

EL UNIVERSO DE ONDAS GRAVITACIONALES A TRAVÉS DE LALENTE: BÚSQUEDA DE INDICIOS DEL EFECTO DE LENTE GRAVITACIONAL EN EL ÚLTIMO CATÁLOGO DE LIGO/VIRGO/KAGRA

Los objetos compactos binarios, como los agujeros negros y las estrellas de neutrones, que se fusionaron hace miles de millones de años, emiten [ondas gravitacionales](#) que pueden detectarse con los detectores operados por las colaboraciones LIGO-Virgo-KAGRA. [Einstein](#) nos enseñó que la gravedad curva el espacio y el tiempo, afectando todo lo que transporta masa o energía, y las ondas gravitacionales no son una excepción. Por lo tanto, esperamos que, a medida que viajan [distancias cosmológicas](#), las ondas gravitacionales se encuentren inevitablemente con objetos astrofísicos masivos que actuarían como lentes, multiplicando sus trayectorias e incluso distorsionando las formas de sus señales.

En [este estudio](#), hemos buscado indicios de los todavía no detectados efectos de lente gravitacional en nuestro último catálogo LIGO-Virgo-KAGRA, que incluye eventos del tercer periodo de observación completo (O3). Este trabajo amplía nuestro [análisis](#) anterior de la primera mitad de O3.

¿CUÁLES SON LOS INDICIOS DEL EFECTO DE LENTE GRAVITACIONAL DE LAS ONDAS GRAVITACIONALES QUE ESTAMOS BUSCANDO?

Las lentes gravitacionales son muy diferentes de las lentes habituales, y la fenomenología del efecto de lente gravitacional de las ondas gravitacionales es amplia y rica. Cuando una señal de onda gravitacional viaja lo suficientemente cerca de una [galaxia](#) o [cúmulo de galaxias](#), puede ser afectada por el efecto de lente gravitacional fuerte, produciendo múltiples imágenes de la señal original, ver Figura 1. En este régimen de efecto de lente gravitacional fuerte, cada imagen viaja a lo largo de una trayectoria diferente, sintiendo un potencial gravitacional diferente y, por lo tanto, llegando al detector en diferentes momentos y con una magnificación diferente. Dado que la forma de la señal no cambia demasiado debido al efecto de lente gravitacional fuerte, buscamos estos eventos repetidos en nuestro catálogo buscando señales que coincidan en sus masas detectadas y otros parámetros intrínsecos. Realizamos esta búsqueda en diferentes etapas, primero utilizando algoritmos rápidos que buscan similitudes en los parámetros inferidos para diferentes eventos con el fin de seleccionar la lista de candidatos. Luego realizamos análisis estadísticos sofisticados para determinar la significancia de la hipótesis de que haya habido efecto de lente gravitacional fuerte frente a la hipótesis de que no haya habido. Dado que algunas de las imágenes podrían ser desmagnificadas cayendo por debajo de nuestros umbrales de detección, también realizamos búsquedas específicas de imágenes por debajo del umbral. Nótese que cuando una señal de onda gravitacional no viaja tan cerca de la lente galáctica, el efecto es solo una magnificación o desmagnificación débil de la señal emitida. Por lo tanto, actualmente no estamos buscando este régimen de lente gravitacional débil, aunque será importante en el futuro, cuando se detecten binarias más distantes.

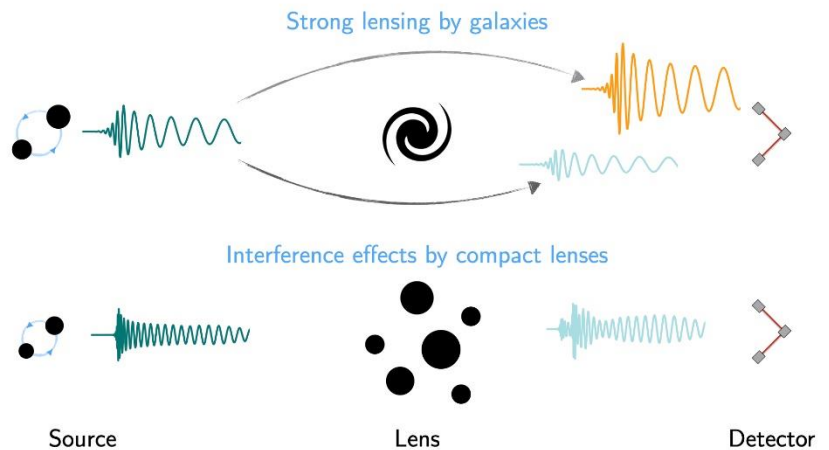


Figura 1: Representación esquemática del efecto de lente gravitacional de ondas gravitacionales. En la parte superior, una señal dada es afectada por el efecto de lente gravitacional fuerte debido a una galaxia actuando como lente, lo que produce múltiples imágenes con diferente amplitud, tiempo de llegada y fase. En la parte inferior, pequeñas lentes compactas producen efectos de interferencia que distorsionan la forma de onda detectada.

