

## COTAS SUPERIORES SOBRE EL FONDO ISOTRÓPICO DE ONDAS GRAVITACIONALES A PARTIR DE LOS DATOS DE LOS TRES PRIMEROS PERÍODOS DE OBSERVACIÓN DE ADVANCED LIGO Y ADVANCED VIRGO

El Fondo Cósmico de Microondas (CMB, del inglés *Cosmic Microwave Background*) nos ha proporcionado información sobre el origen del Universo, dado que es la radiación electromagnética más antigua que podemos medir. De forma similar, existe un Fondo de Ondas Gravitacionales (GWB, del inglés *Gravitational Wave Background*) que consiste en una superposición de ondas gravitacionales (GW, del inglés *Gravitational Wave*) generadas por distintas fuentes astrofísicas y cosmológicas, y que incluso pueden remontarse a tiempos anteriores al CMB, debido al acoplamiento débil entre las GWs y la materia. Ejemplos de estas fuentes astrofísicas incluyen lejanas coalescencias de sistemas binarios de objetos compactos (CBCs, del inglés *Compact Binary Coalescences*) cuyas GWs no pueden identificarse individualmente y colapsos de núcleos de supernovas. Tenemos en este momento una predicción para el rango de intensidades del fondo originado por CBCs lejanas, pero el fondo procedente de colapsos de núcleos de supernova tiene una amplitud desconocida ahora mismo, a pesar de estar seguros de su existencia. Además, hay algunas fuentes más especulativas como cuerdas cósmicas, inflación y transiciones de fase de primer orden, que representan unos pocos ejemplos de fuentes cosmológicas. Detectar cualquiera de estas fuentes del fondo de GWs sería un avance decisivo que nos proporcionaría información acerca de procesos astrofísicos y/o cosmológicos.

Analizamos datos de los tres primeros períodos de observación (O1, O2 y O3) de Advanced LIGO y Advanced Virgo. No hemos podido confirmar una detección, aunque sí pudimos poner cotas superiores sobre la intensidad del GWB más estrictas de las que se habían publicado anteriormente, gracias a la inclusión de los últimos datos de O3 (véase la Figura 1). Mejoramos la sensibilidad de nuestra búsqueda mediante la aplicación de un procedimiento para eliminar el exceso de ruido.

Durante este procedimiento nos cercioramos de que no hubiera ninguna señal correlacionada con ningún tipo de ruido ambiental, instrumental, geológico o relacionado con fuentes antropogénicas. Además, mitigamos el efecto producido por intensos ruidos transitorios mediante una técnica conocida como *gating*, utilizada por primera vez en la búsqueda de un GWB, a pesar de ser una técnica común en búsquedas de CBCs. Este método consiste en hacer cero cada ruido transitorio en el dominio temporal. Esta es también la primera vez que hemos incluido datos del interferómetro Virgo, además de datos de los dos instrumentos LIGO, para la búsqueda del GWB. Los datos de estos interferómetros fueron correlacionados, lo que se usó para determinar una cota superior sobre la amplitud del GWB a un 95% de credibilidad mediante inferencia Bayesiana. Haber correlacionado los datos nos permitió eliminar el ruido ambiental remanente de nuestro análisis, asumiendo que no está correlacionado entre interferómetros. Los detectores que están co-alineados y co-posicionados son los más sensibles a un GWB, pero también a fuentes de ruido locales. Por lo tanto, la sensibilidad a un GWB está dominada por el par de detectores de LIGO, que son los más cercanos a estar co-alineados y co-posicionados, aunque todavía proporcionan una sensibilidad significativamente por debajo de la máxima. La contribución del detector de Virgo a la sensibilidad es solo un pequeño porcentaje, debido a la distancia y la orientación con respecto a los de LIGO. Gracias a los incansables esfuerzos de todos los científicos mejorando los interferómetros, la actual cota superior sobre el GWB es unas cinco veces mejor que en análisis previos. Aunque parte de esta mejora se debe simplemente al hecho de que hayamos analizado una mayor cantidad de datos, la mayor parte de esta mejora se debe al incremento en la sensibilidad. Si los interferómetros hubieran funcionado con la misma sensibilidad que en O2, los datos adicionales solo nos habrían permitido mejorar nuestra cota superior en un factor 2.

