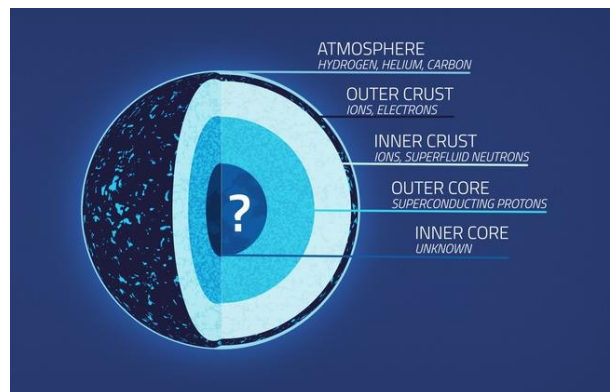


# DISSECCIONANT ELS INTERIORS DE LES ETSRELLES DE NEUTRONS AMB ONES GRAVITACIONALS

Les col·laboracions [LIGO Virgo](#) i [KAGRA \(LVK\)](#) han dut a terme una nova cerca de les increïblement febles [ones gravitacionals contínues](#) (CWs) emeses per les [estrelles neutrons](#) (NSs), els nuclis extremadament densos i en rotació que queden després que les estrelles massives pateixen una [explosió de supernova](#). Aquesta cerca, que ha utilitzat dades de la primera i la segona part de la quarta [campanya d'observació](#) (O4a: maig de 2023 - gener de 2024; i O4b: abril de 2024 - gener de 2025) dels [interferòmetres LIGO, Virgo i KAGRA](#), marca una altra fita en l'esforç per detectar ones gravitacionals no de [col·lisions còsmiques](#) sinó de fonts astrofísiques estables. Aquests senyals delicats i periòdics podrien obrir una finestra als interiors ocults de les NSs, els objectes més compactes del cosmos després dels [forats negres](#). Malgrat nombrosos esforços (vegeu la nostra darrera cerca [aquí](#)), aquests senyals continuen sense detectar-se, la qual cosa indica com s'apropen les NSs a una esfera perfecta.

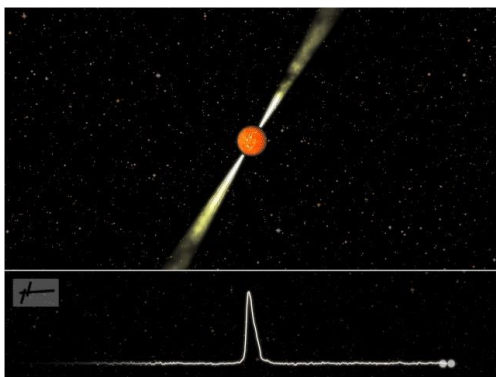
## QUINS OBJECTES EMETEN CWS I PER QUÈ SÓN INTERESANTS PER A NOSALTRES?

Les NSs són objectes densos i molt compactes amb una [massa superior a la del nostre Sol](#) comprimida en un radi d'uns 10 km. La densitat extrema fa entrar en joc fenòmens quàntics que determinen l'estructura d'aquests objectes extraordinaris. A diferència de les estrelles normals, es creu que són extremadament rígides i que tenen una estructura en capes (vegeu la [Figura 1](#)). Estan envoltats per una atmosfera molt fina, amb una escorça exterior i un nucli intern, on les propietats de la matèria tornen cada cop més exòtiques a mesura que s'acosta al centre de l'estrella. Algunes NSs roten centenars de vegades per segon, i, si la seva distribució de massa és lleugerament asimètrica, aquesta imperfecció pot fer que emetin CWs febles i periòdiques (CW) que encara no s'han detectat.



**Figura 1.** Esquema de l'estructura interior estratificada d'una NS. Crèdit: NASA GSFC. (Vegeu també aquest [article de revisió](#).)

Les NSs posseeixen camps magnètics extremadament forts, que són des de cent milions fins a un quadrilió de vegades més intensos que el camp magnètic de la Terra, i que generen feixos de radiació electromagnètica (vegeu la [Figura 2](#)) en un ampli rang de freqüències, des d'ones de ràdio fins a raigs X i gamma.



**Figure 2.** [Impressió d'un pulsar](#) que mostra l'estrella de neutrons en rotació, juntament amb els raigs de radiació electromagnètica emesos, i ressaltat l'arribada regular de polsos a un telescopi. Crèdit de la imatge: Joeri van Leeuwen, Llicència: [CC-BY-AS](#).

A mesura que l'estrella gira, aquests raigs escombren l'espai com un far còsmic, i produeixen polsos regulars cada vegada que creuen la nostra línia de visió a la Terra. Les observacions de pulsars en múltiples observatoris electromagnètics (EM) ens proporcionen mesures precises de les posicions dels pulsars al cel, la seva freqüència de rotació i com els paràmetres que descriuen el seu comportament evolucionen amb el temps (conegut com el *spin-down*). A partir d'aquestes observacions electromagnètiques, també podem entendre i descriure el moviment orbital del pulsar si es troba en un sistema binari. Aquest coneixement detallat fa que els pulsars siguin objectius ideals per a les cerques CW, ja que permet als científics concentrar-se en els rangs de freqüència específics on s'esperen aquests senyals.

La revelació d'aquests senyals suposaria un gran avenç, ja que permetria als científics investigar [l'estructura interna](#) de les NSs i descobrir noves perspectives sobre la matèria en condicions extremes.

## TROBA MÉS INFORMACIÓ:

Visita les [www.ligo.org](http://www.ligo.org)  
nostres webs: [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 aquest estudi, ens vam centrar en 39 [pulsars](#) coneguts (vegeu la **Figura 3**) per intentar captar les seves febles emissions de CW.

