



## El amanecer de la astrofísica de multi-mensajeros: observación de la fusión de un sistema binario de estrellas de neutrones

El 17 de agosto de 2017, astrónomos de todo el mundo fueron avisados de una observación de ondas gravitacionales por los detectores LIGO avanzado y Virgo avanzado. Este evento de ondas gravitacionales, conocido ahora como GW170817, parecía ser el resultado de la fusión de dos estrellas de neutrones. En menos de dos segundos tras la señal GW170817, el satélite Fermi de la NASA observó un estallido de rayos gamma, conocido ahora como GRB170817A, y en los minutos siguientes a estas detecciones iniciales telescopios alrededor del mundo comenzaron una extensa campaña de observación. El telescopio Swope en Chile fue el primero en informar acerca de una fuente óptica brillante (SSS17a) en la galaxia NGC 4993 y otros grupos adicionales detectaron de forma independiente la misma señal transitoria durante los siguientes minutos y horas. Durante las semanas siguientes, los astrónomos observaron esta localización con instrumentos sensibles en todo el espectro electromagnético; estas observaciones proporcionan una visión exhaustiva de este evento cataclísmico empezando aproximadamente 100 segundos antes de la fusión hasta varias semanas después. Las observaciones avalan la hipótesis de que dos estrellas de neutrones se fusionaron en NGC 4993 -produciendo ondas gravitacionales, un estallido de rayos gamma de corta duración y una kilonova. El evento GW170817 marca una nueva era en la astronomía de multi-mensajeros, donde el mismo evento es observado con ondas gravitacionales y electromagnéticas.

### Introducción

La idea de una estrella de neutrones (NS por sus siglas en inglés) fue propuesta por primera vez hace unos ochenta años en 1934, 33 años antes de que fueran observadas. En 1967, el una emisión de rayos X proveniente de Scorpius X-1 fue clasificada como procedente de una NS, y más tarde

durante el mismo año fue descubierto el primer radio púlsar. Desde entonces, varios sistemas binarios de estrellas de neutrones (BNS por sus siglas en inglés) han sido descubiertos, incluyendo el sistema binario de Hulse-Taylor, una BNS donde una de las NS es un púlsar. Las BNS han proporcionado potentes

pruebas observacionales de la Relatividad General, incluyendo la primera evidencia firme de la existencia de ondas gravitacionales (GWs por sus siglas en inglés). Desde los primeros días de LIGO, las fusiones de BNS han sido consideradas un objetivo primario para la observación de ondas gravitacionales.

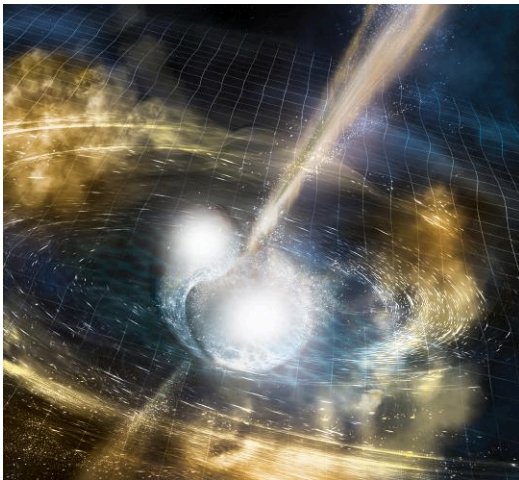


Ilustración artística de la fusión de dos estrellas de neutrones. Los finos haces representan el estallido de rayos gamma mientras que el espacio-tiempo ondulante indica las ondas gravitacionales isótropas que caracterizan la fusión. Los remolinos de nubes de material eyectado de las estrellas fusionadas son una posible fuente de luz que fue vista a energías más bajas. Crédito: National Science Foundation/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet.

A mediados de la década de los 60, los estallidos de rayos gamma (GRB por sus siglas en inglés) fueron descubiertos por los satélites Vela, y posteriormente se estableció su origen cósmico. Desde entonces, determinar las fuentes de GRBs ha sido uno de los retos principales de la astrofísica de altas energías. La idea de que los GRBs

podieran estar relacionados con fusiones de BNS fue considerada rápidamente y en 2005 el campo experimentó una revolución, cuando un estallido de rayos gamma de corta duración fue localizado en una galaxia huésped, y se pudieron observar resplandores multicanal (rayos X, luz visible, ondas de radio). Estas observaciones proporcionaron evidencia de que los GRB de corta duración se pueden asociar a fusiones de BNS o a fusiones de una NS con un agujero negro.

