

UNA NUEVA FUENTE DE ONDAS GRAVITACIONALES: SISTEMAS BINARIOS DE UNA ESTRELLA DE NEUTRONES Y UN AGUJERO NEGRO

¿QUÉ HEMOS DESCUBIERTO?

El 5 de enero de 2020, el [detector Advanced LIGO](#) en Livingston, Louisiana, en Estados Unidos, y el [detector Advanced Virgo](#) en Italia, observaron ondas gravitacionales consistentes con un tipo completamente nuevo de sistema astronómico. Las ondas gravitacionales fueron producidas por el final de dos de los objetos más extremos del universo girando uno alrededor del otro: uno, una [estrella de neutrones](#), y, el otro, un [agujero negro](#). LIGO y Virgo observaron las últimas órbitas ([fase de espiral](#)), seguidas de la fusión de la estrella de neutrones con el agujero negro. Sorprendentemente, solo 10 días después una segunda señal de onda gravitacional procedente de la fase de espiral y fusión de una estrella de neutrones con un agujero negro, fue observada, esta vez tanto por los dos detectores Advanced LIGO (en Livingston y también en Hanford, Washington) como por el detector Virgo. Esta es la primera vez que se han observado ondas gravitacionales procedentes de una combinación de estrellas de neutrones y agujeros negros (véase [Figura 1](#)). Antes de este nuevo descubrimiento, las ondas gravitacionales habían sido observadas procedentes de fusiones de pares de agujeros negros y de pares de estrellas de neutrones. Nuestros nuevos descubrimientos han sido apodados como [GW200105](#) y [GW200115](#).

Estos dos descubrimientos representan las primeras detecciones de sistemas de estrella de neutrones y agujero negro (ENAN). Durante varias décadas, la existencia de los sistemas ENAN había sido predicha, pero sin ninguna evidencia observacional convincente hasta ahora. Con la observación de sistemas ENAN, hemos visto finalmente todos los tres tipos de sistemas binarios que pueden formarse a partir de agujeros negros y estrellas de neutrones. Sistemas formados por agujeros negros y estrellas de neutrones reciben el nombre de [“sistemas de objetos compactos”](#). Estos nuevos descubrimientos, junto con las futuras observaciones de sistemas de objetos compactos, arrojarán luz sobre el nacimiento, vida y muerte de las estrellas, así como sobre los entornos en los que se forman.

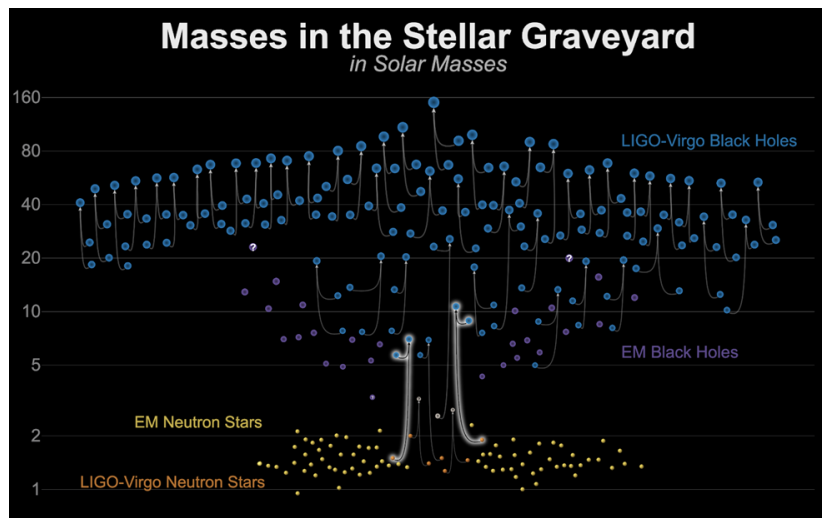


Figura 1: Masas de estrellas de neutrones y agujeros negros detectados a través de ondas gravitacionales y observaciones electromagnéticas. Los círculos amarillos y púrpuras representan las observaciones electromagnéticas de estrellas de neutrones y agujeros negros, respectivamente, mientras que los círculos naranjas y azules son las correspondientes detecciones utilizando ondas gravitacionales. Nuestras señales, GW200105 y GW200115, están destacadas y corresponden a las fusiones de estrellas de neutrones con agujeros negros. (Crédito de la imagen: LIGO-Virgo & Frank Elavsky, Aaron Geller, Northwestern University.)

