

## GWTC-1: UN NUEVO CATÁLOGO DE DETECCIONES DE ONDAS GRAVITACIONALES

Presentamos un nuevo catálogo (conocido como GWTC-1 o “Catálogo de eventos Transitorios de Ondas Gravitacionales 1”) de fuentes de ondas gravitacionales descubiertas durante el primer y segundo período de observación de la red global de detectores de [ondas gravitacionales Avanzados](#).

Nuestro catálogo presenta cuatro nuevas fusiones [de binarias de agujeros negros](#) que no fueron presentados anteriormente, incluida una nueva “detección triple”, observada tanto por los detectores [LIGO](#) como por el detector [Virgo](#) el 18 de agosto de 2017. Para este evento, la posición en el cielo de los agujeros negros binarios, ubicados a 2.500 millones de [años luz](#) de la Tierra, se identificó en el cielo con una precisión de 39 grados cuadrados, mejor que cualquier otra fusión binaria de agujeros negros observada hasta la fecha.

Hemos refinado nuestras estimaciones de las propiedades de las fuentes de los once eventos de ondas gravitacionales confirmados en nuestro catálogo, con un total de diez eventos binarios de agujeros negros y un evento binario de [estrellas de neutrones](#) detectado hasta el momento. Finalmente, proporcionamos una lista de eventos candidatos “marginales”, en los que no se pudo confirmar la detección de ondas gravitacionales, así como una actualización de nuestras estimaciones de la tasa a la que se producen las fusiones de agujeros negros binarios y de estrellas de neutrones en el universo y una cota superior de la tasa de fusiones de agujero negro-estrella de neutrones.

¡El campo emergente de la astronomía de ondas gravitacionales está entrando en una nueva y emocionante era!

### LOS DOS PRIMEROS PERIODOS DE OBSERVACIÓN DE LIGO AVANZADO Y VIRGO AVANZADO

Los últimos tres años han sido testigos de los dos primeros períodos de observación de las redes de detectores de ondas gravitacionales (GW) [LIGO Avanzado](#) y [Virgo Avanzado](#). LIGO Avanzado realizó su primer período de observación (O1) desde el 12 de septiembre de 2015 hasta el 19 de enero de 2016 y su segundo período (O2) desde el 30 de noviembre de 2016 hasta el 25 de agosto de 2017.

Durante O2, el 1 de agosto de 2017, Virgo Avanzado se unió a los dos detectores LIGO Avanzado por primera vez. Algunos aspectos destacados de O1 y O2 fueron:

- [GW150914](#): la primera detección de ondas gravitacionales de la fusión de dos agujeros negros a más de mil millones de años luz de distancia;
- [GW170814](#): la primera señal de GW medida por la red de tres detectores, también procedente de una fusión binaria de agujeros negros (BBH);
- [GW170817](#): la primera señal de GW medida procedente de una fusión de estrellas de neutrones (BNS), así como el primer evento observado en luz, por docenas de telescopios en todo el espectro electromagnético.

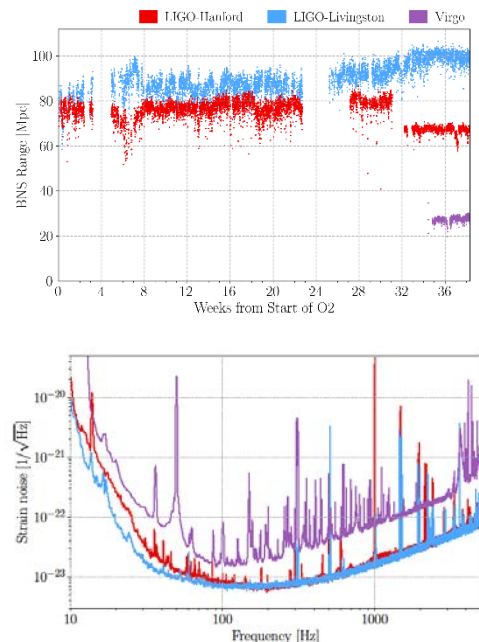
En el intervalo entre O1 y O2, se mejoró la sensibilidad de ambos instrumentos LIGO y en LIGO Livingston (LLO) se realizaron mejoras adicionales durante O2. Como resultado, el “rango BNS” de LLO (un número utilizado para cuantificar el rendimiento de un detector, que corresponde aproximadamente a la distancia promedio a la que podemos detectar una fusión de un sistema binario de estrellas de neutrones) aumentó de aproximadamente 60 Mpc durante O1, a 80 Mpc al comienzo de O2 y luego a más de 100 Mpc al final de este período.

