

COMPROBACIÓN DE LA RELATIVIDAD GENERAL CON LAS ÚLTIMAS OBSERVACIONES DE FUSIONES BINARIAS COMPACTAS

La teoría de la Relatividad General de Einstein es actualmente la teoría aceptada de la gravedad. Durante los últimos 110 años, desde que Einstein la introdujo, esta teoría ha sido sometida a exhaustivas pruebas de muchas maneras, superándolas siempre con nota. Sin embargo, la teoría sigue siendo objeto de constante escrutinio. Las ondas gravitacionales son una predicción directa de la Relatividad General, confirmada por la primera observación directa de dos agujeros negros en fusión en septiembre de 2015. Las observaciones de la fase espiral y la fusión de agujeros negros de masa estelar ofrecen una oportunidad única para comprobar si la Relatividad General sigue siendo válida en regímenes de gravedad fuerte y altamente dinámica.

Durante la última década, la colaboración LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) ha utilizado habitualmente catálogos de observaciones de ondas gravitacionales para poner a prueba la Relatividad General. Estas pruebas confirmaron que, si existe alguna desviación de la Relatividad General, debe ser muy pequeña, inferior a la capacidad de medición de los detectores. Sin embargo, a medida que se observan más eventos de ondas gravitacionales, nuestras pruebas se vuelven cada vez más rigurosas. Con 42 nuevas fusiones de agujeros negros de alta significación detectadas durante la primera parte de la actual campana de observación (O4a), es el momento de reexaminar la validez de la Teoría de la Relatividad General con este conjunto de datos ampliado.

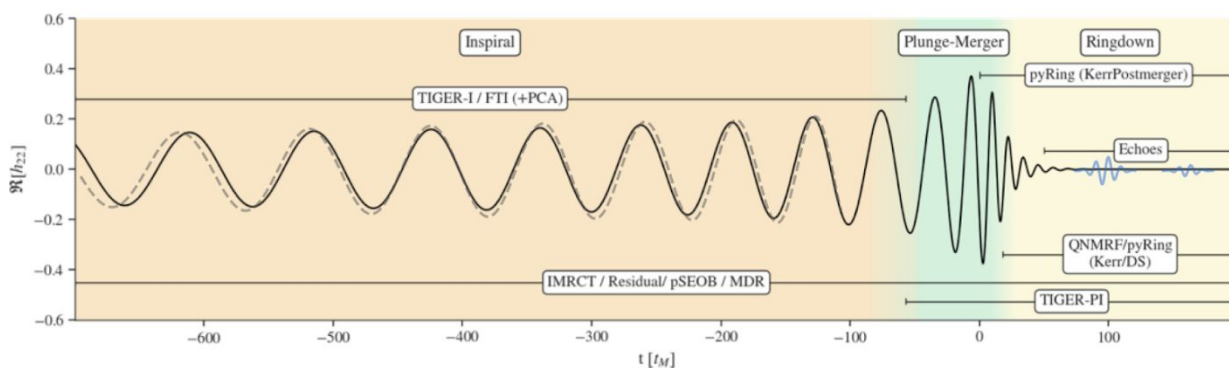


Figura 1: Señal de onda gravitacional procedente de la fusión de un sistema binario de agujeros negros. La figura destaca las regiones de espiral, fusión y relajación de la señal que se utilizan para diferentes pruebas de la Relatividad General. También se indican el nombre de las pruebas y el intervalo de tiempo durante el que se aplica cada una. Una línea discontinua muestra una señal distorsionada hipotética, que se desvía de la predicción de la Relatividad General. Los posibles «ecos», que se esperarían si el remanente de la fusión no fuera un agujero negro, se ilustran en azul.

