

EL CURIOSO CASO DE GW190814: LA FUSIÓN DE UN AGUJERO NEGRO DE MASA ESTELAR Y UN OBJETO COMPACTO MISTERIOSO

El 14 de agosto de 2019, exactamente dos años después de la primera observación de la historia de una onda gravitacional con tres detectores ([GW170814](#)), los dos detectores [Advanced LIGO](#) en los EE.UU., en [Hanford](#), Washington y [Livingston](#), Luisiana, y el [detector Advanced Virgo](#) en Cascina, Italia, observaron otra señal de una onda gravitacional procedente de una fuente quizás aún más intrigante. Los detectores LIGO-Virgo se encontraban en medio de su [tercer período de observación](#), O3, cuando observaron este evento extremadamente intenso, producido por las últimas órbitas en espiral y la posterior fusión de dos [objetos compactos](#): uno, un [agujero negro](#), y el otro de naturaleza indeterminada.

Dos características remarcables hacen a la fuente de GW190814 única. Primero, el objeto compacto de mayor masa es aproximadamente nueve veces más masivo que su compañero, haciendo que este sea el sistema más asimétrico observado con ondas gravitacionales hasta la fecha. En segundo lugar, la masa medida para el objeto compacto menos masivo lo convierte o en el agujero negro más ligero o en la [estrella de neutrones](#) más masiva jamás descubierta en un sistema de dos objetos compactos, sin poder asegurar cuál de las dos opciones es. Juntas, estas características desafían nuestra comprensión de las masas que pueden tener los objetos compactos y la forma en la que terminan en sistemas que se fusionan.

LA SEÑAL DE LA ONDA GRAVITACIONAL

La búsqueda de señales de ondas gravitacionales en los datos registrados por los detectores utiliza técnicas de [filtrado por comparación](#), que comparan los datos observados con predicciones de señales basadas en la [Relatividad General](#) de Einstein. Tal análisis proporciona una probabilidad de menos de 1 en 10.000 años de que GW190814 podría deberse a un ruido aleatorio del detector. GW190814 es el tercer evento más intenso observado hasta la fecha (después de [GW170817](#) y [GW150914](#)). Este es lo suficientemente intenso como para que sea visible a simple vista en el espectrograma de la [Figura 1](#), que muestra cómo la frecuencia de la señal cambia con el tiempo.

Durante el transcurso de O3, la colaboración LIGO-Virgo ha estado lanzando [alertas públicas](#) en tiempo real de potenciales detecciones de ondas gravitacionales. Estas alertas públicas contienen información preliminar sobre la fuente más probable de la señal, en forma de una [clasificación de fuente](#).

