

# NA PROCURA DE PÚLSARES DANZANTES NO MEDIO DA SINFONÍA GRAVITACIONAL DO UNIVERSO

Non todas as [ondas gravitacionais](#) son iguais entre si. Algunhas orixínanse en [colisións cósmicas](#), cando [buratos negros](#) ou [estrelas de neutróns](#) (NS) chocan entre si, enviando ondas a través do espazo-tempo. Outras, como as deste estudo, son moito máis débiles, mais duran moito máis tempo. Trátase de [ondas gravitacionais continuas](#) (CW): o «latexo» cósmico constante dunha estrela de neutróns imperfecta que xira.

As estrelas de neutróns son núcleos densos e compactos que quedan tras as [explosións supernova](#) de [estrelas masivas](#), cunha masa entre 10 e 25 veces superior á do noso [Sol](#). Pese a ter só uns 20 km de diámetro, poden conter máis masa que o propio Sol. Algunhas xiran centos de veces por segundo e, se o seu contido de materia non é perfectamente simétrico, esta lixeira imperfección pode facer que emitan ondas gravitacionais. Cando unha estrela de neutróns forma parte dun [sistema binario](#) (véxase a [figura 1](#)), o seu sinal vólvese máis complexo, pero tamén pode ser máis intenso. Isto débese a que a masa transferida dende unha estrela compañeira a través da [acreción](#) pode acelerar a súa rotación, o que aumenta a probabilidade de detectar ondas gravitacionais. As estrelas de neutróns atópanse entre os obxectos máis compactos do universo, e detectar CWs procedentes delas proporcionaríanos información valiosa sobre a física da materia en condicións extremas. Os astrónomos estiman que pode haber arredor de cen millóns de estrelas de neutróns na nosa galaxia, mais só foron identificadas uns poucos miles. Resolver esta discrepancia é unha das principais motivacións para realizar buscas como a descrita neste estudo.

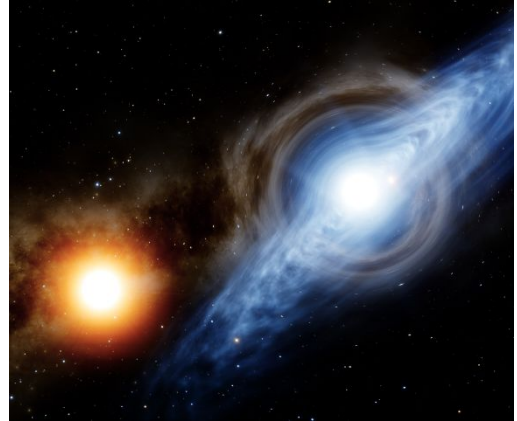


Figura 1. Unha estrela de neutróns (dereita) nun sistema binario cunha estrela compañeira (esquerda). Fonte: simulador [SpaceEngine](#).

## COMO BUSCAMOS ESTES SINAIS?

Canto máis se desvía unha estrela de neutróns dunha forma perfectamente esférica, máis intensas son as ondas gravitacionais continuas que pode producir. Para atopar estes sinais débiles, científicos e científicas examinan os datos dos detectores de ondas gravitacionais [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK), na procura de indicios de CWs procedentes da poboación de estrelas de neutróns da Vía Láctea.

Este estudo centrouse en estrelas de neutróns descoñecidas en sistemas binarios, empregando datos da primeira parte da cuarta [campaña de observación](#) de LVK, O4a (de maio de 2023 a xaneiro de 2024). Buscamos en todo o ceo, tendo en conta todas as posibles localizacións das fontes, sinais no rango de frecuencias de 100 a 350 Hz. Este rango corresponde ás bandas máis sensibles da campaña O4a.

O sinal de CW procedente da NS fonte aparece como unha frecuencia única e constante no marco de referencia da fonte. Porén, os nosos detectores están en movemento: xiran ca Terra e orbitan arredor do Sol, provocando unha [modulación Doppler](#) do sinal. No caso dunha estrela de neutróns nun sistema binario, a súa propia órbita engade unha segunda capa de modulación Doppler. Este efecto «dobre Doppler» dá lugar a que a frecuencia do sinal sexa modulada seguindo un patrón distintivo.

Para describir o movemento dunha estrela de neutróns na súa órbita, empregamos tres parámetros: o semieixo maior proxectado (o tamaño da súa órbita visto dende a Terra), o período orbital (o tempo que tarda en completar unha órbita) e a fase orbital (a súa posición na órbita nun momento dado). Nesta busca, consideramos semieixos maiores proxectados entre 5 e 15 **segundos-luz** e períodos orbitais entre 7 e 15 días, rangos nos que se atopan moitas estrelas de neutróns coñecidas.

