

ESPECTROSCOPIA DE AGUJEROS NEGROS Y PRUEBAS DE RELATIVIDAD GENERAL CON GW250114

DETECCIÓN DE LA SEÑAL GW250114

El 14 de enero de 2025, la colaboración [LIGO-Virgo-KAGRA](#) observó una señal de [onda gravitacional](#) excepcionalmente fuerte, denominada GW250114. La señal fue registrada por los detectores LIGO en Hanford, Washington, y Livingston, Luisiana (EE.UU.), durante el segundo segmento de la cuarta [campaña de observación](#) LIGO-Virgo-KAGRA (O4b).

GW250114 destaca como la señal de ondas gravitacionales más clara observada hasta la fecha, aproximadamente tres veces más intensa que la [primera detección](#) en 2015. Aquí, “más intensa” se refiere a su mayor [razón señal-ruido](#), una medida de la claridad con la que sobresalen las ondas gravitacionales por encima del [ruido](#) de los detectores. La señal coincide con lo que esperamos cuando [dos agujeros negros](#) de masas casi iguales y baja [velocidad de rotación](#) se acercan en espiral, colisionan y se estabilizan en un único agujero negro mayor.

Otro artículo publicado recientemente en *Physical Review Letters* [anuncia la detección de GW250114](#), presentando las propiedades de los agujeros negros y un conjunto selecto de pruebas de física fundamental. El presente trabajo es un estudio complementario, centrado en la *espectroscopía de agujeros negros* y en pruebas de precisión de relatividad general.

PONIENDO A PRUEBA LA TEORÍA DE EINSTEIN CON GW250114

Debido a su intensidad excepcional, GW250114 ofrece una oportunidad sin precedentes para comprobar si la teoría de la relatividad general de Albert Einstein sigue siendo válida en las condiciones más extremas conocidas: los campos gravitatorios intensos y rápidamente cambiantes cerca de agujeros negros fusionándose. El objetivo de estas pruebas es verificar si la señal de onda gravitacional observada es plenamente consistente con las predicciones de Einstein, o si alguna desviación podría sugerir nueva física más allá de la relatividad general.

Una de las herramientas clave para ello es la *espectroscopía de agujeros negros*. Esta técnica se centra en la fase de relajación (*ringdown* en inglés) —la fase justo después de la fusión, cuando el agujero negro recién formado llega a un estado estable— mediante el estudio de los tonos distintivos que emite. De manera análoga a una campana golpeada que resuena en tonos específicos, un agujero negro recién formado emite ondas gravitacionales en un conjunto característico de [modos cuasinormales](#).

Según el [teorema de no pelo](#), un agujero negro en relatividad general se describe completamente por su masa, espín y carga electromagnética. En entornos astrofísicos, sin embargo, cualquier carga significativa se neutraliza rápidamente, dejando la masa y el espín como las únicas magnitudes relevantes. Esto implica que las frecuencias de los modos cuasinormales y los tiempos de atenuación de cada modo están fijados de manera única por esos dos números.

La detección de múltiples tonos de relajación, y la comprobación de si son consistentes con las frecuencias y decaimientos esperados, constituye una poderosa prueba de la relatividad general. Estas mediciones no solo ponen a prueba el teorema de no pelo, sino que también permiten buscar desviaciones genéricas respecto a las predicciones de Einstein, ya sea por características exóticas de los agujeros negros o por modificaciones más fundamentales de la teoría de la gravedad.

