

BÚSQUEDA DE ONDAS GRAVITACIONALES CONTINUAS PROCEDENTES DE RESTOS DE SUPERNOVAS EN LOS PRIMEROS DATOS DE O4A

Las estrellas de neutrones (NS) están entre los objetos más exóticos del universo. Nacen cuando las estrellas masivas mueren en explosiones energéticas que llamamos supernovas de colapso de núcleo. Estas explosiones desgarran la estrella y dejan una hermosa nebulosa difusa llamada remanente de supernova (SNR, **figura 1**). La NS se encuentra en el centro del remanente de la supernova cuando es joven y se aleja gradualmente a medida que el remanente se expande en el medio interestelar.

Las estrellas de neutrones son objetos extremadamente densos, con masa mayor de la masa del Sol empaquetada en el tamaño de una ciudad. Su composición y física subyacente siguen siendo algunas de las preguntas abiertas más intrigantes en la ciencia, atrayendo el interés de la astrofísica, la física nuclear y de partículas, y la física de la materia condensada. También son los imanes más fuertes del Universo, pueden girar a una velocidad increíble, con algunos rotando cientos de veces por segundo. Tradicionalmente se les conoce como "púlsares", ya que emiten pulsos de luz que atraviesan la línea de visión hacia la Tierra una o dos veces por cada rotación que hacen alrededor de su eje. Pero no todas las NS se detectan como púlsares, y sus interiores están en su mayoría lejos del alcance incluso de los telescopios electromagnéticos más sensibles en la Tierra y en el espacio. Las ondas gravitacionales continuas (CW) proporcionan una nueva herramienta para descubrir púlsares que antes se habían perdido y sondear sus exóticos interiores.

Las CW son ondas estables y duraderas en el espacio-tiempo que una NS podría emitir mientras gira. Estas señales provienen de pequeñas distorsiones o "grumos" en una NS rotatoria que no es perfectamente simétrica, con mayores desviaciones de la simetría produciendo una mayor amplitud de onda gravitacional (es decir, una señal más fuerte). Llamamos "triaxial" a esta estrella porque es una elipse tridimensional, similar a una pelota de rugby ligeramente deformada, como la que ha sido usada en algunos partidos. Se espera que las CW se emitan a una frecuencia dos veces superior a la de rotación de la estrella; por lo tanto, su detección ayudaría a revelar los púlsares faltantes.

Para los detectores avanzados LIGO, Virgo y KAGRA, las NS alojadas en remanentes de supernovas jóvenes son objetivos clave para las CW. En un artículo reciente, buscamos restos de CW de 15 supernovas jóvenes de mediana edad (14 de las cuales están en nuestra galaxia y una en la vecina Gran Nube de Magallanes) utilizando ocho meses de datos desde mayo de 2023 hasta enero de 2024, que constituyen la primera parte de la cuarta serie de observaciones de los detectores avanzados, llamada O4a para abreviar.

Si bien ahora se observan regularmente ráfagas transitorias de ondas gravitacionales (GW), las CW son mucho más difíciles de detectar porque se espera que estas señales sean mucho más débiles que las ráfagas que vemos de fusiones de NS o agujeros negros, a menudo más débiles por varios órdenes de magnitud. Hasta ahora no las hemos detectado, si las detectáramos, sería un gran avance ya que nos ayudaría a entender cómo se forman las NS y cómo es la materia bajo las densidades y campos magnéticos más extremos encontrados en el Universo. También nos permitirían descubrir púlsares que se habían perdido anteriormente. Sin embargo, para detectar las CW debemos ser pacientes, recolectar datos durante un largo período de tiempo y buscar pequeñas pero persistentes fluctuaciones que coincidan con nuestro modelo de señal. También tenemos que elegir los mejores objetivos.

Hay muchos restos de supernovas dentro de nuestra galaxia. Elegimos quince restos de supernovas que son jóvenes, con edades entre aproximadamente 40 años (SN 1987A) y decenas de miles de años, y que potencialmente albergan NS jóvenes para las cuales su frecuencia de rotación es aún desconocida. Su edad relativamente joven implica que las candidatas a NS son más propensas a tener deformaciones no uniformes que las NS mayores. Esto se debe a que no han tenido suficiente tiempo para asentarse y para que tales deformaciones se suavizaran. Las NS jóvenes también giran más rápido, produciendo una amplitud de GW mayor. Pero como no sabemos lo rápido que están girando las NS, tenemos que buscar en una amplia gama de posibles frecuencias de CW determinadas principalmente por la edad específica del objeto y la sensibilidad de nuestros detectores. Las NS jóvenes también pierden energía rotacional y se desaceleran con el tiempo, por lo que también necesitamos buscar en un rango de posibles tasas de rotación más bajas. Por último, las observaciones de NS aisladas donde se han hecho mediciones de la frecuencia de rotación sugieren que estas pueden mostrar pequeñas fluctuaciones aleatorias.



