

ESTRELLAS DE NEUTRONES: LAMENTABLEMENTE, MÁS LISAS QUE BOLAS DE BILLAR

Las [estrellas de neutrones](#) son famosamente lisas. Los efectos de la gravedad son aplastantes en estas estrellas asombrosamente densas, las cuales tienen radios de tan sólo 12 km pero que contienen más [masa que la del Sol](#). La abrumadora gravedad de la estrella tiende a templar, es decir, a alisar cualquier protuberancia, grande o pequeña, que pudiera surgir debido a grietas en la superficie o a la acreción de material interestelar.

Científicas y científicos de la colaboración [LIGO-Virgo-KAGRA](#) han llevado a cabo búsquedas en los datos recientes de [LIGO](#) (de la [ronda de observación](#) O4a, de mayo 2023 a enero 2024) para encontrar pruebas de que este proceso de templado no haya funcionado a la perfección en alguna estrella de neutrones de nuestra galaxia. Por medio de búsquedas en todo el cielo de [ondas gravitacionales continuas](#) (OGC) en rangos de frecuencia amplios (20 a 2,000 Hz), uno puede intentar encontrar estrellas de neutrones inusuales que sean lo suficientemente “protuberantes” como para arremolinar el espacio mismo alrededor de la estrella mientras esta gira sobre su propio eje.

Se espera que la frecuencia de la onda resultante sea del doble de la frecuencia de rotación de la estrella. Por ejemplo, una estrella que rota sobre su eje 100 veces por segundo emitiría una señal de ondas gravitacionales continuas con una frecuencia de 200 Hz. Mientras la estrella pierde energía debido a esta radiación emitida, su frecuencia de rotación disminuye lentamente, provocando una disminución gradual de la frecuencia de la señal. Las búsquedas llevadas a cabo aquí permiten una disminución tan grande como 3/10 de un Hertz por año. Se espera que la amplitud de una OGC sea pequeña, mucho más pequeña que una parte en un billón de billones.

¿CÓMO BUSCAMOS Y QUÉ ENCONTRAMOS?

Tres distintos métodos de búsqueda (PowerFlux, Frequency Hough y SOAP) fueron usados para encontrar tan inusuales estrellas de neutrones. Estos algoritmos usan distintos enfoques, pero todos se basan en buscar señales de tipo sinusoidal casi monocromáticas (de una sola frecuencia) en los datos de LIGO. Espectros basados en [transformadas de Fourier](#) son obtenidos para miles de intervalos de los datos recolectados, con intervalos de duración desde 1024 hasta 16384 segundos. Estos espectros son luego promediados juntos sobre el periodo de operación, considerando modulaciones pequeñas ([desfases Doppler](#)) en la frecuencia e intensidad de la señal debido al movimiento de la Tierra (es decir, su rotación diaria y movimiento orbital anual alrededor del Sol).

Los programas PowerFlux y Frequency Hough analizan explícitamente una gran cantidad de posibles patrones de señal para diferentes combinaciones de ubicación en el cielo, frecuencia y derivada temporal de la frecuencia, cada combinación representando un diferente [modelo](#) de forma de onda, mientras que el programa SOAP[‡] no realiza una búsqueda tan explícita de patrones específicos.