DETECTANDO SEÑALES DE ONDAS GRAVITACIONALES

La búsqueda de señales de ondas gravitacionales en los datos registrados por los detectores utiliza [“filtrado por comparación”](#). Este método compara los datos observados con ruido con predicciones de señales a partir de la [Relatividad General](#) de Einstein. El filtrado por comparación puede identificar señales de ondas gravitacionales procedentes de datos con ruido en una manera similar a cómo podemos distinguir instrumentos individuales en una pieza musical. Consideramos que GW200115 es una señal de onda gravitacional de origen astrofísico con un nivel de confianza muy alto, con una posibilidad de que se deba a ruido aleatorio en los datos por debajo de **1 evento en 100.000 años**. La naturaleza astrofísica de GW200105 es más compleja de establecer estadísticamente, pero claramente sobresale por encima de todos los efectos de ruido jamás vistos, y consideramos que la posibilidad de que una señal así se deba a ruido está por debajo de **1 evento en 2,8 años**.

Visita nuestras
páginas web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Las fusiones de ENAN pueden, en principio, producir luz en todo el [espectro electromagnético](#). Desafortunadamente, la posición en el cielo de las fuentes ha podido ser medida solo de manera muy imprecisa, en un área del cielo entre 2.400 y 29.000 veces el tamaño de la luna llena. Teniendo en cuenta además la gran distancia a la que se encontraba la fuente (comentado en más detalle más abajo), esto hacía bastante improbable la observación de luz en el espectro electromagnético, y no se ha observado ninguna. Las futuras observaciones de fusiones ENAN podrían producir luz observable, lo que podría probablemente revelar cómo el agujero negro “distorsiona gravitatoriamente” (desgarrando) la estrella de neutrones. Esto podría proporcionar información sobre la forma extrema de la materia que forma las estrellas de neutrones.

PROPIEDADES DE LAS FUENTES

Las ondas gravitacionales codifican información valiosa sobre su origen, como por ejemplo las masas del agujero negro y la estrella de neutrones. El agujero negro y la estrella de neutrones que dieron lugar a GW200105 eran de aproximadamente 8,9 veces y 1,9 veces más masivas que nuestro Sol (con masa representada por M_{\odot}), respectivamente. El evento GW200105 ocurrió hace aproximadamente 800 millones de años, cientos de millones de años antes de que los primeros dinosaurios aparecieran en la Tierra. Para el evento GW200115, estimamos que el agujero negro y la estrella de neutrones tenían masas de alrededor de $5,7 M_{\odot}$ y $1,5 M_{\odot}$ respectivamente, y su fusión sucedió alrededor de hace mil millones de años. Las masas están representadas en la **Figura 2**.

Encontramos que la rotación del agujero negro para GW200105 podría estar entre 0 y hasta un 30% de la rotación máxima de los agujeros negros, mientras que para GW200115 la rotación se sitúa entre 0 y un 80% de la rotación máxima. No tenemos pruebas contundentes de la rotación de la estrella de neutrones ya que nuestras medidas no son sensibles a ellas (véase **Figura 3**).

¿Por qué pensamos que hemos observado un sistema ENAN? Para producir las ondas gravitacionales observadas, los objetos tienen que ser muy compactos y densos en comparación con las estrellas típicas, pues de lo contrario se harían pedazos antes de la fusión. Dado que las masas de los objetos más masivos en ambos sistemas binarios son de $8,9 M_{\odot}$ y $5,7 M_{\odot}$, los únicos objetos conocidos que podrían asociarse a estas masas

son agujeros negros. Las masas de los objetos más ligeros están alrededor de $1,9 M_{\odot}$ y $1,5 M_{\odot}$, mucho más ligeros que cualquier agujero negro conocido. Estas masas son consistentes con estrellas de neutrones conocidas, como las que se han observado en la Vía Láctea, o con ondas gravitacionales (p.ej., [GW170817](#)). Las masas de los agujeros negros son consistentes con las predicciones de modelos de formación y evolución estelar.

