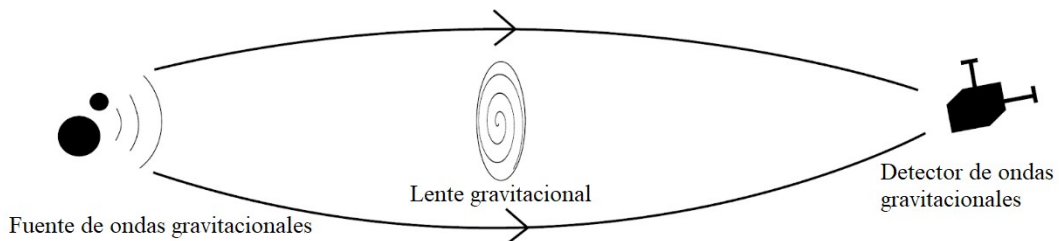


GRAVEDAD CURVANDO GRAVEDAD: ¿ESTÁN ALGUNAS DE LAS DETECCIONES DE LIGO-VIRGO DURANTE O3A AFECTADAS POR LENTES GRAVITACIONALES?

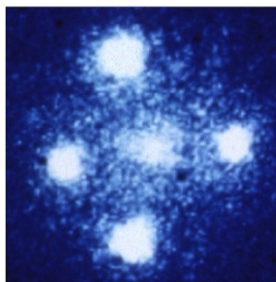
Imagine una lente aumentadora tan grande como una galaxia y su efecto en la luz o a las ondas gravitacionales que viajan a lo largo del cosmos. A través del fenómeno de las lentes gravitacionales, objetos astrofísicos muy masivos pueden actuar como dichas lentes gigantes. En este estudio, hemos buscado indicios de estas lentes en las ondas gravitacionales detectadas en la primera mitad del tercer período de observación de LIGO-Virgo, también conocido como O3a.

LENES GRAVITACIONALES – LA PREDICCIÓN DE EINSTEIN Y SUS APLICACIONES EN ASTRONOMÍA

La teoría de la relatividad general postula que objetos astronómicos masivos alteran el espacio-tiempo cerca de ellos, curvando así los caminos que recorre la luz. En otras palabras, actúan como lentes gravitacionales. Estas pueden aumentar el tamaño de objetos lejanos, separarlos en múltiples imágenes o deformarlos en grandes arcos o “[anillos de Einstein](#)” (ver figura 1). Las observaciones de las lentes gravitacionales están muy extendidas en el campo de la astronomía a lo largo del [espectro electromagnético](#). Históricamente, este fenómeno permitió realizar la primera prueba de la teoría de Einstein [durante el eclipse solar de 1919](#). Más recientemente, se han utilizado observaciones de [lentes débiles](#) para cartografiar la distribución de masa en el universo, logrando un argumento de peso para la [materia oscura](#). Además, permite a los astrónomos estudiar [exoplanetas](#) que causan variaciones periódicas en el brillo de sus estrellas al pasar por delante de ellas. Por otra parte, el fenómeno de las lentes gravitacionales nos permite descubrir objetos y estructuras masivas que, sin ellas, serían demasiado tenues para ser detectados. En definitiva, las lentes gravitacionales han pasado a ser una herramienta básica en astronomía, astrofísica y cosmología.



ESA/Hubble & NASA



NASA, ESA, and STScI



NASA, ESA, Hubble SM4 ERO Team, ST-ECF

Figura 1: Cuando la luz viaja cerca de objetos astrofísicos masivos, su camino se curva por acción de la gravedad; así funcionan las lentes gravitacionales. Este fenómeno puede producir anillos y cruces de Einstein, distorsiones estadísticas en la luz de fondo de las galaxias y muchas otras observaciones interesantes. De manera semejante a la luz, las ondas gravitacionales pueden verse afectadas por dichas lentes. Aún así, los métodos para detectarlas y analizarlas son completamente diferentes. En lugar de distorsiones en la forma de imágenes o iluminación transitoria de estrellas, buscamos señales repetidas de ondas gravitacionales y distorsiones que dependen de la frecuencia en el paquete de ondas.