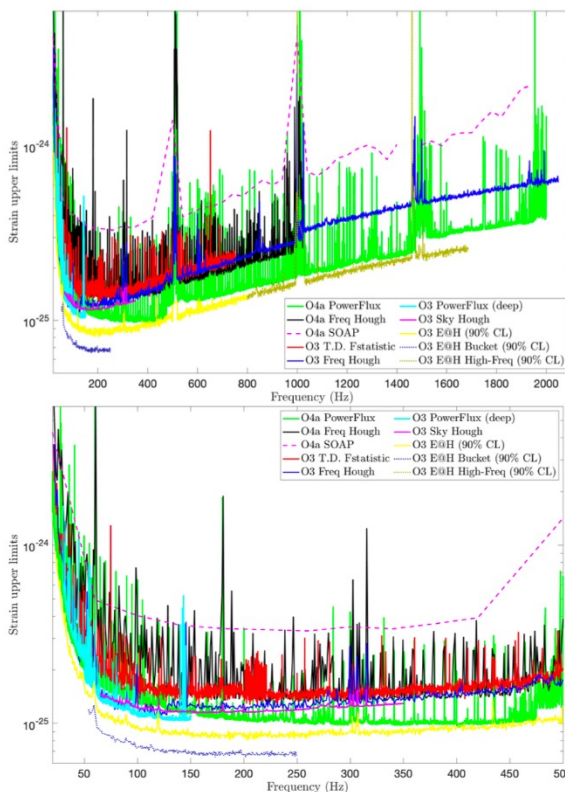


Figura 1: [Fig. 2 del artículo] Límites superiores de la amplitud de ondas gravitacionales continuas contra su frecuencia encontrados para esta búsqueda, mostrados en comparación con los límites de búsquedas anteriores en el periodo de observaciones O3. La gráfica superior muestra el rango completo de búsqueda de 20 a 2000 Hz. La gráfica inferior muestra una ampliación del rango de 20 a 500 Hz. Los múltiples picos corresponden a contaminaciones instrumentales o ambientales (conocidas como “líneas”).

[‡] SOAP (siglas en inglés de “Snakes on a Plane” [¡no la [película!](#)]) significa “Serpientes En El Avión” debido a que, en el plano de un [espectrograma](#) definido por el tiempo en el eje horizontal y la frecuencia en el eje vertical, algunas ondas gravitacionales continuas se verían como [serpientes](#) meneantes, un patrón que SOAP es bueno detectando.

Como resultado, SOAP ha reducido la sensibilidad de las señales esperadas de estrellas de neutrones aisladas en comparación con otros enfoques, pero, al mismo tiempo, es muchos órdenes de magnitud más rápido que los otros dos programas y tiene el potencial de detectar señales inesperadas con una evolución en la frecuencia sin predecir.

Desafortunadamente, ninguna OGC fue observada. La **Figura 1** muestra los límites de la amplitud de deformación gravitacional adimensional. La mejor sensibilidad se obtiene alrededor de los 290 Hz donde los límites en los valores de la deformación son tan grandes como 9.7×10^{-26} .

¿QUÉ SIGNIFICAN LSO RESULTADOS NEGATIVOS DE LA BÚSQUEDA?

En este artículo, científicas y científicos de la LVK han interpretado los resultados negativos de la búsqueda para atender tres específicos problemas astrofísicos:

- 1. Lo lisa de la población de todas las estrellas de neutrones en nuestra galaxia, la Vía Láctea;
- 2. La población de púlsares de milisegundos (MSPs, por sus siglas en inglés), es decir, con una frecuencia de rotación mayor a 100 Hz, cercana al centro galáctico, los cuales se cree que son estrellas que pudieran contribuir significativamente al exceso de rayos gamma de alta energía observados desde ahí (referidos como el “exceso GeV”); y
- 3. La potencial contribución a la Materia Oscura debido a sistemas en espiral de agujeros negros primordiales donde estos tienen masas de la escala de asteroides y emiten señales monocromáticas similares a estrellas de neutrones con protuberancias.

La **Figura 2** muestra una manera de caracterizar los límites en la lisura de las estrellas de neutrones. El eje horizontal es el logaritmo (base 10) de la elipticidad, la cual es una medida adimensional de la no-asimetría o la rugosidad (a gran o pequeña escala) de la estrella. El eje vertical es el logaritmo de la frecuencia en Hz. Las curvas muestran contornos de exclusión de la cantidad de estrellas de neutrones que tienen una elipticidad por encima de cierto valor. Los colores de las curvas se definen por el color de la barra del lado derecho. Por ejemplo, para una elipticidad límite de 10^{-5} y una frecuencia de alrededor de 200 Hz (cerca de 2.3 en el eje vertical), los resultados de la búsqueda

de PowerFlux (contorno morado sólido) implican que no hay más de 100 estrellas de neutrones en la galaxia con una elipticidad mayor a este límite.