También hemos buscado ruido magnético globalmente correlacionado, conocido como resonancias de Schumann, mediante el estudio de campos magnéticos medidos con sensores específicos colocados cerca de los tres interferómetros. La identificación de las resonancias de Schumann es necesaria porque estas pueden aparecer como un GWB efectivo y, por lo tanto, suponen una contaminación de la señal que realmente buscamos. Los campos magnéticos pueden acoplarse a partes críticas del interferómetro, como, por ejemplo, a los imanes en los espejos finales de los brazos, usados para controlar los espejos. Si este acoplamiento es lo suficientemente fuerte, puede fingir ser una señal observada cuando el desplazamiento del espejo se debe a los campos magnéticos y no al paso de una GW. Por lo tanto, las resonancias de Schumann podrían causar correlaciones altas que nos podrían conducir a anunciar erróneamente una detección de un GWB. Para construir una predicción de una posible contaminación magnética (véase la Figura 2) necesitamos dos elementos clave. Por un lado, necesitamos medidas muy precisas de campos magnéticos en cada interferómetro. Por otro lado, necesitamos tener una medida de cómo estos campos magnéticos se acoplan a nuestros interferómetros y, así, eventualmente, aparecer como "una señal falsa de GW".

Para determinar este acoplamiento usamos una bobina que crea campos magnéticos fuertes cerca del interferómetro y luego observamos la señal falsa que se produce, a la vez que medimos los campos magnéticos con precisión. Comprobamos la contaminación magnética de dos formas. En primer lugar, buscamos contaminación en celdas de frecuencia individuales. En segundo lugar, buscamos la posibilidad de que la suma de la contaminación magnética en distintas celdas sea tal que quede por encima de nuestra sensibilidad. Nuestra conclusión es que nuestras estimaciones de ruido magnético correlacionado están muy por debajo de la sensibilidad que conseguimos en O3, tanto cuando consideramos el de celdas de frecuencia individuales, como cuando consideramos el ruido en distintas celdas en conjunto (véase la Figura 2). Adicionalmente, implementamos un algoritmo, basado en inferencia Bayesiana, para hacer un ajuste simultáneo de un GWB y resonancias de Schumann de nuestros datos. De manera consistente con otros de nuestros métodos, no encontramos ninguna señal ni procedente de un GWB ni de resonancias de Schumann. Sin embargo, este nuevo algoritmo se espera que sea muy útil en futuras búsquedas a medida que nuestra sensibilidad mejore.

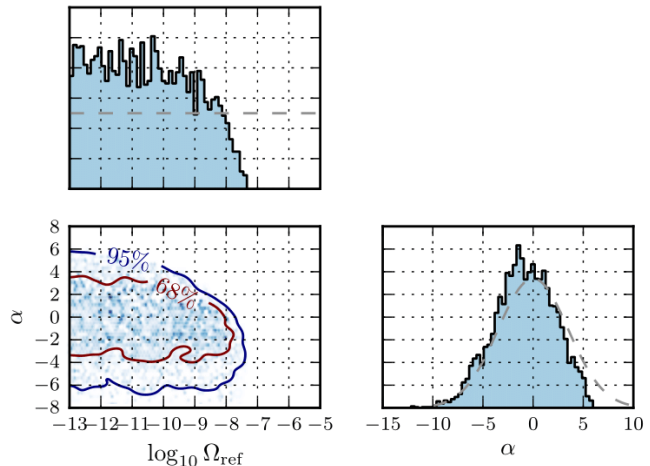


Figura 1: Gráficas que muestran las distribuciones de probabilidad de la amplitud del fondo de ondas gravitacionales  $\Omega_{ref}$  y el índice espectral  $\alpha$  en  $\Omega_{ref}(f/25 \text{ Hz})^\alpha$  el modelo que asumimos para describir la dependencia del GWB en términos de las frecuencias  $f$ . Estas distribuciones muestran que los datos prefieren valores bajos de  $\Omega_{ref}$ . La línea discontinua gris representa nuestro conocimiento de los parámetros "a priori". Las curvas de credibilidad del 68% y 95% muestran las regiones con esos porcentajes de probabilidad total en el espacio de parámetros.

