

LÍMITES SUPERIORES DEL FONDO ISOTRÓPICO DE ONDAS GRAVITACIONALES EN LA CUARTA RONDA DE OBSERVACIONES DE LIGO, VIRGO Y KAGRA.

El [Fondo de Ondas Gravitacionales](#) (FOG) es la superposición de numerosas [ondas gravitacionales](#) (OG) débiles e independientes generadas por diversas fuentes, el cual produce una señal persistente e incoherente a lo largo de múltiples bandas de frecuencia, incluyendo el rango de frecuencia de 10-1000 Hz de los detectores de OG [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK). Las fuentes del FOG pueden ser categorizadas como «cosmológicas» o «astrofísicas» dependiendo de su origen. Las fuentes astrofísicas incluyen [supernovas por colapso de núcleo](#), [estrellas de neutrones](#) rotatorias, y la población de [coalescencias de binarias compactas](#) (CBC) débiles y sin descubrir. La intensidad esperada del Fondo para CBCs es ahora predicha con buena aproximación, asumiendo que la población local observada de CBCs se puede extrapolar a mayores [corrimientos al rojo](#) y que el modelo de la [tasa de fusiones](#) es bien comprendido (véase la [Figura 1](#)). Además de éstas, existen fuentes cosmológicas como lo son las [cuerdas cósmicas](#), la [inflación](#), las [transiciones de fase](#) de primer orden, las cuales pueden proveer información sobre la época previa a la emisión del [Fondo Cósmico de Microondas](#) (FCM), un periodo que, de otro modo, sería inaccesible mediante la observación directa. Detectar el FOG representaría un hito científico importante ya que brindaría conocimientos profundos sobre fenómenos astrofísicos y cosmológicos. En el rango de frecuencias de los *nanohertz* (10^{-9} Hz), múltiples [conjuntos de sincronización de pulsares](#), como [NANOGrav](#) (Norte América), [EPTA](#) (Europa), [PPTA](#) (Australia) e [InPTA](#) (India), reportaron evidencias de un [Fondo Estocástico de Ondas Gravitacionales](#) (FEOG) con una alta [significancia](#) de detección para una señal de espectro común, la cual se espera que sea producida por una clase de fuentes diferentes a las señales en el rango de frecuencias de LVK.

Nuestro análisis incluye datos de Advanced LIGO y Advanced Virgo recolectados durante las primeras tres rondas de observaciones (O1-O3), así como datos de la primera parte de la cuarta ronda de observaciones (O4) durante la cual sólo Advanced LIGO se encontraba operativo. Nos centramos en la dependencia en la frecuencia del FOG, modelando la señal como [isotrópica](#) (igual en todas las direcciones), [sin polarización](#) (sin una dirección preferencial de oscilación), [estacionaria](#) (con propiedades estadísticas que no cambian con el tiempo) y [gausiana](#) (las propiedades estadísticas pueden ser descritas [únicamente en términos de la media y la varianza](#)) en el límite de observación a tiempos largos. La señal también se asume como débil comparada con la [sensibilidad](#) del detector. En esta búsqueda, los datos de al menos dos detectores de OG (por ejemplo, [LIGO-Hanford](#) y [LIGO-Livingston](#)) se [correlacionan](#) entre sí para suprimir el [ruido](#) instrumental mientras se aumenta la sensibilidad a una señal de OG común entre los detectores. Generalmente, el ruido no es correlacionado entre detectores; sin embargo, un fondo estocástico induciría señales correlacionadas consistentes con el tiempo de viaje lumínico entre los detectores y la esperada [función de reducción de solapamiento](#) (FRS).

Esta es la primera vez que usamos pygwb, una librería de [Python](#) desarrollada por la colaboración LVK para la búsqueda del FEOG. Pygwb ofrece una mayor eficiencia computacional y una mayor flexibilidad para personalizar el análisis. Nuestra técnica de análisis asegura que, al mejor de nuestro conocimiento, no existe una señal correlacionada originada en ruido ambiental, tal como lo es el instrumental, geológico o relacionado con actividad humana. Aún más, mitigamos el efecto de [glitches](#) a través de una técnica llamada [gating](#), la cual consiste en remover cada glitch en el [dominio del tiempo](#). Los datos de los detectores fueron [correlacionados cruzadamente](#) y una [ley de potencias](#) fue usada para caracterizar cómo la señal varía con la frecuencia. Métodos de [inferencia bayesiana](#) fueron usados para determinar el límite superior a un [nivel de credibilidad](#) del 95% en la amplitud de referencia Ω_{ref} del FOG, ya sea a través de fijar el valor del índice espectral α de la ley de potencias o tomando el promedio (conocido como «marginalización») sobre este valor (véase la [Tabla 1](#)).

