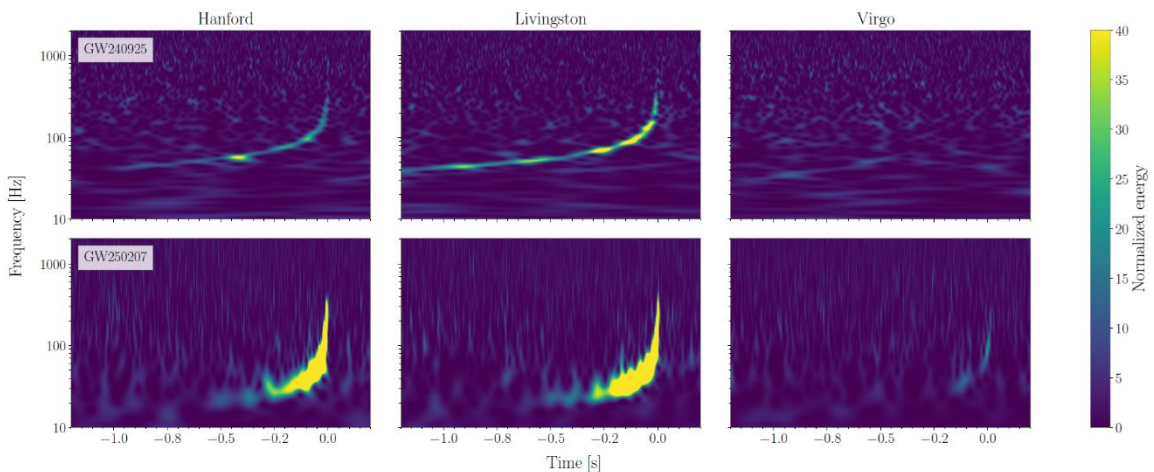


# AJUSTANDO NUESTROS DETECTORES MEDIANTE COLISIONES CÓSMICAS

## *Calibración astrofísica mediante dos fusiones excepcionales de agujeros negros*

La colaboración [LIGO, Virgo y KAGRA \(LVK\)](#) ha detectado más de [300 señales de ondas gravitacionales](#) procedentes de pares de [agujeros negros](#), [estrellas de neutrones](#) y sistemas binarios de agujeros negros y estrellas de neutrones en proceso de fusión. Cada [señal](#) codifica información sobre su origen y la física extrema que rige estas colisiones. Para extraer esta información, los observatorios de ondas gravitacionales deben detectar con precisión la emisión de ondas gravitacionales (en cierto sentido, escuchar las señales con claridad) y tener en cuenta cualquier incertidumbre en sus mediciones. La colaboración LVK informa de dos señales de ondas gravitacionales [intensas](#) nuevas, GW240925 y GW250207, con las que podemos realizar las primeras pruebas informativas de [calibración astrofísica](#).

Fue un mal momento sorprendentemente bueno: observamos dos señales de ondas gravitacionales fuertes (véase la [Figura 1](#)) en momentos en los que el detector LIGO Hanford estaba, metafóricamente, desafinado, lo que significa que no sabemos con precisión cómo interpretar sus datos. Pero gracias a la intensidad de las señales, podemos analizarlas y sintonizar LIGO Hanford midiendo directamente el estado del detector al mismo tiempo. Esto es especialmente importante en el caso de GW250207, para el que la incertidumbre del detector es en gran medida desconocida y cambia con el tiempo.