Visite nuestras páginas web:

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

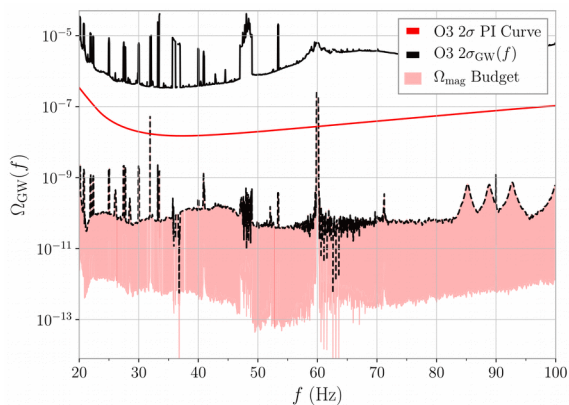
[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



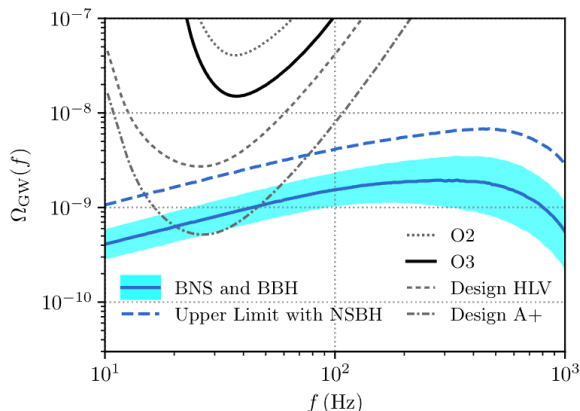
También determinamos cotas superiores sobre un supuesto GWB con una **polarización** escalar o vectorial. Estas son las conocidas como **polarizaciones "prohibidas"** en **Relatividad General (RG)**, que solo predice ondas gravitacionales con una polarización tensorial. El hecho de observar en algún momento polarizaciones alternativas a la de RG implicaría que la teoría de Einstein debería modificarse y considerarse un modelo más complejo. Estas búsquedas de polarizaciones escalar y vectorial se han beneficiado de la incorporación de los datos de Virgo, ya que al añadir un nuevo detector es más sencillo diferenciar entre distintas polarizaciones. Aún no hemos encontrado evidencia de estas polarizaciones "prohibidas". Otras observaciones de ondas gravitacionales son consistentes con este resultado, ya que solo detectan polarización tensorial, como fue el caso al observar la señal del sistema binario de estrellas de neutrones **GW170817**.

Asimismo, usamos un modelo para predecir el GWB debido a sistemas binarios de objetos compactos (véase la Figura 3), que podría ser la primera fuente de GWB que LIGO y Virgo pueden detectar, tal y como se comenta [aquí](#). Incorporamos las observaciones más recientes del catálogo de LIGO-Virgo **GWTC-2**. Encontramos que el GWB puede ser potencialmente detectado por una versión mejorada de los actuales interferómetros, que se conoce como **LIGO A+** y **Advanced Virgo Plus**. También aplicamos un análisis conjunto entre el GWB y las observaciones individuales de sistemas binarios de objetos compactos. Dado que el GWB es sensible a la fusión de binarias más lejanas que los sistemas binarios compactos que se pueden detectar individualmente, es posible que medidas del GWB pudieran mejorar el cálculo de la tasa de fusión de los agujeros negros binarios en el Universo temprano. Aunque este no es el caso en O3, mostramos que el GWB podría ser útil en períodos de observación futuros.

A pesar de que no hayamos sido capaces de anunciar una detección de un GWB, aún, este análisis supuso un gran paso en nuestro campo. Muchos métodos y procedimientos nuevos se usaron por primera vez en nuestro análisis, como la inclusión de más datos de un tercer interferómetro, el uso del **gating** para eliminar ruidos transitorios, la introducción de un ajuste de las resonancias de Schumann en un modelo Bayesiano consistente y el uso de un modelo para predecir el GWB debido a sistemas binarios de objetos compactos. Estas nuevas técnicas y procedimientos podrían resultar críticos en futuras búsquedas, cuando alcancemos la sensibilidad necesaria para anunciar una detección.



**Figura 2:** Esta gráfica muestra el efecto de la señal magnética correlacionada, denominada  $\Omega_{\text{mag}}$  Budget (se expresa en términos de la densidad de energía de ondas gravitacionales que se detectaría en los interferómetros,  $\Omega_{\text{GW}}$  debido a esta señal correlacionada), tanto para celdas individuales de frecuencia (curva discontinua negra) como para la suma del efecto para todo el rango (banda roja). La parte alta de la banda roja (la curva discontinua negra) está muy por debajo de la **curva de sensibilidad** roja, denominada  $2\sigma_{\text{PI}}(f)$ , lo que indica que la contaminación magnética está muy por debajo de nuestra sensibilidad en cada celda individual de frecuencia. La curva de sensibilidad roja, denominada  $2\sigma$  PI curve (del inglés, power integrated curve), muestra la sensibilidad de la búsqueda de una acumulación de ruido magnético en todo el rango de frecuencias. Vemos que la banda roja está muy por debajo de la curva roja de sensibilidad. Nuestras estimaciones del ruido magnético correlacionado están muy por debajo de la sensibilidad alcanzada en O3, tanto a nivel individual de frecuencias como en conjunto.



