

BÚSQUEDA DE ONDAS GRAVITACIONALES PROCEDENTES DE ESTRELLAS DE NEUTRONES EN ROTACIÓN EN NUESTRA GALAXIA CON DATOS DE O3 DE LIGO Y VIRGO

Desde 2015, tenemos una nueva forma de estudiar el Universo mediante la detección directa de ondas gravitacionales (GWs). Hasta la fecha, los interferómetros Advanced LIGO y Advanced Virgo han registrado [90 eventos de GW](#). Estas señales de GW fueron emitidas en las fases de espiral y fusión de sistemas binarios de agujeros negros de diversas masas, sistemas binarios de estrellas de neutrones (NSs) y también sistemas binarios mixtos, compuestos por [un agujero negro y una NS](#). Aunque en la realidad los sistemas binarios evolucionan durante millones de años hasta que las componentes finalmente se fusionan, en nuestros detectores aparecen como transitorios - solo duran del orden de segundos o minutos - porque su frecuencia aumenta rápidamente durante las últimas órbitas del sistema binario. Además de estas señales de corta duración, se esperan otros tipos de radiación GW que no cambian su frecuencia tan rápidamente y que pueden observarse durante meses y años. Estas **ondas gravitacionales continuas** (CWs) son el objeto principal de la búsqueda que aquí se presenta.

Entre las posibles fuentes astrofísicas de CWs se encuentran las NSs en rotación no axisimétricas (un ejemplo extremo de una esfera deformada en una forma no axisimétrica sería un balón de fútbol americano o de rugby). Las NSs son objetos extremadamente compactos - con masas similares a las del Sol comprimidas en una bola de unos 10 kilómetros de radio - formados en las secuelas de estrellas masivas que sufren explosiones de supernova al final de su vida. Las NSs pueden girar muy rápido, alcanzando frecuencias de hasta varios cientos de ciclos por segundo. Una NS en rotación puede emitir CWs detectables, con una frecuencia doble a la frecuencia de giro de la estrella, si posee una asimetría con respecto a su eje de rotación. Según los modelos teóricos actuales y las búsquedas anteriores de CWs de LIGO-Virgo, tal protuberancia asimétrica (a veces también llamada "montaña", "meseta elevada" o deformación en un lado de la NS) tendría como máximo unos pocos centímetros de altura. Cuanto mayor sea la asimetría de la NS, más intensas serán las GWs que genere. Por ejemplo, una protuberancia de unos pocos centímetros corresponde a una deformación de una NS respecto a la simetría esférica - también llamada **elipticidad** - de unas pocas partes por millón. Determinar la elipticidad de una NS no es fácil, pero una vez que se detecte proporcionará una visión realmente única de las propiedades de la materia extremadamente densa y los intensos campos magnéticos de los que está compuesta la estrella. Actualmente estas propiedades son muy poco conocidas. Además de unas 3000 NS conocidas por la comunidad astronómica por ser electromagnéticamente brillantes (por ejemplo, como radio **púlsares**), se estima que nuestra galaxia, la

Vía Láctea, contiene hasta 100 millones de NSs que no son visibles en el espectro electromagnético porque, o bien son demasiado débiles para ser detectadas, o bien su emisión electromagnética no está dirigida hacia la Tierra. Sin embargo, si alguna de estas NSs es lo suficientemente asimétrica, podrá emitir GWs detectables por nuestros interferómetros. El objetivo final de nuestra búsqueda es detectar las señales de GWs de estos millones de objetos no observados hasta ahora.

Búsquedas como ésta se han llevado a cabo utilizando los datos de Advanced LIGO y Advanced Virgo anteriormente, en los periodos de observación O1, O2 y la primera mitad del O3 (O3a). Aquí resumimos los resultados recientes obtenidos en los datos más sensibles hasta ahora, el periodo de observación LIGO-Virgo O3 (abril de 2019 - marzo de 2020).

