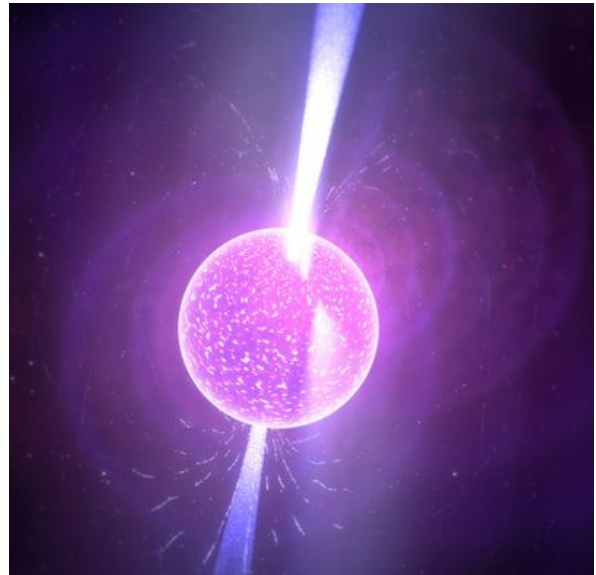


## CERCA D'ONES GRAVITACIONALS PROVINENTS D'ESTELS DE NEUTRONS EN ROTACIÓ A LA NOSTRA GALÀXIA AMB LES DADES O3 DE LIGO I VIRGO

Des de 2015, tenim una nova manera d'estudiar l'univers mitjançant la detecció directa d'ones gravitacionals (GWs). A dia d'avui, [90 esdeveniments de GW](#) han estat registrats pels interferòmetres Advanced LIGO i Advanced Virgo. Aquests senyals de GW van ser emesos per sistemes binaris de forats negres de distintes masses en òrbites espirals que acaben en una fusió, també en sistemes binaris d'estels de neutrons (NSs) o sistemes binaris mixtes formats per un [un forat negre i un NS](#). Tot i que en realitat els sistemes binaris evolucionen durant milions d'anys fins que finalment es fusionen, als nostres detectors apareixen de manera transitòria - durant sols de l'ordre de segons o minuts - perquè la seva freqüència augmenta ràpidament durant les darreres òrbites del sistema binari. En addició a aquestes senyals de curta durada, esperem altres tipus de radiació procedent de GW que no canvien la seva freqüència tan ràpidament i es poden observar durant mesos i anys. Aquestes **ones gravitacionals contínues** (CWs) són el principal objecte de la recerca que aquí es presenta.

D'entre les possibles fonts astrofísiques de CWs hi ha els NSs noaxisimètrics en rotació (un exemple extrem d'una esfera deformada en una forma no-axisimètrica seria una pilota de futbol americà o una pilota de rugbi). Els NSs són objectes extremadament compactes - amb masses similars al nostre sol compresos en bolles del voltant de 10 kilòmetres de radi - formades a les seqüeles d'estels massius que han acabat la seva vida en forma d'explosions de supernova. Els NSs poden rotar ràpidament, donant voltes amb freqüències de fins centenars de cicles per segon. Si poseeix una asimetria respecte l'eix de rotació, un NS en rotació pot emetre CWs, en una freqüència el doble que la freqüència de l'estel. Segons els models teòrics actuals i cerques prèvies LIGO-Virgo de CW, una protuberància asimètrica (també anomenada "muntanya", "altiplà elevat" o deformació a un costat del NS) seria com a molt d'uns pocs centímetres d'altura. Com major sigui la deformació al NS, majors GWs generarà. Per exemple, una protuberància d'uns pocs centímetres es correspon a una deformació del NS respecte la simetria esfèrica - també anomenada **el·lipticitat** - d'unes poques parts per milió. Determinar l'el·lipticitat d'un NS no és senzill, però una vegada detectada proporcionarà una visió vertaderament única de les propietats de la matèria extremadament densa i camps magnètics intensos que es troben als NSs. Actualment aquestes propietats són molt poc conegudes. En addició als aproximadament 3000 NSs coneguts pels astrònoms per ser molt brillants electromagnèticament (per exemple, com **pulsars** radio), la nostra galàxia, la Via Làctia, s'estima que conté fins a 100 milions de NSs que no són visibles a l'espectre electromagnètic perquè o són massa febles per ser detectats o la seva emissió electromagnètica no es dirigeix cap a la Terra. No obstant, si alguna d'aquests NSs fos suficientment asimètrica, podria emetre GWs detectables pels nostres interferòmetres. L'objectiu final de la nostra cerca es detectar senyals de GW d'aquests milions d'objectes fins ara no observats.



