

BÚSQUEDA DE ANISOTROPÍAS EN EL FONDO DE ONDAS GRAVITACIONALES

Desde la primera detección de ondas gravitacionales, de la fusión del sistema binario de agujeros negros GW150914, la red de detectores LIGO-Virgo ha observado ondas gravitacionales procedentes de muchas fusiones de sistemas binarios de agujeros negros y un par de fusiones de sistemas binarios de estrellas de neutrones. Sin embargo, estos eventos representan una fracción pequeña del número total de fusiones de sistemas binarios de agujeros negros y estrellas de neutrones en el universo. Debido a la actual **sensibilidad** de nuestros detectores, aún no podemos detectar individualmente señales muy débiles de fusiones lejanas. No obstante, la combinación de estas señales débiles de fusiones da lugar a un fondo de ondas gravitacionales, que podría ser detectado usando una red de detectores de ondas gravitacionales como LIGO y Virgo. También esperamos fondos de ondas gravitacionales generados por varios fenómenos, tales como **transiciones de fase de primer orden** y fusión de **agujeros negros primordiales**, que habrían podido producirse en el universo temprano. Se espera que estos fondos de ondas gravitacionales tengan una dependencia en frecuencia distinta, con lo que deberíamos ser capaces de diferenciarlos.

En un [artículo reciente](#), buscamos la componente isotrópica del fondo de ondas gravitacionales. La componente isotrópica nos indica cómo de similar un fondo de ondas gravitacionales es cuando

miramos en distintas direcciones del cielo. Dado que el universo tiene estructuras, como galaxias y cúmulos de galaxias, esperamos que las fuentes de estas ondas gravitacionales débiles residan principalmente en regiones del cielo que contengan estas estructuras, dando lugar a anisotropías (características dependientes de la dirección) en el fondo de ondas gravitacionales observable. Un fondo de ondas gravitacionales es análogo al **fondo cósmico de microondas** (CMB, del inglés Cosmic Microwave Background), cuya primera observación sugirió que era homogéneo en todas las direcciones (isotrópico), mientras que estudios más detallados posteriores revelaron características dependientes de la dirección (anisotrópico). Estas anisotropías en el CMB se consideran un descubrimiento importante en cosmología, y proporcionan una explicación de la formación de cúmulos de galaxias y otras estructuras del universo. También esperamos ver características dependientes de la dirección en el fondo de ondas gravitacionales. Si se observaran estas anisotropías, nos podrían dar una idea de la historia del universo temprano, así como explicar cómo la materia está distribuida en el universo cercano.

En este artículo hemos correlacionado los datos de dos o más detectores para la búsqueda de un fondo de ondas gravitacionales anisotrópico. La **correlación**, con la que comprobamos la similitud de los datos de dos detectores, es una de

las muchas técnicas que nos permiten extraer señales muy débiles del ruido en los detectores de ondas gravitacionales. Usamos radiometría de ondas gravitacionales para buscar señales del fondo de ondas gravitacionales, procedentes de distintas direcciones en el cielo. En **radiometría**, para mirar en una dirección determinada, hacemos un desplazamiento en tiempo de los datos de un detector y luego los correlacionamos con los datos del segundo detector. Con este método, cada dirección en el cielo corresponde a un desplazamiento en tiempo de los datos de un detector con respecto a otro.

Usando datos de los tres primeros **períodos de observación** de los detectores de LIGO y Virgo, donde el primer período (O1) duró desde septiembre de 2015 a enero de 2016, el segundo período (O2) de noviembre de 2016 a agosto de 2017 y el tercer período (O3) desde abril de 2019 a marzo de 2020, y asumiendo muy poco acerca del fondo de ondas gravitacionales esperado, buscamos ondas gravitacionales de banda ancha (frecuencias en el rango de 20Hz a 1726Hz) que podrían proceder de cualquier dirección en el cielo.

