

BÚSQUEDA DE ONDAS GRAVITACIONALES CONTINUAS PROCEDENTES DE REMANENTES JÓVENES DE SUPERNOVAS EN LOS PRIMEROS DATOS DE O3

Las [supernovas de colapso del núcleo](#) son las muertes violentas y explosivas de [estrellas masivas](#). El remanente de la explosión es una [estrella de neutrones](#) ultra-densa rodeada por restos de la explosión (Figura 1). Los restos de la explosión pueden extenderse a lo largo de varios [años-luz](#), pero la estrella de neutrones en el centro mide aproximadamente 30 kilómetros y tiene una masa de unas 1.4 veces la masa del Sol. Las estrellas de neutrones son uno de los objetos más densos del universo. La composición y la física subyacente de las estrellas de neutrones sigue siendo uno de los misterios más intrigantes de la física, que inspira interés en una variedad de campos, abarcando la astrofísica, la física nuclear, la física de partículas y la física de la materia condensada. Para los detectores Advanced LIGO y Advanced Virgo, las estrellas de neutrones son importantes porque son potenciales fuentes de ondas gravitacionales continuas (OCs). En un artículo reciente, buscamos OCs procedentes de quince remanentes jóvenes de supernovas en nuestra galaxia utilizando seis meses de datos de 2019, lo que constituye la primera mitad del tercer período de observación de los detectores avanzados, llamada O3a para abreviar.

Si bien ahora se observan regularmente ráfagas transitorias de ondas gravitacionales, las OCs continúan evadiendo la detección. Esto se debe a que las ráfagas transitorias son intensas y breves, mientras que las ondas gravitacionales continuas son muy débiles y difíciles de diferenciar del ruido. Para detectar OCs, tenemos que ser pacientes, recopilar datos durante un largo periodo de tiempo y buscar fluctuaciones diminutas pero persistentes que coincidan con nuestro modelo de señal. Para una búsqueda típica de OCs, buscamos ondas generadas por una estrella de neutrones que gira rápidamente. Cualquier desviación de una estrella perfectamente uniforme producirá ondas gravitacionales con el doble de la frecuencia de rotación de la estrella, donde mayores desviaciones dan lugar a una mayor [intensidad de las ondas gravitacionales](#). A esta estrella la llamamos "triaxial" porque es una elipse tridimensional, similar a una pelota de rugby.

Hay muchos remanentes de supernovas en nuestra galaxia. Elegimos quince remanentes jóvenes de supernovas de entre 100 y 10.000 años, pero cuya frecuencia de rotación se desconoce. Consideramos los remanentes jóvenes de supernovas porque las estrellas de neutrones jóvenes tienen más probabilidades de tener deformaciones no uniformes que las estrellas más viejas. Las estrellas de neutrones jóvenes también giran más rápido, produciendo una onda gravitacional más intensa. Pero debido a que no sabemos cómo de rápido está rotando la estrella de neutrones, tenemos que buscar en un amplio rango de frecuencias. Las estrellas de neutrones jóvenes también pierden energía de rotación y se ralentizan con el tiempo (disminución de la velocidad de giro), por lo que también necesitamos buscar entre las posibles tasas de disminución de las velocidades de giro. Por último, las observaciones de estrellas de neutrones aisladas para las cuales las frecuencias han sido medidas sugieren que puede haber pequeñas fluctuaciones aleatorias en la frecuencia de rotación.

En una búsqueda normal (llamada búsqueda coherente), construimos plantillas de cómo debería ser la señal durante el tiempo de observación e intentamos hacer coincidir esas señales con los datos. Si utilizamos la plantilla de la señal correcta y si el número de plantillas no es demasiado alto, entonces una búsqueda coherente es muy sensible. Pero tenemos quince objetivos sin una estimación de su frecuencia que podrían cambiar su frecuencia de rotación o sufrir pequeños cambios de frecuencia aleatorios. En este escenario, una búsqueda coherente es demasiado costosa desde el punto de vista computacional. En su lugar, utilizamos tres métodos semi-coherentes para buscar en la primera parte de los datos de O3 de manera eficiente. Una búsqueda semi-coherente aplica una búsqueda coherente a pequeños bloques de datos y los une para cubrir todo el período de observación.