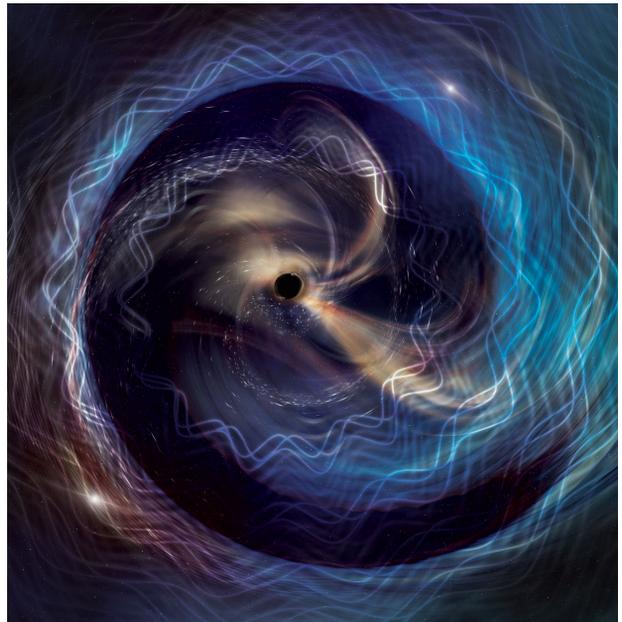


Figura 1. Visualización del agujero negro GW250114 tras la fusión, que muestra una representación artística de las ondas gravitacionales producidas durante la fase de relajación: a medida que el agujero negro recién formado se estabiliza, emite ondas gravitacionales con un conjunto de frecuencias específicas, como los tonos distintivos de una campana que resuena. [Crédito de la imagen: LIGO Scientific Collaboration/Sonoma State University/A. Simmonet]

En relatividad general, la solución única que describe un agujero negro astrofísico en rotación es la *métrica de Kerr*. Nuestras mediciones espectroscópicas prueban, por tanto, si el remanente formado en GW250114 es consistente con un agujero negro de Kerr, y dentro de la precisión actual, si sus propiedades coinciden con esta expectativa.

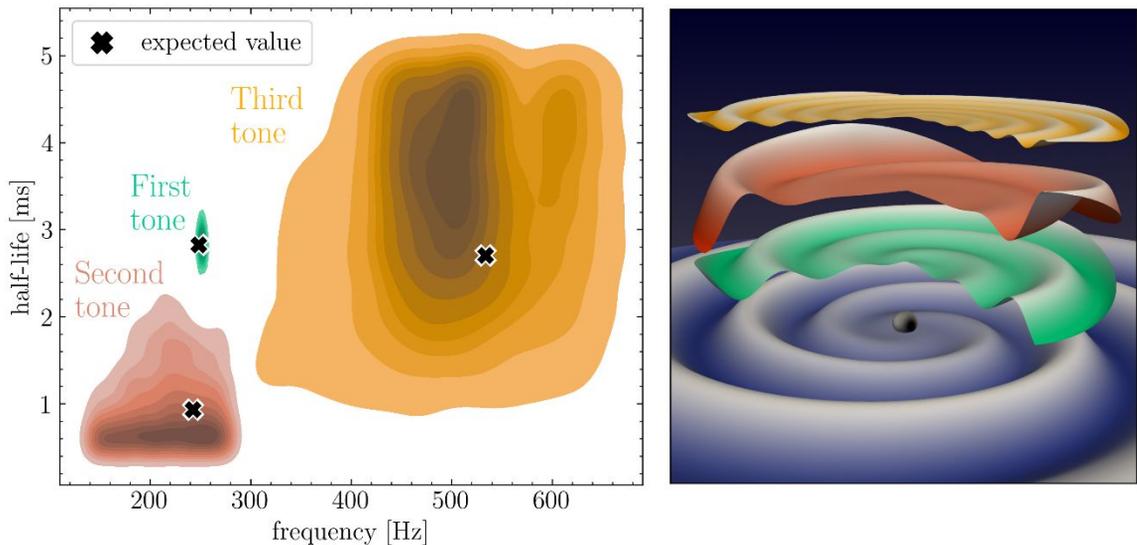


Figura 2. *Panel izquierdo:* Frecuencia y tiempo de decaimiento (vida media) de los diferentes tonos de ringdown identificados o acotados en GW250114. Las regiones coloreadas muestran los resultados de los análisis que permiten que las frecuencias y los tiempos de decaimiento del modo cuasi normal varíen libremente. La región roja corresponde al armónico detectado en el análisis solo de ringdown (segundo tono), mientras que las regiones verde y amarilla corresponden al tono fundamental (primer tono) y al tono secundario de mayor frecuencia (tercer tono) obtenidos del análisis de la señal completa. Los marcadores negros indican los valores previstos para un agujero negro de Kerr con la masa y el espín inferidos a partir del análisis de la señal completa, suponiendo la relatividad general. El sombreado denota regiones de probabilidad, desde el 90 % (más claro) hasta el 10 % (más oscuro). *Panel derecho:* Descomposición de la señal de onda gravitacional (espiral inferior, en azul) emitida por el agujero negro remanente (esfera inferior) en los diferentes tonos, para una simulación numérica que coincide con los parámetros medidos de GW250114. Las superficies verde, roja y amarilla corresponden al primer tono (fundamental), al segundo tono (armónico) y al tercer tono, respectivamente.