¿Cómo comprobamos la Relatividad General? La Relatividad General proporciona un marco bien establecido para describir la gravedad, y en las últimas décadas se han logrado grandes avances, tanto analíticos como numéricos, en la modelización precisa de las ondas gravitacionales procedentes de fusiones binarias compactas. Las pruebas de la Relatividad General se basan en (i) evaluar la coherencia interna de la teoría en las diferentes etapas de la coalescencia, o (ii) buscar «distorsiones» específicas de las señales de ondas gravitacionales motivadas por violaciones plausibles de la Relatividad General.

Podrían producirse posibles desviaciones de la Relatividad General durante la generación o propagación de ondas gravitacionales, o debido a que los objetos que se fusionan no son agujeros negros tal y como los describe la Relatividad General. Sin embargo, estas pruebas deben interpretarse con cautela: las fluctuaciones en el ruido instrumental y las limitaciones derivadas del uso de formas de onda gravitacionales computacionalmente eficientes (pero ligeramente menos precisas) pueden imitar desviaciones aparentes de la Relatividad General, y deben separarse cuidadosamente de los efectos físicos genuinos.

UNA PLENITUD DE PRUEBAS

El gran número y la alta calidad de las observaciones de ondas gravitacionales disponibles permiten a los científicos de LVK realizar una amplia variedad de pruebas de la relatividad general. Más allá de las pruebas que se describen con más detalle a continuación, nuestros artículos presentan otras pruebas que exploran la coherencia de las características más débiles (conocidas como **modos subdominantes**) de las señales de ondas gravitacionales o examinan si los agujeros negros se deforman por su rotación como se espera. Además, examinamos si el centro de masa del sistema binario muestra signos de aceleración—un efecto astrofísico que, si no se tiene debidamente en cuenta, podría interpretarse erróneamente como una desviación de la Relatividad General.

La primera serie de pruebas que destacamos aquí se centra en examinar directamente si la evolución de los sistemas binarios de agujeros negros, así como la emisión y propagación de ondas gravitacionales, se desvía de las predicciones de Einstein. Por ejemplo, la Relatividad General predice que las ondas gravitacionales viajan a la velocidad de la luz e interaccionan muy débilmente con la materia. Por el contrario, algunas teorías alternativas de la gravedad (como las que implican un gravitón masivo o la energía oscura) sugieren que las ondas gravitacionales pueden propagarse a diferentes velocidades y experimentar *dispersión*—lo que significa que las diferentes frecuencias llegan en momentos ligeramente diferentes, de forma similar a cómo se dispersan las ondas de radio cuando viajan a través de un plasma. Esto se puede comprobar introduciendo parámetros adicionales en el modelo de señal que imitan los efectos de las teorías alternativas. Si los datos sugieren que estos parámetros son consistentes con cero, la teoría de Einstein supera la prueba. De lo contrario, el resultado podría apuntar a una nueva física más allá de la Relatividad General.

Otra clase de pruebas está diseñada para verificar la coherencia general de las señales de ondas gravitacionales observadas con las predicciones de la Relatividad General, o la coherencia interna de las diferentes partes de la señal. La coherencia general se puede comprobar restando la forma de onda de la Relatividad General que mejor se ajusta a los datos y analizando los residuos, comparándolos con el ruido instrumental esperado. Dado que las observaciones que consideramos para estas pruebas se realizan con al menos dos y, a veces, tres detectores, la coherencia de los residuos entre los detectores —teniendo en cuenta el tiempo de viaje de la luz entre los sitios— proporciona una comprobación adicional: mientras que una señal de onda gravitacional genuina debería aparecer como un componente correlacionado entre los detectores, el ruido instrumental en cada detector no está correlacionado.

La coherencia interna puede comprobarse dividiendo la señal en segmentos distintos y analizando cada parte por separado. Si la Relatividad General es correcta, los parámetros de la onda gravitacional inferidos a partir de diferentes partes de la señal deberían coincidir. Por ejemplo, las señales de ondas gravitacionales detectadas por el LVK suelen codificar información de las tres fases de la fusión de un agujero negro binario: la espiral de los dos agujeros negros, su fusión y la relajación del agujero negro remanente. La prueba de consistencia «espiral-fusión-relajación» compara la masa y la rotación del agujero negro remanente inferidos a partir de la fase de espiral de baja frecuencia con los valores inferidos a partir de la fase posterior a la fusión de alta frecuencia.