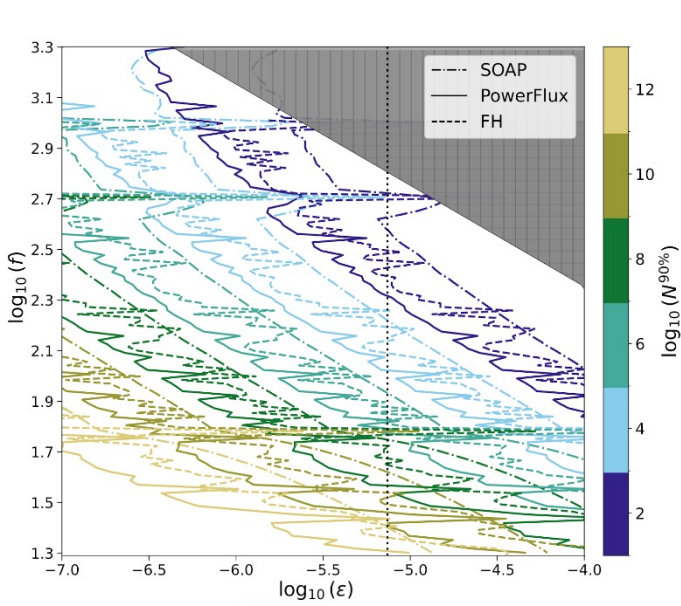


Figura 2: [Fig. 5 del artículo] Contornos de exclusión de los números de estrellas de neutrones galácticas (véase la barra de color) para diferentes elipticidades asumidas y frecuencias de ondas gravitacionales. Resultados para diferentes métodos de búsqueda y para diferentes límites de exclusión del número de estrellas de neutrones.

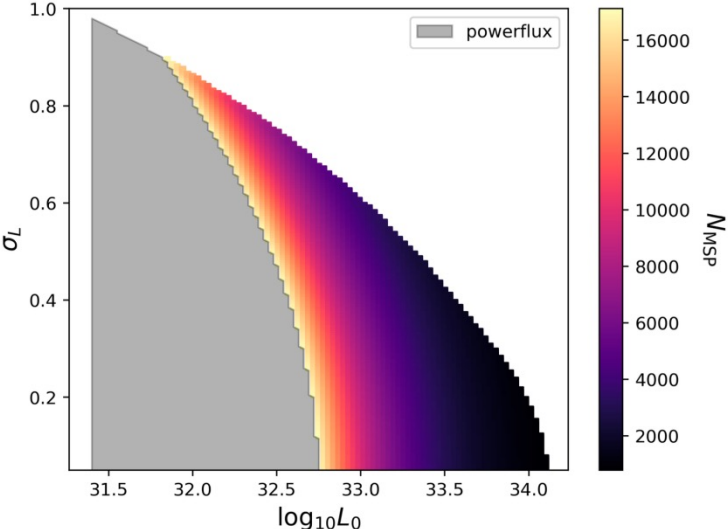


Figura 3: [Fig. 6 del artículo] Región de exclusión (gris) del parámetro de luminosidad para púlsares de milisegundos para los cuales la ausencia de OGC es consistente con la explicación de que el exceso de GeV provenga de púlsares. Las regiones a color muestran el número de MSPs necesarios para explicar el exceso de GeV para la elección de los parámetros de luminosidad L_0 y σ_L .

CONOCE MÁS:

Visita nuestros sitios:

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



En otras palabras, las estrellas de neutrones son más lisas, relativas a sus diámetros, que bolas de billar (aunque no son igual de redondas debido a que su rápida rotación provoca una oblación o aplanamiento, con una circunferencia mayor medida desde su ecuador que de polo a polo).

La **Figura 3** muestra otra manera de interpretar los resultados negativos de la búsqueda en términos de su habilidad de explicar el exceso de GeV, el cual se refiere a un exceso inesperado en la intensidad de rayos gamma en GeVs (Giga [electronvolts](#), donde $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) y más altas energías, emitidas cercanas al centro galáctico. Las dos principales explicaciones físicas para este exceso es la aniquilación de partículas pesadas de materia oscura debido a la población de púlsares de milisegundos escondida a la observación electromagnética debido a polvo en la galaxia que no bloquea las ondas gravitacionales emitidas por dichas estrellas.

