

# ESTRELLES DE NEUTRONS: PER DESGRÀCIA, MÉS LLISES QUE LES BOLES DE BILLAR

Les [estrelles de neutrons](#) són, com sabem, llises. Els efectes de la gravetat estan aixafant aquestes estrelles sorprenentment denses, que tenen radis de només uns 12 km, però contenen més [massa que el Sol](#). La gravetat aclaparadora de l'estrella tendeix a recoure, és a dir, a suavitzar qualsevol bony, gran o petit, que pugui aparèixer per trencaments de la superfície o per acreció de material interestel·lar.

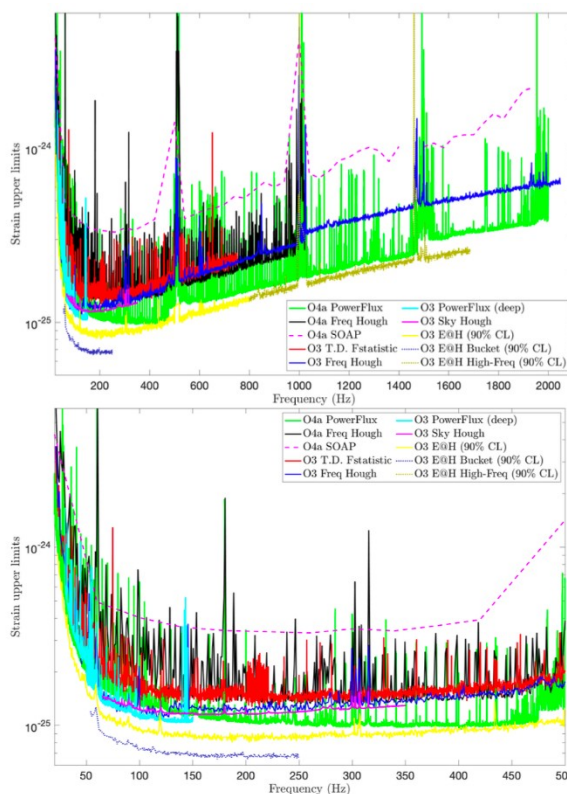
Els científics de [LIGO-Virgo-KAGRA](#) han dut a terme cerques en dades recents de [LIGO](#) (amb la [sèrie d'observacions](#) O4a – de maig de 2023 a gener de 2024) per demostrar que aquest procés de recoure no hagi funcionat perfectament per a alguna estrella de neutrons a algun lloc de la nostra galàxia. Fent cerques de tot el cel [d'ones gravitacionals contínues](#) (CWs) en un ampli rang de freqüències (de 20 fins a 2000 Hz), un pot intentar trobar una estrella de neutrons inusual que sigui prou rugosa per fer girar l'espai al voltant de l'estrella mentre gira al voltant del seu eix.

S'espera la freqüència de l'ona resultant com el doble de la freqüència de la rotació de l'estrella. Per exemple, una estrella que gira 100 vegades per segon al voltant del seu eix emetria ones gravitacionals contínues amb una freqüència de senyal de 200 Hz. A mesura que l'estrella perd energia per aquesta radiació emesa, la freqüència de gir disminueix lentament, fent que la freqüència de senyal faci el mateix. Les cerques realitzades permeten disminucions màximes de 3/10 Hz per any. S'espera que l'amplitud d'una CW sigui petita (molt menor que una part en un bilió de bilions).

## COM HEM CERCAT I QUÈ HEM TROBAT?

S'han emprat tres tipus de cerca diferents (SOAP, PowerFlux i Frequency Hough) per buscar estrelles de neutrons tan inusuals. Els tres algorismes adopten diferents enfocaments, però tots es basen en cercar senyals sinusoidals i monocromàtics (una sola freqüència) en dades de LIGO. Els espectres basats en [transformades de Fourier](#) es calculen per a milers d'interval·ls de dades, amb durades d'entre 1024 fins a 16384 segons. Amb aquests espectres trobam la mitjana conjunta durant el període d'execució, permetent també petites modulacions ([desplaçaments Doppler](#)) en la freqüència i intensitat del senyal causats pel moviment de la Terra (és a dir, la rotació diària i el moviment orbital anual al voltant del Sol).

