

ME DAS VUELTAS (CÓMO UNA ESTRELLA): EN BÚSQUEDA DE ONDAS GRAVITACIONALES CONTINUAS DE ESTRELLAS DE NEUTRONES BINARIAS DESCONOCIDAS

Las **estrellas de neutrones** (NS, del inglés Neutron Stars) son el resultado de explosiones de supernova, el remanente de una estrella primitiva con una masa de entre 10 y 25 veces la masa del Sol. Estos objetos compactos tienen un radio típico de 10km y una masa similar a la de nuestro Sol, haciendo de las NS uno de los entornos más extremos donde se ha observado materia. Actualmente, la estructura y composición de estos objetos compactos es un campo de investigación activo e interdisciplinar, que une trabajos de las comunidades de física de partículas y astrofísica.

La extrema compacidad (o densidad) de estos objetos hace de ellos un interesante laboratorio para poner a prueba efectos relativistas como la emisión de radiación gravitacional. De hecho, los detectores Advanced LIGO y Advanced Virgo han detectado numerosos eventos de ondas gravitacionales relacionados con **la fusión de dos NS**. Una de esas detecciones, **GW170817**, incluso estuvo acompañada por un homólogo electromagnético, generando la primera detección multi-mensajera de un evento astrofísico mediante ondas gravitacionales y luz.

Las **ondas gravitacionales continuas** (CW, del inglés Continuous Waves) son otro canal mediante el cual se puede investigar la estructura interna de NS en rotación rápida. Según la teoría, las NS pueden sostener desviaciones respecto a una forma simétrica, bien sea por las imperfecciones en la corteza exterior, una perturbación oscilante en la estructura interna o precesiones libres debidas a desalineaciones entre la simetría y los ejes de rotación. A medida que la NS gira rápidamente, dichas deformaciones producirían radiación gravitacional en forma de CW. Esta forma de radiación gravitacional es varios órdenes de magnitud más débil que las producidas durante la fusión de objetos compactos. Aun así, duran largos periodos de tiempo (de meses a años), permitiendo la integración de largos flujos de datos para acumular una alta relación señal/ruido.

Las búsquedas para este tipo de señal están divididas acorde con lo que se conoce sobre las potenciales fuentes. Por ejemplo,

las búsquedas específicas (targeted searches en inglés) se centran en NS para las cuales la posición en el cielo y la frecuencia de rotación son conocidas por medios electromagnéticos, mientras que las búsquedas dirigidas apuntan a ciertas regiones del cielo donde pueden estar situadas NS desconocidas. Nosotros presentamos los resultados de una búsqueda del cielo completo, que significa que buscamos señales de CW provenientes de NS completamente desconocidas desde cualquier dirección del cielo. Particularmente, nos centramos en NS desconocidas en **sistemas binarios**. La señal esperada de NS aisladas es una onda de larga duración, cuya frecuencia se reduce lentamente debido a la emisión de energía a través de diferentes medios como la radiación electromagnética o gravitatoria. Este efecto de ralentización de la rotación (**spindown** en inglés) es suficientemente lento como para ser ignorado dada la población de NS consideradas por esta búsqueda. Desde el punto de vista del detector en la Tierra, la señal presenta una modulación de frecuencia debido a la rotación diaria y los movimientos orbitales de nuestro planeta. Esta señal es mucho más compleja para NS en un sistema binario, ya que se tiene que considerar una segunda **modulación de Doppler** a causa del movimiento relativo de la fuente alrededor de su cuerpo acompañante.

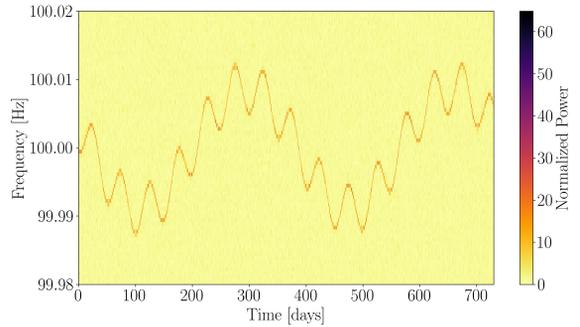


Figura 1: Ejemplo de una CW fuerte simulada como se muestra en el espectrograma. Esta señal corresponde a una NS deformada rotando 50 veces por segundo orbitando un acompañante con un periodo orbital de 50 días. Las oscilaciones más amplias, con periodicidad de 365 días, corresponden a la modulación de Doppler inducida por el movimiento orbital de la Tierra alrededor del Sol. Las más estrechas, con periodicidad de 50 días, corresponden al movimiento orbital de la fuente de CW alrededor de su acompañante. La duración del flujo de datos (2 años) se toma para ser más larga que la usada en esta búsqueda (6 meses) debido a fines ilustrativos.

