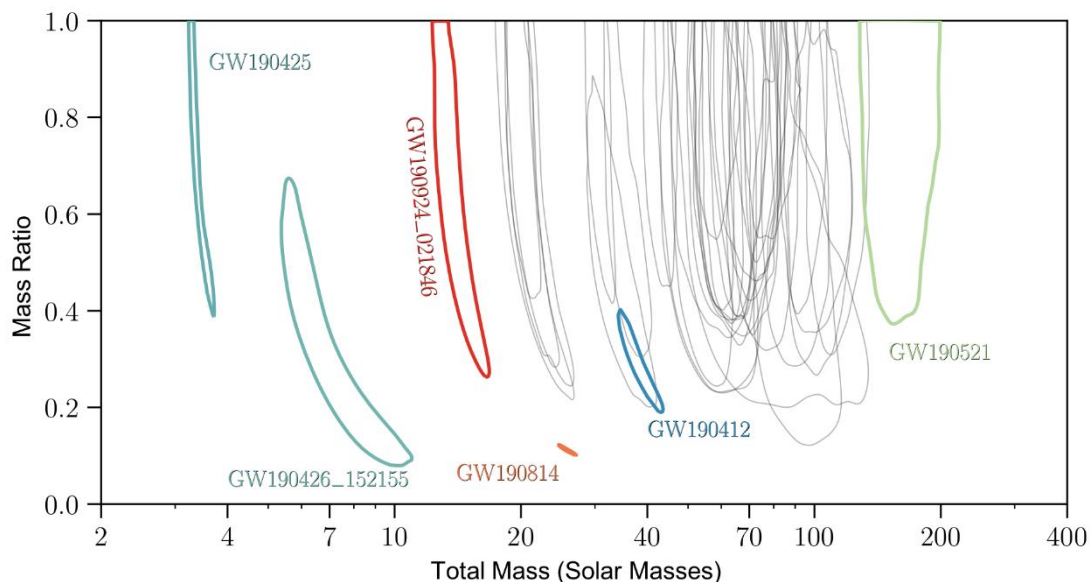


Figura 4: Estimaciones de la razón de masas y la masa total para todos los eventos detectados durante O3a. Los contornos representan los intervalos de credibilidad del 90%. Seis eventos únicos aparecen destacados. (Adaptado de la Fig. 6 de nuestro [artículo](#).)

DESCUBRIMIENTOS EXCEPCIONALES DE O3a

La **Figura 3** ilustra la diversidad de las masas en GWTC-2, cuyo rango comprende desde estrellas de neutrones de aproximadamente 1.4 masas solares hasta agujeros negros que rondan las 150 masas solares. Las **Figuras 4 y 5** destacan los siguientes ocho eventos, cuatro de ellos descritos en publicaciones individuales:

- [GW190412](#): el primer sistema BBH con masas inequívocamente diferentes, que además muestra evidencias de [armónicos de orden superior](#)
- [GW190425](#): el segundo evento de ondas gravitacionales consistente con un sistema BNS tras [GW170817](#)
- [GW190426_152155](#): evento de baja masa consistente con un sistema NSBH o un sistema BBH
- [GW190514_065416](#): sistema BBH con el espín alineado efectivo más pequeño de todos los eventos de O3a
- [GW190517_055101](#): sistema BBH con el espín alineado efectivo más grande de todos los eventos de O3a
- [GW190521](#): sistema BBH con una masa total superior a 150 veces la masa del Sol
- [GW190814](#): un sistema altamente asimétrico de naturaleza ambigua, que corresponde a la fusión de un agujero negro de 23 masas solares con un objeto compacto de 2.6 masas solares, que puede ser el agujero negro más ligero o la estrella de neutrones más masiva jamás observados en un sistema binario de objetos compactos
- [GW190924_021846](#): probablemente el sistema BBH con la masa más baja, siendo la masa de los dos componentes superior a 3 masas solares

Además, GWTC-2 incluye eventos que cubren el llamado “hueco en la parte inferior de la distribución de masas”, entre 2.5 y 5 masas solares. Durante muchos años, los astrofísicos han teorizado acerca de la existencia de este “hueco”, debido a la escasez de observaciones en este rango de masas. Sin embargo, durante O3a han aparecido objetos posiblemente situados en este “hueco”, como las componentes más ligeras tanto de [GW190814](#) como de [GW190924_021856](#).

Como se ve en la **Figura 4**, [GW190521](#) contiene la masa total más grande observada en O3a, que dobla prácticamente la masa de [GW170729](#), el sistema BBH más masivo de [GWTC-1](#). Además, es probable que [GW190521](#) contenga el agujero negro individual más masivo detectado mediante ondas gravitacionales a día de hoy, con una masa superior a 90 masas solares. Algunos otros eventos podrían tener masas totales por encima de 100 masas solares, incluyendo [GW190519_153544](#), [GW190602_175927](#), y [GW190706_222641](#).

GWTC-2 presenta sistemas binarios con masas más diferentes que cualquier fuente presente en GWTC-1, como GW190412 y GW190814, ambos originados de una fusión de un agujero negro con un compañero más ligero. Las fusiones asimétricas amplifican el tono de los armónicos de orden superior, como se ve en la detección de [GW190412](#). Este catálogo actualizado incluye otras proezas de la astronomía de ondas gravitacionales, como el evento más lejano observado hasta la fecha, así como nueve eventos localizados en una región más pequeña del 1% del área total del cielo, todos ellos pertenecientes a O3a.