Aunque no pudimos confirmar una detección, sí establecimos [límites superiores](#) más estrictos en la [intensidad del FEOG](#) que los anteriormente publicados, esto debido a la inclusión de los datos más recientes de la primera parte de O4.

Analizamos los campos magnéticos de los sensores cercanos a cada interferómetro para investigar la correlación global del ruido proveniente de las [resonancias de Schumann](#). Estas resonancias pueden emular señales de OG al acoplarse a componentes sensibles como lo son los imanes de control de los espejos finales, causando desplazamientos falsos y generando, potencialmente, una identificación errónea de ruido magnético como un fondo estocástico de ondas gravitacionales. Para evaluar el riesgo de tal contaminación, se estudian cuidadosamente las mediciones de alta fidelidad del campo magnético en el lugar, realizadas con magnetómetros especializados situados en el exterior (donde se espera que se produzcan las resonancias de Schumann) y en el interior de los dos observatorios de LIGO, buscando cómo se acoplan estas mediciones, así como el acoplamiento de los campos dentro del edificio con el movimiento de los espejos.

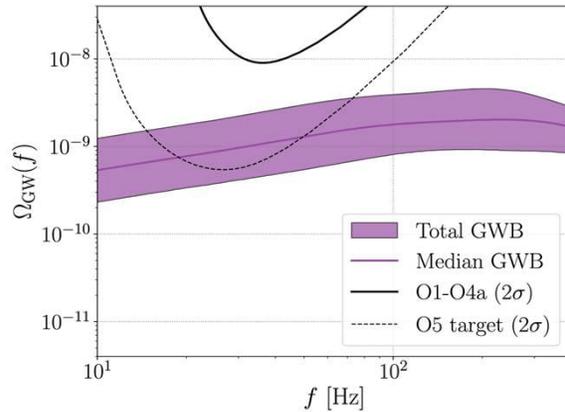


Figure 1: La sensibilidad al FOG como función de la frecuencia, obtenida del análisis de las primeras tres rondas de observación y la primera parte de la cuarta ronda de observación (O1-O4a), se muestra como la línea negra continua junto con la sensibilidad objetivo de la quinta ronda de observaciones O5, representada por la línea negra discontinua. La línea morada sólida muestra la [media](#) estimada del fondo total (de agujeros negros binarios, estrellas de neutrones binarias y pares de estrellas y agujeros negros) como función de la frecuencia, mientras que el área sombreada morada ilustra incertidumbres creíbles del 90% en este fondo.

α	O1-O4a	O1-O3	Mejora
0	2.8×10^{-9}	5.8×10^{-9}	2.1
2/3	2.0×10^{-9}	3.4×10^{-9}	1.7
3	3.2×10^{-10}	3.9×10^{-10}	1.2
Marginalizado	2.9×10^{-9}	6.6×10^{-9}	2.3

Tabla 1: Límites superiores a un nivel de credibilidad del 95% de la amplitud Ω_{ref} del FOG asumiendo previamente una distribución logarítmica uniforme. La última columna muestra las mejoras con respecto al análisis previo.

Visita nuestros sitios:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



Realizamos análisis de correlación cruzada para estimar la contaminación magnética a través de ventanas de frecuencia individuales. También examinamos si el efecto combinado de contaminación a través múltiples ventanas de frecuencia pudiera exceder nuestro umbral de sensibilidad. Nuestra conclusión es que nuestras mediciones estimadas de ruido magnético correlacionado se encuentran muy por debajo de la sensibilidad lograda en la primera parte de O4, tanto en las frecuencias individuales como en la suma de múltiples frecuencias (véase la **Figura 2**). Adicionalmente, implementamos un marco teórico, basado en inferencia Bayesiana, para ajustar simultáneamente un modelo de FOG y de resonancia de Schumann en nuestros datos. Consistente con nuestros métodos, no encontramos evidencia de alguna señal correspondiente a un FOG o a resonancias de Schumann.