Al igual que las ondas luminosas, la Relatividad General solo permite dos polarizaciones transversales, denominadas «plus» y «cruzada». Las pruebas de polarización comprueban si las ondas gravitacionales poseen únicamente los dos estados predichos por la Relatividad General, o si el campo gravitacional de la onda puede oscilar de una forma más general. Sin embargo, las teorías alternativas de la gravedad pueden tener hasta seis modos de polarización independientes. La presencia de modos de polarización adicionales puede comprobarse mediante observaciones de múltiples detectores. (Véase la figura 5 de este resumen para obtener más información).

El agujero negro formado en una fusión binaria se ve inicialmente distorsionado por la violenta dinámica de la coalescencia. Al igual que una campana golpeada que libera sus vibraciones en forma de sonido, el agujero negro emite ondas gravitacionales. Estas ondas se irradian a frecuencias específicas y decaen en escalas de tiempo características, ambas determinadas por la masa final y el giro del agujero negro remanente. Esto constituye la base del «teorema sin pelo»: todas las distorsiones del agujero negro —o «pelo»— se irradian, dejando tras de sí un estado final descrito

únicamente por dos parámetros. Al igual que un coro que se desvanece al final de una canción, las «voces» individuales del agujero negro —los componentes armónicos de la relajación— contienen información detallada sobre su origen. Por lo tanto, los científicos pueden obtener información sobre la masa y la rotación de un agujero negro analizando su espectro de frecuencia de relajación y su tiempo de decaimiento. La detección de un solo armónico —que suele ser el caso— permite comprobar la coherencia con los parámetros inferidos antes y durante la fusión. La característica clave de un agujero negro es su horizonte de sucesos, del que no pueden escapar las señales, a diferencia de una superficie dura que podría actuar como un «espejo» reflectante y producir las llamadas «señales de eco» en la posfusión, que también buscamos.

PARA MÁS INFORMACIÓN:

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



¿ENTONCES EINSTEIN TIENE RAZÓN?

Para todos los eventos considerados, encontramos que los residuos son consistentes con el ruido, lo que indica que las señales de ondas gravitacionales se describen adecuadamente por la Relatividad General. Las masas y rotaciones finales, inferidas a partir de las partes de baja y alta frecuencia de las formas de onda, son consistentes entre sí.

Tampoco encontramos pruebas de desviaciones respecto a las predicciones de la Relatividad General, ni en la generación ni en la propagación de las ondas gravitacionales codificadas en la forma de las señales. Del mismo modo, no hay indicios de modos de polarización adicionales más allá de los predichos por la Relatividad General. Sin embargo, el presente análisis establece límites significativamente más estrictos sobre las posibles desviaciones respecto a la Relatividad General, como se ilustra en la **figura 2** a continuación.

