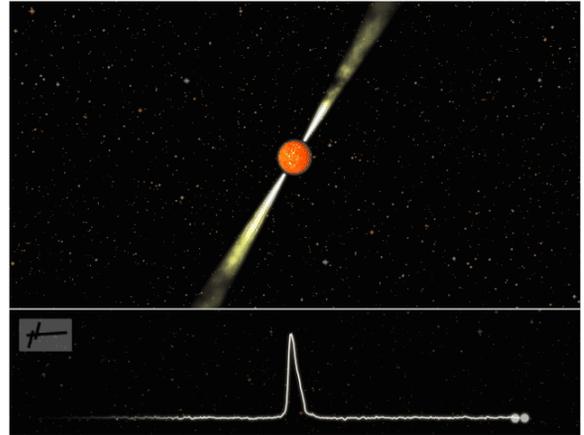


## BÚSQUEDA DE BANDA ESTRECHA DE ONDAS GRAVITACIONALES CONTINUAS Y TRANSITORIAS DE LARGA DURACIÓN PROCEDENTES DE PÚLSARES CONOCIDOS EN EL TERCER PERIODO DE OBSERVACIÓN DE LIGO-VIRGO

Las estrellas de neutrones son remanentes de **supernovas**, las explosiones de estrellas masivas, y son los objetos más densos del Universo después de los agujeros negros. Tienen una masa de 1,4 veces la de nuestro Sol o más, ¡pero su radio es de tan solo unos 10 km! Presentan campos magnéticos que pueden ser de entre cientos de millones y mil billones (mil veces un millón de millones) de veces más fuertes que el campo magnético de la Tierra. A medida que la estrella de neutrones gira, emite **ondas electromagnéticas** (como ondas de radio o rayos X) de sus polos magnéticos y, con telescopios sensibles a estas longitudes de onda (ver **rayos X** y **radiotelescopios**), podemos ver en la Tierra pulsos de estas ondas cuando son emitidos hacia nuestra dirección, como un faro (ver **Figura 1**). Llamamos púlsares a las estrellas de neutrones que podemos observar de esta manera. Los pulsos son muy regulares, tanto que en algunos casos los astrónomos pueden predecir cuándo llegarán los siguientes con una precisión de 10 nanosegundos. Las estrellas de neutrones tienen superficies muy lisas, pero si tienen alguna "montaña", también podrían emitir ondas gravitatorias de forma continua, que podemos detectar con **LIGO**, **Virgo**, y **KAGRA**. Estas montañas podrían ser muy pequeñas y aún así podríamos detectar ondas gravitatorias. Por ejemplo, si la estrella de neutrones se encuentra a 100 **pársecs** y gira más de 100 veces por segundo, ¡podríamos detectar una montaña de menos de medio milímetro aproximadamente en la superficie de la estrella!



**Figura 1:** Representación artística de un púlsar donde se muestra la estrella de neutrones en rotación, los haces de radiación electromagnética que emite y la llegada regular de los pulsos a un telescopio. Crédito de la imagen: [Joeri van Leeuwen](https://www.astron.nl/pulsars/animations/), Licencia: [CC-BY-AS](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). (Para una versión animada ir a <https://www.astron.nl/pulsars/animations/>).