**Figura 3:** Esta gráfica compara la sensibilidad de observaciones actuales y futuras con predicciones del GWB procedente de CBCs no identificados, es decir, de la fusión de sistemas binarios de estrellas de neutrones (BNS, del inglés Binary Neutron Star) y sistemas binarios de agujeros negros (BBH, del inglés Binary Black Hole). La línea azul es la estimación media de la intensidad del GWB procedente de BNS y BBH, mientras que la banda azul clara indica la región al 90% de incertidumbre. Además, también se muestran las sensibilidades correspondientes al segundo y tercer períodos de observación (O2 y O3, respectivamente), así como las correspondientes a las que se esperan alcanzar en sensibilidad de diseño y A+ (para la red global LIGO-Virgo, HLV). La línea discontinua azul representa la cota superior al 95% de credibilidad del fondo predicho procedente de CBCs obtenido al incluir fusiones de estrella de neutrones y agujero negro (NSBH, del inglés Neutron Star - Black Hole). Aún no tenemos ninguna detección confirmada de fusiones NSBH, con lo que su tasa de incidencia es más incierta que la de BNSs o BBHs.

## GLOSARIO

**Fondo cósmico de microondas (CMB):** Radiación electromagnética procedente del universo temprano. Para más información, véase [esta página](#).

**Período de observación:** Período en el que nuestros interferómetros están funcionando, tomando datos para ser analizados más tarde. El tercer período de observación (O3) tuvo lugar desde el 1 de abril de 2019 al 1 de octubre de 2019, y luego continuó desde el 1 de noviembre de 2019 al 27 de marzo de 2020.

**Intensidad del GWB:** Densidad de energía de ondas gravitacionales. Esta cantidad se expresa como una fracción de la energía total en el Universo en forma de ondas gravitacionales.

**Ruido transitorio:** Ruido repentino en los datos procedente de nuestros detectores, análogo a una chispa de sonido estático de un altavoz, que a veces puede confundirse con una señal real o incluso enmascararla. Léase más [aquí](#).

**Dominio temporal:** Análisis de funciones matemáticas o señales físicas con respecto al tiempo.

**Correlación:** Medida de la similitud entre dos (o más) conjuntos de datos. Si los datos procedentes de dos detectores separados están correlacionados, esto podría indicar la presencia de un GWB (asumiendo que no existe ninguna otra fuente correlacionada, como ruido).

**Nivel de credibilidad:** Intervalo en el que un parámetro con cierta incertidumbre tiene una probabilidad determinada de pertenecer.

**Inferencia bayesiana:** Método que nos permite usar un conocimiento o creencia que ya tenemos (comúnmente conocido como prior) para calcular la probabilidad de un evento relacionado usando los mismos datos. Más información puede encontrarse [aquí](#).

**Resonancias de Schumann:** Ondas de radio de muy baja frecuencia generadas por los relámpagos que permanecen entre la superficie de la Tierra y la ionosfera, una capa de la atmósfera que empieza a los 60 kilómetros de altitud. Léase más [aquí](#).

**Celdas de frecuencia:** Intervalos entre muestras cuando se analizan funciones matemáticas o señales físicas con respecto a la frecuencia, en vez del tiempo.

**Polarización de una onda gravitacional:** Forma geométrica del estiramiento y compresión del espacio-tiempo debido a una onda gravitacional a medida que se mueve. Un esquema clarificativo de estos conceptos se ve en la Figura 5 de [este enlace](#).

**Curva de sensibilidad:** La sensibilidad de un detector de GW está determinada por un gran número de fuentes de ruido correspondientes a diferentes fenómenos físicos (por ejemplo, ruido sísmico o electrónico). La suma de todas estas fuentes determina la sensibilidad del detector en cada frecuencia, dando lugar a la curva de sensibilidad.

## PARA SABER MÁS:

Visite nuestras páginas web: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu), [gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)

Lea una versión del artículo científico original [aquí](#).

Podrá encontrar más información acerca del concepto de onda gravitacional [aquí](#).

Lea más acerca de la [necesidad de usar múltiples detectores](#).

Descubra qué significan las [polarizaciones prohibidas en Relatividad General](#).

Lea más acerca de [coalescencia de compactas binarias \(CBCs\)](#).