El rango BNS de LIGO Hanford (LHO) fue de aproximadamente 80 Mpc al finalizar O1 y se incrementó en un promedio de alrededor un 20% durante todo O2. El detector Virgo Avanzado se basa en el detector Virgo de primera generación que completó las operaciones en 2011. Las principales mejoras realizadas a Virgo incluyen un nuevo diseño óptico con un tamaño de haz más grande y una mayor “[finura](#)” de la cavidad óptica de los brazos, espejos de mejor calidad y bancos ópticos que están suspendidos y en vacío. El rango BNS de Virgo Avanzado durante O2 fue de aproximadamente 25 Mpc.

La Figura 1 muestra el rango BNS de los tres detectores y la mejor sensibilidad que lograron durante O2.

### FIGURAS DE LA PUBLICACIÓN

Para más información sobre estas figuras y cómo han sido producidas, léase el [preprint](#) disponible públicamente.



**Figura 1:** El panel superior muestra el “rango BNS” de los detectores LIGO y Virgo durante O2. La interrupción en la tercera semana se debe al periodo festivo de fin de año de 2016. Hubo una interrupción adicional en la toma de datos en la semana 23 para llevar a cabo mejoras en la sensibilidad del instrumento. El impacto sobre la sensibilidad instrumental de LIGO Hanford, debido a un terremoto en Montana, puede ser observado en la semana 31. Virgo se unió a O2 en la semana 34. El panel inferior muestra la sensibilidad de cada detector, indicado por la amplitud total del ruido en función de la frecuencia. Las curvas representan el mejor rendimiento de cada detector durante O2. (Adaptado de la Figura 1 de nuestro [artículo](#).)

Los detectores LIGO tomaron datos individualmente alrededor del 60% del tiempo, y los datos fueron tomados simultáneamente por ambos detectores (a los que se hace referencia como "datos de coincidencia") el 45% del tiempo. Después de eliminar los intervalos afectados por perturbaciones instrumentales, el período de "datos de coincidencia" resulta ser de 118 días. 15 de estos días también coincidieron con Virgo, que tomó datos confidenciales alrededor del 80% del tiempo.

Las búsquedas de señales de ondas gravitacionales de la fusión de sistemas binarios compactos se llevaron a cabo mediante dos algoritmos de búsqueda independientes, llamados "PyCBC" y "GstLAL", que comparan los datos observados con la señal teórica predicha por la [Relatividad General](#) usando una técnica llamada "[matched filtering](#)" ("filtro de correlación"). Además, también se utilizó otro algoritmo de búsqueda genérico, llamado "cWB", que no asume como hipótesis un modelo teórico específico para la señal de onda gravitacional.

Las mejoras en estos algoritmos de búsqueda y una extensión de la búsqueda, en términos de las propiedades de los objetos astrofísicos buscados, motivaron el nuevo análisis de los datos de O1. De manera similar, la aplicación de un procedimiento de "limpieza de datos", para eliminar parte del ruido del detector y mejorar la sensibilidad, también ha motivado un nuevo análisis de los datos de O2.

