

GW190412: LA PRIMERA OBSERVACIÓN DE UNA FUSIÓN DE AGUJEROS NEGROS CON MASAS DIFERENTES

¿QUÉ HEMOS ENCONTRADO?

El 12 de abril de 2019, la [Colaboración Científica LIGO](#) y la [Colaboración Virgo](#) observaron ondas gravitacionales producidas por las últimas órbitas en espiral y posterior fusión de dos agujeros negros. Este evento, catalogado como GW190412, se observó en los tres detectores que operaban en la red: en los dos detectores [LIGO](#) (uno en [Hanford, Washington](#) y otro en [Livingston, Louisiana](#)) así como en el [detector Virgo](#) (ubicado en Cascina, Italia). GW190412 se detectó un poco después del comienzo del tercer período de observación de Advanced LIGO y Advanced Virgo, conocido como O3, que comenzó el 1 de abril de 2019 y se suspendió el 27 de marzo de 2020.

Aunque las masas de los dos agujeros negros son consistentes con las de agujeros negros observados previamente, GW190412 es una señal única en el sentido de que es la primera fusión de agujeros negros donde las masas de los dos agujeros negros son definitivamente diferentes: uno de los agujeros negros del sistema es más de 3 veces más masivo que el otro. Esta asimetría en las masas modifica la señal de la onda gravitacional de tal manera que podemos medir mejor otros parámetros, como la distancia e inclinación del sistema, el espín o rotación del agujero negro más masivo y la magnitud de la precesión del sistema. Además, las masas diferentes de GW190412 nos permiten verificar una predicción fundamental de la Relatividad General de Albert Einstein: que las ondas gravitacionales “suenan” en más de una frecuencia fundamental, llamadas *multipolos de alto orden*.

¿CÓMO SABEMOS QUE GW190412 ES LA SEÑAL DE UNA ONDA GRAVITACIONAL REAL?

GW190412 es una señal intensa que se observó en los tres detectores. Dado que los tres detectores están separados por miles de kilómetros de distancia, ver esta señal en todos ellos casi simultáneamente indica que esta señal es de origen astrofísico y no debida al ruido.

La representación en tiempo-frecuencia de GW190412, conocida como *espectrograma*, se muestra en la Figura 1. Aunque GW190412 es suficientemente intensa como para poder ser observada “a simple vista” en los datos de los detectores en Hanford y Livingston, utilizamos varios algoritmos para escanear sistemáticamente los datos en busca de señales de ondas gravitacionales y determinar su significancia. La mayoría de las técnicas se basan en el *filtrado por comparación*, que compara los datos observados con señales simuladas predichas por la teoría de la relatividad general. Cuantificamos la posibilidad de que una señal resulte del ruido en los detectores como la *tasa de falsas alarmas*. Usando datos del 8 al 18 de abril, encontramos una tasa de falsas alarmas de un evento falso por cada 30.000 años! Esta tasa de falsas alarmas será aún más significativa a medida que se analicen más datos de O3. También realizamos controles para otros tipos de fuentes de ruido instrumentales y ambientales, y no encontramos nada que pudiera tener un impacto significativo en la detección o análisis de GW190412.