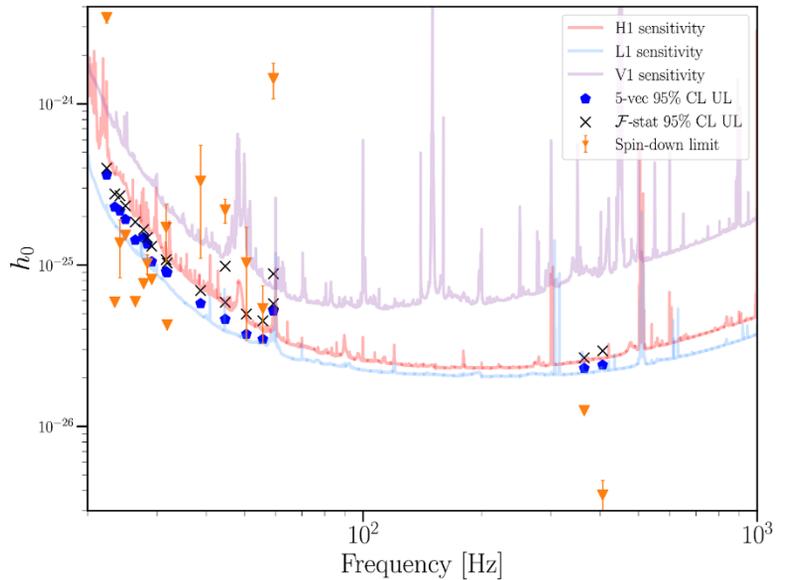
En este estudio, hemos utilizado los pulsos electromagnéticos observados con los telescopios de radio y rayos X para guiar nuestra búsqueda de señales de ondas gravitatorias continuas en los datos del tercer periodo de observación (O3) de Advanced LIGO y Advanced Virgo. En un [estudio separado](#), hemos asumido que la frecuencia de las ondas gravitatorias sigue exactamente la frecuencia con la que vemos llegar los pulsos electromagnéticos. Aquí, sin embargo, permitimos que esta frecuencia y la manera en que cambia con el tiempo (conocida como "spin-down") difieran ligeramente de lo que observamos con las ondas electromagnéticas. Lo hacemos para tener en cuenta la posibilidad de que las ondas gravitatorias se emitan a partir de asimetrías en el interior de la estrella, en lugar de la superficie, donde se emiten las ondas electromagnéticas. A esto lo llamamos enfoque de "banda estrecha", y lo utilizamos para buscar ondas gravitatorias continuas procedentes de 18 púlsares. En la **Figura 2** se muestran nuestros resultados. Para cada púlsar, mostramos la máxima amplitud de onda gravitatoria que nuestra búsqueda hubiese podido detectar. Los resultados están clasificados según la frecuencia de rotación del púlsar.

Como hemos dicho anteriormente, la mayoría del tiempo las estrellas de neutrones giran de manera muy predecible. No obstante, algunos púlsares sufren "**glitches**", es decir, eventos en que la estrella empieza a girar más rápido que antes de forma repentina, de manera que los pulsos llegan con más frecuencia. En la **Figura 3** se muestra un ejemplo de un **glitch** observado por un radiotelescopio. Estos eventos indican que en la estrella ha sucedido algo drástico, pero lo que ocurre exactamente es todavía un misterio. Podrían emitirse ondas gravitatorias más potentes alrededor o después del momento del **glitch**, y su medida nos daría una visión única del interior de las estrellas de neutrones. Para demostrar esta idea, también buscamos ondas gravitatorias emitidas después de **glitches** observados por radio o rayos X durante el O3. Buscamos señales de ondas gravitatorias de duración más corta, de entre 1 hora y 120 días, después de 9 **glitches** de púlsares diferentes.

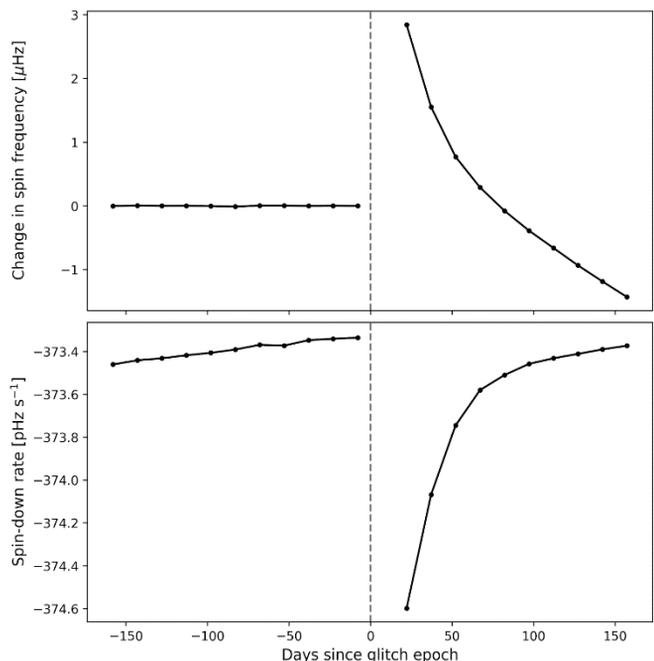
No se han encontrado pruebas convincentes de la existencia de ondas gravitatorias en ninguna de las estrellas de neutrones de estas búsquedas. Por lo tanto, utilizamos nuestros resultados para establecer **límites superiores** en la intensidad de la emisión de ondas gravitatorias basados en la sensibilidad de nuestros detectores, la cantidad de datos que tenemos y la ubicación de las estrellas de neutrones. En la **Figura 2** se muestran estos resultados con cruces negros y pentágonos azules. Como comparación, también podemos establecer otro tipo de límite en la intensidad de la emisión de ondas gravitatorias mediante un argumento físico sencillo: la ralentización del giro observado por los telescopios de radio y rayos X significa que el púlsar está perdiendo energía con el tiempo, la cual debe corresponder a la energía perdida a través de la emisión de radiación electromagnética o gravitatoria. Si suponemos que toda esta energía se emite en forma de ondas gravitatorias, podemos deducir la intensidad máxima que podría tener la señal. Estos **límites de ralentización** se muestran con triángulos naranjas en la **Figura 2**. En 7 de los 18 púlsares en los que buscábamos emisión continua, nuestros límites superiores observacionales establecidos a partir de la búsqueda de ondas gravitatorias estaban por debajo de estos límites de ralentización establecidos por argumentos energéticos. Esto quiere decir que sabemos que al menos parte de la energía tiene que ser liberada de alguna forma diferente a las ondas gravitatorias.

