

¿RESPALDA LA TEORÍA DE LA GRAVEDAD DE EINSTEIN LAS ÚLTIMAS OBSERVACIONES DE LIGO/VIRGO/KAGRA?

INTRODUCCIÓN

Las ondas gravitacionales son producidas por masas aceleradas de manera no uniforme que transportan información sobre sus fuentes y, a menudo, son consideradas como ondulaciones en la curvatura del espacio-tiempo. [La teoría de la Relatividad General de Einstein](#) (RG) predice propiedades medibles de las ondas gravitacionales. Según la RG, estas ondas viajan a la [velocidad de la luz](#), y la velocidad de propagación es independiente de la frecuencia de la onda. Predice que las ondas tendrán dos [modos de polarización](#) independientes denominados “más” y “cruz”. Además, la RG hace predicciones sobre la dinámica del espacio-tiempo que conducen a la generación de ondas gravitacionales, por ejemplo, en el caso de colisiones de agujeros negros y/o estrellas de neutrones. Las detecciones de ondas gravitacionales procedentes de la fusión de sistemas binarios de agujeros negros y estrellas de neutrones por la red de detectores “advanced LIGO/Virgo” brindan una oportunidad única para verificar las predicciones de la RG y por lo tanto buscar cualquier física más allá de esta teoría.

Con el catálogo de ondas gravitacionales transitorias más reciente, GWTC-3, los detectores LIGO/Virgo han detectado alrededor de 90 fusiones de sistemas binarios compactos, incluyendo sistemas binarios de agujeros negros, sistemas binarios de estrellas de neutrones y pares de estrellas de neutrones y agujeros negros. De entre los 90 eventos, [se anunciaron por primera vez](#) 35 fusiones de sistemas binarios compactos desde la segunda mitad del tercer periodo de observación (O3b). En [este artículo](#), combinamos los nuevos datos de observación con los datos más antiguos para buscar posibles desviaciones de la RG.

Todos los experimentos realizan mediciones con la presencia de ruido y los detectores de ondas gravitacionales no son una excepción. Cuando buscamos alteraciones respecto a la RG, ciertos tipos de ruido que están presentes en el detector pueden imitarlos, creando un riesgo de que afirmemos incorrectamente una alteración cuando no la hay. Por lo tanto, restringimos nuestro análisis solo a eventos “fuertes”, cuyas señales podrían parecerse al ruido del detector solo una vez cada 1000 años o más. Esto nos da 15 eventos de O3b para ser analizados y sobre los cuales llevamos a cabo nueve pruebas diferentes que buscan alteraciones respecto a la RG. A continuación, se describe un resumen de los resultados.

PRUEBAS DE CONSISTENCIA

Consistencia general de la señal con los datos: la prueba residual

Usamos formas de onda de la RG para detectar e interpretar eventos de ondas gravitacionales. La prueba de la RG más directa que podemos realizar es restar a los datos observados la [forma de onda de la RG](#) que mejor se ajuste a los datos. El residuo que deja este procedimiento debe ser consistente con el ruido, si la RG es correcta. Para todos los eventos estudiados, encontramos que el residuo es consistente con el ruido del detector evidenciando la consistencia de los datos con las predicciones de la RG.

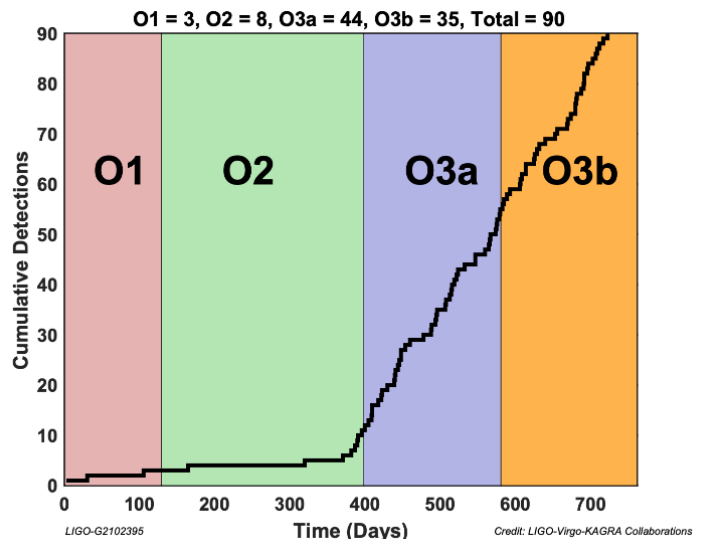


Figura 1: Duración de los tres primeros periodos de observación de los detectores “advanced LIGO” y “advanced Virgo” y el número acumulado de detecciones realizadas. Sin embargo, como se menciona en el texto principal, en este estudio no todos estos sistemas binarios se analizaron para poner a prueba la RG.