### COM SE CERCA UN SENYAL DE CW?

Generalment, hem d'adaptar el nostre mètode de cerca al mecanisme d'emissió que considerem, o a la precisió amb què coneixem els paràmetres de les CW. Aquí hem aplicat una cerca anomenada de banda estreta, capaç d'explorar una petita franja de freqüència i dissenyada per tenir en compte possibles desajustaments entre les emissions EM i CW. De fet, alguns models prediuen que l'escorça exterior de la NS (vegeu la **Figura 1**), que és la font dominant de l'emissió electromagnètica, podria anar per darrere del nucli, girant a una velocitat lleugerament diferent. En aquest escenari, amb cerques de banda estreta, busquem deformacions del nucli induïdes pel potent camp magnètic a l'interior de l'estrella de neutrons.

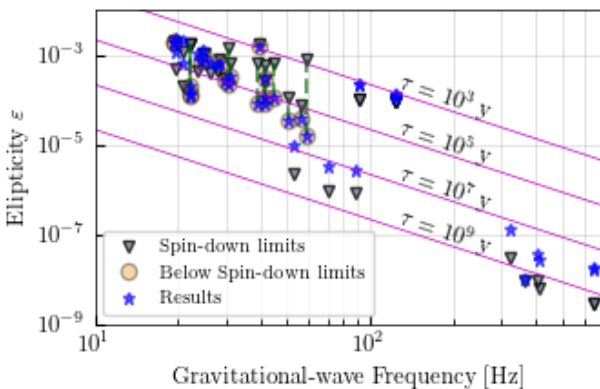
També podria passar que les dades EM sorolloses no ens permetin restringir adequadament l'evolució de la freqüència de l'emissió del pulsar al llarg del temps. En conseqüència, aquests efectes redueixen les nostres possibilitats de detecció si no es tenen en compte correctament.

### QUÈ HEM TROBAT?

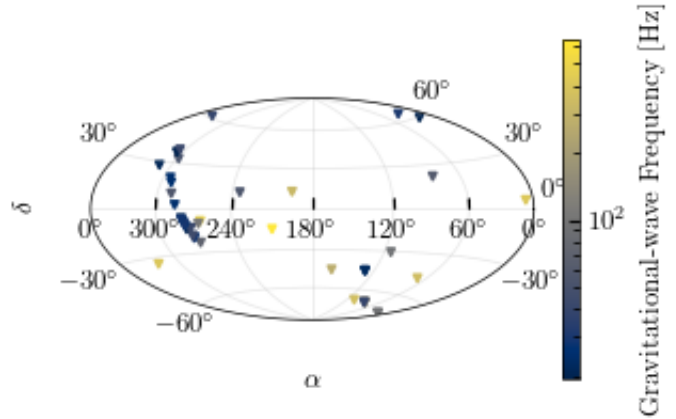
Malauradament, no vam informar de cap detecció dels nostres objectius amb les dades O4ab obtingudes pels observatoris [LIGO Hanford](#) i [LIGO Livingston](#).

Les deformacions d'aquestes estrelles de neutrons es quantifiquen mitjançant un paràmetre anomenat [el·lipticitat](#) i la no-detecció de CWs en O4ab implica que les seves el·lipticitats han de ser inferiors a uns valors líndar anomenats [límits superiors](#) (veure la **Figura 4**). En altres paraules, els científics ara disposen d'estimacions més precises de les distorsions màximes possibles que aquests pulsars podrien tenir, encara que aquestes deformacions fossin massa petites per generar un senyal detectable.

Els nostres resultats de la **Figura 4** es comparen amb els anomenats [límits de desacceleració](#), una amplitud màxima teòrica per a cadascuna de les estrelles. Per a més de la meitat dels nostres objectius, informem d'un límit superior per sota dels límits de frenada de rotació de l'estrella, la qual cosa limita la fracció d'energia perduda a causa de l'emissió de CW. El nostre límit superior més estricte sobre l'el·lipticitat d'una NS és per a J0711-6830 (amb una freqüència CW esperada d'uns 364 Hz), que correspon a deformacions de l'estrella lleugerament superiors a 100 [micres](#) (una micra equival a una milionèsima de metre) per a un radi de 10 km. Aquests límits també impliquen límits superiors per a l'energia dels CWs emesos: en el cas del [Crab pulsar](#) (al voltant de 60 Hz), trobem que l'estrella perd com a màxim només el 0,04 % de la seva energia a través de l'emissió de CWs!



**Figura 4.** (Fig. 6 del nostre article.) Estrelles: límits superiors experimentals de l'el·lipticitat per a cada pulsar en funció de la freqüència CW esperada. Triangles: límits superiors teòrics de l'el·lipticitat, assumint que la [desacceleració](#) dels pulsars és completament degut a l'emissió CW. Línies liles: els pulsars d'una certa edat ( $\tau$  a la figura), que perden energia mitjançant l'emissió de GW, haurien de situar-se al voltant de la mateixa línia.



**Figura 3:** (Fig. 1 del nostre article) Posició celestial en [coordenades equatorials](#) dels objectius analitzats.

Tot i que no hem trobat ones gravitacionals en aquesta cerca, hem millorat els nostres límits superiors anteriors gràcies a un període de presa de dades més llarg i a les millores dels detectors. En general, aquest és un resultat important perquè imposa restriccions més estrictes a les teories que descriuen les NSs i ens ajuda a acostar-nos encara més a una comprensió completa de la física complexa de les estrelles de neutrons.

### TROBA MÉS INFORMACIÓ

Llegiu un preprint gratuït de l'article científic complet [aquí](#) o a arxiv.

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

Traduït al català per Irene Prohens Peteracova (a partir de la versió en original en anglès) i revisat per Maria Antònia Ferrer Martínez.