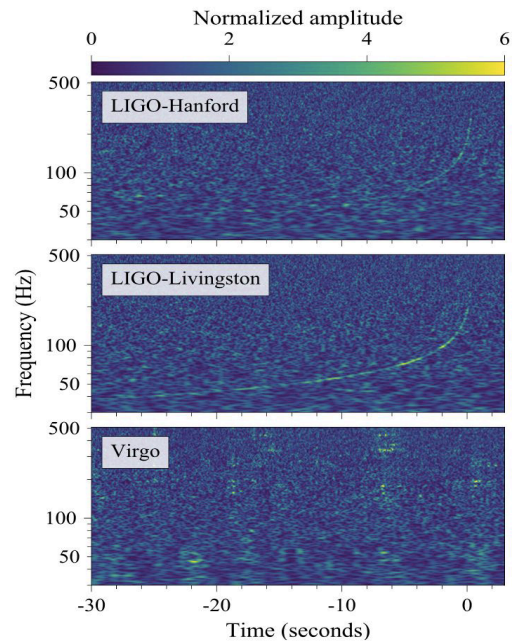




## GW170817: Observación de ondas gravitacionales procedentes de la espiral de una binaria de estrellas de neutrones

El 17 de agosto de 2017, a las 12:41:04 UTC (8:41:04 am EDT en Norteamérica, y 2:41:04 pm CEST en Europa) la red de detectores LIGO-Virgo registró una señal de onda gravitacional procedente de la espiral de dos remanentes estelares compactos conocidos como “estrellas de neutrones”. Este evento sucedió justo tres días después de la primera detección conjunta LIGO-Virgo de una fusión de una binaria de agujeros negros, GW170814 (ver el science summary).

Los astrónomos de ondas gravitacionales han estado esperando señales de ondas gravitacionales procedentes de la fusión de binarias de estrellas de neutrones ya que estas estrellas son comunes en el Universo y anteriormente ya habían sido detectadas binarias de estrellas de neutrones usando radiotelescopios. El ejemplo más famoso es el púlsar binario de Hulse-Taylor, descubierto en 1974. Los radioastrónomos han dibujado su órbita durante los últimos 40 años, y mostrado que las dos estrellas están orbitando lentamente en espiral una alrededor de la otra. En aproximadamente 300 millones de años, el púlsar binario Hulse-Taylor se fusionará, produciendo una señal similar a la que LIGO acaba de observar para GW170817.



**Figura 1:** Estas figuras muestran los espectrogramas de la señal de GW170817 en cada uno de los detectores LIGO y Virgo. En el eje horizontal se muestra el tiempo, y la frecuencia en el vertical. La señal binaria crece en amplitud y frecuencia (el término específico en inglés es *chirp*), empezando abajo a la izquierda, luego curvándose considerablemente en el lado derecho. El glitch ha sido mitigado en el espectrograma de LIGO-Livingston y no se ve aquí.

La red de detectores estaba en el segundo “periodo de observación” (llamado O2) – los dos detectores LIGO habían comenzado a tomar datos el 30 de noviembre de 2016, y Virgo se acababa de unir el 1 de agosto de 2017. Múltiples detectores permiten a los astrónomos de ondas gravitacionales medir de dónde proviene una señal en el cielo; a mayor número de detectores, mejor se puede localizar la región en el cielo. Para este evento, la localización fue una región alargada (llamada “elipse error”) de aproximadamente 2 grados de ancho, y 15 grados de largo, cubriendo cerca de 28 grados cuadrados (visualmente, es aproximadamente el tamaño y la forma de una banana, vista por una persona que la sostiene con los brazos extendidos). El área en el cielo está en la constelación de Hidra, centrada cerca de la estrella Psi Hidra que se puede observar a simple vista.

### **Otras detecciones: Astronomía de multi-mensajeros**

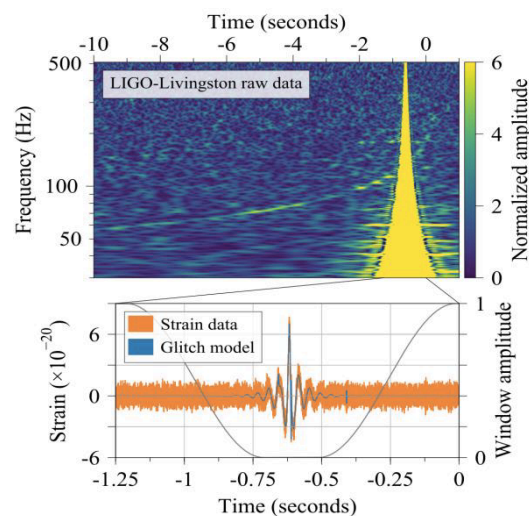
Tan solo 1.7 segundos después de que la red de ondas gravitacionales observara la señal, un estallido de rayos gamma conocido como GRB170817A fue detectado por Fermi-GBM. Las señales intensas como GW170817 y GRB170817A son normalmente llamadas “desencadenantes” porque dan pie a otras actividades astronómicas. En el caso de este evento, los

