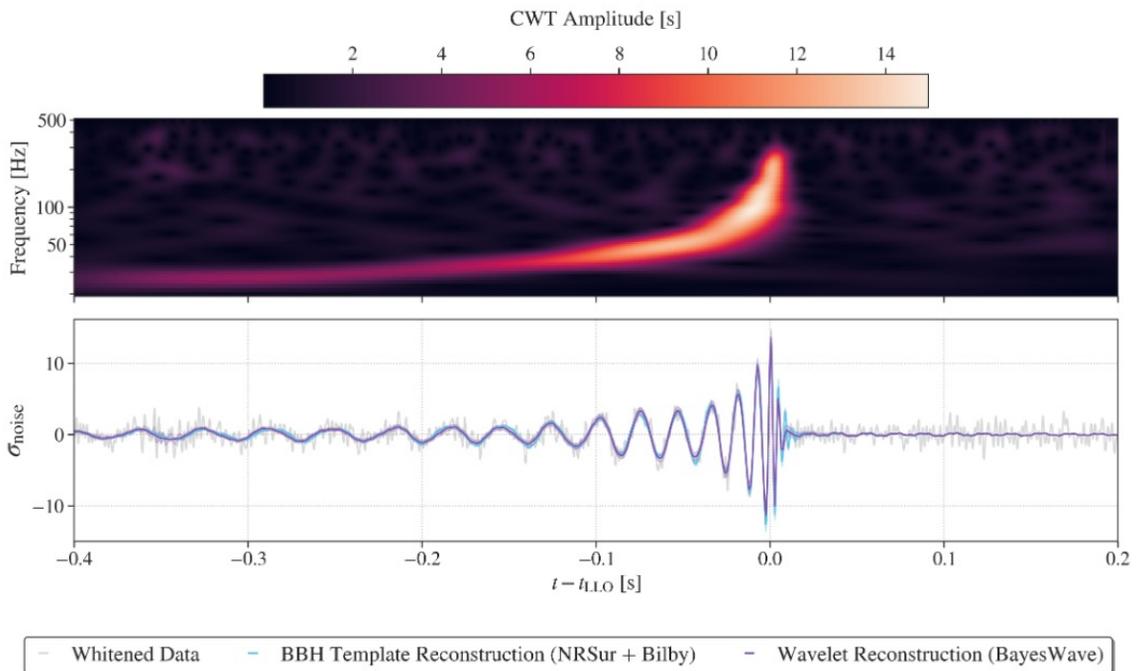


# GW230814: UNA FUERTE SEÑAL DE ONDAS GRAVITACIONALES DETECTADA POR LIGO LIVINGSTON

Las colaboraciones [LIGO-Virgo-KAGRA](#) han observado una señal de [ondas gravitacionales](#) particularmente fuerte con el [detector LIGO Livingston](#). GW230814 fue detectada el 14 de agosto del 2023 a las 23:09:01 horas UTC. Es probable que la señal de ondas gravitacionales se haya originado a partir de la [fusión de dos agujeros negros](#).

## DETECTANDO LA SEÑAL

GW230814 fue observada durante la primera parte de la cuarta [ronda de observaciones](#) (O4a). Al momento de la observación, sólo el detector [Advanced LIGO Livingston](#) estaba recolectando datos. A pesar de haber sido observada por un solo detector, la señal es particularmente fuerte. La **Figura 1** muestra diferentes representaciones de la señal GW230814.



**Figura 1:** Señal de Ondas gravitacionales GW230814. El panel superior muestra la [representación tiempo-frecuencia](#) de la señal, donde las regiones más brillantes indican una amplitud mayor. El acrónimo CWT hace referencia al método utilizado para construir esta representación tiempo-frecuencia, el cual está basado en la transformada de wavelet continua. El panel inferior muestra la señal representada como una [serie de tiempo](#). Las líneas azules y moradas muestran dos diferentes métodos para la reconstrucción de la forma de onda. Es claro que la señal es una coalescencia de binarias compactas y que los datos concuerdan con la reconstrucción hasta la etapa del «ringdown».

## ¿QUÉ SIGNIFICA FUERTE?

Cualquier dato observacional de ondas gravitacionales contiene una mezcla de señal (proveniente del cosmos) y de ruido (del detector y su ambiente). La fuerza de una señal de ondas gravitacionales es medida usando la figura de mérito [relación señal/ruido](#) (SNR, por sus siglas en inglés). Este número describe qué tan fuerte es una señal en comparación con el ruido en los datos. La SNR de un solo detector para GW230814 es de alrededor de 42. A manera de comparación, la primera observación de ondas gravitacionales, [GW150914](#), fue también fuerte, con una SNR de 24.

