

GW190521: LA COLISIÓN DE AGUJEROS NEGROS MÁS MASIVA OBSERVADA HASTA LA FECHA

¿QUÉ OBSERVAMOS?

El 21 de mayo de 2019, los detectores [Advanced LIGO](#) y [Advanced Virgo](#) observaron una señal de onda gravitacional procedente de la fusión de un par de [agujeros negros](#) con propiedades extraordinarias. La señal, catalogada como GW190521, presenta una duración y un pico en frecuencia menor que cualquier otra señal producida por un sistema binario de agujeros negros observada hasta la fecha.

El intervalo de tiempo en el que una señal producida por un sistema binario de agujeros negros se registra en la banda de sensibilidad de los detectores Advanced LIGO y Advanced Virgo es inversamente proporcional a la masa total del sistema binario. En el caso de GW190521, este intervalo de tiempo es de aproximadamente 0.1 segundos, mucho más breve que, por ejemplo, [GW150914](#), la primera fusión de un sistema binario de agujeros negros jamás detectada. De forma similar, la frecuencia máxima de la señal que se alcanza en una fusión de un sistema binario de agujeros negros es también inversamente proporcional a la masa total del sistema binario. En el caso de GW190521, esta frecuencia máxima fue sólo de unos 60 Hz, de nuevo mucho menor que para GW150914, cuya frecuencia máxima fue de unos 150 Hz. Era evidente desde un primer momento (véase la Figura 1) que LIGO y Virgo tenían un par de agujeros negros muy grandes entre manos.

La Figura 2 muestra las masas estimadas de los agujeros negros que produjeron la señal GW190521. Mientras que el mayor de los dos agujeros negros presenta una masa de alrededor de unas 85 veces la [masa del Sol](#) (denotada por el símbolo M_{\odot}), el más ligero presenta una masa cercana a las 66 M_{\odot} . Ambos objetos son mucho más masivos que *ninguno* de los otros agujeros negros [detectados en fusiones por LIGO y Virgo hasta ahora](#), e incluso el agujero negro más ligero ya es más masivo que muchos de los agujeros negros *remanentes* formados en esos eventos de fusión (véase la Figura 3).

Con respecto a GW190521, el agujero negro remanente de la fusión “pesa” alrededor de 142 M_{\odot} , que lo coloca en cabeza en la lista de los mayores agujeros negros observados por LIGO-Virgo. La masa del agujero negro remanente es aproximadamente 8 M_{\odot} menor que las masas combinadas de los dos agujeros negros que se fusionaron; esta diferencia de masa fue convertida en energía, en forma de ondas gravitacionales.

¿POR QUÉ ES TAN INTERESANTE GW190521?

Las masas extraordinariamente grandes de los agujeros negros que produjeron GW190521 sirven para más que presumir; desafían nuestra comprensión sobre la formación de los agujeros negros y sirven como laboratorio único para entender el funcionamiento de la gravedad.



Visita nuestras páginas web:

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

Produciendo grandes agujeros negros

Los astrónomos clasifican los agujeros negros en función de su masa. Esta clasificación resulta útil ya que los agujeros negros en los diferentes extremos de este espectro de masas se forman de muy diferentes maneras.

En el centro de la mayoría, si no todas, las grandes galaxias se encuentra un agujero negro supermasivo con una masa que varía desde centenas de miles hasta miles de millones de veces la masa del Sol.