También podemos traducir nuestros resultados en límites sobre el "tamaño" de una montaña en el púlsar, ya que cuanto más grande sea la montaña, más fuertes serán las ondas gravitatorias que esperamos de ella.

**Figura 3:** Un glitch observado en el púlsar del Cangrejo en 2004, utilizando el radiotelescopio del Observatorio de Jodrell Bank. En el panel superior, podemos ver cómo la **frecuencia de giro** observada del púlsar es bastante constante durante muchos meses, pero después, entre dos observaciones, dio un salto de varios  $\mu\text{Hz}$  (millonésimas de Hertz). (Para comparar, la frecuencia real de giro del Cangrejo es de unos 30 Hz). La frecuencia de giro vuelve a disminuir durante los siguientes meses. Igualmente, en el panel inferior, la tasa de disminución de giro (el cambio en la frecuencia de giro, medido en  $\text{pHz}$  por segundo, donde un  $\text{pHz}$  es una millonésima parte de una millonésima parte de un Hz) estaba aumentando de forma constante pero lenta antes del glitch, pero después dio un salto hacia abajo antes de recuperar su tendencia estable de nuevo. (Crédito: Grupo de Astronomía de Púlsares en Dominio Temporal, Universidad de Manchester)

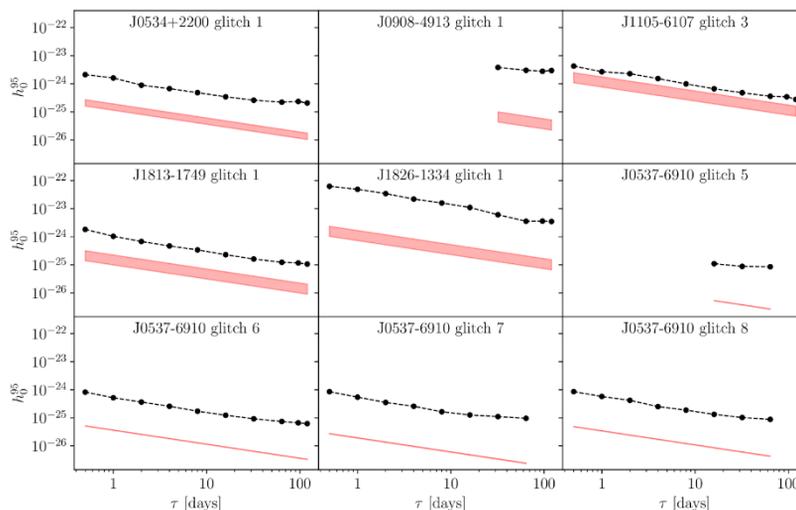


**Figura 2** (Figura 1 en la publicación): Los resultados de nuestras búsquedas de ondas gravitatorias continuas. El eje vertical es la **amplitud de deformación intrínseca** de las ondas gravitatorias, mientras que el eje horizontal es la **frecuencia** a la cual oscilan las ondas gravitatorias. Las líneas continuas indican una estimación previa a la búsqueda del nivel de ondas gravitatorias que pensamos que podríamos detectar con los detectores LIGO Hanford (rojo), LIGO Livingston (azul) y Virgo (morado). Los triángulos naranjas indican los **límites de ralentización** para cada púlsar. Las cruces negras indican los **límites superiores** establecidos utilizando el método de búsqueda de ondas continuas ("F-stat"), mientras que los pentágonos azules indican los establecidos utilizando otro método ("5-vec"). Para los dos métodos, obtenemos los límites superiores simulando las señales de ondas gravitatorias de cada púlsar y comprobando lo fuertes que tienen que ser para poderse detectar el 95% de las veces. Vemos que en 7 casos las cruces y los pentágonos están por debajo de los triángulos naranjas, lo que indica que fijamos límites superiores mejores que el límite de ralentización.



Los límites más restrictivos, para PSR J0711–6830, fijan el tamaño máximo de la montaña en 0,17 mm (suponiendo una estrella de 10 km de radio). Proporcionalmente, si la Tierra fuese una esfera perfecta, ¡la "montaña" de la que hablamos aquí tendría el tamaño de una pelota de fútbol! En el caso de la búsqueda posterior a los *glitches*, los límites debidos a los argumentos energéticos fueron inferiores a los límites establecidos por la búsqueda de todos los *glitches* observados, lo que significa que todavía tenemos que esperar futuras mejoras de nuestros detectores para establecer restricciones físicamente significativas a partir de estos tipos de búsquedas.