## LA FUSIÓN DE AGUJEROS NEGROS BINARIOS QUE PRODUJO GW230814

GW230814 es consistente con una señal proveniente de la fusión de un [sistema binario de agujeros negros](#). Para aprender más sobre las propiedades del binario que produjo la señal, tal como la masa y los [espines](#) de los agujeros negros, comparamos los datos con señales simuladas a partir de la teoría de la [Relatividad General](#) (RG) de Einstein. De esto, descubrimos que GW230814 posiblemente proviene de la fusión de agujeros negros con masas 34 y 28 veces la masa del Sol, lo cual es bastante similar a la primera detección, [GW150914](#).

Este evento cósmico ocurrió a alrededor de 300 [megapársecs](#) de la Tierra, lo cual es cerca de mil millones de años luz de distancia. Sin embargo, con un solo detector no es posible determinar la dirección en el cielo de una señal determinada, a menos que la ésta sea muy larga. Normalmente, es necesaria (aunque no siempre suficiente) la observación conjunta de la misma señal por al menos tres detectores para localizar con precisión en el cielo una fuente de ondas gravitacionales de corta duración como GW230814, tal como fue [el caso de GW170817](#) hace unos ocho años.

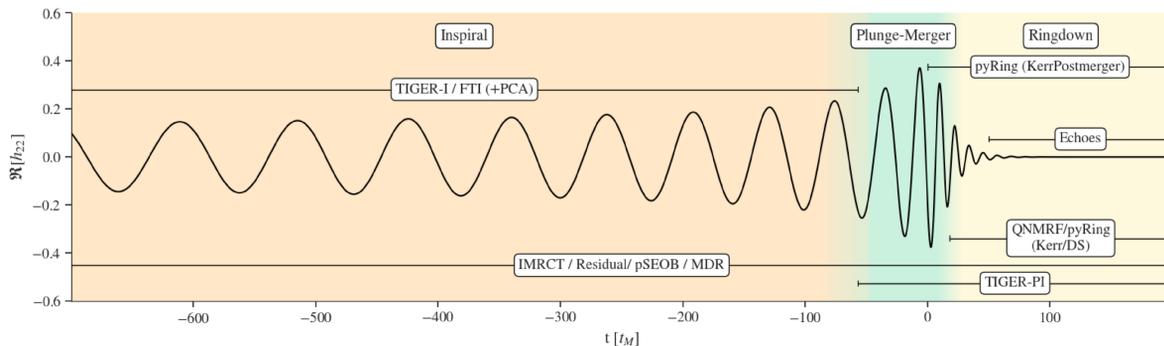
## UNA SEÑAL ENIGMÁTICA: PONIENDO A PRUEBA LA RELATIVIDAD GENERAL

Las señales de ondas gravitacionales pueden ser usadas para poner a prueba la RG de Einstein. Las colaboraciones LIGO-Virgo-KAGRA efectúan una serie de pruebas para verificar si una señal particular de ondas gravitacionales es coherente con lo que se esperaría de la RG. Podrás preguntarte por qué seguimos poniendo la RG a prueba cuando se ha probado y comprobado muchas veces a lo largo del último siglo. Como cualquier otra teoría física, la RG puede ser tan sólo una aproximación a una teoría más completa aún por descubrirse. Esto es justamente lo que ocurrió hace un siglo, cuando la RG de Einstein extendió la [teoría de la gravitación universal de Newton](#) al explicar fenómenos que las leyes de Newton no podían.

Cuando probamos la RG usando ondas gravitacionales, típicamente sólo usamos señales fuertes observadas por dos o más detectores. Sin embargo, lo fuerte que es GW230814 la hace un caso especialmente interesante. Para entender por qué es interesante, primero debemos considerar las diferentes etapas de las ondas gravitacionales provenientes de fusiones de agujeros negros.

Las señales de ondas gravitacionales de fusiones de binarias compactas se componen de tres etapas, como se ilustra en la [Figura 2](#).