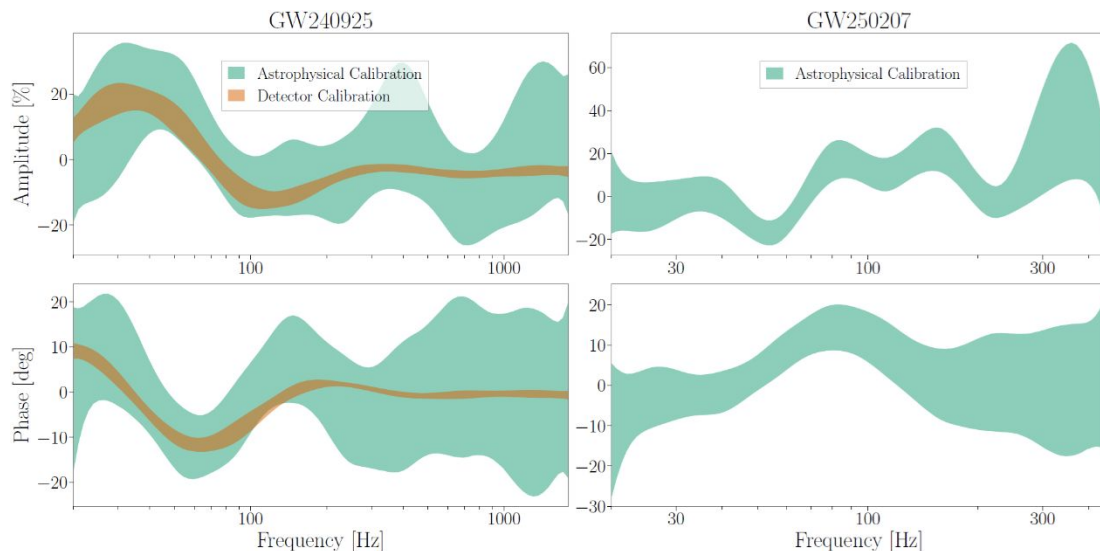


**Figura 1:** Los eventos de ondas gravitacionales GW240924 (fila superior) y GW250207 (fila inferior) observados por los observatorios LIGO Hanford (columna izquierda), LIGO Livingston (columna central) y Virgo (columna derecha). Los gráficos, denominados [espectrogramas](#), muestran el espectro de potencia (energía a diferentes frecuencias) en función del tiempo. Las señales pueden verse como el aumento de energía a lo largo del tiempo (en segundos) y en frecuencias específicas (en hercios), representadas por bandas verdes y amarillas. Su forma sigue el patrón característico de [chirrido](#) producido por las señales de ondas gravitacionales. ¡El grosor y el brillo de GW250207 muestran lo intensa que fue la señal!

## CALIBRACIÓN ASTROFÍSICA

Las [ondas gravitacionales](#) estiran y comprimen el espacio a su paso. Los detectores LVK miden esto enviando luz láser a lo largo de dos brazos perpendiculares y buscando [pequeñas diferencias en el tiempo de recorrido de la luz](#), lo que demuestra que la longitud de los brazos ha cambiado. Una onda gravitacional típica cambiará la longitud de un brazo en unos  $10^{-19}$  m, ¡mucho menos que el [ancho de un protón](#)! Para mantener la sensibilidad ante cambios tan pequeños, regulamos cuidadosamente los detectores en tiempo real, utilizando [bucles de control con retroalimentación](#). Ahora, no solo tenemos que convertir el tiempo de recorrido de la luz en una señal, sino que también tenemos que tener en cuenta cómo los bucles de control han modificado ese tiempo de recorrido. Esto se hace mediante un cuidadoso procedimiento de calibración que modela cómo cambia el detector a medida que las ondas se desplazan (sí, ¡incluidos los bucles de control!). Por lo general, no podemos crear un modelo perfecto y tenemos que corregir nuestras mediciones calculando la discrepancia entre el modelo y las mediciones. Podemos hacerlo observando los errores y las incertidumbres de nuestros cálculos. Cuantificamos esta discrepancia utilizando láseres y sensores auxiliares y nuestro conocimiento detallado del instrumento. Pero, ¿qué ocurre cuando no se dispone de esa información adicional y no se puede realizar una calibración adecuada?

Si la calibración es inexacta, la información de origen que inferimos puede estar sesgada, lo que puede llevarnos a sacar conclusiones erróneas sobre la física involucrada. Afortunadamente, si una señal de onda gravitacional es lo suficientemente fuerte, puede separarse del error de calibración. Si asumimos que la teoría de la relatividad general de Einstein predice correctamente cómo debería ser la señal, podemos mitigar los posibles sesgos en los resultados. Esto se denomina calibración astrofísica. Tanto para las detecciones GW240925 como GW250207, podemos emplear nuestros métodos habituales para estimar los errores de calibración de los detectores LIGO Livingston y Virgo, pero no para el detector LIGO Hanford. Afortunadamente, ambas señales son lo suficientemente fuertes como para realizar las primeras pruebas informativas de calibración astrofísica. Las formas probables de calibración de los errores de calibración que encontramos se muestran en la **Figura 2**. En la **Tabla 1** se ofrece un resumen de ambos eventos.



