

UNA GUIA SOBRE EL RUIDO DE LOS DETECTORES LIGO-VIRGO Y LA EXTRACCIÓN DE SEÑALES TRANSITORIAS DE ONDAS GRAVITACIONALES

INTRODUCCIÓN

Las ondas gravitacionales son ondulaciones extremadamente pequeñas del tejido del [espacio-tiempo](#) que estiran y comprimen el espacio en una minúscula cantidad a medida que pasan. Los dos detectores Advanced LIGO en los EE. UU. y el detector Advanced Virgo en Italia miden esta [distensión](#), o cambio relativo de la longitud, observando la [interferencia](#) de un haz de luz láser que recorre varios kilómetros a lo largo de los brazos perpendiculares del interferómetro en una trayectoria de ida y vuelta. Incluso las señales más intensas de ondas gravitacionales solo producen un cambio en la longitud de los detectores LIGO y Virgo que es [1.000 veces más pequeño que el tamaño de un protón](#). Es un desafío extraer estas fugaces y débiles señales de entre los silbidos y crujidos del ruido del detector.

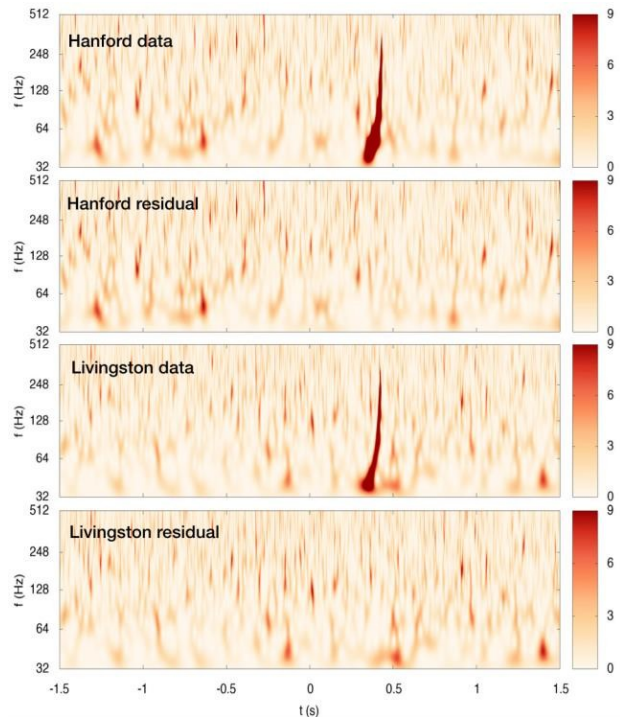
Con el creciente interés en la astronomía de ondas gravitacionales por parte de toda la comunidad científica, la Colaboración Científica LIGO y la Colaboración Virgo han ido tomando medidas para ayudar a facilitar la participación en el análisis e interpretación de los datos de LIGO-Virgo. Un elemento clave de este esfuerzo es la publicación de una [nueva guía sobre el ruido de los detectores LIGO-Virgo y la extracción de señales de ondas gravitacionales](#); el objetivo de esta guía de análisis de datos es proporcionar una introducción accesible a los datos de los detectores de ondas gravitacionales, las propiedades del ruido y los diversos métodos de análisis de datos utilizados para detectar y caracterizar las señales de ondas gravitacionales. Los ejemplos que se muestran en la guía utilizan datos que están disponibles en el Gravitational Wave Open Science Center, gw-openscience.org, junto con tutoriales y herramientas informáticas para trabajar con los datos. Las colaboraciones LIGO y Virgo también organizan [talleres abiertos de datos](#), que ofrecen a los participantes una introducción práctica para trabajar con herramientas informáticas con las que acceder y analizar datos públicos de ondas gravitacionales.

SEÑALES Y RUIDO

Las técnicas utilizadas para analizar datos de LIGO/Virgo están fundamentadas en el trabajo realizado hace más de dos siglos por el matemático francés [Pierre-Simon Laplace](#) y el matemático alemán [Carl Friedrich Gauss](#).



Carl Friedrich Gauss (a la izquierda) y Pierre-Simon Laplace (a la derecha) sentaron las bases del análisis de LIGO/Virgo hace más de dos siglos.



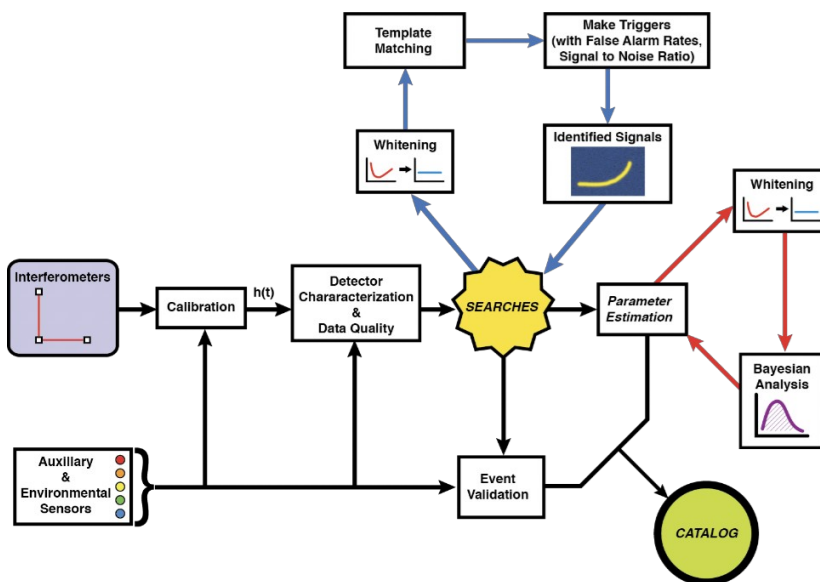
Gráficas tiempo-frecuencia de los datos en los detectores Hanford y Livingston en el momento del evento de la onda gravitacional GW150914. Las gráficas de los datos muestran regiones con forma de "comas" con exceso de potencia debido a la señal de la onda gravitacional. Las gráficas de los datos residuales después de restar el modelo con el mejor ajuste para la señal no muestran un exceso de potencia. Se comprueba que estos residuos son consistentes con ruido gaussiano.