desencadenantes de ondas gravitacionales y rayos gamma generaron alertas que se enviaron a la comunidad astronómica, desatando una campaña de seguimiento que se materializó en muchas detecciones relacionadas con la débil luz procedente de este evento, situado cerca de la galaxia NGC4993. Para más detalles sobre esta campaña de observación “multi-mensajera”, usando tanto ondas gravitacionales como electromagnéticas, consulte el Resumen Científico complementario (link MMA Resumen Científico aquí).

### **Señal de onda gravitacional**

Las ondas gravitacionales procedentes de una binaria de estrellas de neutrones pueden ser visible por un detector durante un minuto o más. Para GW170817, aproximadamente 100 segundos antes de que las estrellas de neutrones se fusionasen éstas estaban separadas por alrededor de 400 kilómetros, y completaron unas 12 órbitas por segundo. Con cada órbita, la emisión de ondas gravitacionales forzó a las estrellas a acercarse cada vez más. A medida que las órbitas se reducen, las estrellas se mueven cada vez más rápido, y la amplitud y la frecuencia de las ondas gravitacionales aumenta. La lenta reducción de la órbita es una espiral, y el incremento en frecuencia se llama “chirp”. El proceso se acelera hasta que las estrellas se fusionan y forman un único remanente.

Para visualizar la señal, los astrónomos de ondas gravitacionales encuentran útil mirar los datos del detector en forma de espectrograma. Éste es una imagen en color, donde el eje horizontal representa el tiempo, y el eje vertical muestra la frecuencia de las fluctuaciones medidas en el detector (frecuencias bajas cerca de la parte inferior del eje vertical y frecuencias altas cerca de la parte superior). *La imagen de un espectrograma de un chirp de una binaria de estrellas de neutrones aparece como una larga línea delgada, inicialmente muy plana o poco profunda y en frecuencias bajas, pero a medida que pasa el tiempo se inclina hacia arriba cada vez más rápido hasta la brillante curva ascendente final a la derecha justo antes de que las estrellas se fusionen.*



**Figura 2:** El panel superior muestra el glitch en los datos de LIGO-Livingston, y también claramente muestra la chirp binaria. El panel inferior muestra la deformación (la cantidad que usamos para describir la intensidad de las señales en LIGO y Virgo) del glitch en función del tiempo. Éste es breve (durando solo alrededor de 1/4 de segundo), pero muy intenso. La mitigación reduce el glitch al nivel de la traza naranja, que es el ruido de fondo que está siempre presente en los detectores tipo LIGO.

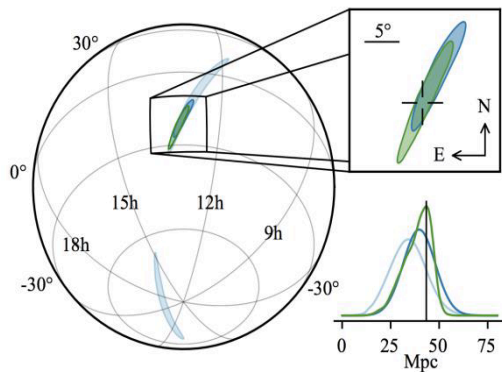
La señal es claramente visible en el espectrograma para ambos detectores LIGO, pero no en el detector Virgo. Esto es un aspecto importante para la localización en el cielo. Cada detector tiene una región en el cielo donde no puede ver la señal tan fácilmente como en otras regiones. Debido a que la señal era claramente visible en ambos detectores LIGO, pero no en Virgo, la consecuencia es que la señal venía de una de las regiones en el cielo en las que Virgo tenía dificultades de observación en ese momento, hecho que ayudó notablemente a la localización del evento.

## Limpiando glitches

El software automatizado de LIGO inicialmente no vio la señal en los datos de Livingston, a pesar de que la señal fuera visible para el ojo humano. El problema fue que había un estallido de ruido (análogo al ruido de estática en tus altavoces analógicos) durante la espiral y la fase chirp. Este estallido de ruido se denomina “glitch” por los científicos de los detectores, y fue eliminado de los datos antes que la señal fuera evaluada. Este cuidadoso procedimiento de eliminación debe suprimir el ruido, pero no la señal, y recibe el nombre de

“mitigación”.

