

GWTC-4.0: BÚSQUEDAS DE LENTES GRAVITACIONALES DE ONDAS GRAVITACIONALES

Las ondas gravitacionales —ondulaciones en el espacio-tiempo producidas por la fusión de sistemas binarios compactos, como las detectadas por la colaboración LIGO-Virgo-KAGRA (LVK)— fueron una predicción de la teoría de la relatividad general de Einstein. La teoría de Einstein también nos dice que la materia curva el espacio y el tiempo a su alrededor, de modo que cualquier señal que viaje a través de esa región será desviada por esta curvatura. Este proceso, conocido como lente gravitacional, es matemáticamente similar al lente de la luz cuando, por ejemplo, pasa a través del cristal (un fenómeno del que quizás dependas para leer estas palabras!). El lente gravitacional de la luz por objetos masivos en el espacio se ha observado durante más de cien años y se ha convertido en una herramienta habitual de los astrónomos, pero hasta ahora no se ha observado el lente por ondas gravitacionales.

En este estudio, hemos buscado señales de lente de ondas gravitacionales en los nuevos eventos de agujeros negros binarios detallados en nuestro último catálogo LIGO-Virgo-KAGRA (GWTC-4.0), que incluye detecciones realizadas durante la primera parte de la cuarta campaña de observación LVK (O4a).

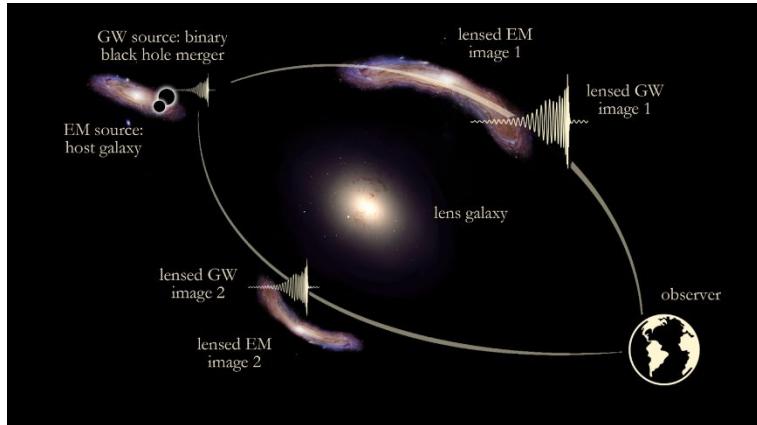


Figura 1: Esquema que ilustra el proceso de lente gravitacional fuerte, en el que la señal emitida originalmente pasa cerca de un objeto lente y se producen múltiples «copias» de esa señal, cada una con su propia trayectoria y diferente aumento. Estas múltiples copias llegan al observador en la Tierra en diferentes momentos, como señales distintas. El esquema ilustra el efecto de la lente gravitacional fuerte sobre una fuente de ondas gravitacionales (GW), superpuesto a representaciones del efecto de lente gravitacional fuerte sobre la luz, es decir, una fuente electromagnética (EM): imágenes distorsionadas de la galaxia anfitriona de la fuente GW tal y como se observarían con telescopios. [Crédito de la imagen: Laura Uronen, CUHK].

¿QUÉ HUELLAS DEJA EL EFECTO DE LENTE GRAVITACIONAL EN LAS ONDAS GRAVITACIONALES?

Dado que toda la materia provoca la curvatura del espacio y el tiempo, existe una amplia gama de objetos diferentes (correspondientes a una amplia gama de masas diferentes) que podrían actuar como lentes de una señal de onda gravitacional en su viaje hacia la Tierra. Estos objetos van desde estrellas individuales, pasando por campos de estrellas, hasta galaxias y cúmulos de galaxias, y no es de extrañar que, con lentes que abarcan una gama tan amplia de escalas de masa diferentes, las posibles señales de las lentes gravitacionales en las ondas gravitacionales también sean variadas.