Laplace sentó las bases de la [teoría de la probabilidad](#) que usamos para inferir las propiedades de las fuentes de ondas gravitacionales, tales como sus masas, espines y localización en el cielo. Independientemente, Gauss desarrolló un método para ajustar un modelo a las observaciones que proporcionaban la solución "más verosímil". Este concepto de "[verosimilitud](#)" se usa hoy en día en los análisis de LIGO-Virgo, y expresa la idea de que el [residuo](#), lo que se obtiene después de sustraer el modelo de los datos, debe ser consistente con las propiedades del ruido. Gauss también demostró que, bajo ciertas condiciones, el ruido debería distribuirse en una curva con forma de campana, hoy llamada gaussiana o [distribución normal](#). Laplace amplió el trabajo de Gauss y demostró que el ruido en una medición seguirá una curva de campana siempre que el ruido esté causado por una gran cantidad de perturbaciones aleatorias.

Los datos de LIGO-Virgo pueden ser difíciles de analizar ya que las propiedades del ruido varían con el tiempo y la [frecuencia](#), y los ruidos transitorios, conocidos como [glitches](#), provocan que las propiedades estadísticas del ruido se desvíen del ideal gaussiano. La guía de análisis de datos describe las diversas técnicas que han desarrollado los científicos de LIGO-Virgo para rastrear y mitigar los efectos de estas fluctuaciones de ruido, y para ofrecer afirmaciones robustas y fiables sobre la significación estadística de las detecciones y de las propiedades de los sistemas astrofísicos que generan las señales.

En la red LIGO-Virgo tenemos múltiples detectores separados por miles de kilómetros, lo cual es muy útil a la hora de analizar los datos. Nos permite determinar de qué dirección del cielo provienen las señales utilizando diferencias en los tiempos de llegada a cada detector. También juegan un papel crucial en la separación de las señales del ruido: las señales de ondas gravitacionales producen una respuesta [correlacionada](#) en la red, mientras que el ruido en cada instrumento no debería estar correlacionado. Esto permite distinguir las señales de las fluctuaciones de ruido.

Se ha planteado la preocupación de que los primeros eventos de ondas gravitacionales muestren signos de ruido correlacionado entre los detectores, pero cuando se restan adecuadamente las señales, no hay evidencia de correlaciones estadísticamente significativas en los residuos. De hecho, se observa que los residuos son perfectamente consistentes con ruido gaussiano.



Un esquema simplificado que muestra los principales pasos en el procesamiento de datos de LIGO / Virgo.

ANÁLISIS CIENTÍFICO

La guía de análisis de datos cubre los pasos principales en los análisis de LIGO-Virgo: en primer lugar, la salida del sistema de control de detección de longitud se calibra y se convierte en una medida de la distensión de la onda gravitacional; los controles de calidad de datos se realizan para marcar cualquier dato corrupto; los datos se pasan luego a los algoritmos de búsqueda que identifican las señales candidatas y clasifican su importancia; los candidatos más prometedores se someten a un estudio más intenso para producir [distribuciones de probabilidad](#) sobre las propiedades de la fuente; después de una mayor verificación y validación de la calidad de los datos, los eventos se agregan al catálogo de fuentes. La guía también describe algunos de los pasos clave del procesamiento de los datos que se utilizan en los análisis, tales como el [enventanamiento de datos](#), la conversión de datos al dominio de frecuencias, la estimación del [espectro de potencia](#) del ruido y el cálculo de la probabilidad de que los datos sean consistentes con un modelo de señal de onda gravitacional en particular.

PARA SABER MÁS:

- Visita nuestras páginas web: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu
- El Gravitational Wave Open Science Center: gw-openscience.org
- Preimpresión disponible de manera abierta del artículo de la guía en arXiv.org: <https://arxiv.org/abs/1908.11170>
- [Versión publicada](#) del artículo guía (B.P. Abbott et al. 2020, Classical and Quantum Gravity 37, 055002)
- Página de tutoriales del GWOSC: <https://www.gw-openscience.org/tutorials/> Esto incluye enlaces a nuestro curso web del taller de datos abiertos LIGO-Virgo, y códigos y cuadernos Jupyter relevantes para nuestro artículo de la Guía de Análisis de Datos.

GLOSARIO

Distensión: El cambio fraccional en la distancia entre dos puntos de medida debido a la deformación del espacio-tiempo por el paso de una onda gravitacional.

Interferómetro: Instrumento, utilizado en muchos campos de la ciencia y la ingeniería, que funciona combinando dos o más fuentes de luz para crear un patrón de interferencia, que puede medirse y analizarse y contiene información sobre el objeto o fenómeno que se estudia. Vease también [aquí](#).

Glitch: Una ráfaga de ruido en los datos de ondas gravitacionales, análoga a una ráfaga de electricidad estática que se escucha desde un altavoz estéreo, que a veces puede confundirse con o enmascarar una señal real de ondas gravitacionales.