ESCUCHANDO LA RELAJACIÓN: TONO FUNDAMENTAL, SOBRETONO Y UN TONO SECUNDARIO DE MAYOR FRECUENCIA

Mediante análisis basados únicamente en la relajación, que se centran exclusivamente en la parte de la señal posterior a la fusión, buscamos estos tonos sin utilizar ninguna información de la fase espiral anterior. Encontramos que los datos favorecen una descripción con el tono fundamental principal y su primer armónico, que es una versión más rápida de la misma vibración. El primer armónico puede rastreadse durante unos 3 milisegundos después de la fusión, tras lo cual ya no puede resolverse por encima del ruido del detector. Las medidas de su amplitud y fase concuerdan con detalladas simulaciones numéricas de relatividad de fusiones de agujeros negros en la relatividad general. Se ha encontrado que las frecuencias y los tiempos de decaimiento de los tonos son coherentes con las predicciones teóricas dentro de las incertidumbres de medición. La medición del armónico se muestra en la **Figura 2** (sombreado rojo), junto con el marcador negro que indica el valor esperado para un agujero negro de Kerr con la masa y la rotación estimados a partir de un análisis de la señal completa bajo el supuesto de la relatividad general.

También analizamos la señal completa —incluyendo inspiral, fusión y relajación— con modelos calibrados con simulaciones numéricas, pero permitiendo que las frecuencias y tiempos de decaimiento de los tonos varíen libremente en lugar de fijarlos a la predicción de Kerr. Al incorporar información de toda la señal, podemos medir las propiedades de la relajación con aún mayor precisión. Con este método, la frecuencia del tono fundamental se mide con una precisión de alrededor del 2% y su tiempo de decaimiento con aproximadamente un 9%, ambos en excelente acuerdo con la relatividad general. Este análisis también proporciona los primeros acotamientos sobre un tono secundario de mayor frecuencia, que oscila aproximadamente al doble de la frecuencia del fundamental, de nuevo coincidiendo con las predicciones teóricas. Ambos resultados se muestran en la **Fig. 2**, donde el tono fundamental y el secundario aparecen en sombreado verde y amarillo, respectivamente.

En conjunto, los análisis basados solo en la relajación y los de la señal completa ofrecen pruebas complementarias, confirmando que las propiedades del remanente son consistentes con las esperadas para un agujero negro de Kerr cuando se miden de distintas maneras.

PARA MÁS INFORMACIÓN:

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



CONSISTENCIA EN TODA LA SEÑAL (INSPIRAL–MERGER–RELAJACIÓN)

También validamos las predicciones de la relatividad general en otras regiones de la señal, además de la relajación. En la fase temprana de aproximación en *espiral*, donde los agujeros negros orbitan más lentamente que en la fusión final, no encontramos evidencia de desviaciones respecto a las predicciones de Einstein. Además, comparamos la masa y el espín del agujero negro final estimados a partir de la parte temprana de la señal con los inferidos de la fusión y la relajación, encontrando de nuevo consistencia entre ambos.

Notablemente, la potencia de GW250114 nos permite imponer restricciones a posibles desviaciones de la relatividad general que no solo son comparables, sino en algunos casos dos o tres veces más estrictas que las obtenidas combinando decenas de señales en el último [Catálogo de Ondas Gravitacionales Transitorias \(GWTC-4.0\)](#), que incluye señales hasta el primer segmento de la cuarta campaña de observación de LIGO-Virgo-KAGRA (O4a). Algunas de estas mejoras se ilustran en la **Figura 3**.

Por último, comprobamos si restar de los datos la mejor forma de onda de relatividad general deja algún patrón no explicado. No es así: la señal residual se comporta como ruido ordinario del detector.

