

A LA RECERCA DE PÚLSARS D'ANARS ENMIG DE LA SIMFONIA GRAVITACIONAL DE L'UNIVERS

No totes les [ones gravitacionals](#) són iguals. Algunes s'originen en [col·lisions còsmiques](#), quan els [forats negres](#) o les [estrelles de neutrons](#) (NSs) xoquen entre si i, com a conseqüència, envien ones a través de l'espai-temps. D'altres, com les d'aquest estudi, són molt més febles, però duren molt més temps. Es tracta d'[ones gravitacionals contínues](#) (CWs): el «batec» còsmic constant d'una estrella de neutrons imperfecta que gira.

Les estrelles de neutrons són nuclis densos i compactes que queden després de les [explosions supernova d'estrelles massives](#), amb una massa entre 10 i 25 vegades superior a la del [nostre Sol](#). Malgrat tenir només uns 20 km de diàmetre, poden contenir més massa que el propi Sol. Algunes giren centenars de vegades per segon i, si el seu contingut de matèria no és perfectament simètric, aquesta lleugera imperfecció pot fer que emetin ones gravitacionals. Quan una estrella de neutrons forma part d'un [sistema binari](#) (vegeu la [figura 1](#)), el seu senyal torna més complexe, però també pot ser més fort. Això es deu al fet que la massa transferida des d'una estrella companya a través de l'[acreció](#) pot accelerar la seva rotació, la qual cosa augmenta la probabilitat de detectar ones gravitacionals.



Figura 1. Una estrella de neutrons (dreta) en un sistema binari amb una estrella companya (esquerra). Font: simulador [SpaceEngine](#).

Les estrelles de neutrons es troben entre els objectes més compactes de l'univers, i detectar CWs procedents d'elles ens proporcionaria informació valuosa sobre la física de la matèria en condicions extremes. Els astrònoms estimen que pot haver-hi al voltant de cent milions d'estrelles de neutrons en la nostra galàxia, però només se n'han identificat uns pocs milers. Resoldre aquesta discrepància és una de les principals motivacions per realitzar cerques com la que es descriu en aquest estudi.

COM CERCAM AQUESTS SENYALS?

Com més es desvia una estrella de neutrons d'una forma perfectament esfèrica, més intenses són les ones gravitacionals contínues que pot produir. Per trobar aquests senyals febles, científics i científiques examinen les dades dels detectors d'ones gravitacionals [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK), a la recerca d'indis de CWs procedents de la població d'estrelles de neutrons de la Via Làctia.

Aquest estudi es centra en estrelles de neutrons desconegudes en sistemes binaris i utilitza dades de la primera part de la quarta [campanya d'observació](#) de LVK, O4a (de maig de 2023 a gener de 2024). La cerca s'ha duit a terme per tot el cel, tenint en compte totes les possibles ubicacions de les fonts, per a senyals en el rang de freqüències de 100 a 350 Hz. Aquest rang correspon a les bandes més sensibles de la campanya O4a.

El senyal d'ona contínua procedent de la NS font apareix com una freqüència única i constant en el marc de referència de la font. Però els nostres detectors es mouen, giren amb la Terra i orbiten al voltant del Sol, la qual cosa provoca una [modulació Doppler](#) del senyal. En el cas d'una estrella de neutrons en un sistema binari, la seva pròpia òrbita afegeix una segona capa de modulació Doppler. Aquest efecte «doble Doppler» provoca que la freqüència del senyal es moduli seguint un patró distintiu.

Per descriure el moviment d'una estrella de neutrons en la seva òrbita utilitzam tres paràmetres: el semieix major projectat (la grandària de la seva òrbita vista des de la Terra), el període orbital (el temps que triga a completar una òrbita) i la fase orbital (la seva posició en l'òrbita en un moment donat). En aquesta cerca, consideram semieixos majors projectats entre 5 i 15 [segons llum](#) i períodes orbitals entre 7 i 15 dies, rangs en què es troben moltes estrelles de neutrons conegudes.

Utilitzam una nova eina d'anàlisi anomenada **FastTracks**, una algorisme accelerat mitjançant l'ús de **GPU** dissenyat per accelerar les cerques de CW. FastTracks comprova si les traces en les dades de temps-freqüència (vegeu la [figura 2](#)) són coherents amb l'aspecte que hauria de tenir un senyal de CW.