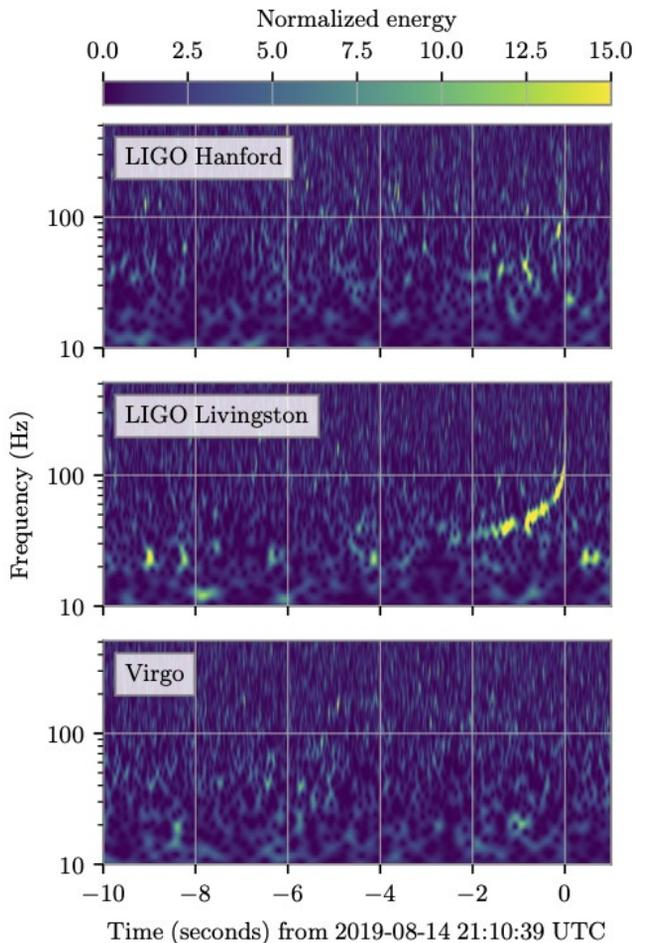


Figura 1: Representación en tiempo-frecuencia de los datos que contienen a GW190814, observada por LIGO Hanford (panel superior), LIGO Livingston (panel central) y Virgo (panel inferior). El tiempo se muestra desde aproximadamente 10 segundos antes del evento. La energía en una cuadrícula determinada en tiempo-frecuencia está representada por la paleta de colores. Una señal con forma de "chirp" se puede ver claramente en el panel central (datos de LIGO Livingston), donde la señal fue más intensa.

Visita nuestras páginas:

<http://www.ligo.org>

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



GW190814 se **anunció** públicamente 20 minutos después de la detección con una clasificación de **"Hueco en la Distribución de Masas"**, lo cual significa que al menos uno de sus objetos compactos tenía una masa estimada entre 3 y 5 veces la **masa del Sol, M_{\odot}** . Esta definición de "Hueco en la Distribución de Masas" está inspirada en la escasez de observaciones de agujeros negros con masas inferiores a aproximadamente $5 M_{\odot}$. Esta parte de la distribución de masas de agujeros negros se conoce como el **límite "inferior" de masas**.

Un análisis posterior de la señal permitió una estimación más precisa de las masas, y una circular **actualizada** 11 horas después cambió la clasificación de la fuente a **"NSBH"** indicando que uno de los objetos compactos tenía una masa inferior a $3 M_{\odot}$, que es una estimación aproximada de la masa máxima de una estrella de neutrones. La fuente también se localizó en una pequeña área de cielo de aproximadamente 20 grados cuadrados (ver **Figura 2**). Usando esta información, se realizaron búsquedas de seguimiento, como en el caso de [GW170817](#), recorriendo el **espectro electromagnético** y con **neutrinos**, pero no se encontraron contrapartidas de las ondas gravitacionales. Sin embargo, esto no es particularmente inesperado, ya que GW190814 es mucho más distante que GW170817 y las propiedades medidas de la fuente (ver más abajo) no favorecen una fuerte emisión electromagnética.

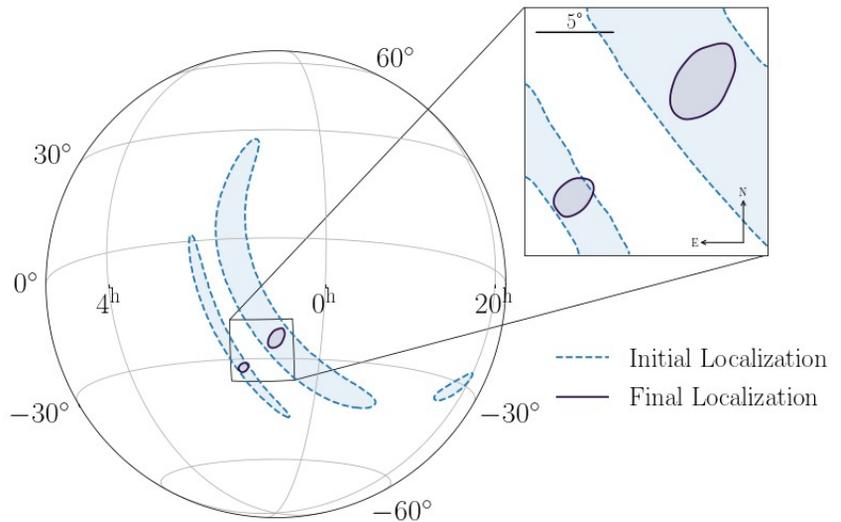


Figura 2: Región del cielo de donde la señal GW190814 procede con mayor probabilidad. Las áreas sombreadas en azul hacen referencia al análisis online inicial de los datos, mientras que las áreas sombreadas en púrpura hacen referencia a la localización final en el cielo.