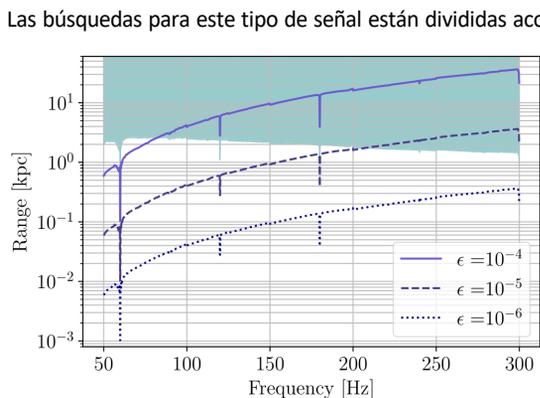


Figura 2: Alcance astrofísico máximo cubierto por nuestra búsqueda en función de la frecuencia. Las curvas representan distintos valores de deformación, caracterizados como la elipticidad para una NS. Mayores deformaciones y frecuencias más altas tienden a generar CW más fuertes, permitiéndonos sondearlas a mayores distancias. La región sombreada implica tasas de spindown más allá de las probadas por la búsqueda, sin asumir ningún otro mecanismo de equilibrio. Como referencia, la NS conocida más cercana a nosotros está situada 0.1 kpc de distancia.

En esta búsqueda, aplicamos una variación de la **transformada de Hough** llamada BinarySkyHough, que opera utilizando un **espectrograma** de los datos. Este espectrograma aporta información sobre qué frecuencias son las más destacadas en los datos a medida que la observación progresa. La idea básica es que una señal CW podría aparecer como un exceso de potencia en el espectrograma que modula de una forma muy particular, como se ejemplifica en la Figura 1. Podemos describir trazas significativas usando un conjunto de parámetros relacionados con las propiedades físicas de la fuente considerada, como su frecuencia de rotación o su posición en el cielo; por tanto, buscar una CW es cuestión de identificar trazas significativas en los datos.

Debido a la inclusión de parámetros orbitales binarios, que describen la forma de una órbita binaria, tenemos que buscar más parámetros que cuando exploramos NS aisladas. Esto plantea un problema para los algoritmos de búsqueda típicos, a medida que el coste computacional, fácilmente, se vuelve insostenible. Una solución sencilla es usar **Unidades de Procesamiento Gráfico** (GPU) para realizar este tipo de búsquedas eficientemente, ya que son capaces de agilizar cálculos simples llevando a cabo una gran cantidad de ellos en paralelo.

Usamos datos del principio del tercer periodo de observación de los detectores Advanced LIGO y Advanced Virgo, abarcando seis meses de datos desde abril hasta septiembre del 2019, para buscar CW de NS desconocidas en sistemas binarios desconocidos en la banda más sensible de los detectores. No encontramos evidencias de señales de CW. Como resultado, estimamos la sensibilidad de nuestra búsqueda mediante el estudio de la recuperación de una población de señales simuladas. Inicialmente esta sensibilidad está expresada en términos de la amplitud de CW más débil detectable por nuestra tubería. Conseguimos la mejor sensibilidad hasta la fecha para el espacio de parámetros analizado, con la amplitud detectable más débil un 60% menor que las estimaciones anteriores.