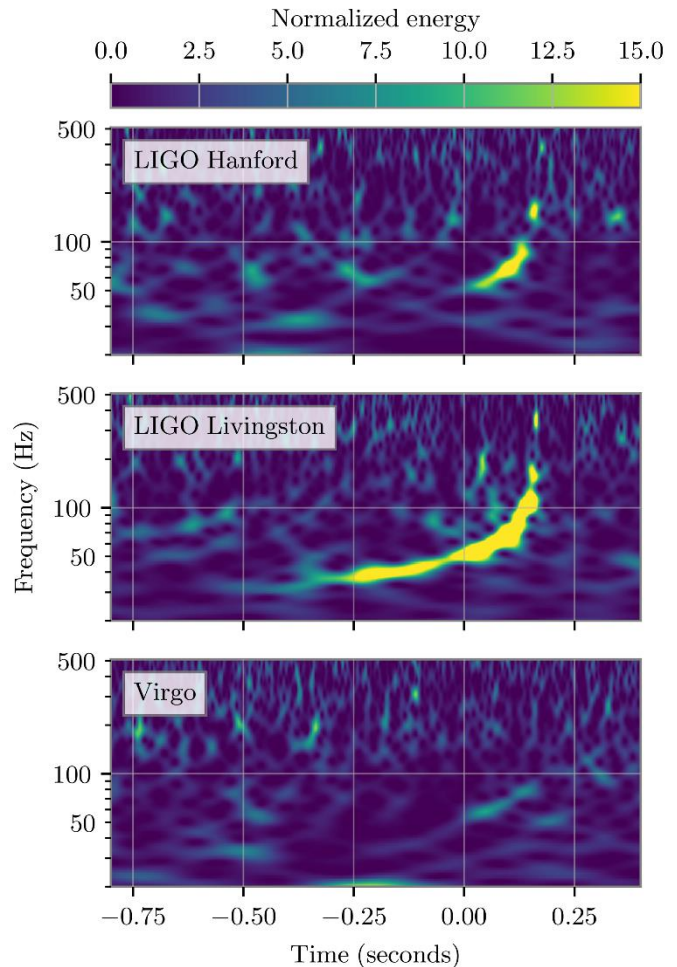


Figura 1: Espectrograma de GW190412 en los tres detectores de ondas gravitacionales. El eje horizontal representa el tiempo y el eje vertical muestra la frecuencia de la señal. El color representa la cantidad de energía en una frecuencia y momento determinados. El familiar “chirp” se puede ver en esta señal como un aumento en frecuencia y energía en función del tiempo, como resultado del incremento de energía en la emisión de la onda gravitacional a medida que los dos agujeros negros que orbitan el uno alrededor del otro cada vez más y más cerca (las últimas órbitas en “espiral”) hasta su posterior fusión.

Visita nuestras páginas:

<http://www.ligo.org>

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



PROPIEDADES DE GW190412

Las masas individuales de los dos agujeros negros en GW190412 son consistentes con lo que se había observado en los períodos de observación anteriores: un agujero negro era aproximadamente 30 veces la masa del Sol y el otro aproximadamente 8 veces la masa del Sol. Sin embargo, la *razón de masas* de GW190412, definida como la razón entre la masa del agujero negro más ligero y la masa del agujero negro más masivo, es diferente a cualquier otra fusión de agujeros negros que hemos detectado anteriormente. Mientras que todas las 10 fusiones de agujeros negros de los dos primeros períodos de observación fueron consistentes con agujeros negros de masa similar en cada sistema, el agujero negro más masivo en GW190412 es más de tres veces la masa del agujero negro más ligero.

Las masas diferentes de GW190412 conducen a una asimetría en la emisión de ondas gravitacionales que nos ayuda a inferir mejor los parámetros particulares del sistema. Encontramos que el *espín efectivo* es positivo, lo que nos dice que al menos uno de los agujeros negros rotaba con una orientación cercana al plano de la órbita de traslación de un agujero negro alrededor del otro. En particular, debido a la desigualdad de masas de GW190412 podemos por primera vez imponer fuertes restricciones al espín del agujero negro más masivo, encontrando que rota aproximadamente al 40% del espín máximo permitido por la relatividad general. El espín efectivo y la razón de masas inferidas para GW190412 se muestra en la Figura 2. También vemos signos marginales de que el sistema tiene precesión, aunque ningún efecto de la precesión es lo suficientemente fuerte como para afirmarlo definitivamente. Además, la desigualdad de masas también ayuda a romper una ambigüedad entre la distancia y la inclinación del sistema, lo que permite una mejor medida de ambos parámetros. ¡GW190412 ocurrió a casi 2.500 millones de años luz de distancia de la Tierra!

ESCUCHANDO EL TARAREO DE LOS ARMÓNICOS DE ORDEN SUPERIOR

Las propiedades únicas de GW190412 también permiten la observación de una propiedad fundamental de las ondas gravitacionales. Comenzando por el trabajo pionero de Einstein, y luego refinado por Newman, Penrose, Thorne y muchos otros, se demostró que la radiación gravitacional de sistemas binarios compactos era predominantemente *cuadrupolar*. Esta radiación cuadrupolar puede considerarse como el sonido principal que se escucha al tocar una cuerda de una guitarra. Sin embargo, al igual que los instrumentos musicales, se predice que la radiación gravitacional también sonará en armónicos de orden superior. Estos *armónicos de orden superior* o *multipolos de orden superior* son excepcionalmente difíciles de analizar en una señal cuando los agujeros negros son casi iguales en masa. Las masas asimétricas de GW190412 permiten que estas sutiles señales se “escuchen” mejor en la emisión de ondas gravitacionales. Encontramos que los datos apoyan la hipótesis, por un factor mayor de 1000 a 1, de la presencia de armónicos de orden superior en la señal. En el futuro, la intensidad relativa de los multipolos de orden superior puede ayudar a distinguir mejor las propiedades de los agujeros negros en coalescencia. También se realizó un conjunto de pruebas para determinar si GW190412 es consistente con la relatividad general. No encontramos inconsistencias con la relatividad general, añadiendo otro punto de apoyo a la teoría de la gravedad de Einstein.

FORMANDO UN SISTEMA BINARIO DE AGUJEROS NEGROS CON MASAS DIFERENTES

Cada período de observación de la red de Advanced LIGO y Advanced Virgo ha traído nuevos y emocionantes hallazgos al zoológico de sistemas binarios compactos. Como el primer sistema binario de agujeros negros con masas definitivamente diferentes, GW190412 proporciona un conjunto de datos importante para nuestra comprensión de las propiedades de las poblaciones de los sistemas binarios de agujeros negros. La observación de este evento único nos dice que los sistemas de agujeros negros con masas diferentes son relativamente comunes, y que deberíamos esperar observar muchos más de estos sistemas en el futuro.