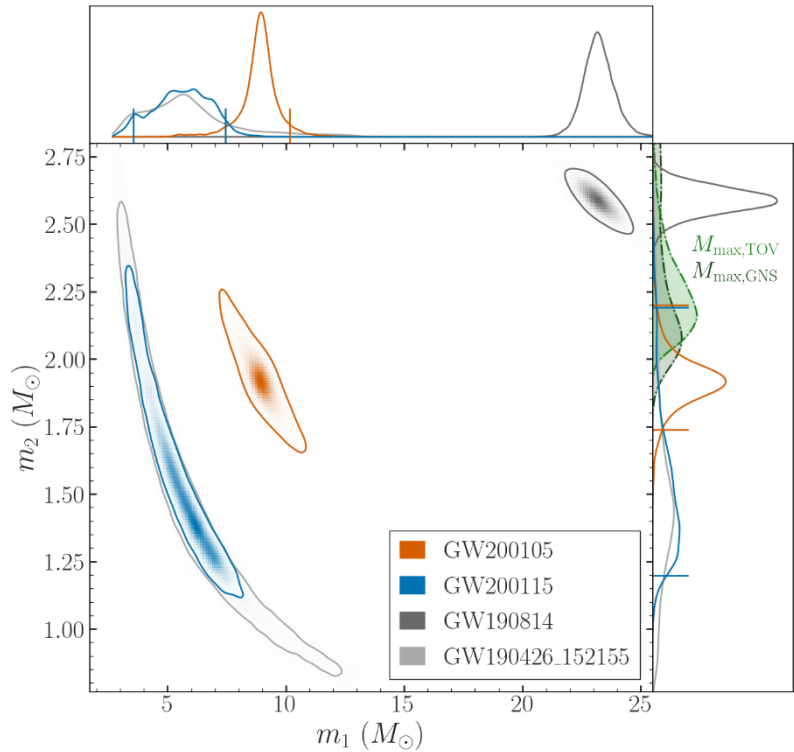


Figura 2: Resumen de nuestra información sobre las masas de los objetos que originaron GW200105 y GW200115. El eje horizontal representa la masa del objeto más masivo (el agujero negro), mientras que el eje vertical representa la masa del objeto más ligero (la estrella de neutrones). La región sombreada indica las combinaciones de masas consistentes con los datos, en naranja para el primer evento y en azul para el segundo. Las zonas sombreadas más oscuras indican mayor concordancia, es decir, una mayor probabilidad para tales combinaciones de masas. La gráfica en la parte superior resume la información correspondiente a las masas de los agujeros negros; por ejemplo, la curva azul muestra que el agujero negro de GW200115 tenía una masa entre unas $3,5 M_{\odot}$ y unas $7,5 M_{\odot}$. Las gráficas en la parte derecha resumen la información correspondiente a las masas de las estrellas de neutrones; por ejemplo, la curva naranja indica que la estrella de neutrones de GW200105 tenía una masa entre $1,75 M_{\odot}$ y $2,2 M_{\odot}$. Las regiones sombreadas en verde en esta gráfica en la parte derecha resume también la información astronómica disponible actualmente sobre cuán masivas pueden ser las estrellas de neutrones, mostrando que nuestros objetos observados tienen masas suficientemente pequeñas para ser estrellas de neutrones. La figura también muestra información sobre dos descubrimientos anteriores de ondas gravitacionales anteriores: GW190814, que es probablemente la fusión de un agujero negro de $23 M_{\odot}$ con otro agujero negro de $2,5 M_{\odot}$ (el más ligero jamás observado); y GW190426_152155, una señal que parece un sistema ENAN, pero que es tan débil que no está claro si tiene origen astrofísico.