*Figura 1: Impressió d'un artista d'un estel de neutrons no axisimètric en rotació. Crèdit d'imatge: Kevin Gill [Flickr](#) (CC by 2.0)*

Cerques com aquesta s'han dut a terme prèviament als períodes d'observació [O1](#), [O2](#) i la [primera meitat de O3 \(O3a\)](#) amb les dades de Advanced LIGO i Advanced Virgo. Aquí resumim els resultats recents obtinguts amb les dades més sensibles fins ara, les del període d'observació O3 LIGO-Virgo (Abril 2019 - Març 2020)

Detectar senyals de CW molts febles enterrats a les dades dels detectors és una tasca complicada. Un senyal CW és bàsicament periòdic, però molts factors poden modificar els senyals rebuts als detectors. Un és l'efecte Doppler que canvia la freqüència del senyal amb el temps, ja que els nostres detectors es troben situats a la Terra, la qual rota i es mou al

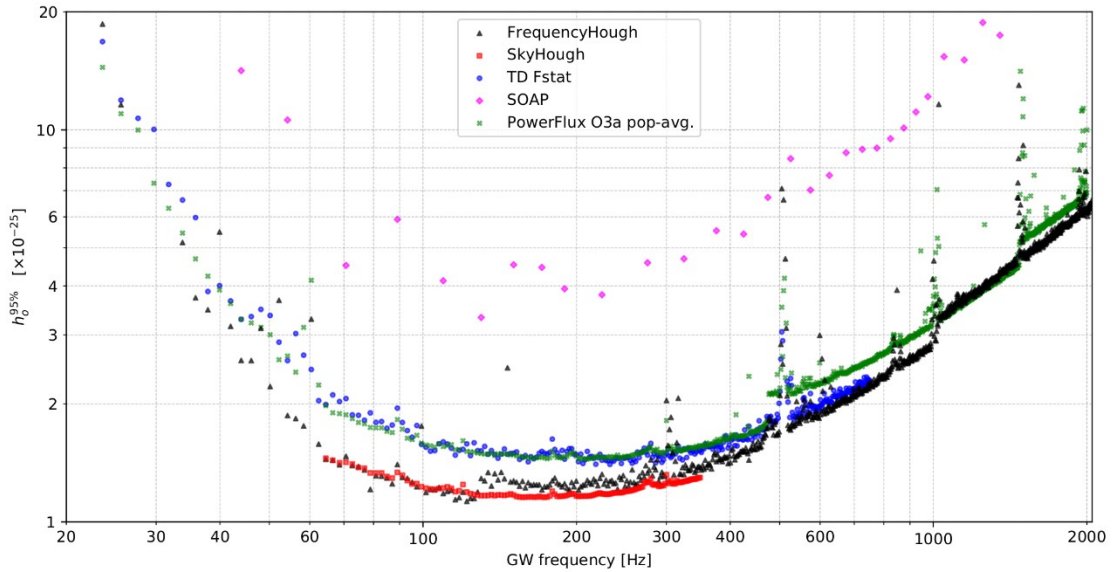
**Visiteu les nostres webs:**

[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/)



voltant del Sol. La freqüència del senyal es modula en funció de les posicions relatives de la font i del detector, i de la pròpia freqüència de la GW.

Per complicar encara més les coses, la freqüència de la GW també evolucionarà amb el temps – un NS perd energia rotacional a través de l'emissió de GWs i de radiació electromagnètica, causant una disminució gradual de la freqüència coneguda com a "spin-down". També cerquem senyals de GW que augmenten el seu ritme de rotació (incrementant la seva freqüència) per assegurar-nos que no ens perdem senyals potencialment interessants amb aquestes característiques. Un exemple d'aquests tipus de senyal seria un sistema binari d'objectes lleugers (per exemple, forats negres de massa planetària) en òrbita espiral.



**Figura 2:** Comparació dels límits superiors de confiança del 95% per l'amplitud de GW sobre un rang de freqüències, obtinguts pels quatre mètodes d'anàlisi de dades: FrequencyHough (triangles negres), SkyHough (quadrats vermells), SOAP (diamants magenta) i Time-Domain F-statistic (cercles blaus). Els límits superiors de cerques prèvies LIGO-Virgo, obtingudes pel mètode PowerFlux a la primera part del període O3 (dades O3a) es troben marcats amb creus de color verd fosc. (Fig.15 a la publicació)

Per una posició del cel donada, freqüència de rotació i "spin-down" d'una font, es pot calcular amb precisió la **forma d'ona** de la CW i detectar el senyal amagat a les dades mitjançant tècniques d'anàlisi de dades ben conegudes, com el mètode de **filtratge adaptat**. La veritable dificultat es troba en el fet que les propietats astrofísiques reals de les fonts de CW son desconegudes – per tant, necessitam passar per un gran nombre de combinacions de paràmetres, la qual cosa fa la cerca computacionalment complicada. Per tractar-ho de manera pràctica, hem dissenyat mètodes d'anàlisi de múltiples passos (jeràrquics), els quals empen el filtratge adaptat en petits paquets de dades (durades temporals de segments que van de mitja hora fins a varis dies), i després combinam aquests petits paquets d'informació per recollir l'evidència de la presència de senyals de CW amb paràmetres particulars a les dades. Els mètodes de cerca jeràrquics son menys sensibles que el procediment òptim, que és l'aplicació directa del filtratge coincident, però son robusts pel que fa a les incerteses del model de senyal, i pràcticament factibles des del punt de vista computacional, malgrat la falta d'informació sobre els paràmetres del senyal. Una altre complicació està relacionada amb les pròpies dades del detector: les dades contenen distàncies instrumentals a moltes freqüències que es poden parèixer molt a senyals de CW. Una part important de l'anàlisi es identificar aquests senyals i llevar-los de la llista de candidats a GW.