MÁS INFORMACIÓN:

Visite nuestras webs: www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Pero las galaxias y los cúmulos de galaxias no son los únicos objetos que podrían provocar el efecto de lente gravitacional en las ondas gravitacionales. Objetos astrofísicos mucho más pequeños, como los [agujeros negros](#) aislados, también podrían provocar efectos de lente gravitacional detectables. Dado que la diferencia del tiempo de llegada entre las múltiples imágenes es proporcional a la masa de la lente, las lentes más ligeras conducirían a retrasos de tiempo más cortos. Eventualmente, cuando el retardo temporal es menor que la duración de la señal, las imágenes pueden superponerse, produciendo efectos de interferencia visibles como patrones de batido en las formas de onda, ver Figura 1. Para masas aún más pequeñas, los efectos de difracción pueden ser importantes y el efecto de lente gravitacional debe resolverse en el [régimen de óptica ondulatoria](#) completo. Sin embargo, si la lente es mucho más pequeña que la longitud de onda gravitacional, no se puede medir ningún efecto significativo. En cualquier caso, esto significa que las fuentes LIGO-Virgo-KAGRA pueden sondear lentes de cientos a decenas de miles de masas solares, ya que estas pueden dar lugar a distorsiones de forma de onda detectables. Siguiendo nuestro estudio anterior, buscamos estos "patrones de batido" en los datos.

¿QUÉ NUEVOS ANÁLISIS HEMOS IMPLEMENTADO?

En este estudio hemos actualizado y mejorado nuestro trabajo anterior, pero también hemos introducido nuevos análisis. En particular, se ha introducido un nuevo método rápido para identificar candidatos a pares afectados por el efecto de lente gravitacional fuerte. En lugar de observar la superposición de parámetros, este nuevo método utiliza el aprendizaje automático para comparar directamente la similitud en la morfología de los espectrogramas de tiempo-frecuencia. Dado que una lente fuerte no cambia demasiado la forma de las imágenes, los espectrogramas deberían ser similares para todas las imágenes. En este estudio hemos utilizado esta técnica de aprendizaje automático junto con el solapamiento de las distribuciones de probabilidad a posteriori para seleccionar a los candidatos más interesantes. Para ellos, realizamos una estimación de parámetros conjunta más costosa computacionalmente que no conduce a evidencia de efecto de lente gravitacional fuerte (ver Figura 2).

Como se mencionó anteriormente, el efecto de lente gravitacional fuerte no cambia demasiado la forma de las imágenes. Para algunas de ellas, conocidas como imágenes de tipo II, podría haber algunas distorsiones pequeñas cuando los diferentes modos de frecuencia son relevantes. En este estudio buscamos estos indicios de lente gravitacional fuerte en eventos individuales. Aunque algunos candidatos muestran evidencia leve de este sutil efecto, un análisis de seguimiento detallado no proporciona evidencia concluyente del efecto de lente gravitacional fuerte.

FIGURAS DE LA PUBLICACIÓN

Para obtener más información sobre estas figuras y cómo se produjeron, lea el [preprint](#) disponible gratuitamente.