Els programes de Powerflux i Frequency Hough osberven explícitament un gran nombre de possibles patrons de senyal per distintes combinacions de la posició al cel, la freqüència i la seva primera derivada; cada una representant una forma d'ona de [plantilla](#) diferent, mentre que el programa SOAP<sup>‡</sup> no realitza una cerca tan explícita de patrons particulars.



**Figure 1:** [També Fig. 2 del nostre article] Límits superiors de l'amplitud de la deformació de l'ona gravitacional contínua vs la freqüència de senyal trobada en les cerques, mostrats en comparació amb els límits de cerca anteriors al període d'observació O3. El gràfic superior mostra el rang de cerca complet de 20 a 2000 Hz. L'inferior mostra un zoom del rang de 20-500 Hz. Els nombrosos pics ascendents corresponen a contaminacions instrumentals o ambientals (conegudes com a "línies").

<sup>‡</sup>SOAP significa "Snakes on a Plane" ("Serps a l'avió", però no la pel·lícula!) perquè en un pla espectromètric definit pel temps a l'eix horitzontal i la freqüència al vertical, alguns senyals d'ones gravitacionals contínues s'assemblen a serps movent-se, un patró que SOAP està ben preparat per detectar.

Com a resultat, SOAP ha reduït la sensibilitat per als senyals esperats d'estrelles de neutrons aïllades en comparació a altres enfocaments, però també és molts ordres de magnitud més ràpid que els altres dos programes i té el potencial de detectar senyals inesperats amb una evolució de freqüència imprevista.

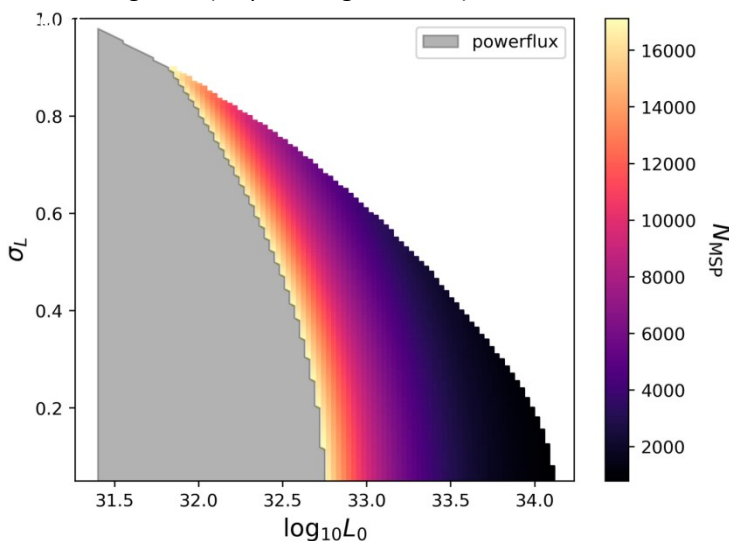
Per desgràcia, no s'han observat senyals de CW. La **figura 1** mostra els límits resultants de l'amplitud de la deformació gravitacional adimensional. La millor sensibilitat es troba al voltant dels 290 Hz on els límits es col·loquen en valors de deformació majors a  $9.7 \times 10^{-26}$ .

## QUÈ VOLEN DIR ELS RESULTATS NEGATius DE CERCA?

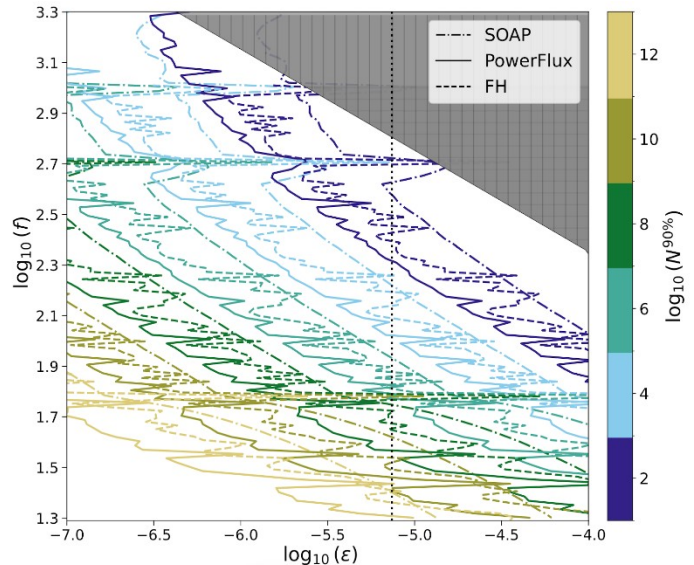
En aquest article, els científics de LVK han interpretat els resultats negatius per abordar tres problemes astrofísics específics:

1. La "suavitat" de la població de totes les estrelles de neutrons a la Via Làctea;
2. La població de púlsars de mil·lisegons (és a dir, amb freqüències de rotació superiors a 100 Hz) a prop del centre galàctic, que es creu que són estrelles que podrien contribuir significativament a l'excés de raigs gamma d'alta energia vistos en aquella regió (referides com "excés de GeV"); i
3. La contribució potencial a la matèria fosca a causa dels sistemes binaris de forats negres primordials en fase d'aproximació on els forats negres tenen masses similars a les d'un asteroide i emeten senyals quasi monocromàtics similars als d'estrelles de neutrons rotants que presenten deformacions.

La **figura 2** mostra una manera de caracteritzar els límits d'esfericitat de les estrelles de neutrons. L'eix horitzontal és el logaritme decimal de l'el·lipticitat, que és una mesura adimensional de la manca de simetria axial o la rugositat (en petita o gran escala) de l'estrella. L'eix vertical és el logaritme de la freqüència en Hz. Les



**Figura 3:** [També Fig. 6 del nostre article] Regió d'exclusió (gris) per a un paràmetre de la funció de lluminositat per a púlsars de mil·lisegons per als quals l'absència de detecció de CWs és consistent amb una explicació de l'excés de GeV com a procedent dels púlsars. Les regions colorides mostren el nombre de MSPs necessaris per explicar l'excés de GeV per a l'elecció dels paràmetres de lluminositat  $L_0$  i  $\sigma_L$ .



**Figura 2:** [També Fig. 5 del nostre article] Contorns d'exclusió per al nombre d'estrelles de neutrons galàctiques (veure la barra de colors) per a diferents el·lipticitats assumides i freqüències d'ona gravitacional. Resultats per als diferents mètodes de cerca i per a diferents llindars d'exclusió per al nombre d'estrelles de neutrons.

corbes mostren els contorns d'exclusió del nombre d'estrelles de neutrons amb una el·lipticitat major a cert valor. Els colors de les corbes venen definits per la barra de colors a la dreta. Per exemple, per a un llindar d'el·lipticitat d'uns  $10^{-5}$  i una freqüència d'uns 200 Hz (al voltant de 2.3 a l'eix vertical), els resultats de la cerca PowerFlux (contorn lila sòlid) impliquen que no hi ha més d'unes 100 estrelles de neutrons a la galàxia amb una el·lipticitat major a aquest llindar.

## MÉS INFORMACIÓ:

Visita les nostres 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/)



En altres paraules, les estrelles de neutrons són més llises en relació amb els seus diàmetres que les boles de billar (encara que no són tan rodones perquè la seva ràpida rotació els aplatia, amb una major circumferència al voltant del seu equador que de pol a pol).

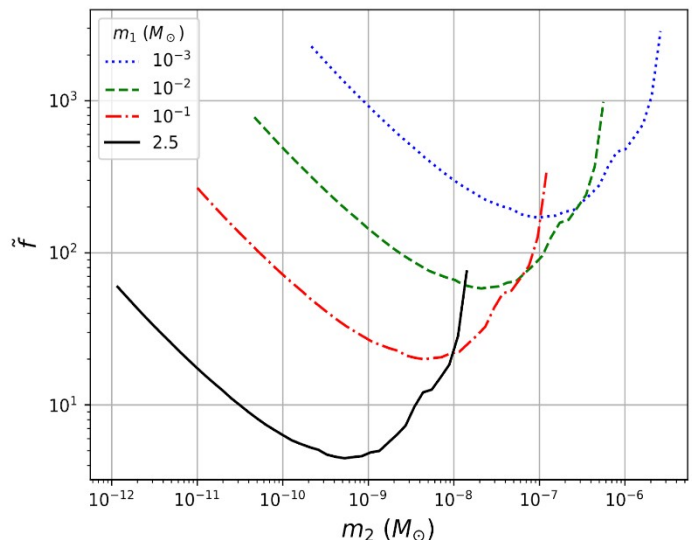
La **figura 3** mostra una altra manera d'interpretar els resultats de cerca negatius en termes de la seva capacitat d'explicar l'excés de GeV, que es refereix a l'excés inesperat d'intensitat de radiació de raigs gamma en GeV (o Giga**electronvolts**, on 1 GeV =  $10^9$  eV) i energies més altes, emeses des de prop del centre galàctic. Les dues principals explicacions físiques per a l'excés són l'aniquilació de partícules pesades de matèria fosca o bé una població de púlsars de mil·lisegons ocults a la vista electromagnètica per la pols de la galàxia, que no impedeix les ones gravitacionals emeses per aquestes estrelles.