**Figura 2:** La forma probable del error de calibración inferido de Hanford en términos de su amplitud y fase en función de la frecuencia. Cuanto mayor sea la región sombreada para una determinada frecuencia, mayor será nuestra incertidumbre sobre cuál es exactamente el error de calibración. Los gráficos de GW240925 de la izquierda muestran en verde los resultados de la calibración astrofísica de los datos iniciales y en naranja el error cuantificado utilizando información adicional medida en el detector (denominada «calibración del detector»). Podemos ver que la región sombreada en verde engloba a la naranja, lo que significa que estamos deduciendo con éxito la forma del error de calibración. A la derecha, tenemos los resultados de GW250207 con solo la región sombreada en verde, ya que no había información adicional del detector para comparar estos resultados.

## ¿POR QUÉ ES IMPORTANTE LA CALIBRACIÓN ASTROFÍSICA?

Con datos precisos sobre las ondas gravitacionales, podemos estimar las propiedades (o parámetros) de los agujeros negros que generaron la señal de ondas gravitacionales, propiedades como la masa de los agujeros negros, si están girando o no, y dónde se encuentran en el cielo (localización celeste). Hemos descubierto que GW240925 fue generado por agujeros negros con masas 9 y 7 veces superiores a la masa del Sol, a una distancia de  $\sim 350$  megaparsecs de la Tierra, y GW250207 por dos agujeros negros con masas 35 y 30 veces superiores a la del Sol, a una distancia de  $\sim 200$  megaparsecs de la Tierra; ninguno de los dos eventos proporciona muchas pruebas de que los agujeros negros giraran rápidamente. Sin tener debidamente en cuenta las incertidumbres de calibración, estas estimaciones podrían estar sesgadas hacia un valor que no es verdadero, por lo que necesitamos incertidumbres de calibración precisas para garantizar que podemos confiar en los datos.

También podemos utilizar los datos de las ondas gravitacionales y los parámetros estimados de la fuente para realizar análisis interesantes, como comprobar la relatividad general y determinar la constante de Hubble. La relatividad general es la teoría de la gravedad de Einstein; comprobarla en situaciones extremas, como durante la fusión de dos agujeros negros, nos permite ver si hay discrepancias entre lo que predice la teoría y lo que observamos. Aunque todavía no hemos encontrado ninguna discrepancia entre la relatividad general y las observaciones, no se trata de una teoría completa y comprender en qué difieren las observaciones de sus predicciones podría permitirnos elaborar una nueva teoría más completa, como una que incluya la gravedad cuántica. Si bien los errores de calibración no pueden imitar las señales de ondas gravitacionales, sí podrían imitar las desviaciones de la relatividad general.

## PARA SABER MÁS:

Visita nuestras webs: [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/)

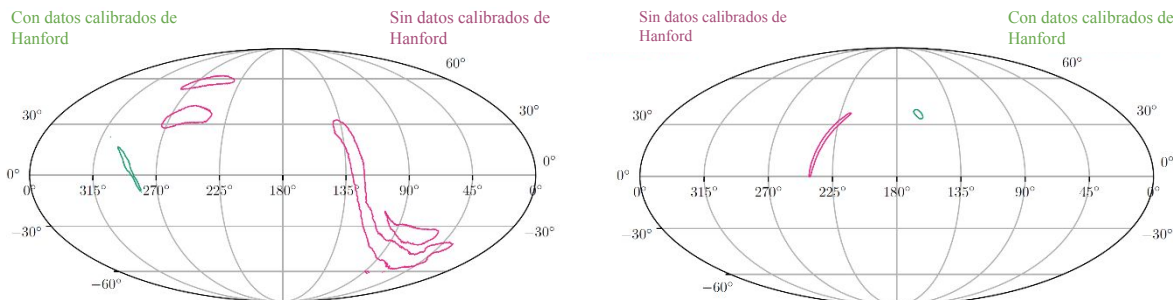


Por lo tanto, nuestra confianza en una posible discrepancia entre la relatividad general y nuestras observaciones podría verse socavada por errores de calibración, lo que significa que no podemos confiar en nuestra interpretación de los datos. En casos como GW250207, en los que no se disponía de los métodos típicos de calibración, podemos utilizar la calibración astrofísica, lo que nos permite seguir confiando en los datos. Al utilizar datos calibrados astrofísicamente, no se detectó ninguna discrepancia entre la teoría de Einstein y las observaciones de este evento.