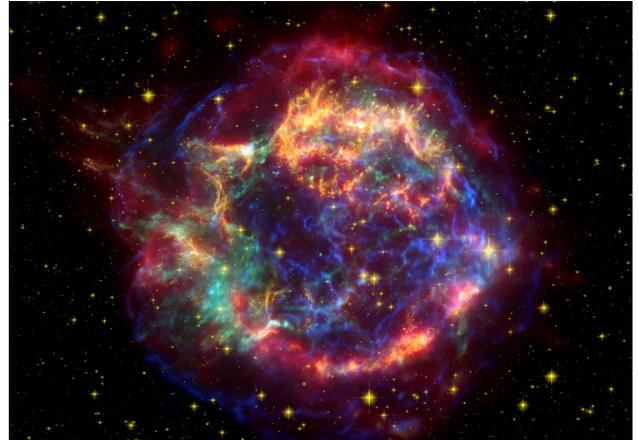


Figura 1: Cassiopeia A, uno de los remanentes jóvenes de [supernova](#) objetivo de esta búsqueda. Crédito de la imagen: NASA/JPL-Caltech/Krause et al.

FIGURAS DE LA PUBLICACIÓN

Para obtener más información sobre estas figuras y cómo se produjeron, lea este [documento](#) disponible de forma gratuita.

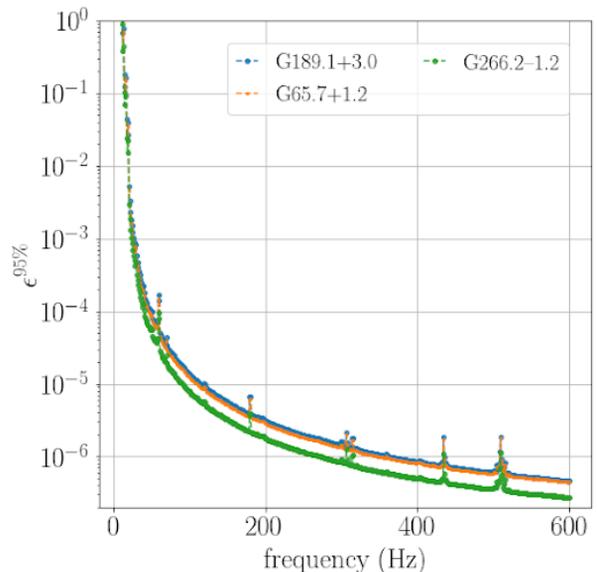


Figura 2: [Cotas superiores](#) del 95% en la [elipticidad](#) ϵ de la estrella de neutrones para algunos de los análisis y objetivos del artículo. El eje horizontal es la frecuencia a la que detectaríamos una señal de onda gravitacional; el eje vertical es la cota superior del 95% de la elipticidad. Las curvas verde (G266.2-1.2), azul (G189.1+3.0), y naranja (G65.7+1.2) muestran la elipticidad mínima posible que podríamos detectar. Esta es una cota superior de cuán elíptica podría ser la estrella de neutrones (porque si fuera más elíptica que esto, ¡la habríamos detectado!).

Bloques de datos más pequeños necesitan menos plantillas para las búsquedas, por lo que una búsqueda semi-coherente es mucho más eficiente desde el punto de vista computacional. Aplicamos tres algoritmos semi-coherentes a los primeros datos de O3: uno optimizado para la sensibilidad, uno optimizado para una señal que cambia rápidamente y otro optimizado para un modelo astrofísico particular. Ninguna de las tres búsquedas ha obtenido ninguna señal de tipo OC.