¿COMO PUEDEN AFECTAR LAS LENTES GRAVITACIONALES A LAS ONDAS GRAVITACIONALES?

Al igual que las ondas electromagnéticas, las [ondas gravitacionales](#) pueden verse afectadas por la presencia de objetos astronómicos como estrellas, agujeros negros, galaxias o cúmulos (ver figura 1). Aún así, mientras que la teoría detrás de este fenómeno en las ondas gravitacionales es similar a la del mismo en la luz, los métodos para detectarlo son completamente diferentes, debido fundamentalmente a las distintas fuentes y detectores. En concreto, puede que estemos detectando una amplificación de las ondas como norma general, producto de las lentes gravitacionales. Esta amplificación causaría que las [señales de fusión de binarias](#) dieran la impresión de proceder de fuentes más cercanas y más masivas de las de las que provienen en realidad. Múltiples imágenes aparecerían como eventos repetidos: eventos casi idénticos serían detectados con diferencias de entre minutos hasta meses (incluso años). Como las lentes producen separaciones en las imágenes demasiado pequeñas como para ser resueltas con los detectores actuales, los eventos parecen proceder de la misma posición en el cielo. Por otra parte, las microlentes producen pequeños retrasos temporales entre las imágenes, lo cual puede generar deformaciones de la señal detectada con “patrones de batimiento o pulsación”.

¿QUÉ PODEMOS APRENDER DE LAS ONDAS GRAVITACIONALES AFECTADAS POR LENTES?

Una vez identificadas, las ondas gravitacionales alteradas por lentes podrían dar lugar a numerosos avances científicos. Para algunos sistemas de lentes particulares, se podrían localizar fusiones de agujeros negros, invisibles para telescopios convencionales, combinando mediciones del efecto de las lentes en ondas gravitacionales y electromagnéticas. Cuando una señal electromagnética acompaña las ondas magnificadas, se podrían realizar estudios de cosmología de precisión gracias a la precisión inferior al milisegundo en la medida del retardo entre las imágenes producidas por la lente. Al contrastar los retrasos de tiempo entre las ondas gravitacionales afectadas por lentes con sus equivalentes electromagnéticos, se podría medir la velocidad de la gravedad en relación con la luz. Como estas ondas gravitacionales modificadas nos permiten observar el mismo evento varias veces en diferentes orientaciones del detector, también pueden permitirnos averiguar la polarización completa de las ondas, probando la relatividad general y teorías alternativas. Las microlentes, por otro lado, podrían ayudar en el estudio de poblaciones de objetos como agujeros negros primordiales y de masa intermedia. Una vez realizadas, las observaciones de ondas gravitacionales afectadas por lentes permitirán nuevos estudios científicos en física fundamental, astrofísica y cosmología.

LO QUE BUSCÁBAMOS EN LOS DATOS DE O3A, Y LO QUE ENCONTRAMOS

En este estudio hemos buscado indicios de lentes en señales de ondas gravitacionales procedentes de binarias compactas detectadas por [Advanced LIGO](#) y [Advanced Virgo](#) durante el período O3a. Hemos pronosticado con qué frecuencia aparece el fenómeno causado por las lentes gravitacionales con la sensibilidad del detector actual y determinado como incluso la *ausencia* de efectos de lente fuerte detectables mejora nuestro conocimiento del ritmo de fusiones de binarias compactas en el universo lejano (ver figura 2).

IMÁGENES DE LA PUBLICACIÓN

Para más información acerca de estas imágenes y cómo fueron producidas, lea la versión de [preimpresión](#), disponible gratuitamente.