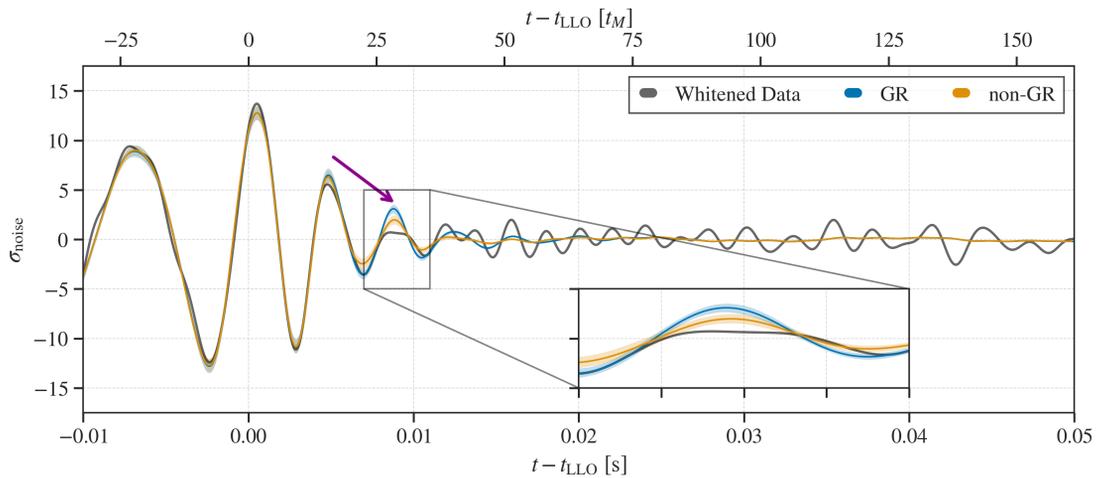
- La [espiral](#) ocurre cuando los dos agujeros negros se orbitan el uno al otro, acercándose cada vez más. En esta etapa, la señal de ondas gravitacionales aumenta en [frecuencia y amplitud](#).
- La **fusión por absorción** es cuando dos agujeros negros se encuentran en el proceso de fusionarse y la amplitud de las ondas gravitacionales es la más grande.
- La siguiente etapa, llamada «[ringdown](#)» en inglés, ocurre cuando el nuevo agujero negro, recién nacido de la fusión, se asienta emitiendo ondas gravitacionales con una amplitud continuamente decreciente. Imagina que haces sonar una campana (lo que correspondería con la fusión por absorción): después de golpearla, la campana continua emitiendo un sonido que se desvanece hasta el silencio; esto es el [ringdown](#).



**Figura 2:** Evolución típica de una señal de ondas gravitacionales de la fusión de un sistema de binarias compactas. Esta gráfica ilustrativa muestra la amplitud de la señal (eje vertical) versus el tiempo (eje horizontal). Las diferentes etapas de la señal son la espiral (naranja), la fusión por absorción (verde claro) y el [ringdown](#) (amarillo). También se muestran los nombres técnicos de las diferentes pruebas a la RG llevadas a cabo, y las etapas de la señal que toman en cuenta; lee este [artículo científico](#) para más detalles.

Las pruebas a la RG usadas por la colaboración LIGO-Virgo-KAGRA estudian distintas etapas de la señal. Pruebas centradas en la etapa espiral de GW230814 muestran que la señal es consistente con la RG. Sin embargo, las pruebas que se centran en las etapas de fusión por absorción/*ringdown* pintan un panorama más enigmático. El *ringdown* de GW230814 se desvanece más rápido de lo esperado por la RG. Esto se muestra en la **Figura 3**, donde el pico justo después de la fusión es más pequeño que la predicción de la RG.

¿Qué causan las diferencias entre los datos y la predicción de la RG? Muchas líneas de investigación han sido exploradas. Una de éstas exploró si modos de oscilación subdominantes del *ringdown* pudieran ser los causantes. Estos modos en las ondas gravitacionales son similares a los [armónicos](#) más altos de las ondas de sonido. Otra investigación analizó si la señal de ondas gravitacionales podría haber sido afectada por una [lente gravitacional](#). Sin embargo, las pruebas no son convincentes para ninguna de estas explicaciones.



**Figura 3:** Comparación de los datos de GW230814 (en gris) con las formas de onda reconstruidas correspondientes al modelo de la RG (azul) y un modelo no-RG (naranja). La flecha morada resalta la parte de la señal (ampliada en el recuadro) donde la amplitud observada de los datos es menor que la esperada por la RG. Se puede notar que el eje horizontal cubre sólo seis centésimas de segundo (con el tiempo=0 correspondiendo a la fase de fusión por absorción): ¡el estudio de las ondas gravitacionales verdaderamente ha entrado en la era de la precisión!

Créditos de la imagen: Rossella Gamba/Koustav Chandra/LIGO-Virgo-KAGRA.

Una tercera posibilidad es que la aparente inconsistencia se deba a limitaciones en la precisión de nuestros modelos de [ondas gravitacionales](#) de la RG más que a una desviación real de la RG. Una señal fuerte como GW230814 tiene más probabilidades de revelar tales imprecisiones a medida que se hacen visibles más detalles de la onda gravitacional. Nuestras pruebas indican que las limitaciones en la precisión de la forma de onda podrían ser, efectivamente, una explicación creíble para la aparente inconsistencia.