### Un descubrimiento multi-mensajero

El 17 de agosto de 2017, el satélite Fermi de la NASA mediante su instrumento Monitor de Estallidos de Rayos Gamma (GBM por sus siglas en inglés) envió una alerta automática de la señal GRB170817A. Se necesitaron aproximadamente seis minutos para que los análisis automáticos de datos de LIGO encontraran que un candidato a señal transitoria de ondas gravitacionales (designada más tarde como GW170817) había sido detectado casi en el mismo instante en el observatorio LIGO-Hanford. La onda gravitacional era consistente con una fusión de una BNS ocurrida menos de dos segundos antes que la señal GRB170817A. El equipo de respuesta rápida de LIGO-Virgo inspeccionó manualmente los datos y emitió una alerta, comunicando que un candidato de onda gravitacional altamente

significativo estaba asociado con el momento del GRB. Análisis iniciales de los datos identificaron el área del cielo más probable de contener la fuente de las señales GRB170817A y GW170817, mostrada en la Figura 1.

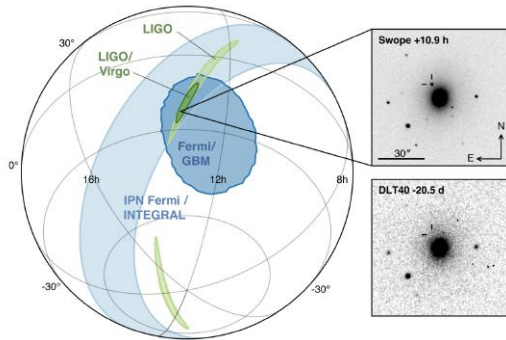


Figura 1: Localización de las señales de ondas gravitacionales, rayos gamma y ópticas. El panel de la izquierda muestra una proyección de las regiones de fiabilidad del 90% de LIGO (verde claro), LIGO-Virgo (verde oscuro), triangulación del tiempo de retardo entre Fermi e INTEGRAL (azul claro), y Fermi GBM (azul oscuro). El recuadro muestra la localización de la galaxia huésped aparente NGC 4993 en la imagen óptica del descubrimiento del telescopio Swope 10.9 horas después de la fusión (arriba a la derecha) y la imagen anterior al descubrimiento de DLT40 20.5 días antes de la fusión (abajo a la derecha).

Este evento ha marcado el primer descubrimiento multi-mensajero de ondas gravitacionales: fue observado mediante GWs y ondas electromagnéticas (EM). Una vez identificada el área del cielo mediante la señal gravitacional y de rayos gamma, telescopios alrededor del mundo concentraron sus esfuerzos en llevar a cabo más observaciones asociadas con esta fuente. Hubo una plétora de observaciones clave en diferentes longitudes de onda del

espectro electromagnético, así como de medidas del flujo de neutrinos. La Figura 2 muestra el hilo cronológico de las observaciones. Las observaciones en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético fueron cruciales para la riqueza de este descubrimiento científico.

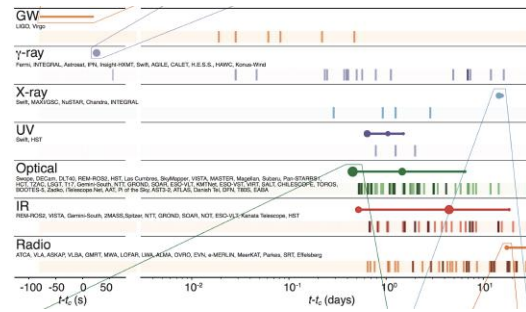


Figura 2: El cronograma del descubrimiento de las señales GW170817, GRB170817A, SSS17a/AT2017gfo y las observaciones posteriores, se muestra en la Figura 2 de la publicación. Algunos de los elementos de esa figura se presentan aquí y están descritos en más detalle. Figura 2a: muestra el cronograma del descubrimiento y seguimiento de este sistema. Se muestran dos tipos de información por cada banda/mensajero. En primer lugar, las líneas discontinuas sombreadas representan los instantes en los que la información fue comunicada en una circular del GCN. Los nombres de los autores asociados están recogidos al principio de cada fila. En segundo lugar, las líneas continuas con círculos indican el momento en el cual la fuente era detectable por al menos un telescopio en cada banda particular. Los tamaños de los círculos muestran aproximadamente la escala de magnitud.