Aunque no hemos encontrado ondas gravitatorias en esta búsqueda, las estrellas de neutrones en rotación siguen siendo una fuente potencial prometedora. Esperamos poder volver a hacer la búsqueda con los datos más sensibles que llegarán con el cuarto periodo de observación de LIGO, Virgo y KAGRA, que actualmente se espera que comience a finales del 2022.



**Figure 4** (Figura 7 en la publicación): Los límites superiores en la amplitud de la deformación de las ondas gravitatorias que obtuvimos con los datos alrededor y después de los glitches de los púlsares que se observaron con telescopios electromagnéticos en el cronometraje de 6 púlsares durante el O3. Cada panel muestra los límites superiores de una búsqueda, en la cual 5 púlsares sufrieron un único glitch y, por lo tanto, un único conjunto de resultados cada uno durante O3, mientras que el "Gran Glitcher" J0537–6910 sufrió cuatro glitches en O3 y aparece con cuatro conjuntos de resultados. Los límites superiores  $h_0^{95}$  se obtienen de forma similar a los de la Figura 2, es decir, como el valor de la deformación en que el 95% de las señales simuladas son recuperadas con éxito por nuestro método de búsqueda. Sin embargo, aquí hemos buscado señales transitorias, donde las señales más cortas son más difíciles de detectar. Por lo tanto, estos límites superiores (curva negra y puntos de datos) se muestran como funciones de la duración de la señal  $\tau$  (en días), y son generalmente más bajos (más restrictivos) hacia duraciones más largas. Como comparación, la franja roja de cada panel muestra una estimación indirecta de lo fuerte que podría ser la señal procedente del glitch, su frecuencia de rotación y cuánto aumentó esta frecuencia en el glitch. Como nuestros resultados observacionales no llegan a estar por debajo de esta estimación indirecta para ninguno de los glitches, desafortunadamente todavía no disponemos de la sensibilidad suficiente para investigar realmente la física de lo que puede estar sucediendo en el interior de una estrella de neutrones durante un glitch. (Uno podría preguntarse por qué algunas de las curvas no cubren todo el rango de valores de  $\tau$ . Esto se debe al hecho de que no disponemos de datos del detector de ondas gravitatorias para los rangos de datos correspondientes después de estos glitches).

## GLOSARIO

**Deformación:** El cambio fraccionario de la distancia entre dos puntos de medida (por ejemplo, los espejos de un detector interferométrico) debido a la deformación del espacio-tiempo provocada por una onda gravitatoria que pasa.