Empregamos unha nova ferramenta de análise chamada **FastTracks**, un algoritmo acelerado por GPU deseñado para acelerar as buscas de CW. FastTracks comproba se as trazas nos datos de tempo-frecuencia (véxase a [figura 2](#)) son coherentes co aspecto que debería ter un sinal de CW.

## PARA MÁIS INFORMACIÓN:

Visita as nosas [www.ligo.org](http://www.ligo.org)  
páxinas web: [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)  
[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



A nosa busca realizouse no dominio tempo-frecuencia, empregando [transformadas de Fourier cortas \(SFT\)](#) de 1024 segundos cada unha. A busca constou de dous pasos: primeiro aplicamos a [transformada de Hough](#) aos datos e buscamos sinais persistentes no [espectrograma](#). En segundo lugar, para as pistas máis prometedoras, repetimos o cálculo empregando as pistas de potencia das SFT.

## SENSIBILIDADE DA BUSCA E IMPLICACIÓNS ASTROFÍSICAS

Non atopamos ningunha evidencia de sinais de ondas gravitacionais continuas nesta busca. Porén, este resultado nulo permítenos determinar a sensibilidade da nosa busca, é dicir, a que distancia poderíamos ter detectado tales sinais se estiveran presentes. Para iso, inxectamos miles de sinais CW simulados nos datos e medimos a frecuencia ca que a nosa análise é quen de recuperalos. A partir destas probas, determinamos a amplitude máis pequena do sinal que a nosa busca podía detectar, logrando as mellores sensibilidade ata a data para esta rexión do espazo de parámetros.

Amosamos a sensibilidade da nosa busca de dúas formas: a **figura 3** amosa a distancia máxima á que a nosa busca podería detectar unha estrela de neutróns, para diferentes valores posibles da súa [elipticidade](#) (unha medida de canto se desvía a forma da estrela da simetría axial perfecta). As estrelas máis deformadas poden producir sinais CW máis intensos, o que as fai detectables dende maiores distancias. A **figura 4** presenta os mesmos resultados dende unha perspectiva diferente: a deformación máxima permitida dunha estrela de neutróns sen ser detectada pola nosa busca, en función da frecuencia. A nosa busca considerou fontes con [taxas de desaceleración](#) da frecuencia de emisión insignificantes (o dobre da taxa de desaceleración da estrela de neutróns emisora). En ambas figuras, as rexións sombreadas marcan os casos con taxas de desaceleración requiridas que estaban fóra do rango que exploramos.

Estes resultados establecen os límites máis estritos ata a data para sinais de CW procedentes de estrelas de neutróns descoñecidas en sistemas binarios para os parámetros orbitais explorados. Foron posibles grazas a dous factores clave: a mellora de sensibilidade dos detectores durante a campaña de observación O4a e o rendemento optimizado do noso novo algoritmo FastTracks. Incluso sen unha detección, estas restricións son valiosas, posto que reducen o rango de propiedades posibles da poboación de estrelas de neutróns invisibles da nosa galaxia.

### GLOSARIO

**Acreción:** transferencia de materia entre dous corpos en órbita debido á acción da gravidade. A materia que cae adoita formar un [disco de acreción](#) debido á conservación do momento angular. Neste disco, o gas xira en espiral cara o centro, xuntándose a medida que o potencial gravitacional se transforma en enerxía térmica.

**Campaña de observación:** período durante o cal os nosos interferómetros recollen datos para a súa análise astrofísica.

**Elipticidade:** medida do lonxe que está un corpo da esfericidade, definida como a deformación relativa ao longo do plano ecuatorial con respecto á deformación ao longo da dirección perpendicular.

**Espectrograma:** representación visual da composición de frecuencias dunha serie temporal. ([Wikipedia](#))

**Estrela de neutróns:** resto do proceso de supernova que sofre unha estrela cunha masa entre 8 e 25 veces a masa do noso Sol. As estrelas de neutróns típicas teñen unha masa de entre 1 e 2 masas solares e un radio de entre 10 e 15 quilómetros, sendo algúns dos obxectos máis compactos xamais descubertos.

**Estrela masiva:** as estrelas masivas teñen masas superiores a aproximadamente 8 veces a [masa do Sol](#). Só estas estrelas masivas poden formar unha estrela de neutróns despois de explotar como supernova. Se teñen masas inferiores, o remanente convértese nunha estrela anana branca.

**FastTracks:** motor masivamente paralelo deseñado para avaliar as estatísticas de detección de sinais de ondas gravitacionais continuas empregando computación GPU en datos similares á transformada de Fourier corta.

**Kiloparsec (kpc):** mil parsecs. Un [parsec](#) é unha unidade astronómica de lonxitude, que corresponde aproximadamente a 3,26 anos luz ou 30 billóns de quilómetros.