Sin embargo, la ausencia de detección no significa que no haya resultados. Podemos estimar la [sensibilidad](#) de nuestra búsqueda y a partir de esto inferir propiedades de las estrellas que buscamos. Una estrella de neutrones que gira rápidamente emite OCs, y cuanto más deformada está una estrella, más intensa debe ser la señal. Al poner un límite a la intensidad de la señal, podemos poner una cota superior a la deformación que podría tener la estrella de neutrones observada. La asimetría de una estrella de neutrones se mide con el parámetro ϵ , que representa la [elipticidad](#). Diferentes modelos de estrellas de neutrones predicen diferentes límites en la elipticidad, pero la mayoría predice $\epsilon < 10^{-6}$. Mostramos los límites de elipticidad para tres objetivos en la Figura 2. El eje vertical es la [cota superior](#) al 95% de confianza en ϵ obtenido en esta búsqueda. El eje horizontal es la frecuencia de la onda gravitacional, que afecta la elipticidad de dos formas. En primer lugar, la amplitud de la onda gravitacional a una frecuencia dada es mayor para una estrella más elíptica. En segundo lugar, la sensibilidad de LIGO y Virgo depende de la frecuencia, por lo que nuestros límites en la amplitud de la onda gravitacional varían a lo largo del rango de frecuencia. Logramos acotar la elipticidad por debajo del máximo teórico ($\epsilon < 10^{-6}$). A medida que este límite mejore, podremos descartar modelos físicos que intenten predecir las propiedades de las estrellas de neutrones.

Las estrellas de neutrones triaxiales no son la única forma en que una estrella de neutrones podría generar OCs. La rotación estelar también puede emitir OCs a través de oscilaciones de [modos r](#) dentro de la estrella de neutrones, con la escala de las oscilaciones parametrizada por la amplitud α . La cota superior teórica en la escala de las oscilaciones es $\alpha < 10^{-3}$. Una cota en la deformación de una estrella de neutrones elíptica se puede convertir en un límite en α , como lo hacemos en la Figura 3. El eje vertical es nuestro límite de confianza del 95% en α y el eje horizontal es la frecuencia de la onda gravitacional (en Hz). Encontramos $\alpha < 10^{-3}$ por encima de 150 Hz para tres casos, lo que restringe el tamaño de las amplitudes de los modos r en estas estrellas.

A medida que la recopilación de datos continúa y nuestros métodos mejoran, aumenta la probabilidad de conseguir la primera detección. Hasta entonces, restringimos los modelos físicos basados en la no detección y trabajamos para aumentar la sensibilidad de nuestras búsquedas.

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

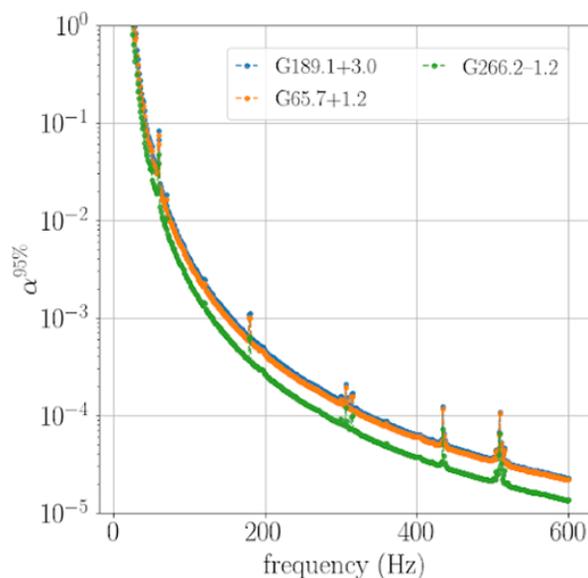


Figura 3: Cotas superiores del 95% en la amplitud de oscilación α de los [modos r](#) para algunos de los análisis y objetivos en el artículo. El eje horizontal es la frecuencia a la que detectaríamos una señal de onda gravitacional; el eje vertical es la cota superior del 95% en la amplitud. Las curvas verde (G266.2-1.2), azul (G189.1 + 3.0) y naranja (G65.7 + 1.2) muestran la mínima amplitud posible que podríamos detectar. Esta es una cota superior de cuán intensos podrían ser los modos r en la estrella de neutrones (porque si fueran más intensos que esto, ¡los habríamos observado!).