¿CÓMO SE FORMARON, Y CON QUÉ FRECUENCIA OCURRE?

Así que, ¿cómo se formaron estos sistemas ENAN? Hay dos posibilidades principales. Una de ellas comienza con dos estrellas girando una alrededor de la otra. Las estrellas tienen tales masas que al envejecer eventualmente explotan en explosiones de supernova, dejando como remanente una estrella un agujero negro y la otra una estrella de neutrones. Esta opción recibe el nombre de “evolución binaria aislada”. La otra posibilidad es que las estrellas de neutrones y los agujeros negros se formen por separado en explosiones de supernova no relacionadas, y solo después se encuentren ambos objetos. Esta opción recibe el nombre de “interacción dinámica” y puede ocurrir en los entornos estelares densos como los [cúmulos globulares](#). Para distinguir entre estas dos posibilidades, las orientaciones de las rotaciones de los agujeros negros proporcionan un claro indicio. En la evolución binaria aislada, la dirección de rotación de los agujeros negros tiende a alinearse con la órbita del sistema binario, es decir, esperamos que la estrella de neutrones orbite en el plano ecuatorial del agujero negro. En cambio, en el escenario de la interacción dinámica no hay una preferencia por ninguna dirección particular para la rotación, y por tanto la órbita de la estrella de neutrones podría tener cualquier orientación relativa al plano ecuatorial del agujero negro.

Las rotaciones inferidas de los agujeros negros de GW200105 no nos permiten distinguir entre estos escenarios de formación. Sin embargo, para GW200115, encontramos que la dirección de rotación del agujero negro es muy probablemente opuesta a la dirección de la órbita del sistema binario. Por ejemplo, si la estrella de neutrones orbita alrededor del agujero negro en sentido horario, entonces el agujero negro rotaría sobre su eje en sentido antihorario. Esto nos da una pista de que la fuente de GW200115 podría haberse formado en un entorno denso, como un cúmulo globular.

¿Cuántos sistemas ENAN en el universo se fusionan en un período determinado de tiempo? La observación de dos sistemas ENAN nos indica que entre 5 y 15 de estos sistemas se fusionan por año a una distancia de mil millones de años-luz. Además, esta estimación en la tasa de fusiones podría ser explicada tanto únicamente por la evolución binaria aislada como únicamente por la interacción dinámica en cúmulos de estrellas jóvenes, pero no podemos descartar ninguno escenario específico.

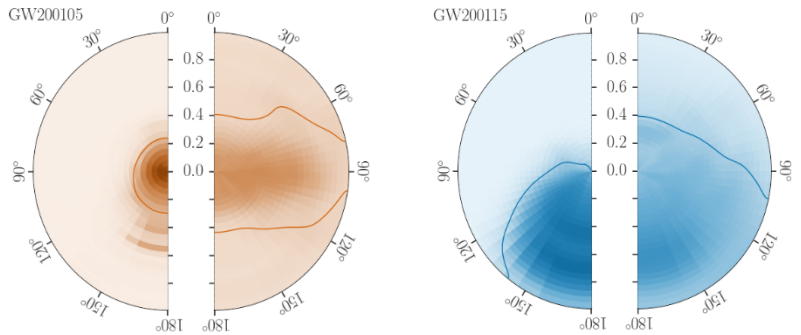


Figura 3: Intensidad y dirección de la rotación inferida de los agujeros negros (discos a la izquierda) y estrellas de neutrones (discos a la derecha) de GW200105 y GW200115. El radio del disco indica la intensidad de la rotación, y varía entre 0 (no hay rotación) y 1 (máxima rotación de los agujeros negros). La dirección de rotación se muestra como un ángulo, que varía entre 0° (objetos rotando en la misma dirección que la órbita del sistema binario) y 180° (objetos rotando en dirección opuesta a la órbita del sistema binario). Las zonas sombreadas indican los valores probables de la intensidad y dirección de la rotación. El disco más a la izquierda tiene zonas sombreadas más intensas cerca del centro, indicando que el agujero negro de GW200105 tiene una rotación que es probablemente muy pequeña. La zona sombreada del segundo disco se extiende hacia abajo, indicando que el agujero negro de GW200115 podría estar rotando en dirección opuesta al movimiento orbital.