Cada método de búsqueda produce una lista de eventos candidatos que se clasifican en términos de su intensidad de señal con respecto al ruido del detector, una cantidad llamada "[relación señal-ruido](#)" (SNR), y su importancia estadística, cuantificada por [la tasa de falsa alarma](#) (FAR), es decir, la tasa a la que uno podría esperar que tal evento candidato haya ocurrido por casualidad, debido simplemente a las características del ruido de los datos del detector que imitan una detección real de ondas gravitacionales. Al establecer un umbral de FAR de menos de 1 por cada 30 días (aproximadamente 12.2 por año) en al menos uno de los dos algoritmos de análisis de "filtro de correlación", restringimos la lista de eventos candidatos y eliminamos muchas señales candidatas que muy probablemente sean simplemente artefactos del ruido del detector: dentro de estos candidatos encontramos 11 eventos con una probabilidad mayor al 50% de tener un origen astrofísico, en lugar de ser un ruido instrumental. Estos candidatos se etiquetan con el prefijo "GW" seguido de los datos de la detección (por ejemplo, GW150914). Los otros candidatos se consideran eventos "marginales", que probablemente no sean de origen astrofísico.

## ALGUNOS VIEJOS AMIGOS – Y ALGUNOS NUEVOS DESCUBRIMIENTOS

Nuestros tres algoritmos de búsqueda han identificado un total de 11 detecciones fiables en los datos de O1 + O2. Siete de estos han sido presentados previamente: tres fusiones de BBH en O1, y tres más de BBH y una fusión de BBH en O2. Una de las fusiones de BBH en O1 fue etiquetada previamente como LVT151012 (detectada el 12 de octubre de 2015), ya que su descubrimiento inicial en 2016 tenía una [significación estadística](#) demasiado baja como para ser considerado una detección de GW en ese momento. Sin embargo, un nuevo análisis detallado de este evento ha demostrado ahora que efectivamente cumple con los criterios de una detección fiable, y por ese motivo ha sido etiquetado de nuevo como GW151012.

Además, hemos descubierto cuatro nuevos eventos de ondas gravitacionales durante O2: GW170729 (detectado el 29 de julio), GW170809 (9 de agosto), GW170818 (18 de agosto) y GW170823 (23 de agosto), todos precedentes de la fusión de las binarias de agujeros negros. GW170818 destaca entre las nuevas observaciones: es la segunda detección de coincidencia triple de BBH, observada tanto por los detectores LIGO como por Virgo, después de GW170814, y la tercera coincidencia triple contando también el evento BNS GW170817.

## MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES DE NUESTRAS FUENTES DE ONDA GRAVITACIONAL

Un par de agujeros negros que experimentan órbitas casi circulares entre sí antes de fusionarse se describe mediante una combinación de 15 cantidades físicas. 8 de estos parámetros son propiedades del propio sistema de agujeros negros: las masas de los agujeros negros y su "giro" ("spin"), que está relacionado con el [momento angular](#) de cada cuerpo. Otros 7 parámetros están relacionados con la forma en que se observa la fuente de ondas gravitacionales desde la Tierra: la posición de la fuente en el cielo, su distancia con respecto a nosotros, la inclinación del [plano orbital](#) de BBH con respecto a la línea de visión a la fuente, el ángulo de [polarización](#) de las ondas gravitacionales que emite la fuente, el momento en el que el par de agujeros negros se fusionan y la [fase](#) de la emisión de ondas gravitacionales en ese momento. Dado que las estrellas de neutrones están hechas de materia, las ondas gravitacionales producidas por los sistemas BNS también dependen de otro parámetro conocido como su "[deformabilidad de marea](#)"; esta magnitud mide cuánto se deforma cada estrella por la distorsión de marea causada por su compañera durante las órbitas finales antes de la fusión. Las mediciones de la deformabilidad de marea nos pueden explicar características sobre la estructura interna de las estrellas de neutrones.

La Figura 2 muestra nuestras estimaciones de las masas de los componentes de todos los eventos GW descubiertos, deducidos a partir de los datos; para cada evento, el área que se muestra es una forma de representar el rango de valores dentro del cual tenemos una confianza del 90% de que las masas de los componentes se encuentren, lo que se denomina "[región de confianza](#) del 90%". (Nótese que en cada caso hemos etiquetado al componente binario con la masa más grande como "1"). Podemos ver que las masas de los componentes de los sistemas de BBH cubren un amplio rango, desde aproximadamente 5 veces la masa del Sol hasta aproximadamente 70 veces la [masa del Sol](#), lo cual es consistente con el rango esperado para BH de masa estelar. El sistema BBH más pesado es GW170729 y los dos sistemas más ligeros son GW151226 y GW170608.