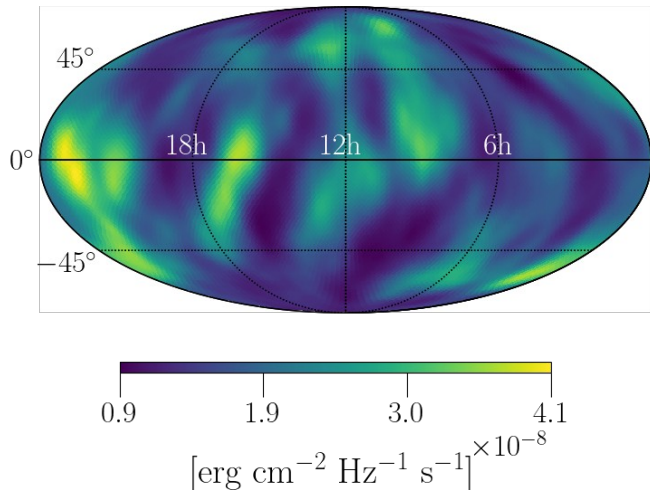


Figura 1. Mapa del cielo que muestra cotas superiores al 95% de nivel de credibilidad sobre el flujo de energía de ondas gravitacionales de distintas direcciones en el cielo para un modelo de señal que se compone de fusiones de sistemas binarios de agujeros negros y sistemas binarios de estrellas de neutrones. Este mapa está en [coordenadas ecuatoriales](#) con la coordenada de la ascensión dada en horas y la declinación en grados. Un flujo de energía es la energía recibida por unidad de área, frecuencia y tiempo. Viene dada en [ergios](#) por centímetro cuadrado, por Hercios y por segundo.

Visit our websites:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



No encontramos ninguna evidencia significativa de la existencia del fondo de ondas gravitacionales, con lo que establecemos **cotas superiores** sobre la intensidad del fondo de ondas gravitacionales en todas las direcciones del cielo (véase Figura 1). Estas cotas superiores corresponden a la amplitud máxima del fondo de ondas gravitacionales, siendo consistentes con la no detección en nuestro análisis, y se puede usar para poner cotas sobre modelos de fondo de ondas gravitacionales. Las cotas superiores obtenidas en nuestro análisis son mejores que las anteriores en un factor aproximadamente 3.

También buscamos señales de ondas gravitacionales de banda estrecha procedentes de tres direcciones en el cielo con interés astrofísico: [supernova 1987A](#), [Scorpius X-1](#) y el [Centro Galáctico](#). Esperamos que estas fuentes emitan ondas gravitacionales; sin embargo, no conocemos ni la amplitud ni la frecuencia de las ondas gravitacionales procedentes de estas fuentes. Buscamos un fondo de ondas gravitacionales procedentes de estas fuentes con frecuencias de entre 20 y 1726Hz.

No encontramos ninguna evidencia de emisión de ondas gravitacionales, y por lo tanto, pusimos cotas superiores en la posible amplitud del fondo procedente de las tres fuentes mencionadas anteriormente (véase por ejemplo la Figura 2 para las cotas superiores sobre ondas gravitacionales procedentes de Scorpius X-1).

Además de las dos búsquedas anteriores, también buscamos diferentes patrones de las ondas gravitacionales en el cielo. En este análisis buscamos un fondo de ondas gravitacionales procedente de fuentes extensas en el cielo, como el plano galáctico de la [Vía Láctea](#). No encontramos evidencia significativa de esos patrones, con lo que pusimos cotas superiores sobre el fondo de ondas gravitacionales de diversos tamaños angulares en el cielo (véase Figura 3).

Para el análisis presentado en este artículo, hemos usado por primera vez “datos plegados” y una serie de códigos escritos en [Python](#) que reduce el coste computacional más de un factor 100. Con las mejoras planeadas para los detectores actuales, esperamos poder detectar estas anisotropías del fondo de ondas gravitacionales en el futuro. De forma similar al CMB, la futura observación de estas anisotropías podría ayudarnos a entender la evolución del universo.

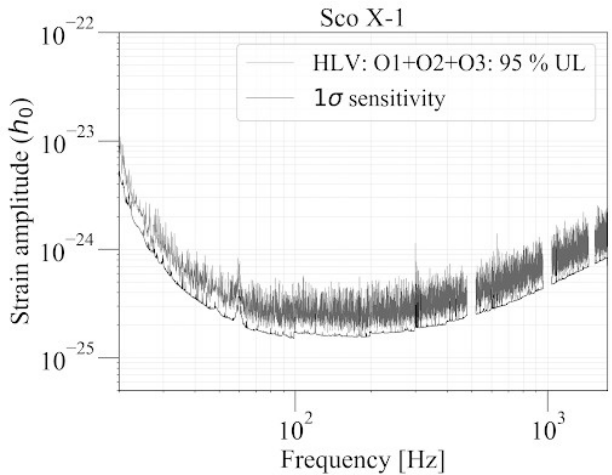


Figura 2. La curva gris representa cotas superiores al 95% de nivel de credibilidad sobre la intensidad de las ondas gravitacionales de banda estrecha en función de la frecuencia para una fuente en la dirección de Sco X-1. La curva negra corresponde al nivel de ruido del análisis.