En la figura, el eje horizontal indica el logaritmo del parámetro de luminosidad de los rayos gamma provenientes de un MSP (entre más bajo el valor, más MSPs se necesitarían para poder explicar el exceso de GeV). El eje vertical es un parámetro que gobierna la forma de la función de luminosidad. El código de colores muestra la cantidad de MSPs necesarios para cada elección del parámetro para explicar el exceso. La zona gris indica una cantidad tan alta de MSPs que es inconsistente con los resultados negativos de la búsqueda dada la fracción de esas estrellas que probablemente tendrían una elipticidad gravitacionalmente detectable (para las cuales hay una dependencia al modelo, lo cual se trata en el artículo).

La **Figura 4** muestra una manera más de interpretar los resultados negativos de la búsqueda. El eje horizontal muestra el logaritmo de la tasa entre la masa de un agujero negro secundario en un sistema binario de agujeros negros primordiales y la masa del Sol. Las distintas curvas muestran límites de exclusión para una función de formación de agujeros negros primordiales, asumiendo distintos valores de las masas del agujero negro más grande del sistema binario.

El hecho de no haber encontrado ninguna señal de OGC es decepcionante, ya que, una vez que finalmente se detecte una señal de este tipo, nos permitirá poner a prueba nuestro conocimiento tanto de la gravedad misma como de la estructura interna, aún poco conocida, de las estrellas de neutrones. Una vez encontrada, una estrella que emita radiación de OGC detectable podría estudiarse durante años, décadas, quizás incluso siglos, utilizando detectores de ondas gravitacionales cada vez más avanzados. Esos detectores del futuro podrían estar aquí en la Tierra, en el espacio e incluso en la Luna. Las y los científicos podrían estudiar las oscilaciones de la propia radiación (sus propiedades de [polarización](#)) para comparar las observaciones con las predicciones de la [Teoría de la Relatividad General](#) de Einstein y con las de otras teorías exóticas y [alternativas de la gravedad](#).

Además, habría una excelente oportunidad de detectar [electromagnéticamente](#) una estrella de neutrones hasta ahora desconocida una vez que las ondas gravitacionales nos indiquen con precisión dónde buscarla en el cielo y qué frecuencia de rotación probablemente modifique las señales de luz, las cuales podrían ser detectables en una amplia banda de radiación que abarca desde la luz visible hasta los rayos gamma. Una estrella de este tipo, observada durante largos períodos de tiempo tanto en radiación gravitacional como electromagnética, sería la fuente astronómica [multimensajera](#) definitiva.

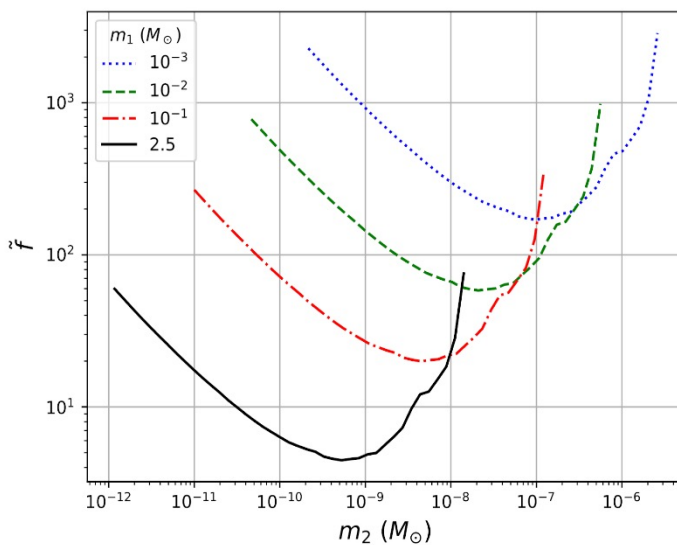


Figura 4: [Fig. 9 del artículo] Curva de exclusión de la formación de agujeros negros binarios primordiales para diferentes masas supuestas de los agujeros negros primario y secundario (las masas se expresan en unidades de [masas solares](#)). Las regiones por encima de las curvas quedan excluidas según diferentes supuestos sobre las masas de los agujeros negros, m_1 y m_2 .

CONOCE MÁS

Visita nuestros sitios:

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

Lee una versión gratuita del artículo científico complete [aquí](#) o en [arxiv](#).

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

Versión original (inglés) [aquí](#).