Visita nuestras páginas web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



Traducción al castellano por Nicolás Sanchis-Gual e Isabel Cordero-Carrión (a partir de la versión original en inglés en <https://www.ligo.org/science/Publication-O3aDirectedSNR>)

GLOSARIO

Onda gravitacional continua: Forma de radiación gravitacional de larga duración. Consulte [aquí](#) para obtener más detalles.

Elipticidad: Medida de cómo de alejado está un cuerpo de ser esférico, definida como la deformación relativa a lo largo del plano ecuatorial con respecto a la deformación a lo largo de la dirección perpendicular.

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

LIGO: El Observatorio de ondas gravitacionales por interferometría láser (LIGO) es un par de detectores de ondas gravitacionales con sede en EE. UU. Uno está situado cerca de Livingston, Louisiana, y el otro cerca de Hanford, Washington. Ambos detectores son interferómetros láser a gran escala, con dos brazos perpendiculares de 4 km de largo, que intentan medir cualquier cambio en la longitud relativa del brazo causado por el paso de una onda gravitacional.

Estrella masiva: Las estrellas masivas tienen masas de más de 8 veces la masa del Sol. Solo estrellas tan masivas pueden formar una estrella de neutrones después de explotar como supernova. Si tienen masas más bajas, el remanente se convierte en una enana blanca.

Estrella de neutrones: Objeto extremadamente denso que queda después del colapso de una estrella masiva. Una estrella de neutrones típica tiene una masa medio millón de veces mayor que la de la Tierra, pero solo tiene unos 30 km de diámetro.

Modos r: Ondas en el líquido que constituye la mayor parte de una estrella de neutrones. Tienen una frecuencia que es comparable a la frecuencia de giro

de la estrella, por lo que para estrellas de neutrones jóvenes podrían estar en la banda de frecuencia LIGO y Virgo.

Sensibilidad: Una descripción de la capacidad de un detector para detectar una señal. Los detectores con menor ruido son capaces de detectar señales más débiles y, por lo tanto, se dice que tienen una mayor sensibilidad.

Deformación: Cambio fraccional en la separación entre dos puntos de medición debido a la deformación del espacio-tiempo causada por una onda gravitacional que pasa. La intensidad típica de incluso las ondas gravitacionales más intensas que llegan a la Tierra es muy pequeña, por lo general menos de 10^{-21} .

Supernova: Una explosión violenta, a menudo detectada como un objeto brillante que aparece rápidamente en el cielo, para luego desvanecerse. Una supernova puede eclipsar al resto de su galaxia. Hay una variedad de supernovas diferentes. Algunas proceden del colapso de estrellas masivas, otras pueden proceder de la colisión de dos enanas blancas.

Ondas gravitacionales transitorias: Ondas gravitacionales resultantes de un evento corto, a menudo cataclísmico, como por ejemplo las fusiones de sistemas binarios de objetos compactos. La mayoría de las ondas gravitacionales transitorias aparecen en el detector solo durante unos segundos o menos.

Cota superior: La cota superior de alguna cantidad (por ejemplo, la intensidad de la onda gravitacional) es el valor más pequeño que detectaríamos con un 95% de confianza. Entonces, si no hemos detectado nada, tenemos un 95% de certeza de que no existen fuentes que produzcan valores más altos.

Virgo: El detector Virgo es un interferómetro terrestre ubicado en Cascina, Italia, cerca de Pisa.