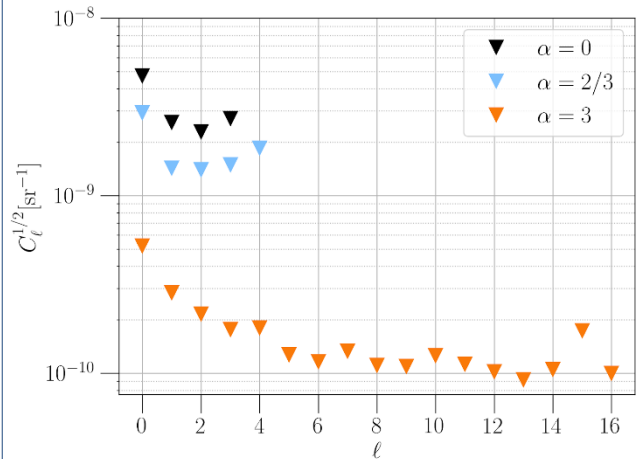


Figura 3. Cotas superiores al 95% de nivel de credibilidad sobre la amplitud del fondo de ondas gravitacionales para varios tamaños angulares en el cielo. Cuanto menor es el número en el eje horizontal, mayor es el tamaño angular del fondo de ondas gravitacionales en el cielo. La figura muestra las cotas superiores para tres modelos diferentes de acuerdo a distintos valores del parámetro α correspondiente a distintas dependencias en frecuencia del fondo de ondas gravitacionales. Por ejemplo, $\alpha=2/3$ corresponde a una dependencia en frecuencia (f) de $f^{2/3}$.

GLOSARIO

Sensibilidad: Descripción de la capacidad de un detector para detectar una señal. Detectores con menos ruido son capaces de detectar señales más débiles y, por lo tanto, se dice que tienen más sensibilidad.

Transición de fase: Transformación termodinámica de un sistema que va de un estado a otro. Un ejemplo de transición de fase es el paso del agua a hielo al enfriarse. Para una pequeña introducción a las transiciones de fase durante el universo temprano, véase [este enlace](#).

Agujeros negro primordiales: Agujeros negros que se formaron justo después del Big Bang. Para más información, véase [este enlace](#).

Fondo Cósmico de Microondas (CMB, del inglés Cosmic Microwave Background): Radiación electromagnética procedente de una etapa temprana del universo, también conocida como “radiación de reliquia”. Para más información, véase [este enlace](#).

Correlación: Medida de la similitud de dos (o más) grupos de datos. Si los datos de dos detectores de ondas gravitacionales separados están correlacionados, esto podría indicar la presencia de un fondo de ondas gravitacionales (asumiendo que otras posibles fuentes estén descartadas).

Nivel de credibilidad: Intervalo en el que el valor de un parámetro con incertidumbre tiene una probabilidad dada de pertenecer.

Período de observación: Período durante el cual nuestros interferómetros están funcionando, tomando datos que luego se analizarán. El tercer período de observación (O3) tuvo lugar desde el 1 de abril de 2019 hasta el 1 de octubre de 2019, y luego se continuó desde el 1 de noviembre de 2019 hasta el 27 de marzo de 2020.

Radiometría: Una técnica para caracterizar la distribución de la potencia de radiación, procedente de distintas direcciones del espacio.

Cotas superiores: Máximo valor de un observable que no ha sido descartado por el experimento.

“Datos plegados”: Debido a la rotación diaria de la Tierra alrededor de su eje, alrededor de cada 24 horas, el cielo observado parece el mismo. Aprovechando esta simetría temporal, podemos comprimir los datos de varios cientos de días en un día (sidéreo). Estos datos comprimidos se llaman “datos plegados”.

APRENDA MÁS:

Visite nuestras páginas web:

- <https://www.ligo.org/>
- <https://www.virgo-gw.eu/>
- <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>

Lea la versión preliminar del artículo científico [aquí](#).

Traducción al castellano por Alba Romero-Rodríguez e Isabel Cordero-Carrión (a partir de la versión original en inglés en [este enlace](#)).