La señal de onda gravitacional generada mucho antes de la fusión, conocida como "[inspiral](#)", depende principalmente de una combinación especial de las masas individuales de los componentes, llamada "[masa de chirrido](#)", un parámetro que se puede medir con mayor precisión para sistemas binarios menos masivos. Otros parámetros importantes, como la relación entre la masa de los componentes y el "spin alineado efectivo" (que está relacionado con una combinación particular de los spins de los componentes individuales antes de fusionarse) son más difíciles de medir con precisión, ya que los diferentes valores de estos parámetros conducen a efectos bastante similares en la señal de onda gravitacional predicha.

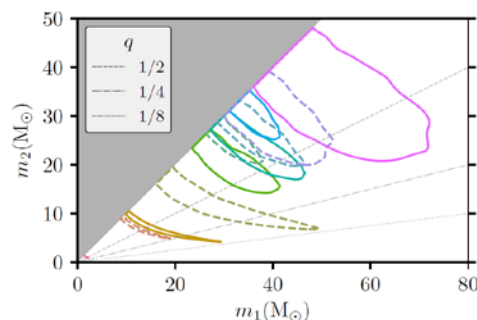


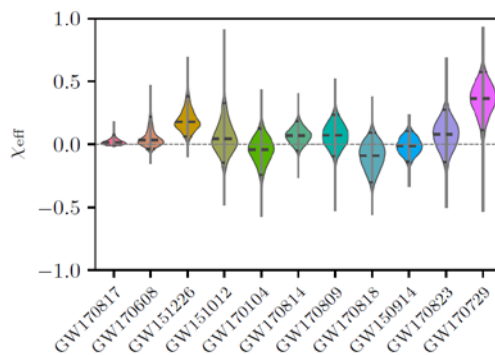
Figura 2: Regiones de confianza del 90% para las estimaciones de las masas de los componentes de nuestras detecciones de ondas gravitacionales, en unidades de masas solares. Las masas estimadas de las estrellas de neutrones en GW170817 se muestran en la esquina inferior izquierda de la gráfica. El resto de eventos son fusiones de sistemas binarios de agujeros negros. Puede observarse que las estimaciones de las masas cubren un amplio rango, desde unas 5 hasta unas 70 veces la masa del Sol. Para cada evento se ha etiquetado al componente binario con la masa más grande como "1". (Adaptado de la Figura 4 de nuestro [artículo](#).)

Podemos observar esto en la Figura 3, por ejemplo: para todos los eventos, la distribución del spin efectivo se centra alrededor de cero, excepto en GW170729 y GW151226, en donde podemos descartar un valor cero para el spin efectivo con más del 90% de nivel de confianza. Las mediciones más precisas de los spines y las masas en el futuro nos darán una mejor perspectiva de los diferentes escenarios de cómo se forman y evolucionan los sistemas binarios estelares. Por el momento, sin embargo, es difícil medir los spines de los agujeros negros individuales con nuestra sensibilidad actual del detector.

Algunas otras cantidades importantes inferidas de nuestras señales de ondas gravitacionales son la masa final y el spin del objeto fusionado, la cantidad de energía de GW irradiada y la [luminosidad](#) máxima emitida en las GW. Encontramos que un pequeño porcentaje de la masa total del sistema binario se irradia en forma de GW: cuanto mayor es la masa total, mayor es la cantidad de energía irradiada. Por ejemplo, para GW170729, el sistema BBH más pesado detectado hasta ahora, la energía radiada corresponde a casi cinco masas solares y la luminosidad máxima a más de  $4 \times 10^{56}$  erg/s, o aproximadamente ¡50 veces más luminosa que la potencia luminosa de cada estrella en todo el universo!