Consideremos primero el extremo más pesado de la escala, el de las galaxias y los cúmulos galácticos (que tienen un orden de magnitud de cientos de millones de masas solares o más). Si una señal de onda gravitacional pasa lo suficientemente cerca de un objeto tan masivo, experimenta lo que llamamos lente gravitacional fuerte, donde se producen múltiples copias de esa señal. Este fenómeno se muestra en la **figura 1**, que ilustra el efecto de la lente gravitacional fuerte tanto para una señal luminosa (de la galaxia anfitriona de la fuente de ondas gravitacionales) como para la propia señal de onda gravitacional. Cada una de estas copias de la señal sigue su propia trayectoria y experimenta diferentes partes del campo gravitacional producido por el objeto de lente, por lo que las observamos en diferentes momentos con diferentes aumentos, lo que cambia la amplitud de la onda gravitacional, haciendo que la fuente parezca más cercana o más lejana a nosotros. Sin embargo, esto deja la forma de las señales sin cambios, salvo por un cambio de fase global, de forma similar a como, al mirar a través de un cristal, los reflejos se invierten.

Esto significa que podemos buscar estas señales con múltiples lentes buscando eventos de ondas gravitacionales que parezcan mostrar similitudes en los parámetros que medimos para ellos. Por ejemplo, podríamos observar múltiples eventos que parecen provenir de sistemas binarios con masas similares, o de una dirección similar en el cielo, pero que a primera vista podrían parecer estar a distancias diferentes. Por supuesto, existe la posibilidad de que esto ocurra por casualidad, por lo que debemos ser minuciosos en nuestros exámenes e intentar eliminar (o al menos reducir) esos casos de «falsos positivos». Esto se hace mediante un proceso de varias etapas.

En primer lugar, utilizamos algoritmos rápidos que examinan los diferentes eventos de ondas gravitacionales, buscando estas similitudes en sus parámetros inferidos y evaluando la compatibilidad de las diferentes combinaciones de señales bajo la hipótesis de que han sufrido el efecto de una lente (lo que se denomina «hipótesis de lente»).

PARA MÁS INFORMACIÓN:

Visita nuestras páginas web: www.ligo.org www.virgo-gw.eu gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Este primer paso selecciona la lista de candidatos a lentes gravitacionales, que luego se someten a análisis más sofisticados, pero que requieren un mayor esfuerzo computacional, con el fin de determinar la importancia de los posibles candidatos. También debemos tener en cuenta que, dado que las diferentes señales tendrán diferentes magnificaciones, es posible que se detecten señales que estén «por debajo del umbral»: tan «silenciosas» que las búsquedas estándar de señales de ondas gravitacionales de LVK no las encontrarían. No obstante, están presentes en los datos que recibimos y, por lo tanto, realizamos búsquedas específicas de dichos candidatos.

Aunque lo más habitual es buscar lentes fuertes a gran escala a través de múltiples copias de la misma señal, en determinadas condiciones específicas puede ocurrir que solo sea identificable una única señal de onda gravitacional. Este escenario se da en lo que se denomina el caso de tipo II¹, y en estas circunstancias el lente produce algunas pequeñas diferencias en los distintos modos de frecuencia de la señal que pueden detectarse.

Pasando ahora a lentes más pequeñas y menos masivas, en este caso se siguen produciendo imágenes múltiples cuando la señal pasa lo suficientemente cerca del objeto, pero como la lente es mucho más pequeña, también lo son las desviaciones y los retrasos que produce. Esto significa que, en lugar de múltiples señales separadas, observamos solo una señal que tiene unos patrones distintivos denominados «latidos», en los que dos señales de frecuencias ligeramente diferentes interfieren entre sí. Estos patrones son teóricamente detectables en los datos de LVK, por lo que los buscamos en este estudio.

¿QUÉ HEMOS ENCONTRADO?