A su vez, determinamos los límites superiores de los llamados *modos escalares* o *vectoriales* para la [polarización](#) del FEOG, que son polarizaciones «prohibidas» en la teoría de la [Relatividad General](#) de Einstein, donde sólo modos de polarización *tensorial* son permitidos. Observar estas polarizaciones alternativas sería un indicativo de que la teoría de Einstein necesita ser modificada. Este análisis se beneficia de tener más detectores de OG en la red, dado a que esto permite una mejor identificación de las diferentes polarizaciones.

No hemos encontrado evidencia de estas polarizaciones «prohibidas» en nuestro análisis. Nuestros resultados de la inferencia Bayesiana indican que un fondo con polarización tensorial (en concordancia con la RG) sigue siendo favorecido por encima de las polarizaciones vectoriales, escalares o mixtas.

Finalmente, nos centramos en los límites superiores del FOG en el contexto de un fondo astrofísico generado por fusiones de binarias compactas. Presentamos una actualización de los estimados del espectro de densidad de energía que surge de agujeros negros binarios distantes, estrellas de neutrones binarias y binarias de estrellas de neutrones con agujeros negros, incorporando mediciones actualizadas de las tasas y demográficos de las fusiones de estas fuentes. Encontramos que el FOG puede ser detectado potencialmente por una versión mejorada de los detectores actuales, conocidos como [LIGO A+](#) y [Advanced Virgo Plus](#) (véase la Figura 1).

También aplicamos un análisis conjunto del FOG y de las observaciones de binarias compactas individuales de [nuestro más reciente catálogo de OG, GWTC-4](#). Dado que el FOG es sensible a fusiones binarias a distancias mayores que las binarias compactas detectables individualmente, es posible que las mediciones del FOG puedan mejorar las mediciones de la tasa de fusión de agujeros negros binarios (ANBs) en el universo primitivo. La **Figura 3** muestra la [densidad de la tasa de fusiones](#) inferida (esto es, el número de fusiones esperadas por unidad de volumen de espacio por año) de ANBs a través del tiempo cósmico inferido de la combinación de nuestros resultados del FOG y observaciones individuales de binarias compactas del GWTC-4. A modo de comparación, las curvas negras punteadas indican los límites de credibilidad del 90 % obtenidos al analizar las fusiones de ANBs en nuestro catálogo anterior, GWTC-3. Los nuevos resultados son consistentes con estimaciones previas, aunque ahora hemos encontrado que la tasa con la que aumenta la tasa de fusión es cercana al borde superior de los límites antes establecidos. Al añadir los nuevos datos de la primera parte de O4, nuestras restricciones a la tasa de fusiones a mayores corrimientos al rojo han mejorado, aunque siguen siendo poco precisas, como indica la amplia dispersión de las muestras individuales que se muestran como líneas rojas en la **Figura 3**.

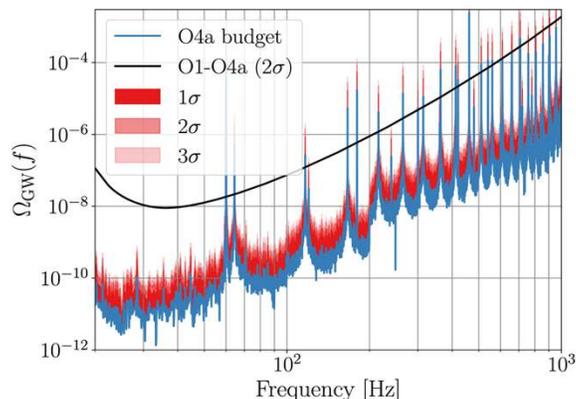


Figura 2: El efecto de la señal magnética correlacionada, denominada presupuesto O4a (expresado en términos de la densidad energética de las OG que se inferirían a partir de esta señal correlacionada en los interferómetros, Ω_{GW}). Se muestra el presupuesto magnético calculado en azul, incluyendo las incertidumbres 1σ , 2σ y 3σ (en tonos rojos cada vez más claros). La [curva de sensibilidad](#) integrada de ley de potencias (en negro), denominada O1-O4a 2σ , muestra la sensibilidad de la búsqueda a una acumulación de ruido magnético en múltiples intervalos de frecuencia. Observamos que la banda roja está muy por debajo de esta curva de sensibilidad negra, excepto por las características de banda estrecha introducidas por la FRS y los armónicos de la línea eléctrica de 60 Hz.