Interpretamos estos resultados en términos de responder a dos preguntas astrofísicamente interesantes, concretamente, qué tan lejos de la Tierra fue capaz de sondear nuestra búsqueda y cuál es la deformación máxima permitida para una fuente de CW dentro del rango probado por nuestra búsqueda. Las figuras 2 y 3 resumen el alcance máximo de nuestra búsqueda y la máxima deformación permitida para una fuente de CW como una función de la frecuencia de la onda gravitacional. Como se ha comentado anteriormente, consideramos fuentes de CW con spindown negligible. Esta suposición establece un límite en la máxima deformación sondeada para una NS, representado por las regiones sombreadas en dichas figuras. En otras palabras, si no existen mecanismos de equilibrio, las regiones sombreadas se excluyen de nuestros resultados, ya que implicarían tasas de spindown más altas que las cubiertas por esta búsqueda. Un posible mecanismo de equilibrio que contrarresta el spindown de la NS podría ser la **acreción** de materia del cuerpo acompañante. Estos resultados muestran la mejora creciente de los detectores Advanced LIGO y Advanced Virgo a medida que alcanzan su sensibilidad de diseño, permitiéndonos acercarnos a los límites superiores de las propiedades de la NS cada vez más cerca de los resultados estimados proporcionados por las simulaciones numéricas.

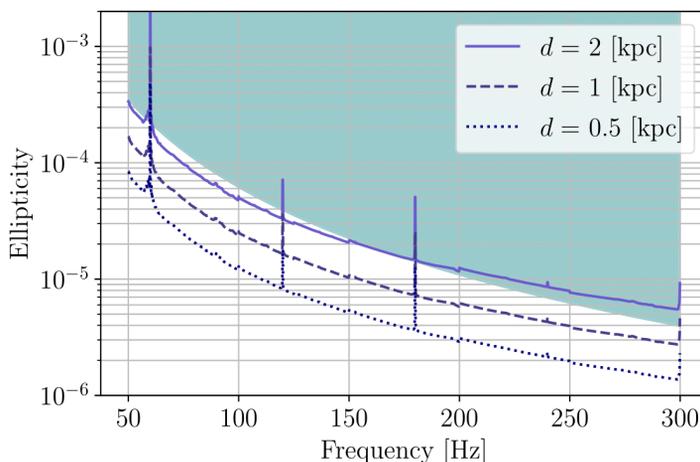


Figura 3: Máxima deformación permitida para una NS dentro de nuestro alcance de búsqueda en función de la frecuencia. Estas curvas representan como de deformada debe de estar una NS para generar una CW detectable por nuestra búsqueda. Dado que la amplitud de una CW decae con la distancia, fuentes más cercanas están obligadas a tener elipticidades más bajas que aquellas más lejanas. La región sombreada implica tasas de spindown más allá de las probadas por la búsqueda, sin asumir ningún otro mecanismo de equilibrio.

DESCUBRE MÁS:

Visita nuestras páginas web:

www.ligo.org, www.virgo-gw.eu

Lee un preprint gratuito del artículo científico [aquí](#).

Lee una introducción a las ondas gravitacionales continuas [aquí](#).

Visita nuestras páginas web:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>



GLOSARIO

Estrella de neutrones: Remanente del proceso de la supernova sufrido por una estrella con una masa entre 10 y 25 veces la masa de nuestro Sol. Las estrellas de neutrones típicas tienen una masa alrededor de 1-2 masas solares y un radio de 10-15 kilómetros, siendo uno de los objetos más compactos jamás descubierto.

Onda gravitacional continua: Radiación gravitatoria de larga duración. Consulte [aquí](#) para más detalles.

Elipticidad: Medida de qué tan lejos de esférico está un cuerpo, definido como la deformación relativa a lo largo del plano ecuatorial con respecto a la deformación a lo largo de la dirección perpendicular.

Spindown: Velocidad a la que una estrella de neutrones en rotación se ralentiza debido a la emisión de energía a través de ondas electromagnéticas o gravitacionales.

Modulación de Doppler: Cambio en la frecuencia de una onda debido al movimiento relativo de la fuente y el observador.

Sistema binario: Par de objetos astronómicos unidos por su atracción gravitacional.

Transformada de Hough: Algoritmo para identificar formas bien descritas en imágenes como las descritas por un espectrograma.

Espectrograma: Representación visual de la composición de frecuencias de una serie temporal.

Unidades de Procesamiento Gráfico (GPU): Hardware especializado adecuado para el procesamiento de datos mediante paralelización masiva.

Accreción: Transferencia de materia entre dos cuerpos en órbita debido a la acción de la gravedad.

Kiloparsec (kpc): Mil parsecs. Un **parsec** es una unidad astronómica de longitud que corresponde aproximadamente a 3 años luz o 30 billones de kilómetros.