Tras examinar las casi 3500 parejas de señales procedentes de combinaciones de fuentes de ondas gravitacionales detectadas en O4a mediante nuestros análisis de alta velocidad, solo unas pocas decenas de estas parejas pasaron a un estudio más intensivo. Sin embargo, ninguna de ellas mostró ningún indicio significativo de lente gravitacional, por lo que fueron descartadas. En las búsquedas por debajo del umbral tampoco hubo candidatos destacados. Además, nuestro análisis de lente gravitacional fuerte de tipo II no encontró ningún apoyo significativo a la hipótesis de lente gravitacional entre los nuevos eventos. No obstante, estos resultados fueron útiles: utilizamos esta no detección de lente gravitacional fuerte para inferir restricciones sobre la frecuencia con la que se fusionan los agujeros negros en alto desplazamiento al rojo, como se muestra en la **figura 2**.

A partir de nuestra búsqueda de distorsiones en señales individuales, causadas por lentes menos masivas, la gran mayoría de las señales no respaldaban la hipótesis de la lente, ya que no mostraban distorsiones más allá del nivel que cabría esperar, por mera casualidad, en una población de señales sin lente. Sin embargo, hubo una única excepción: el evento GW231123, cuya detección se anunció por separado como un «evento excepcional» antes de la publicación del catálogo completo de O4a. Nuestro análisis revela que GW231123 parece mostrar un apoyo mucho más fuerte a la hipótesis de lente que el que cabría esperar normalmente para una señal sin lente. Por ejemplo, como se muestra en la **figura 3**, tras generar un pequeño «fondo» simulado de algo más de 250 eventos de ondas gravitacionales sin lente, descubrimos que ninguno de estos eventos simulados mostraba un nivel de apoyo a la hipótesis de la lente igual o superior al de GW231123.

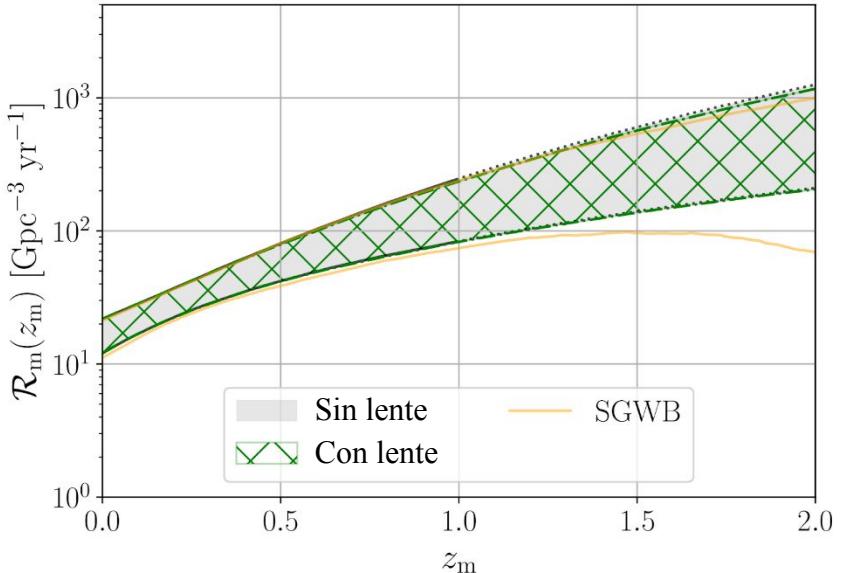


Figura 2: (Figura 11 de nuestro artículo). Tasa inferida de fusiones de agujeros negros binarios en función del desplazamiento al rojo. Nuestras restricciones sobre la tasa de fusión (mostradas como la región sombreada en verde) obtenidas al tener en cuenta la no detección de lentes gravitacionales fuertes en este estudio son comparables con las restricciones inferidas directamente a partir de las propiedades de los agujeros negros binarios detectados en nuestro nuevo catálogo (mostradas en gris) y con los límites de la tasa de fusión inferidos a partir de la no detección de un fondo estocástico de ondas gravitacionales (mostrados por las curvas naranjas).