PROPIEDADES DE LA FUENTE

El objeto compacto más masivo del sistema tiene una masa de aproximadamente $23 M_{\odot}$, consistente con la población de agujeros negros observados por LIGO y Virgo hasta ahora (ver **Figura 3**). La masa del objeto compacto menos masivo se encuentra entre 2.5 y $3 M_{\odot}$, colocándolo por encima de lo que podría suponerse que es la estrella de neutrones más masiva conocida hasta la fecha, [MSP J0740+6620](#), y por debajo de la masa típica de los agujeros negros detectados indirectamente por medio de observaciones electromagnéticas. Sin embargo, es comparable en masa al objeto compacto (probablemente un agujero negro) producido por la fusión de las dos estrellas de neutrones observadas en [GW170817](#).

La asimetría entre las masas mayor y menor nos ayuda a medir las propiedades de la fuente con mayor precisión. Cuanto mayor sea la asimetría, mayor es la firma de los "armónicos" de orden superior de la frecuencia fundamental de la señal de la onda gravitacional, que son análogos a los armónicos de una cuerda de guitarra cuando se toca. Como en el caso de la fusión de agujeros negros de masas diferentes asociadas a [GW190412](#), la ambigüedad entre la distancia y la inclinación del sistema se ve parcialmente rota por la información adicional contenida en los armónicos de orden superior. Podemos, en consecuencia, determinar que las ondas gravitacionales de GW190814 se originaron a unos 800 millones de **años luz** de distancia.

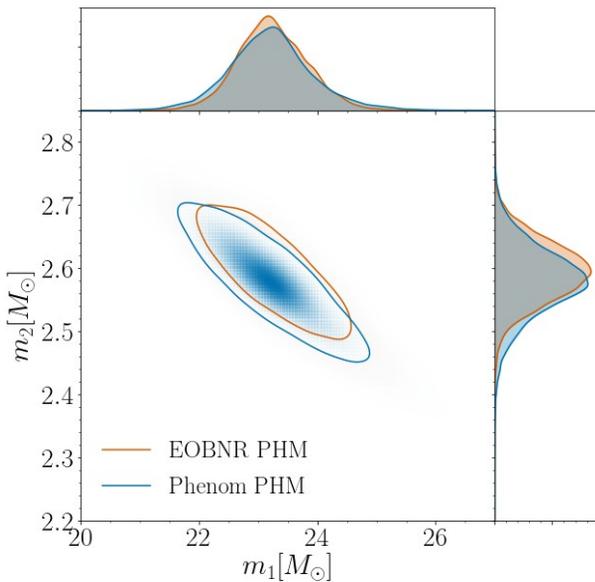


Figura 3: Masas inferidas de los dos objetos compactos que produjeron GW190814. El eje horizontal representa la masa del objeto más masivo, mientras que el eje vertical representa la masa del objeto menos masivo (que podría ser una estrella de neutrones o un agujero negro). Los contornos y la región sombreada muestran las posibles combinaciones de masas consistentes con los datos. Las curvas en los paneles adicionales en la parte superior y a la derecha proporcionan las correspondientes distribuciones de posibles valores de las masas individuales. Los dos colores son de dos modelos ligeramente diferentes de la predicción de la señal en Relatividad General.