Los espines revelan más información acerca de la evolución de los sistemas binarios de objetos compactos. Los espines están relacionados con el [momento angular](#) de un cierto objeto compacto, y varían desde una rotación nula hasta una rotación máxima. Típicamente, los espines se miden mediante un parámetro llamado “espín alineado efectivo”, una combinación particular de los espines de cada componente del sistema antes de la fusión. La **Figura 5** muestra el espín alineado efectivo medido con respecto a la masa de gorjeo para cada evento. Un espín alineado efectivo negativo indica espines no alineados, dando a entender que el sistema binario pudo haberse formado en un entorno denso, como un [cúmulo globular](#). Como se destaca en la **Figura 5**, es probable que GW190517_055101 tenga el mayor espín alineado efectivo. En GWTC-2 no se ha identificado ningún valor claramente negativo, aunque es probable que GW190514_065416 posea el espín alineado efectivo más pequeño. Por otro lado, los espines también pueden desvelar pruebas de la presencia de [precesión](#) en un sistema binario; GWTC-2 contiene eventos que podrían apoyar una ligera evidencia de precesión, como son GW190412 y GW190521.

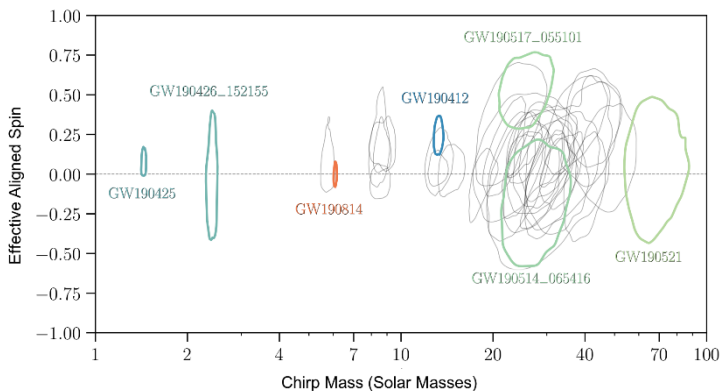


Figura 5: Espín alineado efectivo con respecto a la masa de gorjeo estimados para todos los eventos de O3a. Los contornos representan intervalos de credibilidad del 90%. (Adaptado de la Fig. 7 de nuestro [artículo](#).)

UN FUTURO BRILLANTE PARA LA ASTRONOMÍA DE ONDAS GRAVITACIONALES

Por muy irreal que parezca, la detección de ondas gravitacionales se ha convertido en ya en un hecho habitual, tras sólo cinco años después de la [primera detección](#), en septiembre de 2015. Ahora, con 50 detecciones de ondas gravitacionales confirmadas, somos capaces de estudiar mejor las poblaciones de agujeros negros y estrellas de neutrones en el universo (véase [este resumen](#)). Estas nuevas observaciones de ondas gravitacionales también aumentan nuestro conocimiento acerca de la Teoría de la Relatividad General (véase [este resumen](#)).

El futuro de la astronomía de ondas gravitacionales es cada vez más prometedor después de haber sumado 39 eventos durante los primeros seis meses del tercer período de observación O3. Los análisis de la segunda mitad de O3, llamada O3b, están actualmente en marcha, y aumentarán nuestro creciente catálogo de ondas gravitacionales transitorias. Tras O3, los detectores se someterán a una serie de mejoras de ingeniería con el objetivo de aumentar aún más su capacidad para observar eventos astrofísicos, a tiempo para el inicio del cuarto período de observación. Mientras esperamos a las mejoras instrumentales y a la construcción de nuevos detectores, la comunidad de ondas gravitacionales continuará explorando la naturaleza de los agujeros negros y las estrellas de neutrones a lo largo del universo.

GLOSARIO

Masa de gorjeo: combinación matemática de las masas de cada uno de los objetos compactos de un sistema binario. La masa de gorjeo define el aumento en frecuencia característico durante la fusión para sistemas binarios de baja masa.

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

Forma de onda gravitacional: representación de la evolución temporal de una señal de onda gravitacional.

Razón de masas: ratio de la masa del componente más ligero entre la masa del componente más masivo.

Mediana: valor situado exactamente en el medio de una distribución, de tal forma que la mitad de los otros valores está situada por encima y la otra mitad por debajo de ella.

Estimación de parámetros: técnicas estadísticas usadas para inferir los parámetros astrofísicos correspondientes a una señal de onda gravitacional.

Masa solar: la masa del Sol. Se usa de forma común en astronomía como unidad de masa.

Deformación (strain): el cambio en la longitud del brazo del detector debido a la deformación del espacio-tiempo tras el paso de una onda gravitacional a través del detector, dividido entre la longitud total del brazo.

PARA SABER MÁS:

Visita nuestras páginas web:

<http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>

Lee un preprint gratuito del artículo científico completo (en inglés) en: <https://dcc.ligo.org/P2000061/public>

Los datos de los 39 eventos descubiertos en O3a están disponibles a través del portal GWOSC, en: <https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/GWTC-2/>

La página web de GWOSC incluye documentación útil, ejemplos de código y tutoriales que sirven de guía para explorar estos conjuntos de datos públicos.



Visita nuestras webs:

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