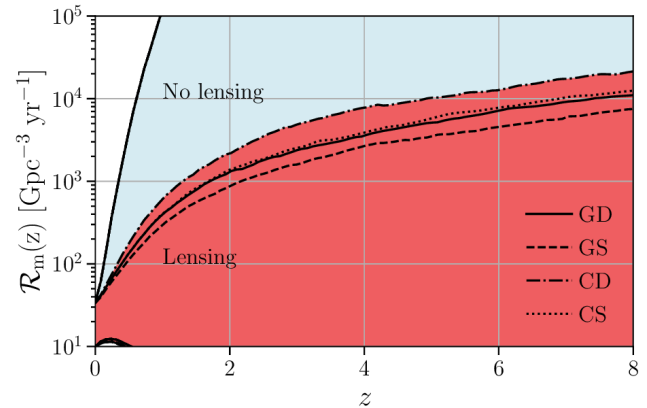


Figura 2: Este diagrama demuestra cómo la presencia o ausencia de ondas gravitacionales alteradas por lentes detectables amplía nuestro conocimiento del ritmo de fusiones de binarias compactas (eje vertical) a lo largo de la historia del cosmos, siendo el eje horizontal el corrimiento al rojo z (el día actual se encuentra en $z=0$). Ya tenemos una idea general acerca del ritmo de fusiones, como indica la zona en azul del diagrama, gracias a nuestro catálogo de observaciones, sobre el cual pueden leer más en este resumen. Saber si existen o no efectos detectables de las lentes gravitacionales en los datos restringe el ritmo de fusión de alto corrimiento al rojo (universo primitivo), como indica la región en rojo del diagrama. Esto se debe a que las lentes pueden aumentar señales de forma que somos capaces de detectarlas desde más lejos. En la gráfica, la cantidad mostrada en el eje vertical es técnicamente la densidad de ritmo de fusión, eso es, el número de fusiones por año en un volumen de un Gigapársec cúbico. Las diferentes líneas representan resultados para diferentes tipos de lentes: lentes de escalas galácticas (G), y lentes de escalas de cúmulos (C), así como detecciones de una única (S) o las dos (D) imágenes producidas por un evento con dos imágenes.



Visita nuestras páginas web:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>

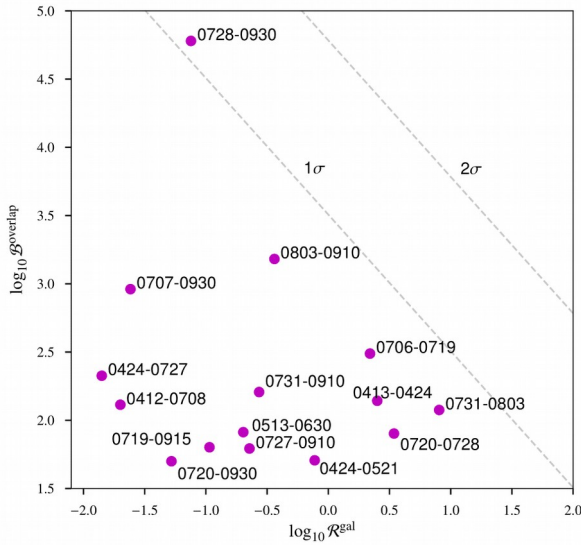


Figura 3: Los pares de eventos más prometedoros en GWTC-2 potencialmente afectados por lentes durante O3a según el criterio de un alto solapamiento entre sus propiedades estimadas, incluyendo por ejemplo las masas y espines de los objetos en fusión. El grado de solapamiento se muestra cuantificado en el eje vertical. El eje horizontal nos dice si el tiempo de retraso entre los pares es más consistente considerando el efecto de una lente (asumiendo una galaxia como dicha lente gravitacional, generando retrasos temporales menores y clasificados más arriba) o bien considerando dos eventos no relacionados (los cuales en general producirían retrasos mayores y serían clasificados más abajo). Las líneas discontinuas indican que, combinando las dos medidas, ninguno de los pares muestra evidencia significativa de estar afectado por lentes (medidos en los niveles convencionales de desviación típica). Pero, para profundizar aún más, también hemos realizado otros análisis de seguimiento y hemos incluido modelos poblacionales y sesgos de selección; al final, todos los pares candidatos parecen consistentes con fusiones independientes que simplemente resultan tener propiedades semejantes, sin ningún efecto de lentes gravitacionales implicado.