Se espera que objetos compactos como las estrellas de neutrones y los agujeros negros [roten](#) sobre su propio eje. Aunque sus espines no afecten a la señal de la onda gravitacional con tanta fuerza como sus masas y, por lo tanto, son más difíciles de medir, GW190814 fue una señal larga que estuvo en nuestros detectores durante unos 10 segundos. Conjuntamente con la intensidad de la señal, esto nos permite realizar la medida de onda gravitacional más precisa de una rotación de un agujero negro hasta la fecha: es menos del 7% del giro máximo permitido por la relatividad general. También podemos determinar que el sistema probablemente no tenía [precesión](#).

PONIENDO A PRUEBA A EINSTEIN Y A HUBBLE

GW190814 nos proporciona un entorno muy favorable para hacer ciencia. Dado que GW190814 es significativamente más asimétrico que [GW190412](#), encontramos evidencia mucho más fuerte de la presencia de *armónicos de orden superior* o *multipolos de orden superior* de radiación gravitatoria en la señal subyacente. Esta es una maravillosa validación de la Relatividad General que predice la estructura multipolar de la radiación gravitatoria.

Hemos realizado varias pruebas adicionales de la relatividad general con GW190814 y hemos encontrado que la señal (**Figura 4**) podría estar bien descrita mediante la fusión de dos agujeros negros. Significativamente, no hay evidencia que sugiera que el objeto menos masivo fuese *otro* que un agujero negro, como una estrella de neutrones o algo aún más [exótico](#).

Con GW190814, también podemos llevar a cabo una nueva medida basada en ondas gravitacionales de la [Constante de Hubble, \$H_0\$](#) , el ritmo de expansión actual del universo. GW190814 es, hasta la fecha, la fuente de ondas gravitacionales mejor localizada en el cielo para la que no hemos observado una contrapartida en el espectro electromagnético o con neutrinos. En principio, para medir H_0 , necesitamos el **desplazamiento al rojo** de la galaxia anfitriona de la fuente. Pero sin una contrapartida que identifique la galaxia anfitriona de manera unívoca, podemos en su lugar considerar como posibles anfitriones a *todas* las galaxias conocidas en la región de origen bien localizada de GW190814. Para determinar la constante de Hubble, combinamos todos sus desplazamientos al rojo, promediados con la probabilidad de que cada galaxia sea la anfitriona, con la medida de la distancia de la onda gravitacional. Al realizar este cálculo, medimos H_0 con cierta incertidumbre, en aproximadamente 75 km por segundo por **Megaparsec**, que es tan buena como cualquier otra medida procedente de una fuente de onda gravitacional anteriormente observada sin contrapartida.

¿ES EL OBJETO COMPACTO MENOS MASIVO UNA ESTRELLA DE NEUTRONES O UN AGUJERO NEGRO?

La masa del objeto compacto menos masivo lo convierte en una estrella de neutrones excepcionalmente masiva o en un agujero negro inusualmente ligero. Normalmente, podríamos inferir la presencia de una estrella de neutrones a partir de la huella de las mareas de la señal de la onda gravitacional: en la fusión de un sistema que involucra una estrella de neutrones, la fuerza gravitatoria ejercida por su compañero provoca una marea en la estrella de neutrones, similar a las mareas oceánicas levantadas en la Tierra por la Luna. Sin embargo, para un sistema tan masivo y asimétrico como GW190814, [la huella de la marea](#) es demasiado pequeña para medirla. En este caso, nuestro intento de medir las mareas no nos dice si GW190814 fue causada por la fusión de un agujero negro y una estrella de neutrones, o por contra de dos agujeros negros.

Por otro lado, los modelos teóricos sobre la materia de las estrellas de neutrones, así como las observaciones de la población de estrellas de neutrones con astronomía electromagnética, nos permiten estimar la masa máxima que puede alcanzar una estrella de neutrones. Estas predicciones sugieren que el objeto compacto menos masivo es probablemente demasiado masivo para ser una estrella de neutrones y, por lo tanto, es más probable que sea un agujero negro.