En el momento de la alerta de la señal GW170817, la posición en el cielo de la fuente se había establecido en Australia, pero estaba bien situada para observarla con telescopios en Sudáfrica y Chile. En las primeras horas de

oscuridad en Chile, el telescopio Swope identificó una señal transitoria en la banda óptica (SSS17a) proveniente de la galaxia NGC 4993. Durante las dos semanas siguientes, una red de telescopios terrestres y observatorios espaciales dieron seguimiento a las detecciones iniciales, cubriendo longitudes de onda ultravioletas (UV), ópticas (O), y en el infrarrojo cercano (IR). Estas observaciones monitorizaron cuidadosamente la distribución espectral de energía, revelando que la excepcional contrapartida electromagnética era una kilonova. Esta observación conecta firmemente las kilonovas con fusiones de BNS, proporcionando evidencias que apoyan la idea de que las kilonovas son el resultado de la desintegración radioactiva de los elementos pesados formados por la captura neutrónica durante la fusión de una BNS.

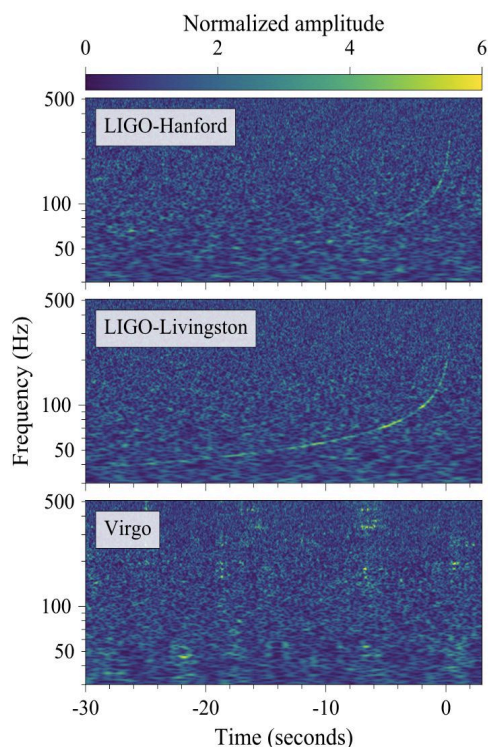


Figura 2b: Aquí mostramos el espectrograma de las ondas gravitacionales registradas en el detector LIGO-Livingston. Aquí mostramos los espectrogramas de los tres detectores LIGO-Virgo. Se puede ver el “chirp” característico, cuando la frecuencia crece, de la fusión del sistema binario.

Tras la kilonova, observaciones de rayos X y ondas de radio de los destellos posteriores del evento revelaron información significativa acerca de la energía emitida en la explosión, el material eyectado, y el ambiente de la fusión. Los observatorios de neutrinos buscaron la coincidencia de neutrinos de alta energía provenientes del área de la señal GW170817, ya que los neutrinos son emitidos en el flujo relativista producido durante la fusión de BNS. Sin embargo, no se identificaron neutrinos procedentes de la dirección de GW170817 ni ninguna explosión de neutrinos de supernova fue detectada simultáneamente a la fusión. Tras la identificación de la galaxia huésped del evento, se inició una extensa búsqueda de neutrinos en la dirección de NGC 4993 durante las dos semanas siguientes a la fusión, pero no se encontró ninguna emisión de neutrinos significativa. Detectar ondas gravitacionales, radiación electromagnética y neutrinos de un mismo evento cósmico continúa siendo un objetivo de la astrofísica de multi-mensajeros.