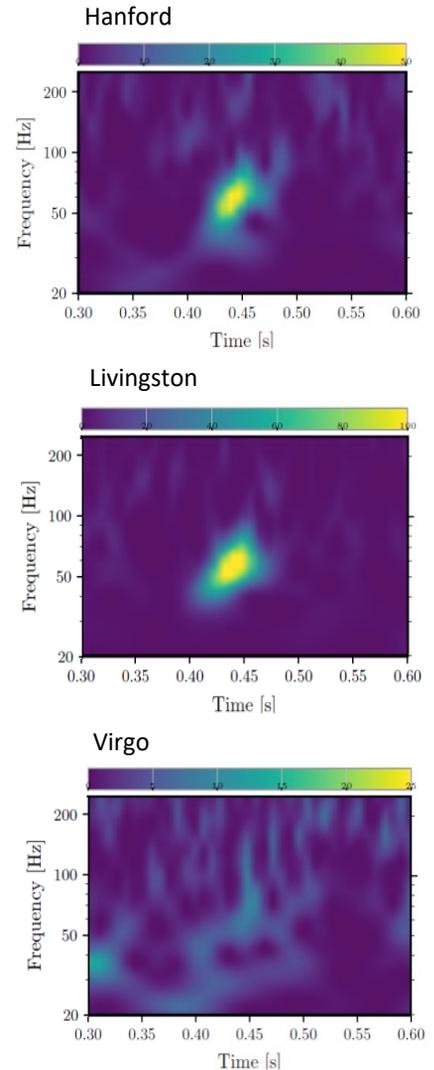


Figura 1. Representación de la frecuencia en función del tiempo de los datos que contienen la señal GW190521, observada por LIGO Hanford (figura superior), LIGO Livingston (figura central) y Virgo (figura inferior). Los tiempos se muestran relativos a las 03:02:29 UTC del 21 de mayo de 2019. La energía en un cierto valor de tiempo y frecuencia está representada por un código de colores. Nótese la extremadamente corta duración de la señal así como su pico en frecuencia alrededor de 60 Hz. (Adaptación de la Figura 1 de nuestro [artículo sobre el descubrimiento de GW190521](#))

Nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, alberga en [su centro un agujero negro](#) con una masa de alrededor de 4 millones de veces la masa del Sol. El modo exacto en el que estos agujeros negros monstruosos se forman es aún un tanto misterioso. Sin embargo, el proceso de formación comenzó probablemente cuando el Universo era mucho más joven, dando de este modo tiempo a los agujeros negros para crecer hasta alcanzar semejante tamaño.

En el otro extremo del espectro de masas se encuentran los [agujeros negros de masa estelar](#), los cuales se cree que se formaron a partir del colapso del núcleo de una estrella masiva, durante [explosiones de Supernova](#). Los agujeros negros de masa estelar presentan masas en el rango desde unas pocas a unas decenas de veces la masa del Sol, y los pares de estos objetos constituyen las fusiones de agujeros negros observadas hasta el momento por LIGO-Virgo.

Entre los agujeros negros de masa estelar y los supermasivos se encuentra el misterioso reino de los [agujeros negros de masa intermedia](#), cuyas masas oscilan entre 100 y aproximadamente 100.000 veces la masa del Sol. Aunque por el momento no hay observaciones concluyentes de agujeros negros de masa intermedia, existen diferentes escenarios de formación. Gracias a las mejoras en las capacidades de observación de telescopios y detectores de ondas gravitacionales, la búsqueda de agujeros negros de masa intermedia ha sido retomada a fondo recientemente.

Basándonos en el conocimiento teórico sobre el funcionamiento interno de las estrellas masivas, y en los escenarios de formación de agujeros negros, se piensa que los agujeros negros con masas entre 65 y 120 veces la masa del Sol, *no pueden* haber sido formados tras el colapso de una estrella. Y así es como GW190521 arruina la fiesta, ya que la masa del agujero negro más masivo que se fusionó (el agujero negro “primario”) se sitúa justamente en el intervalo en el que no se espera que los agujeros negros se produzcan directamente por colapso estelar, y donde, además, el agujero negro remanente de la fusión puede ser clasificado como un agujero negro de masa intermedia.

La observación de LIGO-Virgo de GW190521 sugiere que, o bien las estrellas *pueden* formar agujeros negros masivos, o bien que *algunos* agujeros negros observados por LIGO-Virgo se forman por otros mecanismos, quizá como resultado de una fusión previa entre pares de agujeros negros más pequeños, lo que abre una vía de formación de agujeros negros incluso más grandes a través de experimentar *otro* proceso de fusión de agujeros negros. Este escenario de *multi-fusión* requiere que la formación de agujeros negros debe ocurrir en entornos especiales donde existan suficientes agujeros negros en las cercanías para que se produzcan los múltiples procesos de fusión. Los astrónomos proponen los [cúmulos estelares](#) densos o los discos de [núcleos galácticos activos](#) como posibles ejemplos de tales entornos especiales.

La observación de GW190521 también sugiere que el terreno de los agujeros negros de masa intermedia podría estar poblado en parte por remanentes de fusiones de agujeros negros de masa estelar. De manera similar, los agujeros negros supermasivos podrían también formarse mediante este mecanismo.