Figura 1. Izquierda: El remanente más joven en nuestra lista de objetivos, SN 1987A localizado en la Gran Nube de Magallanes a unos 50 kpc de distancia, como lo ve la NIRCam del Telescopio Espacial James Webb (JWST). JWST reveló evidencia creciente de la presencia de una estrella de neutrones cerca del centro que calienta el material en el interior del remanente. *Crédito de imagen:* NASA, ESA, CSA, Mikako Matsuura (Universidad de Cardiff), Richard Arendt (NASA-GSFC, UMBC), Claes Fransson (Universidad de Estocolmo), Josefín Larsson (KTH); *Procesamiento de imagen:* Alyssa Pagan (STScI). **Derecha:** El remanente de supernova Cassiopeia A, uno de los restos más jóvenes y brillantes conocidos de supernova por colapso del núcleo en nuestra galaxia, según lo visto por el Observatorio de rayos X Chandra. El punto blanco central es una fuente de rayos X similar a un punto que se cree es la estrella de neutrones dejada tras la explosión de la supernova y conocida como un 'Objeto Compacto Central'. *Crédito de la imagen:* X-ray: NASA/CXC/Meiji Univ./T. Sato et al.; *Procesamiento de imágenes:* NASA/CXC/SAO/N. Wolk.

MÁS INFORMACIÓN:

Visita nuestro www.ligo.org

sitio web: www.virgo-gw.eu

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



En una búsqueda normal (llamada búsqueda "coherente"), construimos plantillas de cómo debería verse la señal durante el tiempo de observación y tratamos de hacer coincidir esas señales con los datos. Si probamos la plantilla de la señal correcta y el número de plantillas no es demasiado alto, entonces una búsqueda coherente es extremadamente eficaz para detectar señales débiles. Pero tenemos 15 objetivos sin una estimación de frecuencia, que también podrían cambiar su frecuencia de rotación o sufrir pequeños cambios de frecuencia aleatorios. En este escenario, una búsqueda coherente es demasiado intensiva computacionalmente. En cambio, utilizamos cuatro métodos "semi-coherentes" para buscar en los datos de O4a de manera eficiente. Una búsqueda semi-coherente aplica una búsqueda coherente a pequeños bloques de datos y los une para cubrir todo el tiempo de observación. Los bloques de datos más pequeños necesitan menos plantillas, por lo que una búsqueda semi-coherente es mucho más eficiente computacionalmente. Además, utilizamos una quinta canalización de 'correlación cruzada' que combina y compara los datos combinados de los detectores LIGO en Hanford y Livingston en el rango 20-1726 Hz. Este proceso utiliza un enfoque no modelado, es decir, no asume un patrón específico por adelantado, y se aplicó a los datos de cuatro restos de supernovas jóvenes famosas, incluyendo SN 1987A y Cassiopeia A (**figura 1**).

Desafortunadamente, ninguna de las búsquedas reporta señales de CW. Sin embargo, no tener detección no significa que no haya resultados. Podemos estimar la sensibilidad de nuestra búsqueda y a partir de eso inferir propiedades sobre las estrellas que buscamos. Por ejemplo, al poner un límite a la intensidad de la señal, podemos establecer un límite superior sobre cómo podría estar deformada la NS objetivo. La asimetría de una NS se mide a través del parámetro ϵ , que significa elipticidad. Diferentes modelos para NS predicen diferentes límites de la elipticidad, pero la mayoría predicen $\epsilon < 10^{-6}$. Mostramos los límites de elipticidad para varios objetivos en la **figura 2 (izquierda)**. El eje vertical es el límite superior del 95% sobre ϵ obtenido en esta búsqueda (un límite superior del 95% significa, a grandes rasgos, que estamos 95% seguros de que el valor real del parámetro no es mayor que este límite). El eje horizontal es la frecuencia de la GW, que afecta a la elipticidad de dos maneras. En primer lugar, la deformación de la GW a una frecuencia dada es más fuerte para una estrella más elíptica. En segundo lugar, la sensibilidad de LIGO, Virgo y KAGRA depende de la frecuencia, por lo que nuestros límites a la tensión de la GW varían en todo el rango de frecuencias. Logramos limitar la elipticidad por debajo del máximo teórico ($\epsilon < 10^{-6}$). A medida que este límite mejore, podremos descartar los modelos físicos que intentan predecir las propiedades de la NS.