El uso de la calibración astrofísica, que nos permite confiar en los datos del detector LIGO Hanford, también significa que podemos reducir el área en la que creemos que se originaron las ondas gravitacionales. Esta localización en el cielo funciona de manera similar a la triangulación, en la que cuantos más detectores participan en una detección, más podemos reducir el área del posible origen de la señal. En la **Figura 3**, el área posible cambia y se reduce significativamente cuando se utilizan datos de LIGO Hanford calibrados correctamente.

**Tabla 1:** Breve resumen del contexto observacional para GW240925 y GW250207

GW240925	GW250207
<p>Un problema técnico en el detector Hanford provocó un desajuste temporal en la calibración de los datos en tiempo real, que se cuantificó y corrigió posteriormente, lo que permitió generar datos correctamente calibrados fuera de línea. Esto significa que podemos realizar una calibración astrofísica de los datos iniciales y comparar los resultados del análisis entre estos y los datos finales correctamente calibrados.</p>	<p>Durante esta señal, LIGO Hanford acababa de encenderse y se encontraba en un estado inestable. Varios sensores auxiliares no estaban recopilando datos, lo que imposibilitaba calcular el error de calibración. Este es el segundo evento más intenso que hemos observado y ofrece una perspectiva única sobre algunos aspectos fascinantes de la física. Solo es posible acceder a esta información gracias a las mediciones astrofísicas del error de calibración.</p>



**Figura 3:** Localización en el cielo de GW240925 (izquierda) y GW250207 (derecha). Las áreas rosadas se obtienen utilizando datos de los detectores LIGO Livingston y Virgo. Utilizando los datos de LIGO Hanford calibrados astrofísicamente, la posible ubicación de la fuente se desplaza y se reduce al área verde.

La localización del cielo es un ingrediente clave en la medición de la constante de Hubble, un valor que nos puede indicar la tasa de expansión del Universo. Para determinar la constante de Hubble, necesitamos medir las distancias cósmicas. Los dos métodos principales para hacerlo son medir el brillo de las sirenas estándar, como las supernovas, y medir las fluctuaciones en la radiación cósmica del fondo en microondas que quedó tras el Big Bang. Sin embargo, estos métodos no coinciden en el valor de la constante, lo que da lugar a la tensión de Hubble. El uso de ondas gravitacionales para medir la constante de Hubble podría ayudar a resolver esta tensión. Debido a su posición en el cielo y a su intensidad, se cree que GW250207 es una de las mejores señales de agujeros negros binarios para medir la constante de Hubble, pero no puede resolver la tensión por sí sola, ya que se necesitarían muchas más sirenas oscuras de este tipo para obtener una medida precisa de la constante de Hubble. El análisis de todas las sirenas oscuras detectadas durante la primera parte de la cuarta campaña de observación se recoge en este resumen científico anterior.

El uso de GW240925 y GW250207 nos ha permitido realizar las primeras pruebas informativas de calibración astrofísica, un nuevo método de calibración aplicable a señales fuertes que podría ayudarnos a confiar en nuestros datos incluso cuando los detectores de ondas gravitacionales se encuentran en un estado inestable, lo que nos permite mejorar nuestra capacidad de medir las propiedades de las fuentes, poner a prueba la teoría de la gravedad de Einstein y determinar la tasa de expansión del Universo utilizando ondas gravitacionales.

## PARA MÁS INFORMACIÓN

Visita nuestras webs:

- [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/) (KAGRA)

Lee una versión preliminar gratuita del artículo científico completo aquí o en arxiv.

*Traducción al castellano por Pablo García Abia e Irene Prohens Peteracova (a partir de la versión original en inglés).*