La amplitud de la señal de GW que medimos es inversamente proporcional a la distancia de la fuente (más específicamente, una medida particular conocida como su "[distancia de luminosidad](#)"), lo que nos permite estimar su distancia. Nuestras estimaciones llevan implícita una incertidumbre sustancial, en particular para los sistemas más remotos, pero está claro que estamos detectando eventos de GW que ocurrieron "hace mucho tiempo en una galaxia muy, muy lejana".

De los diez sistemas de BBH en nuestro catálogo, seis tienen distancias estimadas de aproximadamente 1 Gigaparsec (1 Gpc = 1 mil millones de [parsecs](#)) o más: la fuente más distante (que también fue la más pesada) es GW170729, a una distancia de 2.76 Gpc, o aproximadamente 9 mil millones de [años luz](#), mientras que la fuente más cercana es GW170608, a 0.32 Gpc (o aproximadamente 1 mil millones de años luz de distancia). Por otro lado, el sistema BNS GW170817 está, en términos groseros, en nuestra puerta cósmica a una distancia de sólo 0.04 Gpc, o 130 millones de años luz.



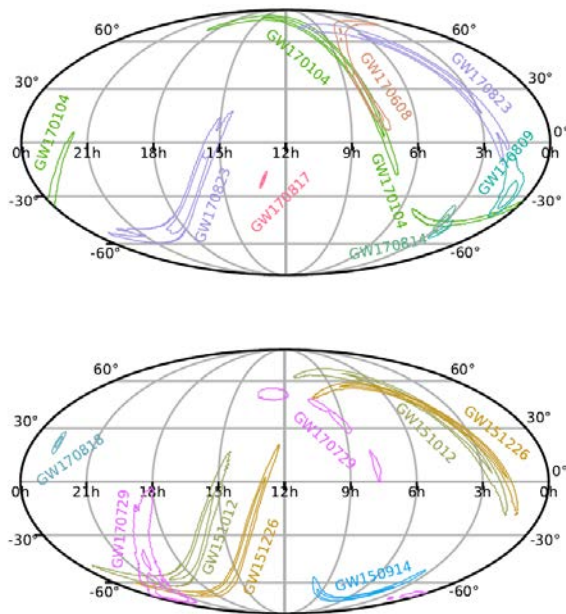
**Figura 3:** Valores estimados del spin alineado efectivo para cada una de nuestras detecciones de ondas gravitacionales. Podemos ver que en todo los casos nuestra estimación de esta cantidad se centra alrededor de cero, excepto para GW170729 y GW151226, en donde podemos descartar un valor cero para el spin efectivo con más del 90% de nivel de confianza. (Adaptado de la Figura 5 de nuestro [artículo](#).)

## LA IMPORTANCIA DE LA RED DE DETECTORES

Cuando una señal GW llega a la Tierra, llegará a los diferentes sitios del detector en momentos ligeramente diferentes. Estos tiempos de llegada observados y también la amplitud de la señal de GW medida en cada detector nos permite localizar la dirección en el cielo de donde proviene la señal. Dos detectores pueden restringir la dirección para situarla en algún lugar de un anillo truncado en el cielo, pero con un tercer detector en la red podemos localizar la situación en el cielo mucho mejor, proporcionando información crítica para avisar a los astrónomos que pueden buscar en esa área del cielo con telescopios que abarcan todo el [espectro electromagnético](#) (óptico o en otras longitudes de onda).

La mejora en la localización en el cielo proporcionada por la red es muy clara en nuestros resultados, y se puede ver en la Figura 4, que muestra cómo de bien se localizan en el cielo las posiciones de nuestros eventos de ondas gravitacionales. Por ejemplo, el evento más pobremente localizado en nuestro catálogo es la fusión GW170823 de BBH, que sólo fue observada por los dos detectores LIGO y se localizó dentro de un área de cielo de más de 1600 grados cuadrados (o aproximadamente 5000 veces el área de la luna llena). Por otro lado, los tres detectores observaron la fusión BBH GW170818, que tenía una intensidad de señal bastante similar a la GW170823, y se localizó en aproximadamente 39 grados cuadrados en el cielo. Sólo la detección triple de BNS, GW170817, se identificó con mayor precisión con sólo 16 grados cuadrados.