Auto-consistencia de la forma de onda: la prueba de consistencia de espiral-fusión-relajación

Las ondas gravitacionales de las fusiones de estrellas de neutrones y agujeros negros tienen tres fases evolutivas: la lenta espiral de los dos cuerpos uno hacia el otro, la fusión de los dos cuerpos en uno y la relajación del objeto compacto remanente. Se puede realizar una verificación de consistencia importante preguntando si la forma de onda de la espiral es consistente con la forma de onda de la post-espiral. La masa y el espín finales del agujero negro remanente se pueden

inferir de ambas partes de la evolución utilizando ajustes empíricos inspirados en simulaciones de relatividad numérica de estos sistemas binarios en la RG. Nuestro análisis encontró que las formas de onda de las fases espiral y post-espiral coincidían para todos los eventos que fueron analizados (ver [figura 2](#)).

PRUEBAS PARAMETRIZADAS DE GR

La física altamente no lineal y compleja durante la dinámica tardía del sistema binario conduce a varios efectos físicos que quedan codificados en la forma de onda gravitacional. Una teoría de la gravitación modificada podría tener una predicción diferente para uno o más de estos efectos. Los modelos parametrizados permiten buscar posibles desviaciones de la RG en estos efectos físicos. Buscamos evidencia de física que no esté descrita por la RG en las fases espiral y de fusión/relajación de la evolución.

Pruebas usando la fase espiral

La fase espiral del sistema binario se describe mediante una aproximación de campo débil y a cámara lenta, llamada [aproximación post-Newtoniana](#) de la RG. Diferentes coeficientes post-newtonianos capturan uno o varios de los efectos físicos que ocurren durante la dinámica del sistema binario. Probar su consistencia con las predicciones de la RG constituye un test muy útil de esta teoría. Nuestro análisis, combinado con los resultados de catálogos anteriores, proporciona los límites más recientes para los coeficientes de desviación; sin embargo, no encontramos inconsistencias estadísticamente significativas con la RG.

La fase espiral del sistema binario también nos permite comprobar si la señal es consistente con la coalescencia de dos [agujeros negros de Kerr](#) en la

RG. Si uno de los objetos compactos está girando, este giro puede provocar una deformación, al igual que la rotación de la Tierra conlleva a un aplastamiento en los polos y un abultamiento en el ecuador. Esto conduce a una contribución perceptible en la fase evolutiva del sistema binario, la cual es diferente para un agujero negro de Kerr en comparación con otros objetos compactos. Probamos este efecto y no encontramos evidencia de ningún [objeto compacto exótico](#).

Pruebas usando la fase de fusión y relajación

De manera similar, probamos si las ondas gravitacionales emitidas durante la fase de fusión y la relajación siguen las predicciones de la RG. La duración de la fusión y la relajación es mucho más corta que la espiral, excepto en el caso de los sistemas binarios de masas altas, lo que da como resultado una menor acumulación de [relación señal-ruido](#) durante esta parte de la evolución. Restringir los eventos a aquellos con una relación señal-ruido acumulada razonable durante la fusión y la relajación permite establecer límites significativos. Esta prueba se realiza con tres métodos que son complementarios entre sí en cuanto a los detalles de la forma de onda y metodología y parametrización. Encontramos que la prueba es consistente con GR dentro de las incertidumbres estadísticas.

Pruebas de propagación de ondas gravitacionales

Mientras que las ondas gravitacionales se propagan de forma no dispersiva según la RG, las modificaciones de esta teoría pueden dar lugar a [dispersión](#). Esto da como resultado que los componentes de frecuencia de la onda viajen a diferentes velocidades, provocando diferencias en sus tiempos de llegada al detector. Por ejemplo, si las ondas de mayor frecuencia emitidas durante la fusión viajan más rápido que las ondas de menor frecuencia, producidas en la espiral, entonces las "ondas de fusión" podrían llegar a la Tierra antes de lo previsto. Buscamos la dispersión de ondas gravitacionales y no encontramos evidencia alguna. Un modelo específico e interesante que puede encajar aquí son las teorías del gravitón masivo. Esta es una de las teorías en las que se supone que la supuesta partícula de gravitón tiene una masa pequeña (pero desconocida). Esto conduce a un tipo específico de dispersión que puede restringir y proporcionar un límite inferior en la masa del gravitón. Con base en los eventos analizados de los tres periodos de observación, el límite que obtenemos es que la masa del gravitón debería estar por debajo de $1.3 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2$.