EL CURIOSO CASO DE GW231123

GW231123 es una señal muy breve; la observamos durante solo unos pocos ciclos de ondas gravitacionales, aproximadamente una décima de segundo. Según nuestros análisis estándar (es decir, sin tener en cuenta el efecto de lente gravitacional) de esta señal, GW231123 parecía ser un sistema binario de agujeros negros pesados y de gran velocidad de rotación (de hecho, el sistema más masivo de este tipo observado en ondas gravitacionales hasta la fecha). Sin embargo, curiosamente, los parámetros inferidos para GW231123 en estos análisis sin lente parecían variar significativamente, dependiendo del modelo particular de emisión de ondas

1. En el lente fuerte hay tres clases de «imagen». Se denominan Tipo I, II y III. A cada una de estas clases se le asigna una imagen en función del desplazamiento de fase que ha experimentado. Este desplazamiento puede tomar uno de estos tres valores: (I) 0, (II) $\pi/2$ o (III) π . El valor del desplazamiento de fase que se produce viene determinado por la posición de la señal en el campo gravitatorio a medida que se desplaza hacia nosotros.

gravitacionales (denominado «forma de onda») que se utilizara. Por otro lado, cuando se analizó GW231123 en busca de signos de lente gravitacional, estas diferencias entre los modelos de forma de onda parecieron atenuarse y, aunque se siguió deduciendo que uno de los componentes de la señal era más masivo y giraba más rápidamente (aunque menos que en el caso sin lente), el otro componente parecía ser más ligero y girar más moderadamente. Al analizar una señal de onda gravitacional con lente, ya sabemos que, si no se tiene en cuenta el efecto de lente, esto puede hacer que se deduzca que la señal gira más rápido de lo que realmente lo hace. Este patrón de comportamiento sería coherente con lo que se encontró para GW231123 si, efectivamente, este evento sufriera el efecto de lente gravitacional. Sin embargo, debemos ser cautelosos antes de llegar a tal conclusión y considerar cuidadosamente otras posibles explicaciones.

Una posibilidad es que, dada la brevedad de la señal, la calidad de los datos en algunas frecuencias, asociada a características particulares del espectro de ruido de nuestros detectores, pueda ser motivo de preocupación. Sin embargo, el examen de las diferencias entre las señales con lente y sin lente propuestas para este evento parece sugerir que ninguna línea espectral concreta es responsable de respaldar la hipótesis de la lente. En un caso anterior en el que se observó cierto apoyo a la lente gravitacional de esta manera, descubrimos que se debía a los datos de uno solo de nuestros detectores, lo que sugería que la causa más probable era el ruido transitorio en ese detector, y no la lente gravitacional. En el caso de GW231123, por otro lado, cuando examinamos los datos de cada uno de los detectores individualmente, encontramos que los datos siguen respaldando la hipótesis de lente, lo que significa que la causa es común a ambos detectores.

Por tanto, si GW231123 tiene efecto de lente, es importante preguntarse «¿qué probabilidad hay de que se observe un sistema de lenteado de este tipo?». En nuestro estudio, modelamos el objeto que actuó como lente de GW231123 como una masa puntual aislada, y recientemente se ha informado de que el satélite Swift podría haber observado la lente gravitacional de estallidos de rayos gamma por parte de dicha lente de masa puntual. Aunque estas afirmaciones sobre el lente no están confirmadas, si las tomamos como reales, pueden ayudarnos a estimar la probabilidad de que se observe un evento de lente gravitacional como GW231123. De esta manera (y después de tener en cuenta otras posibles fuentes, como los núcleos galácticos activos), descubrimos que cabría esperar ver un evento de ondas gravitacionales lenteado por una masa puntual aislada como la propuesta para GW231123 en una proporción de entre uno de cada cien y uno de cada diez mil detecciones de señales de ondas gravitacionales. En otras palabras, si GW231123 está lenteado, entonces, con nuestras observaciones actuales, representa un hallazgo bastante afortunado.