Finalmente, la Figura 5 muestra los datos de GW para todas las fusiones de BBH mostradas (en el panel izquierdo para cada fusión) como un mapa de "[tiempo-frecuencia](#)": una representación de los datos que utilizan el tiempo como eje horizontal y la frecuencia de GW como eje vertical, con una medida de la intensidad de la señal representada por la barra de color.



**Figura 4:** Mapas del cielo mostrando las regiones de confianza del 50% y 90% para la localización medida en el cielo de nuestras detecciones de ondas gravitacionales. La localización en el cielo significativamente mejor proporcionada por la red de tres detectores (LLO, LHO y Virgo) es manifiesta para, por ejemplo, GW170818. (Adaptado de la Figura 8 de nuestro [artículo](#).)

En muchos casos, el patrón característico de "chirrido" de barrido ascendente esperado para un sistema "inspiral" de BBH es claramente visible. Los paneles de la derecha para cada fusión muestran las formas de onda de la señal reconstruida utilizando dos métodos de reconstrucción diferentes, que resultan ser consistentes entre sí cuando tenemos en cuenta las incertidumbres del proceso.

## MIRANDO HACIA EL FUTURO

Las detecciones de GW presentadas en nuestro catálogo nos han permitido mejorar nuestra estimación de la tasa "global" a la que se realizan las fusiones BBH y BNS en el Universo, y establecer una cota superior en la tasa de las fusiones de estrellas binarias de agujero negro-estrella de neutrones, en vista del hecho de que no detectamos tal fusión en O1 u O2. Se pueden encontrar más detalles de estas estimaciones de tasa de población y cómo se midieron en un [artículo complementario](#) a nuestro artículo del catálogo. Aunque nuestras estimaciones de tasas aún son bastante inciertas, continuarán mejorando a medida que hagamos muchas más detecciones de GW en el futuro.

Virgo Avanzado y LIGO Avanzado están actualmente experimentando mejoras adicionales en su sensibilidad y se espera que un tercer período de observación, conocido como [O3](#), comience en la primavera de 2019 y dure todo un año, conduciéndonos al descubrimiento de decenas de eventos de fusión de sistemas binarios durante ese período. Además, se espera que el detector japonés [KAGRA](#) se una a la red a finales de O3, lo que ampliará aún más la red global y, por tanto, debería mejorar aún más nuestra capacidad para localizar fuentes de GW en el cielo.

**La publicación de GWTC-1 es un momento histórico para la astronomía de ondas gravitacionales, y un importante escalón hacia un futuro muy brillante.**

## GLOSARIO

**Agujero negro:** Región del espacio-tiempo causada por una masa extremadamente compacta donde la gravedad es tan intensa que no deja escapar nada, incluida la luz.

**Estrella de neutrones:** Remanente extremadamente denso del colapso de las estrellas más masivas.

**Ruido:** Fluctuación en la señal de medición de ondas gravitacionales debido a diversos efectos instrumentales y ambientales. La sensibilidad de un detector de ondas gravitacionales está limitado por el ruido.

**Período de observación:** Período de observación 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 menor ruido son capaces de detectar señales más débiles y por lo tanto se dice que tienen mayor sensibilidad (o más alta sensibilidad).

**Strain:** Cambio fraccionario en las medidas de la distancia entre dos puntos debido a la deformación del espacio-tiempo por una onda gravitacional que los atraviesa.

**Forma de onda:** Representación de cómo varía una señal de onda gravitacional en función del tiempo.

**Spin ("giro"):** Cantidad que mide la rapidez con que un objeto gira alrededor de sí mismo.

**Polarización de ondas gravitacionales:** Forma geométrica del estiramiento y compresión del espacio-tiempo causada por una onda gravitacional a medida que se propaga.