La detección de señales de CWs muy débiles enterradas en los datos del detector es una tarea difícil. Una señal de CWs es básicamente periódica, pero muchos factores modifican las señales recibidas en el detector. Uno de ellos es el efecto Doppler, que desplaza la frecuencia de la señal a lo largo del tiempo, ya que nuestros detectores están situados en la Tierra

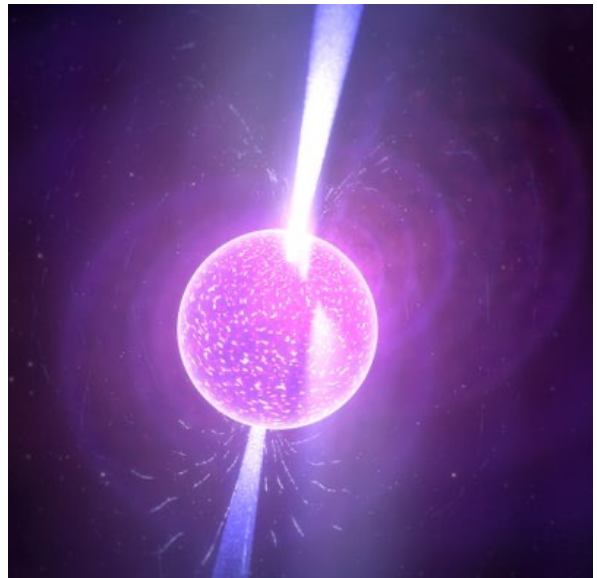


Figura 1: Representación artística de una estrella de neutrones no axisimétrica en rotación. Crédito de la imagen: Kevin Gill [Flickr](#) ([CC by 2.0](#))

VISITE NUESTRAS PÁGINAS WEB:

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



que gira y se mueve alrededor del Sol. Por lo tanto, la frecuencia de la señal se modula en función de las posiciones relativas de la fuente y el detector, y de la propia frecuencia de la GW.

Para complicar aún más las cosas, la frecuencia de las GWs también evolucionará en el tiempo - una NS pierde energía rotacional a través de la emisión de GWs y en radiación electromagnética, lo que provoca una disminución gradual de la frecuencia de la señal llamada **spin-down**. También buscamos señales de GWs que aumenten su ritmo de rotación (aumentando su frecuencia) para asegurarnos de no perder señales potencialmente interesantes con estas características. Un ejemplo de este tipo de señal sería un sistema binario de objetos compactos ligeros, por ejemplo, agujeros negros de masa planetaria, en su fase de espiral.