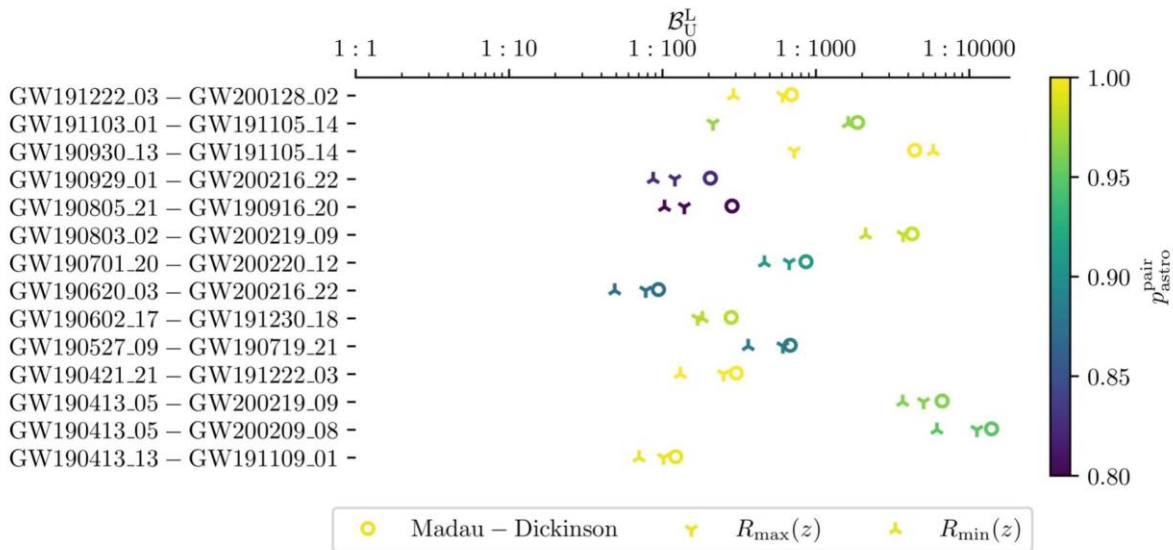


Figura 2: Gráfico de resumen para nuestra búsqueda de ondas gravitacionales afectadas por el efecto de lente gravitacional fuerte. Para cada par de eventos candidatos a haber sido afectados por el efecto de lente gravitacional enumerados en la columna de la izquierda, calculamos la evidencia estadística de la hipótesis de que haya habido efecto de lente gravitacional frente a la de que no lo haya habido (B_U^L). Un B_U^L mayor que 1 indica preferencia por la hipótesis del efecto de lente gravitacional. El eje horizontal indica esta evidencia comenzando en 1, con probabilidad decreciente hacia la derecha. Calculamos esta evidencia para diferentes suposiciones sobre el historial de la tasa de fusión de los agujeros negros binarios, resumida por los tres símbolos diferentes, que abarcan una tasa de fusión siguiendo la tasa de formación estelar ("Madau-Dickinson"), y el mínimo y máximo de una recopilación de simulaciones astrofísicas. También agregamos una barra de color como referencia, que indica la probabilidad de que este par tenga un origen astrofísico independiente del escenario de lente gravitacional. Ninguno de los pares muestra preferencia por la hipótesis del efecto de lente gravitacional.

IMPLICACIONES DE NO ENCONTRAR EL EFECTO DE LENTE GRAVITACIONAL EN ONDAS GRAVITACIONALES

El hecho de que no encontremos evidencia del efecto de lente gravitacional nos permite extraer implicaciones astrofísicas sobre la población de lentes y fuentes. Las búsquedas de imágenes múltiples restringen la distribución de lentes grandes como las galaxias, mientras que los efectos de interferencia establecen límites en la cantidad de objetos compactos que actúan como [materia oscura](#). Para este último caso, suponiendo que todos los objetos compactos de materia oscura tienen la misma masa, podemos establecer límites en su abundancia para diferentes masas, ver Figura 3. Esto a su vez tiene implicaciones para los modelos del Universo primitivo que predicen la existencia de [agujeros negros primordiales](#). Como se puede observar en la figura, encontramos que los objetos compactos con masas entre 100 y 10.000 masas solares no podrían formar la totalidad de la materia oscura. Para el primer caso, encontramos que la no observación del efecto de lente gravitacional fuerte implica que la tasa de fusión de agujeros negros binarios en el pasado distante (hace más de 10 mil millones de años) no podría ser más de dos órdenes de magnitud mayor que la tasa de fusión en la actualidad, o de lo contrario deberíamos haber observado eventos con efecto de lente gravitacional múltiple. Este resultado es consistente con los límites superiores derivados de la no observación de un [fondo estocástico de ondas gravitacionales](#).

EL CAMINO POR DELANTE

Aunque no hemos encontrado evidencia convincente del efecto de lente gravitacional, la sensibilidad mejorada en los próximos periodos de observación sitúa la búsqueda del efecto de lente gravitacional en ondas gravitacionales en una posición muy emocionante al borde de su primera detección.