**Ondas gravitacionais continuas:** ondas gravitacionais que duran moito tempo a unha frecuencia aproximadamente constante. Estas ondas son creadas por fontes como estrelas de neutróns que xiran rapidamente con, por exemplo, unha pequena desviación da simetría axial perfecta: as ondas son extremadamente débiles, mais duran moito máis tempo que o tempo de observación. Isto permítenos analizar longos tramos de datos para extraer o sinal débil do ruído. Isto difire doutros fenómenos de ondas gravitacionais, como por exemplo as coalescencias binarias compactas, nas que se emiten sinais fortes mais de curta duración ([LIGO](#), [AEI](#)).

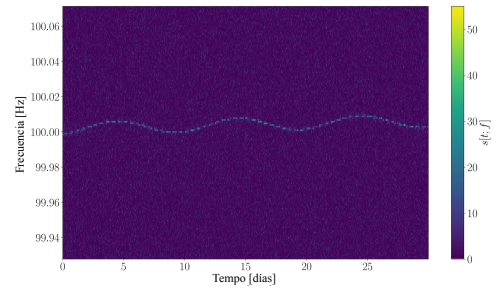
**Segundo-luz:** a distancia que percorre a luz nun segundo. ([Wikipedia](#))

**Sistema binario:** par de obxectos astronómicos unidos pola súa atracción gravitatoria. ([Wikipedia](#))

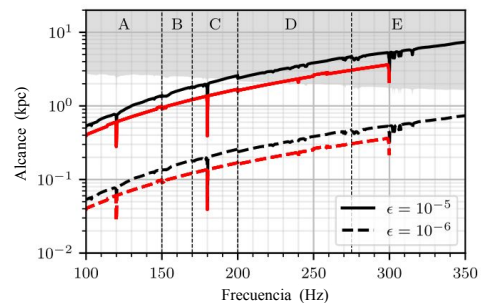
**Taxa de desaceleración:** velocidade á que unha estrela de neutróns en rotación diminúe debido á emisión de enerxía a través de ondas electromagnéticas ou gravitacionais.

**Transformada de Hough:** algoritmo para identificar formas ben descritas en imaxes, como as descritas por un espectrograma. ([Wikipedia](#))

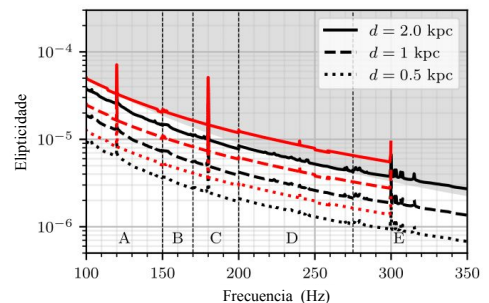
**Unidade de procesamento gráfico (GPU):** hardware especializado adecuado para o procesamento de datos mediante paralelización masiva.



**Figura 2:** Un sinal CW simulado nun *espectrograma* (gráfico que mostra a frecuencia do sinal en función do tempo). Este exemplo mostra unha estrela de neutróns que xira 50 veces por segundo e orbita arredor dunha compañeira cada 10 días. As modulacións de amplitude débense ao cambio diario na sensibilidade dos detectores para esa parte do ceo.



**Figura 3:** Alcance astrofísico máximo en [kiloparsecs \(kpc\)](#) cuberto pola busca en función da frecuencia. As dúas curvas negras representan diferentes valores de [elipticidade](#) das estrelas de neutróns. Canto maior sexa a elipticidade, máis fortes serán as ondas gravitacionais xeradas. A zona sombreada en gris indica as distancias excluídas polo límite imposto pola desaceleración máxima utilizada na análise. A figura amosa unha comparación entre os resultados da busca anterior (O3a BinarySkyHough, en vermello) e os resultados da presente busca (en negro).



**Figura 4:** Deformación máxima (elipticidade) permitida para unha NS fóra do alcance da nosa busca en función da frecuencia. As curvas representan, a diferentes frecuencias, o grao de deformación que debe ter unha NS para producir unha CW detectable ca nosa busca. A zona sombreada en gris indica os valores excluídos por ser superiores á desaceleración máxima empregada. A figura mostra unha comparación entre os resultados da busca anterior (O3a BinarySkyHough, en vermello) e os resultados da presente busca (en negro).

### PARA MÁIS INFORMACIÓN:

Visita as nosas [www.ligo.org](http://www.ligo.org)  
páxinas web: [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)  
[gwcenter.icrru-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrru-tokyo.ac.jp/en/)

Le unha versión preliminar gratuita do artigo científico completo [aquí](#) ou en [arxiv](#).

Le unha introdución ás ondas gravitacionais continuas [aquí](#).

*Tradución ao galego por Sofia Bussières e Raúl Rodríguez (a partir da versión orixinal en inglés).*