Otra posible explicación es que la inconsistencia sea debido a fluctuaciones aleatorias del [ruido](#) en los datos. Una fluctuación aleatoria en el ruido al mismo tiempo que la etapa del *ringdown* de la onda gravitacional podría significar que la señal sólo *parece ser* inconsistente con la RG. Para probar esta hipótesis hicimos pruebas, tal como uno puede probar si un dado está cargado a través de tirarlo muchas veces. En este caso no podemos fusionar agujeros negros a nuestra conveniencia, así que usamos computadoras para simular tales fusiones basándonos en la RG para generar las ondas gravitacionales. Así, podemos simular muchas ondas gravitacionales parecidas a GW230814 y añadirles ruido realista (aunque aleatoriamente fluctuante). Luego, volvemos a aplicar las pruebas de la RG a cada señal simulada. Los resultados indican que es también posible que una fluctuación aleatoria del ruido sea la causa aparente de la inconsistencia con la RG.

## LA IMPORTANCIA DE UNA RED DE DETECTORES

Los observatorios de ondas gravitacionales funcionan mejor como una red de detectores. Una señal de ondas gravitacionales detectada a través de múltiples detectores independientes permite verificar la señal, estimar mejor las propiedades de la fuente y localizar el origen de la señal en el cielo.

El caso de GW230814 resalta la importancia de una red de detectores (tal como lo fue el caso de otra fusión binaria de agujeros negros, [GW170814](#), que fue detectada exactamente seis años antes y que fue la primera señal observada por tres interferómetros). Tener datos de un solo detector restringe el conjunto de posibles mediciones que pueden hacerse y limita considerablemente la precisión. Mientras que científicos trabajan arduamente para lograr la meta de una red global de detectores, no podemos esperar que todos los componentes se encuentren funcionando 24/7. Por lo tanto, ¡cuanto más grande la red, mejor! Actualmente (2025), la red LIGO-Virgo-KAGRA incluye a cuatro detectores: dos de LIGO ubicados en E.U.A., el instrumento europeo Virgo en Italia y KAGRA en Japón. Las tres Colaboraciones operan la red globalmente para maximizar los resultados científicos de la búsqueda de ondas gravitacionales.

## UN FUTURO BRILLANTE (Y FUERTE)

Ahora que las colaboraciones LIGO-Virgo-KAGRA cumplen 10 años desde [la primera detección directa de ondas gravitacionales](#), podemos anticipar muchas más señales fuertes a medida que la sensibilidad de nuestra red de detectores sigue mejorando. Estos eventos proporcionarán nuevas oportunidades para explorar las propiedades de los agujeros negros, además de seguir poniendo a prueba la Relatividad General de Einstein.

### GLOSARIO

**Agujero negro:** Una región del espaciotiempo donde la gravedad es tan intensa que nada, ni la luz, puede escapar de ella. Los agujeros negros pueden tener distintos tamaños: los agujeros negros de masas estelares se originan del colapso de estrellas, y sus masas varían desde unas cuantas masas solares hasta las 65 masas solares. Los agujeros negros de masa intermedia varían desde alrededor de 100 masas solares y hasta  $10^5$  masas solares. Por último, los agujeros negros supermasivos tienen masas desde más de  $10^5$  masas solares y hasta las  $10^9$  masas solares.

**Agujeros Negros Binarios:** Un sistema conformado por dos agujeros negros que se orbitan de cerca.

**Relatividad General:** Teoría de la gravedad propuesta por Albert Einstein en 1915. En esta teoría, el espacio y el tiempo son como una tela maleable que se curva en presencia de materia y energía, y los objetos siguen trayectorias a través de este espacio curvo.

**Ondas Gravitacionales:** Ondas en el espaciotiempo generadas por algunos de los procesos más violentos del universo, como la fusión de estrellas de neutrones o agujeros negros.

**Espiral:** La contracción lenta de la órbita de una binaria debido al efecto de la emisión de ondas gravitacionales. Es la primera y más larga etapa en la coalescencia de una binaria.

**Ruido:** Fluctuaciones en la medición de una señal de ondas gravitacionales debido a diversos efectos instrumentales y ambientales. La sensibilidad de un detector de ondas gravitacionales es limitada por el ruido.

**Ringdown:** Fase de una fusión de agujeros negros en la que el agujero negro distorsionado que se forma en la fusión emite ondas gravitacionales que hacen desaparecer tales distorsiones.

**Relación señal/ruido (SNR por sus siglas en inglés):** Medida usada en la ciencia y en la ingeniería que compara el nivel de una señal deseada con el nivel del ruido del fondo.

**Masa Solar ( $M_{\odot}$ ):** Masa del Sol, usada como una unidad estandarizada de masa en la astronomía. Es igual, aproximadamente, a  $2 \times 10^{30}$  kg.

## DESCUBRE MÁS:

Visita nuestros sitios:

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)

Lee la preimpresión libre del artículo científico completo [aquí](#) o en [arxiv](#).

Datos de GW230814 del Gravitational-Wave Open Science Centre (GWOSC) disponibles [aquí](#).

Datos liberados del GWTC-4.0 del GWOSC disponibles [aquí](#).