Por otro lado, también sabemos que el modelo de masa puntual aislada utilizado para las búsquedas realizadas en nuestro estudio no abarca otros escenarios, quizás más probables, para la lente, por ejemplo, cuando la lente está incrustada en un objeto más grande, como una galaxia. Si tal escenario fuera cierto, cambiaría nuestra estimación de la frecuencia con la que se observaría un evento con lente similar al GW231123 y se necesitarían estudios más profundos para refinar esa estimación.

En resumen, los resultados de nuestros análisis, tomados en conjunto, no nos permiten llegar a una conclusión segura sobre si GW231123 es realmente una señal con lente gravitacional. Sin embargo, en el futuro, a medida que observemos más y más señales, es posible que podamos llegar a una conclusión más definitiva, ¡así que permaneced atentos!

PERSPECTIVAS DE FUTURO

¡La búsqueda de lentes gravitacionales continúa! En el último catálogo, puede que aún no hayamos encontrado ninguna señal de lente gravitacional identificada con certeza. Sin embargo, hemos encontrado el candidato más interesante y prometedor hasta la fecha en GW231123, para el que no se puede descartar la hipótesis de la lente gravitacional. En los próximos años, a medida que se detecten más y más fuentes de ondas gravitacionales, las perspectivas para identificar las señales de lentes gravitacionales entre ellas parecen prometedoras, y varias de las pruebas que se han realizado en este estudio serán clave para llevar a cabo esa identificación.

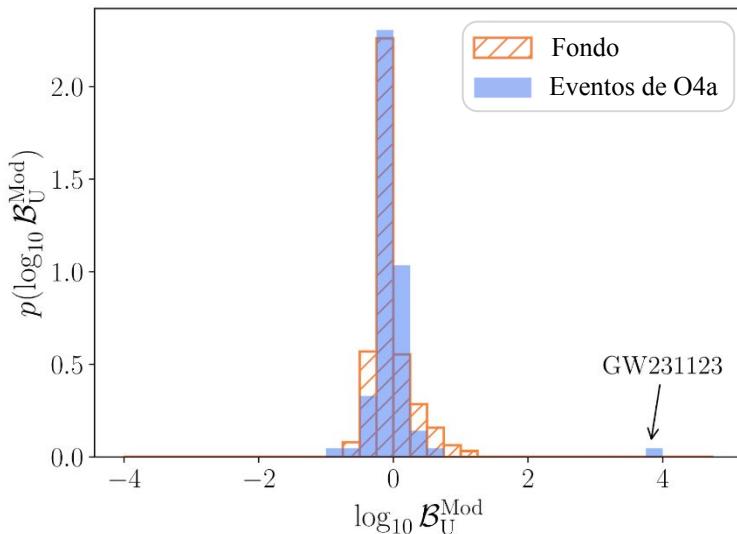


Figura 3: (Figura 6 de nuestro [artículo](#).) Distribución de los factores de Bayes —que indican el grado de preferencia de un modelo sobre otro— comparando los modelos con lente y sin lente para los eventos de O4a considerados en nuestro estudio. En azul se muestra un histograma del logaritmo (en base 10) del factor de Bayes, comparando un modelo con lente (donde la lente es una masa puntual aislada) con un modelo sin lente, para cada uno de nuestros eventos. También se muestra en naranja un histograma de los valores logarítmicos del factor de Bayes para una distribución simulada de algo más de 250 eventos sin lente. La mayoría de los eventos de O4a se encuentran dentro de la distribución simulada. Sin embargo, GW231123 se encuentra significativamente fuera de esta distribución.

PARA MÁS INFORMACIÓN:

Visita nuestras páginas web:

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

Lee la versión preliminar gratuita del artículo científico completo [aquí](#) en [arxiv](#).

Los datos del Gravitational-Wave Open Science Center para GWTC-4.0 están disponibles [aquí](#).

Traducción al castellano por Pablo García (a partir de la versión original en inglés).