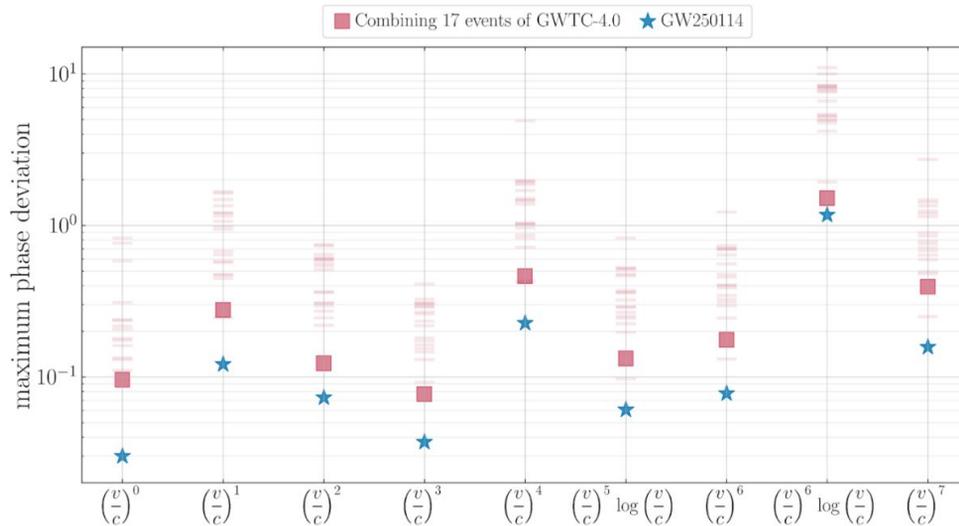


Figura 3. Límites superiores medidos al 90% sobre posibles desviaciones de la relatividad general en la *expansión post-newtoniana* de la fase de inspiral de la señal de onda gravitacional. El marco post-newtoniano describe la fase de inspiral como una serie en potencias de la velocidad orbital del sistema binario (v/c), donde c es la velocidad de la luz, con cada coeficiente predicho de forma única por la relatividad general. Para el término $(v/c)^1$, la relatividad general predice que el coeficiente es exactamente cero, por lo que el límite corresponde a una desviación absoluta; para todos los demás órdenes, los límites representan desviaciones fraccionales. Las estrellas azules muestran las restricciones medidas a partir de GW250114. Para comparación, las bandas rojas claras marcan resultados de señales individuales de GWTC-4.0 y los cuadrados rojos indican restricciones combinadas de catálogo con 17 eventos. En todos los órdenes post-newtonianos, las mediciones de GW250114 establecen límites superiores de 2 a 3 veces más estrictos que los obtenidos combinando múltiples eventos.

EINSTEIN RESISTE

En todas las pruebas, GW250114 concuerda con las expectativas de la relatividad general, dentro de la precisión de las observaciones actuales. La fuerza y claridad de esta señal la convierten en la confirmación más precisa hasta la fecha de la teoría de Einstein para fusiones de agujeros negros, estrechando significativamente los límites sobre cuánto podrían diferir de ella teorías alternativas de la gravedad. Junto con el [artículo de detección](#) —que prueba la [ley del área de Hawking](#) y ofrece resultados complementarios sobre la naturaleza de Kerr del remanente—, este estudio ilustra el amplio alcance científico que abre GW250114.

Mientras la colaboración LIGO-Virgo-KAGRA celebra una década desde la primera detección de ondas gravitacionales provenientes de fusiones de agujeros negros, las notables mejoras en la sensibilidad de los detectores permiten ahora registrar señales como GW250114 con una claridad sin precedentes. Cada nuevo avance promete señales aún más intensas en el futuro. GW250114 es, por tanto, un anticipo de la ciencia transformadora que las próximas campañas de observación harán posible: detecciones más fuertes revelarán las propiedades de los agujeros negros con mayor detalle y llevarán la teoría de Einstein hasta sus límites más extremos.

MÁS INFORMACIÓN:

Visita nuestras páginas web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Lee una versión preliminar gratuita del artículo científico completo [aquí](#) o en [arXiv](#).

Lee una versión preliminar gratuita del artículo científico de la detección de GW250114 [aquí](#) o en [arXiv](#).

Los datos del *Gravitational-Wave Open Science Center* para GW250114 están disponibles [aquí](#).

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

Traducido al español por Pablo García Abia y revisado por Helena Ubach a partir de la versión original en inglés disponible [aquí](#).