Las estrellas de neutrones triaxiales no son la única manera en la que una NS podría generar CW. Las rotaciones estelares también pueden conducir CW a través de oscilaciones en modo r dentro de las NS, con la escala de las oscilaciones parametrizada por la amplitud α . El límite superior teórico de la escala de las oscilaciones es $\alpha < 10^{-3}$. Un límite en la deformación de una NS elíptica se puede convertir en un límite en α , como hacemos en la **figura 2 (derecha)**. El eje vertical es nuestro límite superior del 95% en α y el eje horizontal es la frecuencia de la GW (en Hz).

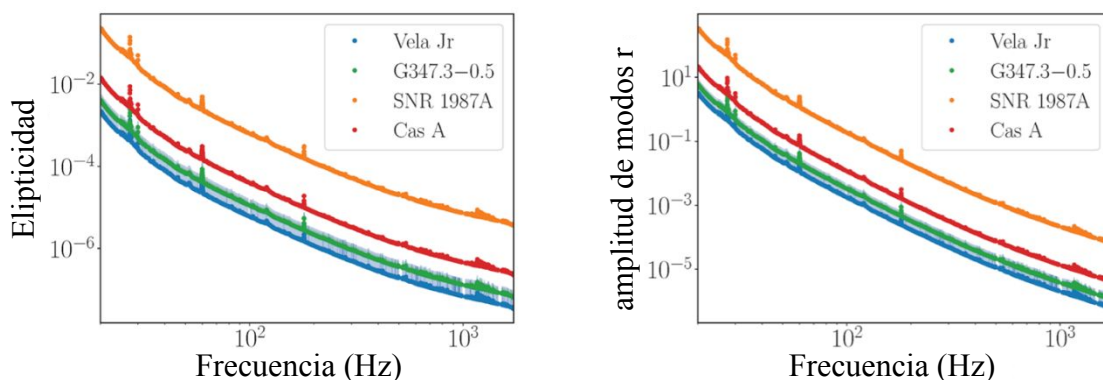


Figura 2: Límites superiores del 95% en la elipticidad de NS, ϵ , (izquierda) y en el modo r (derecha) para algunos de los análisis y puntos del artículo. El eje horizontal es la frecuencia a la que detectaríamos una señal de onda gravitacional; el eje vertical es el límite superior del 95% en la elipticidad (izquierda) y modo r (derecha). Las curvas azul (Vela Jr), verde (G347.3-0.5), naranja (SNR 1987A) y roja (Cas A) muestran la elipticidad (izquierdo) o amplitud (derecho) mínimas que pudimos detectar. Este es un límite superior de lo elípticas o de lo fuerte de los modos r pueden ser en las NS. Si las NS fueran más elípticas que esto, o los modos r fueran más fuertes, probablemente lo hubiéramos detectado. Para este gráfico, elegimos los resultados de la quinta cadena de análisis basada en la correlación cruzada (descrita anteriormente), que es nueva desde la búsqueda de O3a y se aplica al SNR más joven 1987A.

En resumen, no vemos una señal CW del remanente SN 1987A, ni de ninguno de los otros restos que exploramos. Sin embargo, los cinco diferentes métodos de búsqueda complementarios aplicados a los datos de O4a nos permitieron establecer los límites más fuertes hasta el momento sobre cuán ruidosas podrían ser las CW, mejorando nuestros resultados anteriores de O3a y llevando nuestra sensibilidad a las CW de las NS jóvenes a un nuevo nivel. Nuestro límite más ajustado se encontró para el famoso remanente de supernova Vela Jr, lo que nos ayuda a saber qué tan gruesas son las NS y cuán fuertes pueden ser algunos tipos de ondas internas (o modos r). Esos grumos (para Vela Jr) deben ser más pequeños que aproximadamente una parte en diez millones, y los modos r más pequeños que aproximadamente una parte en cien mil a frecuencias superiores a 400 Hz. Estos resultados son las búsquedas de frecuencia de banda ancha más sensibles hasta el momento para CW de restos de supernova.

A medida que la recopilación de datos continúa y nuestros métodos y sensibilidad mejoran, aumenta la probabilidad de hacer la primera detección. Hasta entonces, seguiremos restringiendo los modelos físicos basados en las no detecciones y presionaremos para aumentar aún más la sensibilidad de nuestras búsquedas.

PARA SABER MÁS:

Visita nuestras web: www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/ (KAGRA)

Lea una preimpresión gratuita del artículo científico completo [aquí](#) o en [arXiv](#).

Lea una introducción a las ondas gravitacionales continuas [aquí](#).
 Traducido al español por Claudia Moreno (a partir de la versión original en inglés) y revisado por Pablo García Abia.