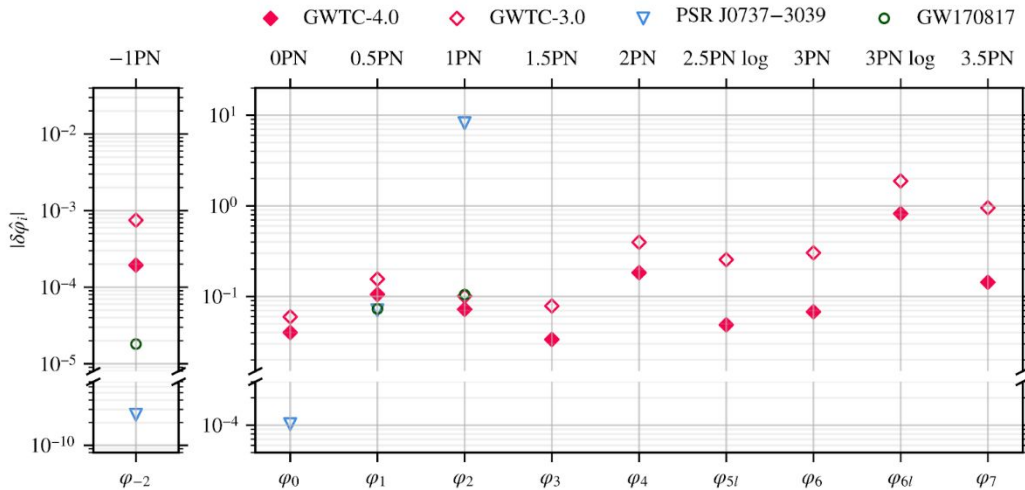


Figura 2: Restricciones sobre los denominados coeficientes post-newtonianos, que rigen la fase de la señal de ondas gravitacionales. Estos coeficientes capturan posibles desviaciones de la Relatividad General en diferentes etapas de la evolución del sistema binario (desde separaciones amplias a la izquierda hasta la espiral tardía justo antes de la fusión a la derecha). El análisis actual arroja límites significativamente más estrictos (valores más bajos) sobre tales desviaciones en comparación con resultados anteriores.

Del mismo modo, el análisis de la relajación arroja resultados coherentes con las masas y los giros del agujero negro remanente estimados bajo los supuestos de la Relatividad General. Tampoco encontramos indicios de ecos posteriores a la fusión, lo que cabría esperar si el remanente no fuera un agujero negro.

La colaboración LVK ha realizado recientemente pruebas de la Relatividad General utilizando dos eventos excepcionalmente intensos que no se incluyen en este trabajo: **GW230814**, anteriormente el evento más intenso jamás detectado (observado solo por LIGO Livingston) y **GW250114**, el nuevo récord en cuanto a intensidad de señal. Aunque **GW230814** parecía inicialmente prometedor para probar la Relatividad General, la ausencia de datos coincidentes de otros detectores impidió realizar comprobaciones cruzadas para detectar un exceso de ruido instrumental, lo que puso de relieve la importancia de las observaciones con múltiples detectores. Por el contrario, **GW250114**, que fue detectado por ambos observatorios LIGO, permitió realizar pruebas de alta precisión de la Relatividad General, incluida una verificación directa del teorema del área de Hawking y las restricciones más estrictas hasta la fecha sobre las desviaciones post-newtonianas y de relajación.

Sin embargo, este evento ocurrió más tarde, en la cuarta campaña de observación, por lo que no forma parte del conjunto de datos considerado en este trabajo.

En resumen, estos resultados confirman que la Relatividad General sigue siendo consistente con las observaciones de ondas gravitacionales, sin necesidad de modificaciones ni de nueva física. Además, al combinar los 42 eventos recién probados con detecciones anteriores, hemos impuesto restricciones aún más estrictas a las posibles desviaciones de la Relatividad General.

PARA MÁS INFORMACIÓN:

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

Este resumen científico se basa en tres nuevos artículos de la Colaboración LVK. Lea una preimpresión gratuita de los artículos científicos completos:

GWTC-4.0: Pruebas de la Relatividad General I. Resumen y pruebas generales. Leer [aquí](#) o en [arXiv](#).

GWTC-4.0: Pruebas de la Relatividad General II. Pruebas parametrizadas. Leer [aquí](#) o en [arXiv](#).

GWTC-4.0: Pruebas de la Relatividad General III. Pruebas de los Remanentes. Leer [aquí](#) o en [arXiv](#).

Datos del Gravitational-Wave Open Science Center para:

Datos para GW230814: <https://doi.org/10.7935/ami3-kd70>

Datos para GW250114: <https://doi.org/10.7935/1g4i-2028>

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