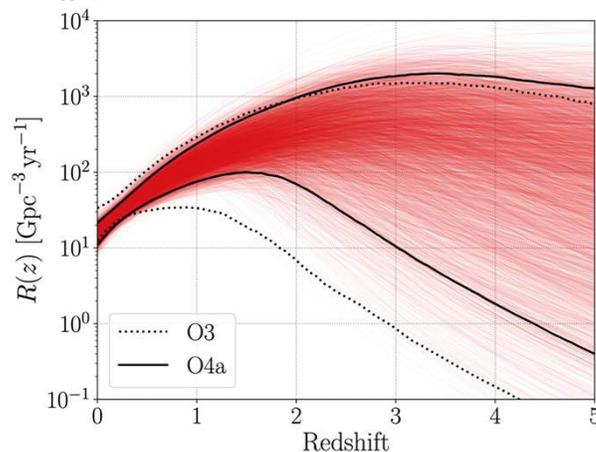


Figura 3: Evolución inferida del corrimiento al rojo de la densidad de la tasa de fusión de ANBs medida jerárquicamente usando las detecciones directas de ANBs en el GWTC-4 y el límite superior del FOG. Las líneas continuas negras y rojas representan, respectivamente, los límites de credibilidad del 90% y muestras individuales que estiman la evolución del corrimiento al rojo, mientras que las líneas negras punteadas representan los límites de credibilidad del 90% obtenidos con el catálogo anterior, GWTC-3.

GLOSARIO

Inferencia Bayesiana: Método que permite combinar datos nuevos con conocimiento previo (usualmente referido como información previa), expresado como una probabilidad. La combinación es utilizada para actualizar nuestro conocimiento actual y es también expresado como una probabilidad (probabilidad posterior). Más información puede ser encontrada [aquí](#).

Fondo Cósmico de Microondas: Radiación electromagnética proveniente de una etapa temprana del universo, también conocido como «radiación residual». Más información puede ser encontrada [aquí](#).

Intervalo de Credibilidad: Intervalo dentro del cual cae el valor de un parámetro incierto con una probabilidad determinada.

Correlación cruzada: Medida de la similitud entre dos (o más) conjuntos de datos. Si se descubre que los datos de dos detectores de OG independientes están correlacionados, esto puede indicar la presencia de un fondo de ondas gravitacionales (siempre que se descarten otras posibles fuentes de correlación).

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

Glitch: Ráfaga de ruido en los datos de ondas gravitacionales, análoga a un chasquido de estática que se oye en un altavoz, que a veces puede confundirse con una señal real de OG o enmascararla. Más información sobre los glitches [aquí](#).

Polarización de ondas gravitacionales: Forma geométrica del estiramiento y compresión del espacio-tiempo causada por una OG a medida que se mueve. En la figura 5 de este [enlace](#) se puede encontrar un buen diagrama de las diferentes polarizaciones.

Ronda de observaciones: periodo durante el cual nuestros interferómetros están en plena actividad, recopilando datos para su posterior análisis. La cuarta ronda de observaciones de LIGO-Virgo-KAGRA (O4) comenzó en mayo de 2023.

Función de Reducción de Solapamiento (FRS): Factor dependiente de la frecuencia que codifica información sobre la sensibilidad de un par determinado de detectores a un fondo de ondas gravitacionales de fuentes. El FRS depende de la geometría relativa del par de detectores, es decir, de su separación y orientación relativa. Más detalles [aquí](#).

Resonancias de Schumann: ondas de radio de frecuencia extremadamente baja generadas por rayos y que permanecen capturadas entre la superficie de la Tierra y la ionosfera, una capa atmosférica que comienza a unos 60 km de altitud. Más información [aquí](#).

Curva de sensibilidad: La sensibilidad de un detector de OG es determinada por un gran número de fuentes de ruido correspondientes a muchos fenómenos físicos diferentes (por ejemplo, ruido sísmico o electrónico). La suma de todas estas fuentes de ruido determina la sensibilidad del detector en cada frecuencia, lo que da lugar a su curva de sensibilidad.

Intensidad del FOG: La densidad de energía en las ondas gravitacionales. Se expresa como la fracción de la energía total del Universo en forma de ondas gravitacionales.

DESCUBRE MÁS:

Visita nuestros sitios: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu, gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Lee la preimpresión libre del artículo científico completa [aquí](#) o en [arxiv](#).

Más información sobre el concepto general de ondas gravitacionales [aquí](#).

Lee más sobre [la ventaja de múltiples detectores](#), en la búsqueda de ondas gravitacionales

Más información sobre las [polarizaciones «prohibidas» en relatividad general](#).

Más sobre la [coalescencia de binarias compactas \(CBCs\)](#).