PER MÉS INFORMACIÓ:

Visita les nostres www.ligo.org
pàgines web: www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



La nostra cerca es va realitzar en el domini temps-freqüència mitjançant les [transformades de Fourier curtes](#) (SFT) de 1024 segons cadascuna. La cerca consta de dues passes: primer aplicam la [transformada de Hough](#) a les dades i cercam senyals persistents a l'[espectrograma](#). En segon lloc, per a les pistes més comprometedores, les tornam a calcular emprant les pistes de potència de les SFTs.

SENSIBILITAT DE LA CERCA I IMPLICACIONS ASTROFÍSQUES

No s'ha trobat cap evidència de senyals d'ones gravitacionals contínues en aquesta cerca. No obstant això, aquest resultat nul ens permet determinar la sensibilitat de la nostra cerca, és a dir, a quina distància podríem haver detectat els senyals si haguessin estat presents. Per tal de fer això, injectam a les dades reals milers de senyals CW simulades i mesuram amb quina freqüència la nostra anàlisi recupera aquests senyals. A partir d'aquestes proves, determinam l'amplitud de senyal més petita que la nostra cerca pot detectar, amb la qual cosa aconseguim les millors sensibilitats fins a la data per a aquesta regió de l'espai de paràmetres.

Mostram la sensibilitat de la nostra cerca de dues formes: la **figura 3** mostra la distància màxima a la qual la nostra cerca podria detectar una estrella de neutrons per a diferents valors possibles de la seva [el·liplicitat](#) (una mesura de quant es desvia la forma de l'estrella de la simetria axial perfecta). Les estrelles més deformades poden produir senyals CW més forts, cosa que els fa detectables a majors distàncies. La **figura 4** presenta els mateixos resultats des d'una perspectiva diferent: la deformació màxima permesa d'una estrella de neutrons sense ser detectada per la nostra cerca, en funció de la seva freqüència. La nostra cerca considerava fonts amb [taxes de desacceleració](#) de la freqüència d'emissió insignificants (el doble de la taxa de desacceleració de l'estrella de neutrons emissora). En ambdues figures, les regions ombrejades marquen els casos amb taxes de desacceleració requerides que són fora del rang que exploràvem.

Aquests resultats estableixen els límits més estrictes fins a la data pels senyals de CW procedents d'estrelles de neutrons desconegudes en sistemes binaris per als paràmetres orbitals explorats. Això ha sigut possible gràcies a dos factors clau: la millora de la sensibilitat dels detectors durant la campanya d'observació O4a i el rendiment optimitzat del nostre nou algorisme FastTracks. Fins i tot sense cap detecció, aquestes restriccions són valuoses, ja que redueixen el rang de propietats possibles de la població d'estrelles de neutrons invisibles de la nostra galàxia.

GLOSSARI

Acreó: Transferència de matèria entre dos cossos en òrbita a causa de l'acció de la gravetat. La matèria que cau sol formar un [disc d'acreció](#) com a conseqüència de la conservació del moment angular. En aquest disc, el gas gira en espiral cap al centre i s'escalfa a mesura que el potencial gravitatori es converteix en energia tèrmica.

Campanya d'observació: Període durant el qual els nostres interferòmetres recullen dades per a la seva anàlisi astrofísica.

El·liplicitat: mesura de com de lluny es troba un cos de l'esfericitat, definida com la deformació relativa al llarg del pla equatorial respecte de la deformació al llarg de la direcció perpendicular.

Espectrograma: Representació visual de la composició de freqüències d'una sèrie temporal. ([Wikipedia](#))

Estrella de neutrons: Resta del procés de supernova que pateix una estrella amb una massa entre 8 i 25 cops la massa del nostre Sol. Les estrelles de neutrons típiques tenen una massa d'entre 1 i 2 masses solars i un radi d'entre 10 i 15 kilòmetres, essent alguns dels objectes més compactes mai descoberts.

Estrella massiva: Les estrelles massives tenen masses superiors a aproximadament 8 vegades la [massa del Sol](#). Només aquestes estrelles massives poden formar una estrella de neutrons després d'explotar com supernoves. Si tenen masses inferiors, el romanent es converteix en una estrella nana blanca.

FastTracks: eina massiva paral·lelitzada dissenyada per avaluar les estadístiques per a la detecció de senyals d'ones gravitacionals contínues mitjançant la computació GPU en dades similars a la transformada de Fourier curta.

Kiloparsec (kpc): Mil parsecs. Un [parsec](#) és una unitat astronòmica de longitud, que correspon aproximadament a 3,26 anys llum o 30 bilions de kilòmetres.