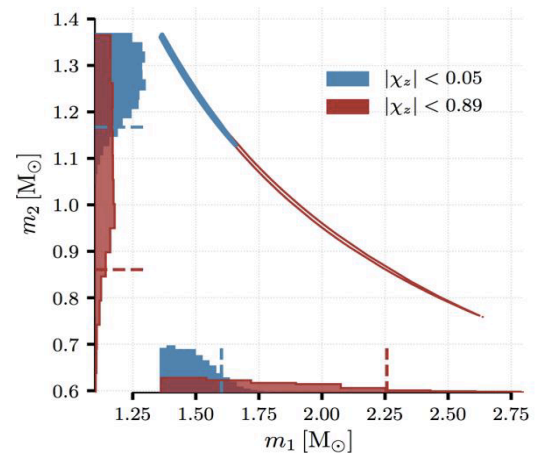
Los glitches aparecen en los detectores de ondas gravitacionales todo el tiempo; algunos similares al glitch limpiado de los datos de GW170817 suceden una vez cada pocas horas. Animamos a aquellos interesados en aprender más sobre glitches en los detectores LIGO a visitar nuestro proyecto de ciencia ciudadana, GravitySpy en <http://gravityspy.org>. En este proyecto, científicos amateurs de todo el mundo miran espectrogramas de los datos de LIGO y ayudan a identificar y clasificar glitches. Esta información es usada por los miembros del equipo LIGO para entender mejor el comportamiento de los detectores y mejorar nuestros procedimientos de análisis en el futuro.



**Figura 3:** Mapa esférico del cielo, mostrando la localización de GW170817 determinado por LIGO y Virgo. Los dos óvalos (azul y verde) muestran la localización predicha por dos códigos de análisis diferentes de LIGO. Las marcas en forma de cruz muestran la localización de la galaxia NGC 4993, en la constelación de Hidra. El gráfico izquierdo inferior muestra nuestra estimación de la distancia a la fuente a partir de los datos de onda gravitacional.

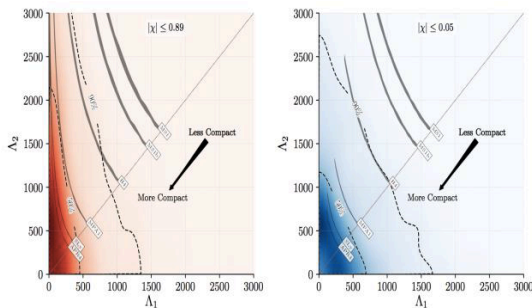
## Propiedades de la fuente

Cada fuente genera una señal de onda gravitacional diferente dependiendo de las propiedades astrofísicas del sistema. Estas propiedades incluyen la masa de los objetos individuales, cuán rápido gira cada uno sobre sí mismo, cómo de fácil es comprimir o deformar el objeto, el tamaño de la órbita, o cómo se deforma la órbita a lo largo de la línea de visión, entre otros. Todas estas propiedades determinan la forma, intensidad, y los continuos cambios en la señal de onda gravitacional. Los astrónomos de ondas gravitacionales miden los cambios en la señal lo mejor posible, y entonces trabajan inversamente para entender las propiedades de la fuente astrofísica.



**Figura 4:** Ésta muestra nuestras mejores estimaciones de las masas de los dos componentes de la binaria. Cualquier masa dentro de la franja diagonal está permitida. Para cualquier punto dentro del contorno, podemos trazar una línea horizontal a la izquierda y una línea vertical hacia la parte inferior indicando las masas que corresponden a la solución para esos datos de onda gravitacional. Los colores indican los resultados para casos de espín bajo (azul) y alto (rojo).

Éste es un proceso imperfecto porque las señales no son medidas perfectamente. La consecuencia es que los valores que asignamos a las propiedades de la binaria de estrellas de neutrones se encuentran en un rango de valores que describen fuente notablemente bien (los científicos a menudo llaman a este rango de números “barras de error”; en los análisis llevados a cabo por la colaboración LIGO-Virgo el rango de valores que obtenemos después de nuestro análisis se denomina “el posterior”).



**Figura 5:** Estas figuras muestran la deformación de marea de las estrellas. Cada eje corresponde a una de las dos estrellas, y cuán deformables podrían ser. El sistema GW170817 se encuentra en algún lugar de este gráfico. Las líneas discontinuas marcadas como 90% y 50% representan la probabilidad de que el sistema se encuentre debajo y a la izquierda de la línea discontinua. Los casos de espín alto se muestran en el panel de la izquierda, y los casos de espín se muestran en el panel de la derecha.