MÁS INFORMACIÓN:

Lea una preimpresión gratuita del artículo científico completo: <https://dcc.ligo.org/P2200031/public> o bien: <https://arxiv.org/abs/2304.08393>

Traducido al castellano por Ángel Garrón y Jose Ezquiaga (a partir de la [versión original en inglés](#))

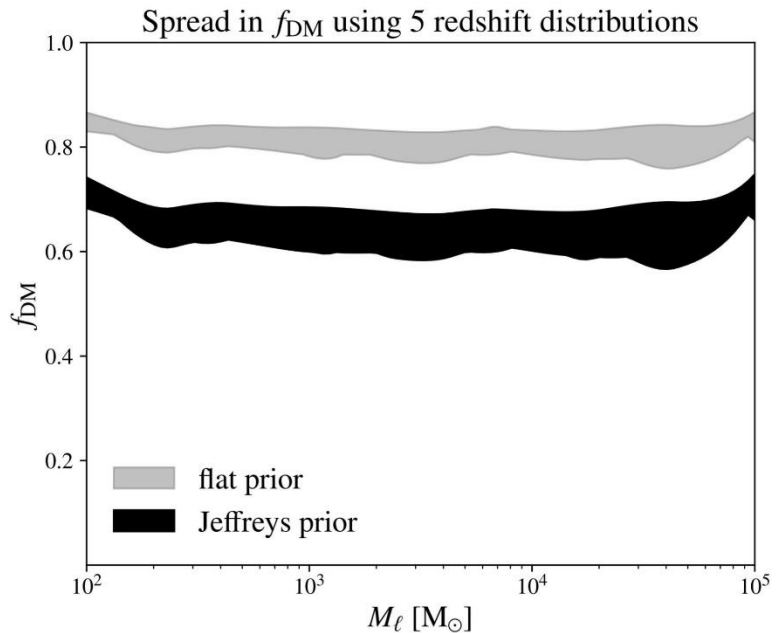


Figura 3: Restricciones en la abundancia de objetos compactos derivadas de la no observación de distorsiones debidas al efecto de lente gravitacional en el último catálogo de ondas gravitacionales. La abundancia de objetos compactos en el eje vertical se calcula como una fracción de la abundancia total de materia oscura. La masa de los objetos compactos en el eje horizontal se presenta en términos de la masa de la lente. Consideramos diferentes supuestos, en parte resumidos por el 'prior uniforme' y por el 'prior de Jeffrey', para la población de lentes y fuentes. Encontramos que los objetos compactos entre 100 y 10.000 masas solares no podrían ser la totalidad de la materia oscura.

GLOSARIO

Einstein: En 1915 Albert Einstein describió por primera vez la teoría general de la gravitación. En esta teoría, la gravedad es el resultado de la curvatura en el espacio-tiempo causada por concentraciones de masa o energía. Predijo tanto las ondas gravitacionales como las lentes gravitacionales.

Distancias cosmológicas: se refiere a distancias mucho mayores que el tamaño de nuestra galaxia y el grupo local. Típicamente, las distancias cosmológicas se expresan en términos de Gigaparsecs. Un Gigaparsec (a menudo abreviado como Gpc) corresponde a unos tres mil millones de años luz o 3×10^{22} km. Es decir, un millón de veces el tamaño de nuestra galaxia.

Galaxias: son sistemas gravitacionalmente ligados compuestos principalmente de estrellas, gas y materia oscura.

Cúmulos de galaxias: Las galaxias también pueden formar sistemas gravitacionales más grandes conocidos como cúmulos.

Agujeros negros: Un agujero negro es un objeto masivo y denso, cuya atracción gravitacional es tan fuerte que la luz no puede escapar.

Régimen de óptica ondulatoria: La óptica ondulatoria se refiere al régimen en el que las propiedades de onda de una onda gravitacional o radiación electromagnética se vuelven importantes y se deben tener en cuenta los efectos de interferencia y difracción.

Materia oscura: Una forma hipotética de materia que representa aproximadamente el 85% de la materia en el universo. La materia oscura se llama "oscura" porque no parece absorber, reflejar o emitir luz y, por lo tanto, es difícil de detectar. La composición de la materia oscura es desconocida, podría estar hecha de partículas fundamentales, o agujeros negros, entre otros candidatos.

Agujeros negros primordiales: Un tipo teórico de agujero negro formado en el Universo primitivo. Las fluctuaciones en la densidad de energía del Universo podrían haber dado lugar a regiones del espacio que eran tan densas que colapsaron espontáneamente para formar agujeros negros. Dado que no se forman a través del colapso de estrellas masivas, los agujeros negros primordiales podrían existir con masas por debajo de una masa solar o fusionarse con corrimientos al rojo más altos que las primeras estrellas forman.