Poniendo a prueba nuestro conocimiento sobre la gravedad

Nuestra comprensión teórica sobre el funcionamiento de la gravedad está descrita por la [Teoría de la Relatividad General](#) (RG) de Einstein. Los físicos usan la RG para predecir las señales de ondas gravitacionales producidas por fusiones de agujeros negros. A su vez, esas predicciones se usan para ayudar a analizar los datos de LIGO-Virgo. Por otra parte, las observaciones de señales de ondas gravitacionales pueden ser utilizadas para comprobar las predicciones de la propia teoría, y para buscar indicios de cualquier desviación de la RG que puedan apuntar hacia [teorías alternativas de la gravedad](#).

El uso de ondas gravitacionales como laboratorios de física no es nada nuevo: las fusiones de agujeros negros observadas previamente por LIGO-Virgo han sido utilizadas para poner a prueba nuestra comprensión de la RG. Entonces, ¿qué hace que la observación de GW190521 sea tan especial?

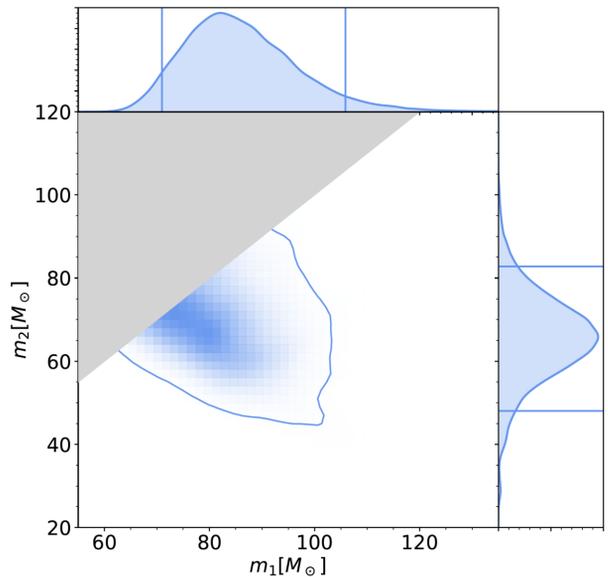


Figura 2. Masas estimadas de los agujeros negros que colisionaron para generar la onda gravitacional GW190521, mostrado como distribuciones de probabilidad. Según el análisis de LIGO-Virgo, los valores reales de las masas de los agujeros negros presentan un 90% de probabilidad de estar localizados dentro del contorno azul en la figura central (la cual muestra la probabilidad conjunta para ambas masas). Lo mismo es cierto para las líneas verticales y horizontales en la distribución con forma de campana en las partes superior y derecha de la figura, que muestran las medidas de las masas para los agujeros negros individualmente. La región en gris no se considera por la convención de LIGO-Virgo de que la masa “primaria” m_1 es siempre mayor o igual a la masa “secundaria” m_2 .

La señal de onda gravitacional de una colisión de dos agujeros negros puede dividirse en tres fases (véase la Figura 4): la fase en la que los dos agujeros negros están todavía suficientemente separados y orbitan uno alrededor del otro en espiral (*inspiral*, en inglés); a continuación tenemos la fase de fusión, en donde los dos agujeros negros se unen (*merger*, en inglés); finalmente, la fase de relajación (*ringdown*, en inglés), donde el agujero negro remanente “suena” como una campana golpeada antes de que vuelva a un estado estable final.

Tal y como mencionamos antes, las ondas gravitacionales procedentes de agujeros negros se han detectado en los datos de LIGO-Virgo en diferentes ventanas de tiempo y alcanzan el máximo de emisión a diferentes frecuencias, dependiendo de las masas de los agujeros negros. Como resultado, los detectores son sensibles a diferentes partes de la señal de onda gravitacional, dependiendo de las masas de sistema binario. Las señales procedentes de agujeros negros con masas más pequeñas se observan más claramente durante las fases de espiral y fusión. Por otra parte, las masas mucho más grandes de los agujeros negros que produjeron GW190521 nos proporciona la mejor oportunidad hasta el momento para estudiar la última parte de la fase de fusión y la fase de relajación de la señal de onda gravitacional.

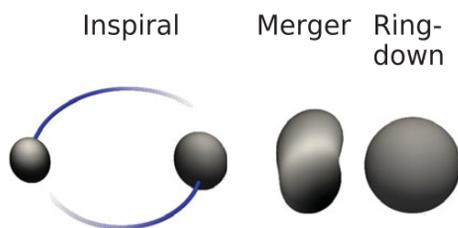


Figura 4. Representación esquemática de las tres diferentes fases de una señal de onda gravitacional procedente de una colisión de dos agujeros negros.