Los análisis de ondas gravitacionales dan un valor para las masas de los objetos individuales en la binaria entre 0.86 y 2.26 masas solares. No podemos medir el espín con gran precisión para este evento, y los diferentes espines cambian la señal de forma similar a como la cambiarían diferentes masas. Si

asumimos que los objetos están girando sobre sí mismos lentamente, entonces los datos están igualmente bien descritos por masas entre 1.17 y 1.60 masas solares. En cualquier caso, estas masas son consistentes con las masas de todas las estrellas de neutrones conocidas, una de las razones por las que pensamos que éste es un sistema binario de estrellas de neutrones.

Otra propiedad que se puede medir bien con ondas gravitacionales es la distancia a la fuente (propriadamente dicho en el lenguaje de los astrónomos, la “distancia luminosa”). La distancia luminosa obtenida a partir de la señal de onda gravitacional fue de 40 megaparsecs (unos 130 millones de años-luz), y es consistente con la distancia a NGC 4993. Teniendo tanto la medida de la distancia como la identificación óptica de la galaxia nos permitió, por primera vez, llevar a cabo una medida conjunta de la constante de Hubble (link al *Hubble Constant Science Summary*).

Las estrellas de neutrones están hechas de materia superdensa, así que no se comportan como los objetos ordinarios que se encuentran en la Tierra. Esto significa que las observaciones son un laboratorio para estudiar materia superdensa. Los físicos describen esta materia con una relación llamada “ecuación de estado” que relaciona la presión y la densidad – similar a la más familiar “ley de los gases ideales”

$PV=nRT$ . Existen muchas posibles ecuaciones de estados, y a los astrónomos les gustaría saber cuál es la que mejor describe las estrellas de neutrones. Para estas estrellas, la masa y la ecuación de estado determinan el tamaño de la estrella, así como sus cambios de potencial gravitatorio cuando la estrella se comprime por la gravedad o por la presencia de su compañero

cercano (lo que se conoce como “deformación de marea”). Esto a su vez puede cambiar la señal de onda gravitacional. El análisis de GW170817 nos proporciona interesantes límites en la deformación de marea de las estrellas de neutrones, pero definitivamente no nos dice qué ecuación de estado las describe mejor.

### ¿Qué más podría ser?

Como con todos los descubrimientos trascendentales en astronomía, hay muchas cosas que hemos aprendido, pero todavía hay muchas preguntas sin respuesta. Las dos preguntas más relevantes que todavía tenemos sobre GW170817 están relacionadas con la naturaleza de los objetos. La señal electromagnética asociada nos indica que al menos uno de los objetos en el sistema binario era una estrella de neutrones, pero no significa que ambas lo sean. Incluso cuando ambas componentes tienen masas similares a las estrellas de neutrones conocidas, es posible que una de ellas sea un agujero negro. Los astrónomos nunca han visto un agujero negro con una masa similar a una estrella de neutrones, pero tampoco tienen ninguna evidencia observacional sólida que sugiera que no existan, así que es posible que GW170817 sea una binaria con una estrella de neutrones y un agujero negro. Sin embargo, dada la similitud en masa con las estrellas de neutrones conocidas, se prefiere la interpretación de que tenemos una binaria de estrellas de neutrones. La otra pregunta pendiente es en qué se convirtió GW170817 *después de fusionarse*. Hay dos posibilidades: se convirtió en una estrella de neutrones muy masiva (sería la estrella de neutrones más grande conocida), o en un agujero negro (sería el agujero negro más ligero conocido). Ambas posibilidades son tentadoras y fascinantes, pero nuestros datos simplemente no son suficientemente buenos para apuntar en una dirección u otra. Todo lo que sabemos es que el objeto, sea lo que sea, tiene una masa de aproximadamente 3 masas solares.

### Descubre más:

- Visita nuestras páginas web: <http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>

- Puedes leer nuestro artículo completo, que ha sido aceptado para publicación en *Physical Review Letters*, aquí.

## Glosario:

- **Agujero negro:** Una región del espacio-tiempo originada por una masa extremadamente compacta donde la gravedad es tan intensa, que impide que nada pueda escapar, incluida la luz.
- **Rayos gamma:** Radiación electromagnética de más alta energía en el espectro electromagnético.
- **Estrella de neutrones:** Objeto extremadamente denso que queda después del colapso de una estrella masiva.