**Frecuencia de giro:** La rotación de un púlsar alrededor de su propio eje (su "giro") se puede medir con telescopios de radio, rayos X y otros contando la llegada de pulsos (cuando el "haz de luz" barre la Tierra) y el tiempo medio entre ellos. La unidad estándar de frecuencia es el Hertz (Hz).

**KAGRA:** El "Kamioka Gravitational Wave Detector" (**KAGRA**) es un detector interferométrico de ondas gravitatorias de 3 km de longitud situado en la mina Kamioka, en la prefectura de Gifu (Japón). Cuando esté acabado, utilizará espejos criogénicos para mejorar la sensibilidad del detector, especialmente en las frecuencias más bajas.

**LIGO:** El "**Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory**" consiste en dos detectores de ondas gravitatorias interferométricas de 4 km de longitud, separados unos 3000 km, situados en Livingston (LA) y Hanford (WA), en los Estados Unidos.

**Límite de ralentización:** Límite en la amplitud de las ondas gravitatorias procedentes de un púlsar basado en la suposición de que toda la energía cinética rotacional que pierde la estrella al ralentizar su rotación se invierte en radiación gravitatoria. Esto supone que se conoce con precisión la distancia al púlsar, mientras que en realidad las distancias de los púlsares pueden ser inciertas hasta en un factor de dos, aproximadamente. No obstante, sabemos que hay otras formas en que los púlsares pierden energía, siendo el mecanismo principal asumido la [radiación de dipolo magnético](#).

## MÁS INFORMACIÓN:

Visita nuestras webs:

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



Leer una [preimpresión gratuita](#) del artículo científico completo.

Traducción al castellano por Ángel Garrón Fernández-Pacheco y Joan Morgades Roca (a partir de la [versión original en inglés](#))

**Límite superior:** Valor máximo que puede tener alguna cantidad sin dejar de ser consistente con los datos. Aquí la cantidad de interés es la máxima amplitud de deformación intrínseca de una onda gravitatoria continua que llega a la Tierra. Tomamos el límite tal que hay un 95% de probabilidad de que la cantidad esté por debajo de este límite.

**Ondas electromagnéticas (EM):** Ondas compuestas por campos eléctricos y magnéticos acoplados. Estas ondas se conocen comúnmente como luz, aunque solo una pequeña parte de las longitudes de onda EM puede ser vista por el ojo humano. Por orden de longitud de onda creciente, los tipos de luz EM mencionados en este documento son: rayos Gamma, rayos X, UV (ultravioleta), visible (óptico), radio.

**Párese:** Unidad astronómica de longitud que corresponde aproximadamente a 3 años luz o 30 billones de kilómetros.

**Radiotelescopios:** Telescopios que miden las ondas de radio procedentes de todo el Universo. Los radiotelescopios pueden tener formas muy diversas. En algunos casos parecen grandes antenas parabólicas individuales (por ejemplo, el Telescopio [Lovell del Observatorio Jodrell Bank](#)) que pueden apuntar hacia donde se espera detectar las ondas de radio. En otros casos, hay muchas antenas parabólicas "más pequeñas" (de unos 10 m de diámetro, como el [telescopio MeerKAT](#)) las señales de las cuales se combinan para mejorar su sensibilidad a las ondas de radio débiles. Finalmente, hay algunos radiotelescopios que son estructuras metálicas largas y rígidas que no necesariamente "apuntan", sino que son sensibles al cielo directamente por encima ([aquí](#) se muestra un ejemplo). En este análisis utilizamos datos de todos estos tipos de telescopios. La lista de radiotelescopios utilizados figura en el documento.

**Supernova:** Una supernova es una explosión de una estrella masiva al final de su vida. Esta explosión es extremadamente luminosa: puede eclipsar una galaxia entera e irradiar tanta energía como la que podría irradiar el Sol durante toda su vida en pocas semanas. La mayor parte del material de la estrella es expulsado y lo que queda es un objeto extremadamente denso y compacto, como una estrella de neutrones o un agujero negro.

**Telescopios de rayos X:** Telescopios que miden los rayos X provenientes de todo el Universo. En general, estos telescopios cuentan los fotones individuales que llegan, en lugar de medir un flujo constante como hacen los radiotelescopios.

**Virgo:** Detector de ondas gravitatorias situado cerca de Pisa (Italia). Al igual que LIGO, es un interferómetro láser, pero con brazos de 3 km de longitud.