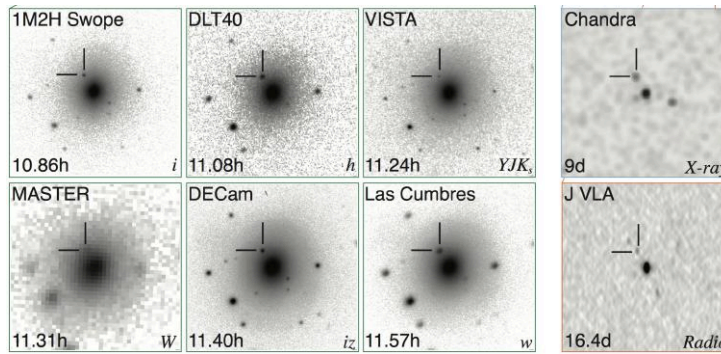


Figura 2c: En esta figura se muestran 8 imágenes de los destellos posteriores de la fusión de la BNS (designados como SSS17a/AT2017gfo). A la izquierda hay seis imágenes ópticas tomadas entre 10 y 12 horas tras la fusión por diferentes telescopios. A la derecha se encuentran imágenes construidas a partir de observaciones de rayos X y ondas de radio. La imagen de rayos X fue tomada 9 días después de la fusión por el [Observatorio de rayos X Chandra](#) de la NASA. 16 días después de la fusión el [Jansky Very Large Array \(VLA\)](#) del NRAO capturó la imagen en radio. En las ocho imágenes la galaxia NGC 4993 se observa en el centro y la señal SSS17a/AT2017gfo está marcada con dos líneas.

## Conclusiones

Por primera vez han sido observadas ondas gravitacionales y electromagnéticas de una misma fuente astrofísica. Esta observación conjunta sustenta la hipótesis de que la fuente es una fusión de dos estrellas de neutrones y también permite la identificación de la galaxia huésped. Las observaciones electromagnéticas contienen tres componentes principales en diferentes longitudes de onda: (i) un temprano estallido de rayos gamma de corta duración que demuestra la asociación de al menos una fracción de éstas con fusiones de sistemas binarios de estrellas de neutrones, (ii) una señal transitoria en la banda ultravioleta, óptica e infrarroja (conocida como kilonova), debida a la desintegración radioactiva de elementos pesados formados por captura neutrónica, observada con claridad por primera vez, seguida por (iii) rayos X y contrapartidas en radio retardados. Todas estas observaciones proporcionan la primera imagen global de los procesos en juego tras fusiones de estrellas compactas que contienen estrellas de neutrones, incluyendo un chorro de partículas de alta energía y la interacción de este chorro con el medio interestelar envolvente. Este evento también demuestra la importancia de la colaboración entre observaciones conjuntas de ondas gravitacionales, electromagnéticas y neutrinos, y marca una nueva era en la astronomía de multi-mensajeros.

## Descubre más:

- Visita nuestros sitios web: <http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>
- Puedes leer el artículo completo, que ha sido admitido para publicación en Physical Review Letters, [aquí](#).
- Visita el LIGO Open Science Center, con acceso a los datos del evento GW170817: <https://losc.ligo.org>

Lea más artículos nuestros acerca del descubrimiento GW170817:

- [GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral](#)
- [Gravitational Waves and Gamma Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A](#)
- [A standard siren measurement of the Hubble constant with GW170817](#)
- [Estimating the Contribution of Dynamical Ejecta in the Kilonova Associated with GW170817](#)
- [On the Progenitor of Binary Neutron Star Merger GW170817](#)
- [GW170817: Implications for the Stochastic Gravitational-Wave Background from Compact Binary Mergers](#)
- [Search for High-energy Neutrinos from Binary Neutron Star Merger GW170817 with ANTARES, IceCube, and the Pierre Auger Observatory](#)

## Glosario

- **Agujero negro:** Región del espacio-tiempo causada por una masa extremadamente compacta donde la gravedad es tan intensa que previene que nada, incluida la luz, pueda escapar.
- **Rayos gamma:** Radiación electromagnética en la banda más energética del espectro electromagnético.
- **Neutrino:** Pequeña partícula sin carga eléctrica.
- **Estrella de neutrones:** Objeto extremadamente denso que queda tras el colapso de una estrella masiva.