A la figura, l'eix horitzontal indica el logaritme del paràmetre de lluminositat de raigs gamma d'un púlsar de mil·lisegons (a valors més baixos, més MSPs hi hauria d'haver per explicar l'excés de GeV). L'eix vertical és un paràmetre que regeix la forma de la funció de lluminositat. El codi de colors mostra el nombre de MSPs necessaris per a cada elecció de paràmetre per explicar l'excés. La regió grisa indica nombres de MSP tan grans que són inconsistents amb els resultats de cerca negatius, donada la fracció d'estrelles que probablement tenen una el·liplicitat detectable gravitacionalment (per a les quals hi ha dependència del model, abordat a l'article).

La **figura 4** mostra encara una altra manera més d'interpretar els resultats de cerca negatius. L'eix horitzontal representa el logaritme de la relació de masses entre un forat negre secundari en un sistema binari primordial de forats negres i la massa del Sol. Les diferents corbes mostren els límits d'exclusió per a una funció de formació de forats negres primordials, assumint diferents valors de massa per al forat negre més gran del sistema binari.

El fracàs de no trobar cap senyal de CW és decepcionant perquè, una vegada aquest tipus de senyal es veu, ens permetrà posar a prova la nostra comprensió de la pròpia gravetat i de l'estructura interna de les estrelles de neutrons, encara no completament coneguda. Un cop trobada, una estrella que emeti radiació de CW detectable podria ser estudiada durant anys, dècades o potser segles, emprant detectors d'ones gravitacionals cada cop millors. Aquests futurs detectors podrien ser aquí a la Terra, a l'espai o fins i tot a la Lluna. Els científics serien capaços d'estudiar les oscil·lacions de la pròpia radiació (les seves propietats de **polarització**) per comparar-les amb les prediccions de la **Teoria General de la Relativitat** d'Einstein i de **teories alternatives** exòtiques de la gravetat.

A més, hi hauria una gran possibilitat de detectar **electromagnèticament** una estrella de neutrons prèviament desconeguda, un cop les ones gravitacionals ens diguin on buscar al cel per trobar-la i quina freqüència de rotació podria modular els senyals de llum, que podrien ser detectables en una àmplia banda de radiació, des de la llum visible fins als raigs gamma. Una estrella d'aquest tipus, observada durant llargs períodes a través de radiació tant gravitacional com electromagnètica, seria la font astronòmica **multimissatgera** definitiva.



**Figura 4:** [També Fig. 9 del nostre article] Corbes d'exclusió de la formació de forats negres binaris primordials per a diferents masses assumides dels forats negres (les masses en unitats de la **massa solar**). Les regions sobre les corbes estan excloses per a diferents suposicions relatives a les masses  $m_1$  i  $m_2$  dels forats negres.

## DESCOBREIX MÉS

Visita les nostres 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/) (KAGRA)

Llegeix una preimpressió gratuïta de l'article científic complet aquí:  
<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500416/public>  
o a arxiv: <https://arxiv.org/abs/2603.14168>

Llegeix una introducció a les ones gravitacionals contínues:  
[https://ligo.org/gravitational-wave-science/#Continuous\\_waves](https://ligo.org/gravitational-wave-science/#Continuous_waves)

Llegeix el resum científic original a:  
<https://ligo.org/science-summaries/O4aAllSkyIsolatedCW/>

Traduït al català per Marta Carrió (a partir de la versió original en anglès) i revisat per Irene Prohens Peteracova.