Ones gravitacionals contínues: Ones gravitacionals que duren molt de temps a una freqüència aproximadament constant. Aquestes ones són creades per fonts com estrelles de neutrons que giren ràpidament amb, per exemple, una petita desviació de la simetria axial perfecta: les ones són extremadament febles, però duren molt més temps que el temps d'observació. Això ens permet analitzar llargs trams de dades per extreure el senyal feble del nou. Això difereix d'altres fenòmens d'ones gravitacionals, com per exemple les coalescències de binàries compactes, en què s'emeten senyals forts però de curta durada. ([LIGO AEI](#))

Segon llum: La distància que recorre la llum en un segon. ([Wikipedia](#))

Sistema binari: Parell d'objectes astronòmics units per la seva atracció gravitatòria. ([Wikipedia](#))

Taxa de desacceleració: Ritme al qual la velocitat de rotació d'una estrella de neutrons s'alenteix a causa de l'emissió d'energia a través d'ones electromagnètiques o gravitacionals.

Transformada de Hough: algorisme per identificar formes ben descrites a imatges, com les descrites per un espectrograma. ([Wikipedia](#))

Unitat de processament gràfic (GPU): hardware especialitzat adequat per al processament de dades mitjançant la paral·lelització massiva.

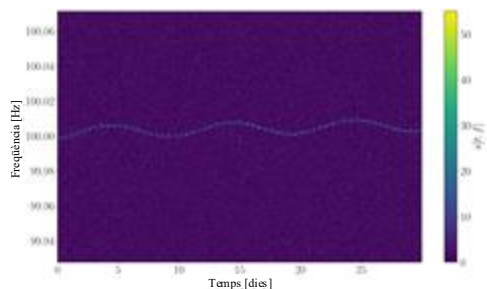


Figura 2: Un senyal CW simulat en un espectrograma (gràfica que mostra la freqüència del senyal en funció del temps). Aquest exemple mostra una estrella de neutrons que gira 50 vegades per segon i orbita al voltant d'una companya cada 10 dies. Les modulacions d'amplitud es deuen al canvi diari en la sensibilitat dels detectors per a aquella part del cel.

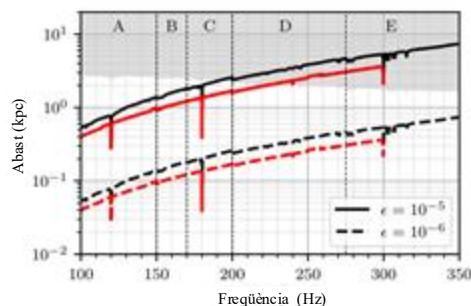


Figura 3: Abast astrofísic màxim en [kiloparsecs](#) (kpc) cobert per la cerca en funció de la freqüència. Les dues corbes negres representen diferents valors d'[el·liplicitat](#) de les estrelles de neutrons. Com major sigui l'el·liplicitat, més fortes seran les ones gravitacionals generades. La zona ombrejada en gris indica les distàncies exclòs pel límit imposat per la desacceleració màxima emprada a l'anàlisi. La figura mostra una comparació entre els resultats de la cerca anterior (O3a BinarySkyHough, en vermell) i els resultats de la cerca present (en negre).

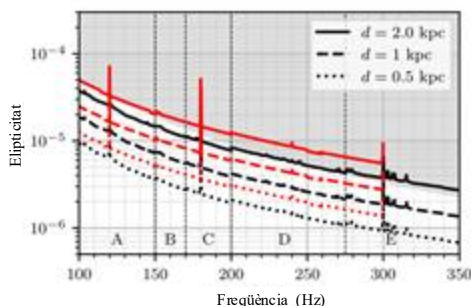


Figura 4: Deformació màxima (el·liplicitat) permesa per una NS fora l'abast de la nostra cerca en funció de la freqüència. Les corbes representen, a diferents freqüències, el grau de deformació que ha de tenir una NS per produir un CW detectable amb la nostra cerca. La zona ombrejada en gris indica els valors exclòs per ser superiors a la desacceleració màxima emprada a la nostra cerca. La figura mostra una comparació entre els resultats de la cerca anterior (O3a BinarySkyHough, en vermell) i els resultats de la cerca present (en negre).

PER A MÉS INFORMACIÓ:

Visita les nostres [www.ligo.org](#)
pàgines web: [www.virgo-gw.eu](#)
[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](#)

Llegeix una versió preliminar gratuïta de l'article científic complet [aquí](#) o a [arxiv](#).

Llegeix una introducció a les ones gravitacionals contínues [aquí](#).

Traducció al català per Irene Prohens Peteracova i Marta Carrió (a partir de la versió en castellà de Pablo García), revisada per Maria Antònia Ferrer.