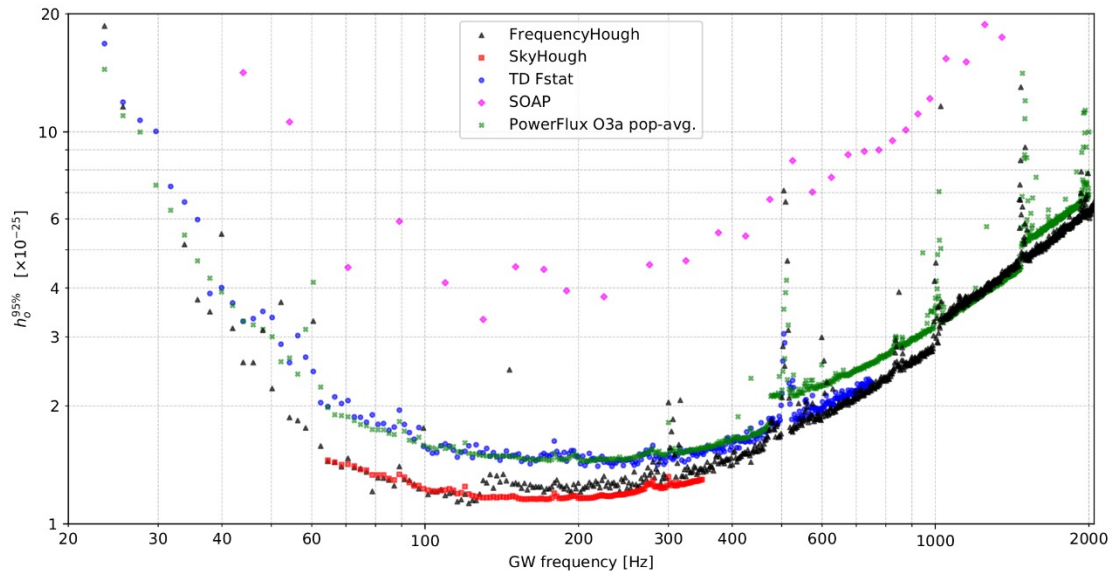


Figura 2: Comparación de los límites superiores de confianza del 95% de la amplitud de la GW en un rango de frecuencias, obtenidos por los cuatro canales de análisis de datos: FrequencyHough (triángulos negros), SkyHough (cuadrados rojos), SOAP (diamantes magenta) y Time-Domain F-statistic (círculos azules). Los límites superiores de la búsqueda previa de LIGO-Virgo, obtenidos con el canal PowerFlux en la primera parte del periodo O3 (datos O3a) están marcados con cruces verde oscuro (Fig. 15 en la publicación).

Para una fuente específica con una posición en el cielo, frecuencia de giro y *spin-down* determinados, podemos calcular con precisión la **forma de onda** de la CW y detectar la señal oculta en los datos utilizando técnicas de análisis de datos bien conocidas, como el método de **filtrado coincidente**. La verdadera dificultad reside en el hecho de que se desconocen las propiedades astrofísicas reales de la fuente de CWs - por lo que tenemos que pasar por un gran número de posibles combinaciones de parámetros, lo que hace que la búsqueda sea computacionalmente complicada. Para poder afrontarlo de forma práctica, hemos diseñado canales de búsqueda de varios pasos (jerárquicos), que emplean el filtrado coincidente en pequeños fragmentos de datos (con duraciones de segmentos de tiempo que van desde media hora hasta varios días), y luego combinan estos fragmentos parciales de información para recabar pruebas de la presencia de una señal de CWs con parámetros particulares en los datos. Los métodos de búsqueda jerárquicos son menos sensibles que el procedimiento óptimo, que es una aplicación directa del filtrado coincidente, pero son robustos con respecto a las incertidumbres del modelo de la señal, y prácticamente factibles desde el punto de vista computacional, a pesar de la falta de información sobre los parámetros de la señal. Otra complicación está relacionada con los propios datos del detector: los datos contienen, en muchas frecuencias, diversas perturbaciones instrumentales que pueden parecerse mucho a las señales de CWs. Una parte importante del análisis consiste en identificar estas señales espurias y eliminarlas de la lista de señales candidatas a GWs.

La **sensibilidad** alcanzada por los detectores Advanced LIGO y Advanced Virgo durante el periodo O3, que duró aproximadamente un año, permitió la búsqueda más sensible de fuentes de CW desconocidas que se haya hecho nunca: el sondeo de todo el cielo, con frecuencias de GW entre 20 Hz y 2048 Hz y a un ritmo de cambio de frecuencia (rango de *spin-down*) de -10^{-8} Hz/s a 2×10^{-9} Hz/s. En la búsqueda actual, los resultados se obtuvieron mediante cuatro canales de análisis de datos jerárquicos independientes. Los métodos cubrieron diferentes rangos de frecuencia y de *spin-down*, utilizaron segmentos de datos de diferentes longitudes, aplicaron diferentes procedimientos de limpieza de datos para reducir el impacto del ruido en los datos y utilizaron diferentes técnicas para el seguimiento de posibles candidatas a señales de GWs, a veces empleando métodos modernos de **aprendizaje automático**, como las redes neuronales profundas.

Nuestros análisis no encontraron ninguna evidencia estadísticamente significativa de señales CWs en los datos de LIGO-Virgo de O3. Con el fin de restringir los modelos teóricos de la emisión de CWs, hemos calculado los límites superiores de la amplitud de GW: límites de lo intensa que podría ser una señal de CW sin todavía ser detectada. Los límites superiores se presentan en la **Figura 2**. Éstos corresponden a un 95% de confianza de que no hay amplitudes de señal superiores en los datos. Nuestros mejores límites superiores son una amplitud de señal de $1,1 \times 10^{-25}$ a la frecuencia de 111,5 Hz. Estos resultados son 1,5 veces mejores - limitan la amplitud a valores menores - que los del periodo de observación anterior, denominado O2.