Hemos demostrado también como la ausencia de un [fondo de ondas gravitacionales estocástico y observable](#) mejora nuestro conocimiento del ritmo en que ocurre el fenómeno de las lentes gravitacionales. Además, hemos estudiado la idea de que la magnificación debido a las lentes podría ayudar a explicar las excepcionales masas que vemos en algunos de los eventos detectados (como [GW190425](#) o [GW190521](#)). También hemos buscado múltiples imágenes producidas por lentes en los datos del detector, comparando cuán probable es que un par de señales dado esté formado por copias modificadas por lentes de la misma fuente o bien por fuentes no relacionadas. Hemos encontrado varios pares candidatos que se parecen unos a otros (ver figura 3), justo como si de imágenes modificadas por lentes de una única fuente se tratase, pero al final no hemos encontrado motivos para concluir que se trataba del efecto de lentes gravitacionales. Después hemos considerado hipótesis más realistas sobre la población de las fuentes, los efectos de selección de las búsquedas, y el ritmo esperado del efecto de las lentes dada la sensibilidad actual. Finalmente, hemos buscado el efecto característico de “patrón de batimiento” de las microlentes en las formas de las ondas de los 36 eventos detectados, sin encontrar evidencia alguna (ver figura 4). En resumen, nuestro amplio estudio de la amplificación de las ondas gravitacionales, imágenes múltiples y evidencias de microlentes en los datos de O3a no nos ha proporcionado evidencia convincente del fenómeno de las lentes gravitacionales.

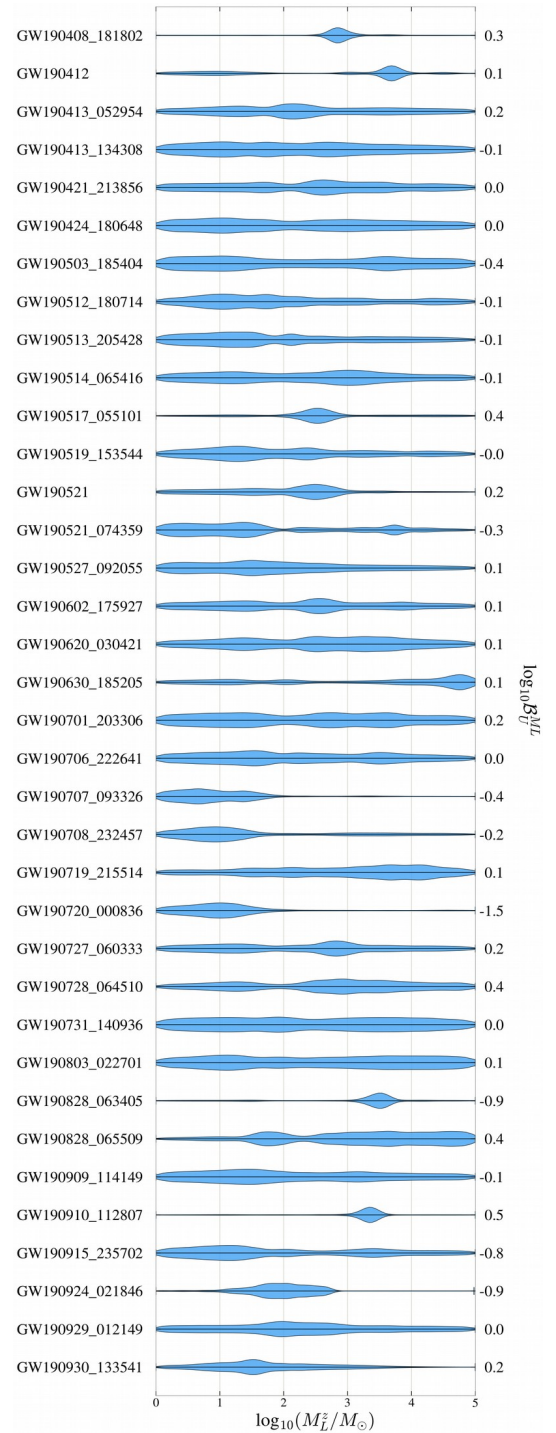


Figura 4: Resultados de examinar 36 eventos de O3a para “patrones de batimiento” de microlentes dependientes de frecuencia. Los contornos muestran la probabilidad de ciertos valores de masas de las lentes dados los datos medidos, asumiendo que el evento ha sufrido el efecto de las microlentes. Aún así, no hemos encontrado evidencias para señalar que sea este el caso de ninguno de los eventos. Los valores a la derecha de la gráfica son [factores de Bayes](#), una estadística que nos dice si, para cada caso, la mejor explicación pasa por asumir el efecto de las lentes o no. Dado que son todos negativos o cercanos a cero, podemos concluir que ninguno de ellos requiere el efecto de las microlentes para explicar su evolución de frecuencia.