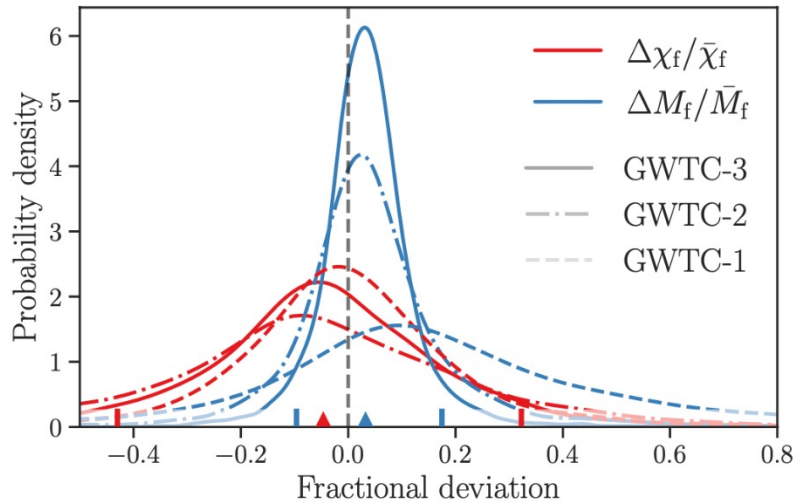


Figura 2: La diferencia fraccionaria entre la masa (azul) y el espín (rojo) de las partes espiral y post-espiral de la forma de onda gravitacional deducida de GWTC-3 se comparan con los resultados de los análisis anteriores (GWTC-1 y GWTC-2). La línea vertical gris muestra el valor de cero según la RG y los resultados muestran una excelente consistencia con esta teoría. (Fig. 4 de [nuestro artículo](#)).

Pruebas de polarización de las ondas gravitacionales

Las ondas gravitacionales en la RG solo pueden tener dos estados de polarización: “más” y “cruz”. Sin embargo, una teoría de la gravedad más general puede tener hasta seis modos de polarización diferentes (ver figura 3). Usando tres detectores (los dos LIGOs y Virgo), podemos establecer un límite parcial en el contenido de polarización no descrito por la RG en las señales que observamos. El método se basa en la construcción de un flujo de datos del detector sin ninguna señal propia de la RG. Cualquier residuo en este flujo de detectores indicaría la presencia de modos de polarización adicionales. Nuestro análisis no mostró tal presencia y los datos se ajustan a las predicciones de la RG.

Ecós posteriores a la fusión

Existen alternativas teóricas a los agujeros negros que se denominan imitadores de agujeros negros, porque pueden imitar las propiedades de los mismos pero no son agujeros negros según la RG. Una de las propiedades más distintivas de un agujero negro es la presencia de un [horizonte de eventos](#), lo cual es una superficie de la que nada regresa, es decir, con una capacidad de absorción perfecta. Sin embargo, en los imitadores de agujeros negros, el equivalente de un horizonte de sucesos puede ser una superficie que, por ejemplo, podría ser parcial o totalmente reflectante. Se ha argumentado que la forma de onda posterior a la fusión de tales objetos puede contener ecos repetidos de la señal procedente de la fase de relajación. Buscamos estos ecos en los datos y no encontramos ninguno, lo que implica la consistencia de los remanentes de fusión con agujeros negros rotatorios en la RG.

RESUMEN

Se buscaron pruebas de una posible violación de la RG de nueve formas diferentes. Encontramos que, dentro de las incertidumbres estadísticas debidas al ruido y la posible sistemática desconocida debido a modelos de forma de onda inexactos, las predicciones de la RG son completamente consistentes con los eventos detectados. Dada la importancia de la detección de posibles violaciones de la RG, seguiremos impulsando estas pruebas en los próximos años. Las nuevas pruebas podrían sondear facetas completamente nuevas de la gravedad que no se han explorado hasta ahora, utilizando detectores más sensibles que estarán operativos en los próximos años.