Basándose en física detallada de la evolución estelar, los astrónomos han construido modelos de cómo se forman los sistemas binarios de agujeros negros en el universo, y de sus masas esperadas y otras propiedades. Aunque la mayoría de los modelos predicen que los sistemas binarios con masas casi iguales deberían ser más comunes, muchos otros también predicen un número apreciable de sistemas como GW190412 con masas claramente diferentes. Normalmente se predice que tales sistemas se forman con una frecuencia al menos diez veces menor que sus contrapartidas de igual masa. Sin embargo, la observación de GW190412 con su razón de masas aparentemente extrema no es inesperada, dado que ahora hemos detectado más de 10 eventos. A medida que continuamos aumentando nuestra sensibilidad al universo de las ondas gravitacionales y construimos un catálogo en rápido crecimiento de fusiones de sistemas binarios compactos, esperamos observar muchos más sistemas que iluminen mejor nuestra visión de la evolución estelar, la formación de sistemas binarios compactos y la física fundamental.

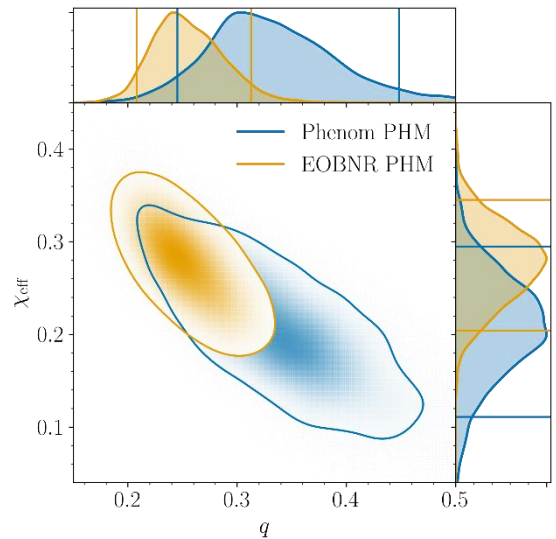


Figura 2: La razón de masas (q) y el espín efectivo (χ_{eff}) inferidos de GW190412. Los contornos naranja y azul muestran las distribuciones de los parámetros estimados usando dos modelos de función de ondas diferentes, que hacen aproximaciones ligeramente diferentes para modelizar la verdadera señal relativista.

GLOSARIO

Agujero Negro: Un objeto tan compacto que ni siquiera la luz puede escapar de su atracción gravitatoria.

Sistema Binario Compacto: Un sistema compuesto por dos remanentes estelares compactos, como por ejemplo, estrellas de neutrones o agujeros negros.

Espín Efectivo: El parámetro con la mejor medida para codificar la información del espín en una señal de una onda gravitacional. Formalmente, es una proyección ponderada en masa de los espines de los agujeros negros individuales en la dirección de la órbita de los dos agujeros negros.

Relatividad General: La teoría de la gravedad propuesta por Albert Einstein en 1915. En esta teoría, el espacio es como una tela maleable que se curva en presencia de materia y energía y los objetos siguen trayectorias a través de este espacio curvo.

Multipolos de Orden Superior: La emisión de ondas gravitacionales se puede describir como una expansión de “[armónicos esféricos](#)”. Los multipolos de orden superior son términos en esta expansión más allá del término dominante, el cuadrupolar.

Inclinación: La orientación angular de los agujeros negros en la órbita de rotación de uno alrededor del otro con respecto a la Tierra.

Filtrado por Comparación: Una técnica para detectar señales enterradas en datos con mucho ruido. Los modelos de funciones de ondas gravitacionales calculadas a partir de la relatividad general se escanean a través de los datos y detectan cuando se encuentran patrones coincidentes en los datos.

Precesión: Debido a la conservación del momento angular, cuando los agujeros negros giran en una dirección diferente a la órbita del sistema binario, el plano de la órbita rotará (“precesionará”) alrededor de la dirección del momento angular total.

Cuadrupolo: El multipolo más intenso de una emisión de ondas gravitacionales de un sistema binario compacto. Pensando en estas ondas como los “sonidos del espacio-tiempo”, la emisión cuadrupolar es el tono fundamental. El nombre se refiere al patrón de emisión en diferentes direcciones: para comparar, una antena de radio simple envía un dipolo como su emisión más intensa.

Espectrograma: Una representación en tiempo-frecuencia-energía de una serie temporal de datos. La intensidad de las frecuencias individuales se muestra con colores.

Función de Ondas: Una señal teórica de una onda gravitacional que se genera usando aproximaciones de la relatividad general de Einstein.