PREVISIÓN FUTURA

En el futuro, es posible indagar más profundamente en los efectos de las lentes gravitacionales con métodos de análisis más sensibles y modelos de lentes más detallados. Las siguientes observaciones electromagnéticas de candidatos a lentes, incluso si no son suficientemente significantes en base a las observaciones de ondas gravitacionales por sí solas, pueden ser también prometedoras para identificar las posibles galaxias huéspedes y lentes. Próximas actualizaciones de la actual generación de detectores, así como la extensión del sistema global, continuaran incrementando las posibilidades de detectar evidencias de efectos claros de las lentes gravitacionales. Una vez que los detectores de tercera generación situados en el espacio (por ejemplo el [Einstein Telescope](#), el [Cosmic Explorer](#) y [LISA](#)) sean una realidad en la década del 2030, otras posibilidades interesantes empezarán a ser factibles.

PARA SABER MÁS:

Visita nuestras páginas web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

Traducción al castellano a cargo de Joan Moragues Roca y Jose Maria Ezquiaga Bravo, de la versión original en inglés disponible en: <https://www.ligo.org/science/Publication-O3aLensing/>

GLOSARIO

Agujero negro: Objeto masivo, muy denso, el tirón gravitacional del cual es tan fuerte que la luz no puede escapar de él.

Binaria compacta: Sistema de dos remanentes de estrellas que han colapsado; por ejemplo una estrella de neutrones y un agujero negro, orbitando una alrededor de la otra a muy corta distancia.

Corrimiento al rojo: El ensanchamiento de la longitud de onda de la luz, o de las ondas gravitacionales, viajando a través del universo en expansión.

Efecto de selección: Los detectores de ondas gravitacionales son más afines a detectar eventos con ciertas propiedades intrínsecas (por ejemplo, en cierto rango de masas) y procedentes de ciertas regiones del espacio. Esto deriva en encontrar más pares de eventos similares de los que uno podría esperar.

Espín: Cantidad que mide la rapidez con la que un objeto rota alrededor de sí mismo.

Gigapársec: Unidad de distancia astronómica apropiada para distancias cosmológicas muy grandes, igual a mil millones de [pársecs](#). Un Gigapársec (abreviado como Gpc) corresponde a unos 3 mil millones de años luz o $3 \cdot 10^{22}$ km.

Plantilla de forma de onda gravitacional: Modelo que predice como las perturbaciones causadas por ondas gravitacionales cambian con el tiempo.

Polarizaciones de las ondas gravitacionales: La forma geométrica del ensanchamiento y estrechamiento del espacio-tiempo causada por la onda gravitacional a medida que avanza. La relatividad general solo predice un tipo específico, llamado polarización de tensor, aunque otras teorías de la gravedad alternativas predicen otras polarizaciones adicionales.

Relatividad general: Teoría de la gravitación actualmente aceptada, descrita por primera vez por Albert Einstein en 1916. En esta teoría, la gravedad es el resultado de la curvatura del espacio-tiempo causada por las concentraciones de masa o energía. Predijo tanto las ondas gravitacionales como las lentes gravitacionales.

Universo lejano: Debido a que la velocidad de la luz es finita, cuanto más lejos miramos en el universo lejano, más lejos miramos en el tiempo hacia el pasado. Por ello, las fusiones de binarias muy lejanas ocurrieron de hecho cuando el universo era mucho más joven de lo que es hoy en día, de manera que nos limitamos a una época distinta que con observaciones más cercanas. Dado que el [universo se expande](#), grandes distancias también corresponden a mayores [corrimientos](#) de las longitudes de onda de las señales observadas.