PARA SABER MÁS:

Visita nuestras páginas web:

www.ligo.org, www.virgo-gw.eu, gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Lea una versión accesible y gratuita del artículo científico completo [aquí](#).

Traducción al castellano por Isabel Cordero-Carrión y Nicolás Sanchis-Gual (a partir de la versión original en inglés en https://www.ligo.org/science/Publication-NSBH_Discovery)

GLOSARIO

Fase de espiral: El movimiento orbital de objetos en un sistema binario como por ejemplo un sistema de una estrella de neutrones y un agujero negro. A medida que el sistema binario pierde energía por la emisión de ondas gravitacionales, la estrella de neutrones y el agujero negro orbitan más y más rápido, y se acercan cada vez más, hasta fusionarse finalmente.

Estrella de neutrones: La reliquia de una estrella masiva que ha alcanzado el final de su vida. Cuando una estrella masiva ha agotado su combustible nuclear, muere de una forma catastrófica, una supernova, que con frecuencia acaba con la formación de una estrella de neutrones: un objeto tan masivo y denso que los átomos no pueden mantener su estructura tal y como normalmente se encuentran en la Tierra. Estas estrellas son tan masivas como nuestro Sol, pero solo tienen varias decenas de kilómetros de diámetro.

Agujero negro: Región del espacio-tiempo con una gravedad tan intensa que evita que cualquier cosa, incluso la luz, escape. Los agujeros negros tienen diferentes tamaños: los agujeros negros de masa estelar se originan en los colapsos estelares y sus masas varían entre unas pocas masas solares y alrededor de 65 masas solares; los agujeros negros de masa intermedia varían entre unas 100 masas solares y 10^3 masas solares; finalmente, los agujeros negros supermasivos los agujeros negros supermasivos varían entre más de 10^3 masas solares y más de 10^9 masas solares.

Sistema binario compacto: Sistema formado por dos objetos remanentes estelares compactos, p. ej., estrellas de neutrones y agujeros negros, girando uno alrededor del otro muy próximos.

Filtrado por comparación: Técnica para detectar señales enterradas en datos ruidosos. Las plantillas de señales de onda gravitacional calculadas a partir de la Relatividad General son escaneadas en todos los datos, y avisan cuando patrones comparables aparecen en los datos.

Relatividad General: Teoría de la gravedad propuesta por Albert Einstein en 1915. En esta teoría, espacio y tiempo son un tejido maleable que se deforma en presencia de materia y energía, y en donde los objetos siguen las trayectorias a través de este espacio curvado.

Cúmulo globular: Un grupo muy denso de estrellas ligadas conjuntamente gravitacionalmente.

Espectro electromagnético: La luz visible varía de roja a violeta, pero fuera de este rango de colores que nuestros ojos pueden ver, el espectro continúa. Más allá del rojo tenemos el infrarrojo, las microondas y las ondas de radio, y más allá del violeta tenemos el ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. Este es el espectro de la radiación electromagnética, y los astrónomos utilizan cada parte del espectro para aprender más sobre el Universo. Toda la radiación electromagnética viene dada por oscilaciones en los campos eléctrico y magnético, y se diferencian en su frecuencia o longitud de onda (el tamaño de una oscilación).

Año luz: Unidad de distancia equivalente a la distancia que la luz recorre en un año. Un año-luz es aproximadamente igual a 9,46 billones de kilómetros (o alrededor de 5,88 billones de millas).

M_\odot (masa solar): Masa del Sol (alrededor de 2×10^{30} kilogramos). La masa solar es una unidad común para representar masas en astronomía.