Sin embargo, no podemos descartar la posibilidad de que GW190814 contenga una estrella de neutrones especialmente masiva, un escenario que nos haría revisar drásticamente nuestras estimaciones de la masa máxima permitida para las estrellas de neutrones.

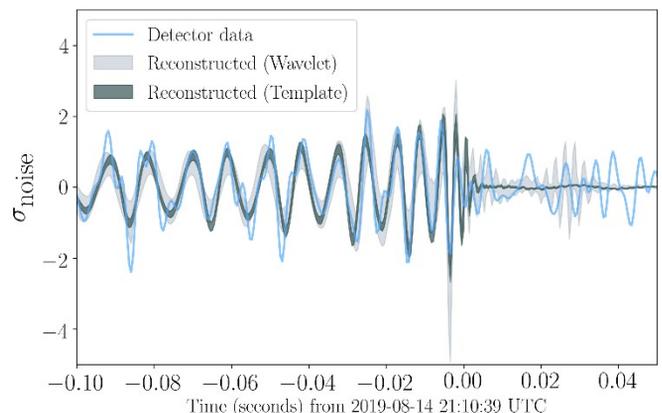


Figura 4: Representación de los datos actuales del detector (curva azul) en torno al tiempo (eje horizontal) del evento, junto con predicciones de la forma estimada de la señal subyacente. La banda gris oscura representa la predicción de un modelo de la señal en Relatividad General, mientras que la banda gris clara representa una reconstrucción de la señal usando el mínimo de suposiciones sobre ninguna teoría específica de la gravedad. El eje vertical está escalado de modo que el valor de 1 corresponde a las fluctuaciones típicas en el nivel de ruido vistas en los datos.

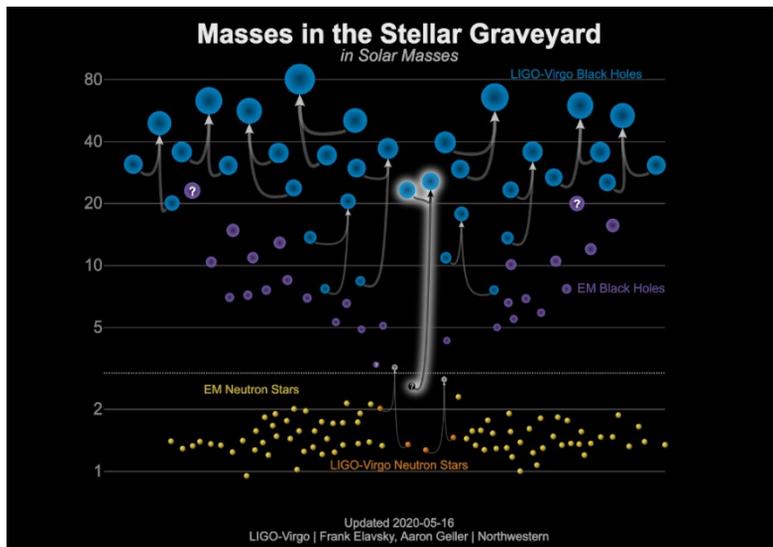


Figura 5: Masas de las estrellas de neutrones y agujeros negros medidas mediante ondas gravitacionales y observaciones electromagnéticas. Las marcas amarillas y púrpura representan las medidas electromagnéticas de estrellas de neutrones y agujeros negros, respectivamente, mientras que las marcas naranja y azul son las correspondientes medidas usando ondas gravitacionales. Nuestra señal, GW190814, está destacada en medio de la figura como una fusión de un agujero negro y un objeto misterioso con una masa de unas 2.6 veces la masa del sol, un evento que produjo otro agujero negro.

HISTORIA DEL ORIGEN: ¿CÓMO SE FORMÓ EL SISTEMA?