**Deformabilidad de marea:** Deformación de un objeto inducida por el campo gravitatorio de otro objeto. Como ejemplo, en la Tierra las mareas son causadas por el Sol y la Luna y producen una deformación de la superficie de los océanos con la consecuente fluctuación diaria en el nivel del océano.

## PARA SABER MÁS:

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

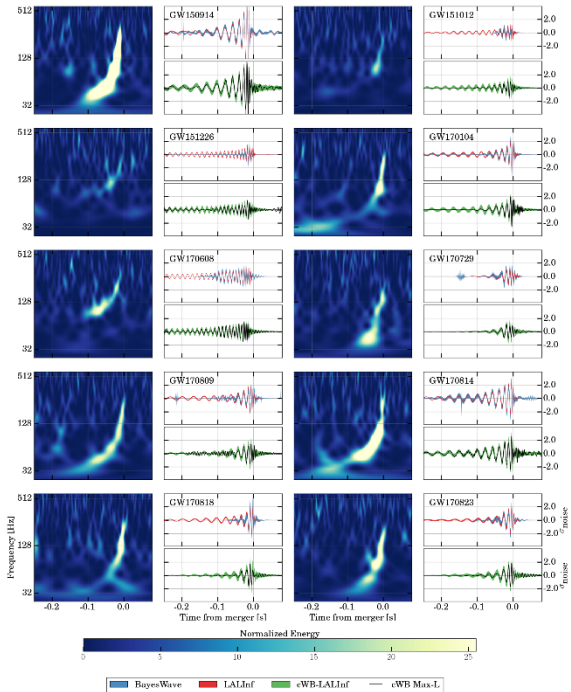
Lee el artículo completo, público y online [aquí](#)

Lee un artículo complementario sobre las propiedades de la población de BBH inferidas de O1 y O2, público y online [aquí](#)

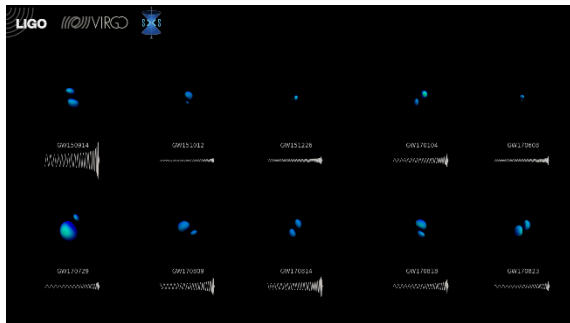
Explora los datos del catálogo [aquí](#) en el [Gravitational Wave Open Science Center](#)



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



**Figura 5:** Mapas de tiempo-frecuencia y formas de onda de la señal reconstruidas para los 10 eventos binarios de agujeros negros presentados en nuestro catálogo. En el panel de la derecha para cada detección, diferentes colores representan diferentes métodos de reconstrucción de la forma de onda, que resultan ser consistentes entre sí cuando tenemos en cuenta las incertidumbres del proceso. (Adaptado de la Figura 10 de nuestro [artículo](#).)



**Figura 6:** Captura de "Planetario de Binarias de Agujeros Negros" de LIGO y Virgo, una visualización de las fusiones de agujeros negros que LIGO y Virgo han observado hasta ahora. El video completo (disponible [aquí](#)) muestra los cálculos de relatividad numérica de los horizontes de los agujeros negros y las ondas gravitacionales emitidas, durante las últimas órbitas de los agujeros negros girando uno alrededor del otro hasta fusionarse y estabilizarse. Cada cálculo de relatividad numérica es consistente con cada una de las observaciones del catálogo LIGO-Virgo. A medida que los horizontes de los agujeros negros giran uno alrededor del otro y se fusionan, las ondas gravitacionales emitidas se hacen más intensas (mayor amplitud) y con una pendiente mayor (mayor frecuencia). Esta película está inspirada en el "Planetario Kepler". (Créditos: Teresita Ramirez / Geoffrey Lovelace / SXS Collaboration / LIGO Virgo Collaboration).