GLOSARIO

Dispersión de una onda es el fenómeno donde diferentes componentes de frecuencia de una onda viajan con diferentes velocidades.

Polarización de una onda se refiere a las formas independientes en que una onda puede oscilar. Para las ondas gravitacionales en la RG, hay dos modos independientes de polarización, llamados “más” y “cruz”. Esto significa que una onda gravitacional que pase por un anillo de partículas lo estiraría y estrujaría en la forma de un “+” y una “x”.

Período de observación O3: el tercer período de toma de datos en la era “Advanced LIGO” y Virgo comenzó en abril de 2019. O3a, la primera parte de O3, se desarrolló del 1 de abril de 2019 al 1 de octubre de 2019, mientras que O3b, la segunda parte de O3, se extendió del 1 de noviembre de 2019 al 27 de marzo de 2020.

Agujero negro: Región del espacio-tiempo que tiene una gravedad tan fuerte que ni siquiera la luz puede escapar de ellos. El límite de no escape, que es exclusivo de los agujeros negros, se denomina horizonte de eventos.

Estrella de neutrones: Remanente del proceso de supernova sufrido por una estrella con una masa entre 10 y 25 veces la masa de nuestro Sol. Las estrellas de neutrones típicas tienen una masa de alrededor de 1-2 masas solares y un radio de 10-15 kilómetros, siendo uno de los objetos más compactos jamás descubiertos.

Objetos compactos exóticos: estos son objetos que imitan las propiedades de los agujeros negros, pero no lo son. Distinguirlos de los mismos es un desafío.

Formas de onda de la RG: Formas de onda gravitacionales calculadas utilizando GR que se emplean tanto para la detección como para la interpretación de la señal de onda gravitacional en los datos.

Agujeros negros de Kerr: Agujeros negros en la RG que están completamente descritos por su masa y su espín (rotación).

eV/c²: El electrón voltio (eV) es una unidad de energía y con la conocida equivalencia entre masa y energía $E=mc^2$, de Einstein, eV/c^2 es una unidad de masa. 1 eV/c^2 es aproximadamente igual a 1.8×10^{-36} kilogramos. Por tanto, se tiene que la masa del gravitón es inferior a 2.3×10^{-59} kilogramos.

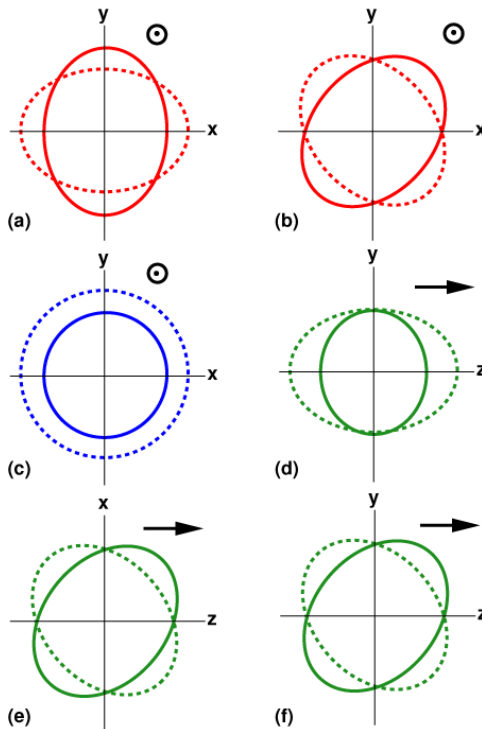


Figura 3: Representación de los seis modos de polarización permitidos en una teoría general de la gravedad. Los tres primeros corresponden a la situación en la que la dirección de propagación de la onda es hacia el plano de la pantalla (transversal) y en los tres últimos la flecha indica la dirección de propagación de la onda. Los dos primeros, en la fila superior, son los únicos modos permitidos por la RG denominados “+” y “x”. (Crédito de la figura: Clifford Will, *Living Reviews in Relativity*)

PARA SABER MÁS

Lea una preimpresión gratuita del artículo científico completo [aquí](#) o en arXiv.org

VISITE NUESTRAS PÁGINAS WEB:

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



Traducción al castellano por Jorge Valencia Gómez (a partir de la versión original en inglés en <https://www.ligo.org/science/Publication-O3bTGR/>)