La **Figura 3** muestra información astrofísica adicional que hemos aprendido con esta búsqueda, que es la relación entre la frecuencia, el *spin-down* y la distancia de una NS a una distancia de **100 pc (pársecs)** si su elipticidad fuera de al menos 3×10^{-7} . Del mismo modo, en el rango de frecuencias medio, alrededor de 550 Hz, podríamos detectar la señal de CWs hasta una distancia de 1 kpc (1000 pársecs), con una elipticidad superior a 5×10^{-7} . A modo de comparación, el radio de nuestra galaxia es de unos 15 kpc. Aunque no se puede afirmar que haya una detección, nuestros resultados son, sin embargo, interesantes desde el punto de vista astrofísico y arrojan más luz sobre las propiedades de las NSs galácticas. Nuestros límites superiores empiezan a sondear el rango de elipticidades de hasta $10^{-7} - 10^{-6}$ para algunos modelos de NSs más jóvenes en los que la deformación no se mantiene por la elasticidad de la corteza, sino por un campo magnético no axisimétrico.

Además de las restricciones sobre las elipticidades de las NSs aisladas, mostramos que nuestros resultados pueden utilizarse para hacer afirmaciones sobre la tasa y la abundancia de los hipotéticos agujeros negros muy ligeros (con masas como las de los planetas y los asteroides) en fase de espiral, que pueden haber sido creados en el Universo temprano y pueden constituir una fracción de la misteriosa [materia oscura](#). Las señales de GWs procedentes de sistemas binarios, en los que al menos una de las componentes es un agujero negro muy ligero, evolucionan su frecuencia muy lentamente durante su fase de espiral - durante mucho tiempo son prácticamente señales de CWs con un ligero *spin-up* en su frecuencia. Mostramos que las búsquedas de CWs pueden utilizarse en un futuro próximo para detectar tales objetos, proporcionando información sobre los agujeros negros ligeros, si es que están presentes en las proximidades de nuestro Sistema Solar.

A medida que los detectores Advanced LIGO y Advanced Virgo aumenten su sensibilidad, y con la ayuda del detector KAGRA en la red mundial, podremos detectar CWs procedentes de NSs en rotación con deformaciones aún más pequeñas, llegar a una porción más amplia de la Galaxia y poner a prueba otras hipótesis, como la existencia de agujeros negros muy ligeros. La detección de estas señales abrirá una nueva frontera en el estudio de estos fascinantes objetos compactos, que se convertirán en verdaderos laboratorios para la astrofísica y la física fundamental: una vez detectada una fuente de CWs, puede ser monitorizada, en principio, durante tiempos arbitrariamente largos. Esto nos permitirá aumentar la confianza de la detección hasta una certeza casi absoluta, medir los parámetros de la NS con una precisión extremadamente alta, calibrar nuestros detectores y poner a prueba teorías sobre la gravedad.

MÁS INFORMACIÓN

Visite nuestras páginas web:

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

Lea una preimpresión gratuita del artículo científico completo [aquí](#)

Traducción al castellano por Maria Rosselló Sastre e Isabel Cordero-Carrión (a partir de la [versión original en inglés](#)).