Al igual que con todas las señales procedentes de agujeros negros observadas hasta el momento, la teoría de la RG pasó las pruebas basadas en GW190521. Una de estas pruebas consistió en analizar la parte de la señal debida a la relajación del sistema de manera separada de las fases de espiral y de fusión, para comprobar si estas eran consistentes entre ellas. También se llevaron a cabo pruebas buscando características adicionales en la señal, predichas por algunas teorías alternativas de la gravedad, y se comprobaron otras hipótesis (por ejemplo, opuestas a la fusión de dos agujeros negros) sobre la propia fuente de la señal. Ninguno de estos estudios fue capaz de contradecir la interpretación de que GW190521 proviene de la fusión de dos agujeros negros de acuerdo a la física descrita en la teoría de la RG.

RESUMEN

La observación de la señal de onda gravitacional GW190521 es un evento excepcional que ha batido récords y que empuja los límites de nuestro conocimiento sobre la formación de agujeros negros, proporcionando una nueva forma de estudiar la gravedad en su régimen más extremo. También sugiere la existencia de una población de fusiones de agujeros negros de gran masa que pueden descubrirse durante futuras campañas de observación de LIGO (incluyendo LIGO India), Virgo y KAGRA, en Japón.

El análisis del extremo superior de la población de agujeros negros de masa estelar nos ayudará a construir una imagen más clara de los procesos que producen los agujeros negros, y los entornos en los que residen. GW190521 puede disfrutar de su posición como el par de agujeros negros más grande observado hasta ahora, pero mejor que no se relaje ya que quizá no mantenga su posición por mucho tiempo. LIGO, Virgo y KAGRA seguirán buscando ondas gravitacionales con una sensibilidad aún más mejorada, y los futuros detectores serán mucho más potentes, especialmente en las bajas frecuencias, donde deberían esconderse muchos más agujeros negros masivos. Entre los nuevos detectores ya proyectados, se incluyen el Einstein Telescope y el Cosmic Explorer, bajo tierra, y LISA, en el espacio. ¡Los récords están hechos para romperse!

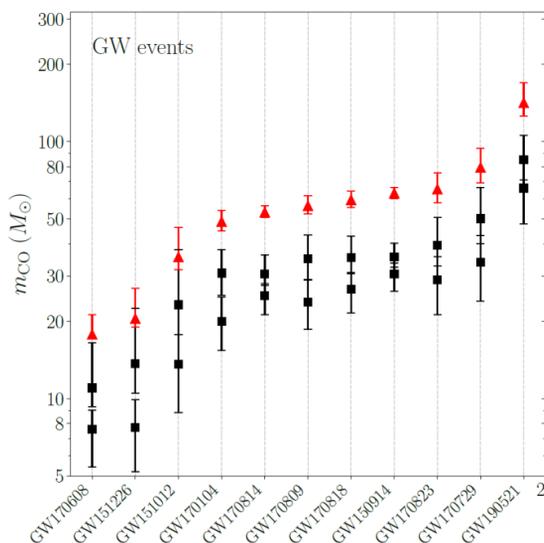


Figura 3. Gráfica que muestra las masas individuales de los agujeros negros de GW190521 (cuadrados en negro), en comparación con las masas de otras fusiones de agujeros negros detectadas durante los dos primeros períodos de observación, O1 y O2, de LIGO y Virgo. Para cada evento la masa del remanente tras la fusión se indica con un triángulo rojo. En todos los casos la longitud de la barra vertical representa el intervalo de incertidumbre en la estimación de la masa. Las masas excepcionales de GW190521 están claramente fuera de este gráfico. (Adaptación de la Figura 10 de nuestro artículo sobre implicaciones astrofísicas de GW150921.)

PARA SABER MÁS:

Visita nuestras páginas web: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu

Lea las notas de prensa de LIGO y Virgo sobre el descubrimiento de GW190521:

www.ligo.org/detections/GW190521/pr-english.pdf

<http://www.virgo-gw.eu/GW190521>

Lea el artículo completo de libre acceso que describe el descubrimiento de GW190521:

<https://dcc.ligo.org/P2000020/public>

Lea el artículo científico compañero que describe las implicaciones astrofísicas de GW190521:

<https://dcc.ligo.org/P2000021/public>

Los datos de GW190521 están disponibles en el Gravitational-Wave Open Science Centre: [aquí](http://gwosc.org).