Debido a que la masa del objeto compacto menos masivo se encuentra entre los valores típicos de una estrella de neutrones y un agujero negro, y es aproximadamente nueve veces más pequeña que la masa de su compañero, GW190814 no se parece a ninguna de las fusiones observadas hasta ahora por LIGO y Virgo (ver **Figura 5**). También es diferente a la mayoría de los sistemas producidos en simulaciones de la población de objetos compactos por fusión del Universo. Esperamos que las fusiones de este tipo ocurran con mucha menos frecuencia que las fusiones más típicas de dos agujeros negros o dos estrellas de neutrones. Por estas razones, explicar la formación de este sistema es un gran desafío para todos los modelos actuales.

Al comparar las propiedades y la tasa de fusión inferida de GW190814 con las predicciones basadas en modelos teóricos de evolución estelar desarrollados por astrónomos, encontramos que los [cúmulos estelares](#) jóvenes y densos y los discos alrededor de los [núcleos galácticos activos](#) parecen ser anfitriones más prometedores para estos eventos que los [cúmulos globulares](#), pero todos los modelos de formación de objetos compactos necesitan una revisión. Este evento se puede haber formado a partir de la evolución de un sistema binario aislado, aunque las predicciones en este escenario dependen de forma crucial de las suposiciones adoptadas y los modelos de formación de objetos compactos. También es posible que el objeto menos masivo del sistema se haya formado a través de un evento de fusión anterior, como un remanente de una fusión de segunda generación. Tal remanente podría adquirir un agujero negro como compañero a través de interacciones gravitacionales en entornos estelares densos como cúmulos globulares. Sin embargo, es poco probable que este sea el mecanismo principal por el cual se forman dichos sistemas binarios.

GW190814 plantea preguntas fascinantes sobre las masas de objetos compactos y los procesos que conducen a sus fusiones. Observaciones futuras de ondas gravitacionales serán cruciales para arrojar luz (¡u ondas gravitacionales!) en una mayor población de fusiones asimétricas, de las que GW190814 es solo el primer ejemplo.

GLOSARIO

Objeto compacto: Objetos muy densos, como enanas blancas, estrellas de neutrones o agujeros negros, que generalmente marcan los estados finales del ciclo de vida de una estrella.

Agujero negro: Objeto compacto tan denso que la luz no puede escapar de su atracción gravitatoria.

Estrella de neutrones: Objeto compacto extremadamente denso que aparece como resultado del colapso de una estrella masiva.

M_⊙: Masa del Sol y una [unida de masa](#) estándar en [astronomía](#), igual a aproximadamente 2×10^{30} kg

Hueco en la Distribución de Masas: hueco en la distribución de masas de la población de agujeros negros sugerido por la escasez de observaciones de objetos compactos con masas entre 2.5 y 5 M_⊙.

Armónicos de orden superior / multipolos: Una emisión de ondas gravitacionales puede describirse como una expansión en "armónicos esféricos". Los armónicos de orden superior son los términos en esta expansión más allá del término principal dominante.

Precesión: Debido a la conservación del momento angular, cuando los agujeros negros giran sobre sí mismos en una dirección diferente a la órbita del sistema binario, el plano de la órbita girará (tendrá "precesión") alrededor de la dirección del momento angular total.

Año luz: Unidad de distancia definida como la distancia recorrida por la luz en un año, equivalente a unos 10 billones de [kilómetros](#).

Megaparsec (Mpc): Unidad de distancia equivalente a aproximadamente 3,26 millones de años luz.

Desplazamiento al rojo: Aumento en la longitud de onda (del sonido, luz u ondas gravitacionales) debido al movimiento de la fuente con respecto al observador. Debido a la [expansión cosmológica del universo](#), los objetos como las galaxias se alejan de nosotros, y la luz y otras radiaciones electromagnéticas que provienen de ellas tienen una longitud de onda más larga.

Cúmulo globular: Una colección esférica de estrellas densamente agrupadas en órbita alrededor de una galaxia. Un cúmulo globular puede contener hasta un millón de estrellas.

Núcleos galácticos activos: Regiones muy compactas y muy luminosas que se encuentran en los centros de varias galaxias. Se encuentran entre las fuentes de energía más potentes y constantes del Universo.