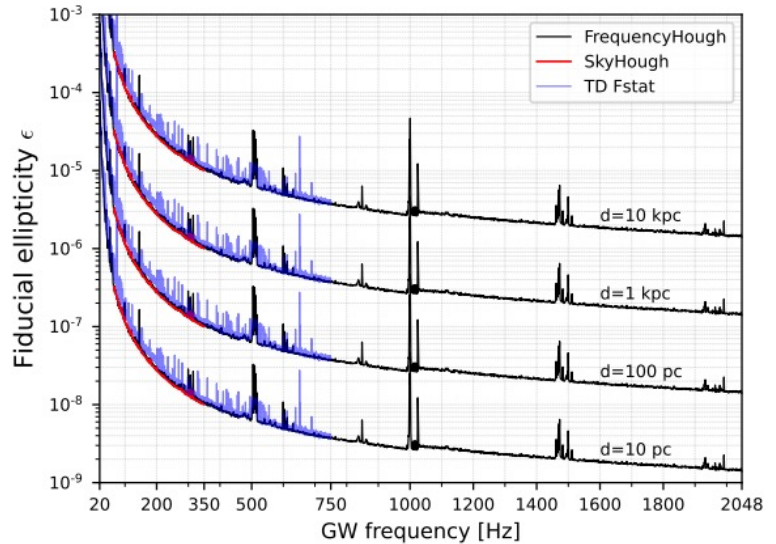


Figura 3: Elipticidad detectable de la NS, en función de la frecuencia de la GW a distancias de 10 kpc, 1 kpc, 100 pc y 10 pc (de arriba a abajo). Los resultados del canal FrequencyHough están marcados en negro, los de SkyHough en rojo y los de Time-Domain F-statistic en azul (panel izquierdo de la Fig. 16 en la publicación).

GLOSARIO

Aprendizaje automático: El estudio de algoritmos computacionales que pueden mejorar automáticamente a través de la experiencia y el uso de datos.

Elipticidad: A grandes rasgos, la elipticidad puede considerarse como la relación entre el tamaño Δr de la deformación, o "montaña" en la superficie de una estrella de neutrones, en comparación con el radio de la estrella, r : $\Delta r/r$. La elipticidad ecuatorial mide lo lejos que está un cuerpo de la esfericidad, definida como la deformación relativa a través del plano ecuatorial con respecto a la deformación a lo largo de la dirección perpendicular en el mismo plano. De forma similar, la elipticidad polar mide la diferencia entre un plano que pasa por los polos estelares y el plano ecuatorial.

Filtrado coincidente: Método de análisis de datos que consiste en correlacionar los datos con una forma de onda simulada para tratar de identificar las señales ocultas en el ruido de fondo del detector.

Forma de onda: el comportamiento de la amplitud de la señal en función del tiempo.

Hz: El hertz es una unidad de frecuencia en el Sistema Internacional de Unidades (SI), definida como un ciclo por segundo. Esta unidad debe su nombre a Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), quien demostró la existencia de las ondas electromagnéticas.

Límite superior: El límite superior de alguna cantidad (por ejemplo, la amplitud de las ondas gravitacionales) es el valor más pequeño que podríamos detectar con un 95% de confianza. Así, si no hemos detectado nada, tenemos un 95% de confianza en que no hay fuentes que produzcan valores superiores.

Ondas gravitacionales continuas: Forma de radiación gravitacional de larga duración. Consulte [aquí](#) para obtener más detalles.

Pársec (pc): Unidad de distancia muy utilizada en astronomía. Corresponde aproximadamente a 3,26 años luz, o 31 billones de kilómetros. Un kiloparsec (kpc) equivale a mil pc.

Púlsar: De "fuente de radio pulsante": estrella compacta en rotación, altamente magnetizada que emite haces de radiación electromagnética desde sus polos magnéticos.

Sensibilidad: Descripción de la capacidad de un detector para detectar una señal. Los detectores con menos ruido son capaces de detectar señales más débiles y, por lo tanto, se dice que tienen una sensibilidad más alta (o mayor).

Spin-down: Los púlsares son estrellas de neutrones en rotación que giran con tanta regularidad en una larga escala de tiempo que pueden ser tratados como [balizas de posición de referencia](#). Por lo general, se observa que su velocidad de rotación disminuye con el tiempo (lo que equivale a un aumento del periodo de rotación), ya que pierden energía de rotación con el tiempo. Esta disminución de la velocidad de rotación de la estrella de neutrones se denomina *spin-down*. Por el contrario, un aumento de la velocidad de rotación se denomina *spin-up* - esto puede ocurrir si un púlsar está en un sistema binario y está aumentando su giro por la acreción de materia de su compañero estelar.