La **sensibilitat** aconseguida pels detectors Advanced LIGO i Advanced Virgo durant el període O3, que va durar al voltant d'un any, va permetre la cerca més sensible de CW desconegudes mai feta: sondejant tot el cel, en freqüències d'entre 20 Hz fins 2048 Hz i a un ritme de canvi de freqüència (rang de "spin-down") des de  $-10^{-8}$  Hz/s fins  $2 \times 10^{-9}$  Hz/s. En la cerca actual els resultats es varen obtenir mitjançant quatre mètodes d'anàlisi de dades amb cerca jeràrquica independents. Els mètodes van cobrir diferents freqüències i rangs de "spin-down", van emprar segments de dades de distintes longituds per seguir candidats possibles a senyal de GW, a vegades emprant mètodes moderns d'**aprenentatge automàtic (machine learning)**, com xarxes neuronals profundes.

Les nostres anàlisis no varen trobar cap evidència estadísticament significant de senyals de CW a les dades O3 de LIGO-Virgo. Per tal de limitar els models teòrics d'emissions de CW, hem calculat els **límits superiors** de l'amplitud de GW: límits sobre com de forta podria ser una senyal de CW i encara no ser detectada. Els límits superiors es presenten a la **Figura 2**. Aquests corresponen a un 95% de confiança que no hi ha senyals amb amplituds majors a les dades. Els nostres millors límits superiors son un senyal d'amplitud de  $1.1 \times 10^{-25}$  a la freqüència de 111.5 Hz. Aquests resultats son 1.5 vegades millors – restringint l'amplitud a valors menors – que aquells del període d'observació previ, conegut com O2.

La **Figura 3** mostra la informació astrofísica addicional que hem conegut amb aquesta cerca, la qual és la relació entre la freqüència, el "spin-down" i la distància a una font potencialment detectable. Per exemple, a una freqüència de 200 Hz podríem detectar un senyal de CW d'un NS a una distància menor de 100 pc (parsecs) si l'el·lipticitat fos d'almenys  $3 \times 10^{-7}$ . De manera similar, a la meitat del rang de freqüència, al voltant de 550 Hz, podríem detectar una senyal de CW fins una distància de 1 kpc (1000 parsecs) amb una el·lipticitat major a  $5 \times 10^{-7}$ . Per comparar, el radi de la nostra galàxia és d'uns 15 kpc. Tot i que no es pot confirmar cap detecció, els nostres resultats són tanmateix interessants des del punt de vista astrofísic i poden il·luminar més les propietats dels NS galàctics. Els nostres límits superiors estan començant a sondejar el rang d'el·lipticitats de fins  $10^{-7}$  -  $10^{-6}$  per alguns models de NS joves en els quals la deformació no és suportada per l'elasticitat de l'escorça, sinó per un camp magnètic no axisimètric.

Adicionalment a les limitacions sobre les el·lipticitats dels NSs aïllats, mostrem que els nostres resultats poden ser emprats per fer declaracions sobre la proporció i l'abundància d'hipotètics forats negres molt lleugers (amb masses semblants a les dels planetes o asteroides) en òrbites espirals, els quals podrien haver estat creats a l'univers primerenc i que podrien constituir part de la [matèria fosca](#). Els senyals de GW provinents de sistemes binaris en els quals almenys un dels components és un forat negre molt lleuger tenen una freqüència que evoluciona molt lentament durant la seva fase en òrbita espiral - durant un llarg període de temps son pràcticament senyals de CW amb un lleuger "spin-up". Mostrem que les cerques de CW poden utilitzar-se en un futur proper per detectar aquest tipus d'objectes, proporcionant informació sobre forats negres lleugers, si n'hi ha de presents a les proximitats del nostre Sistema Solar.

A mesura que els detectors Advanced LIGO i Advanced Virgo incrementen la seva sensibilitat, i amb l'ajuda del detector KAGRA a la xarxa mundial, podem ser capaços de detectar CWs provinents de NSs en rotació amb deformacions encara menors, arribant a una porció encara major de la galàxia, i provar altres diverses hipòtesis com l'existència de forats negres molt lleugers. Detectar aquestes senyals obrirà una nova frontera en l'estudi d'aquests objectes compactes fascinants, els quals esdevindran veritables laboratoris d'astrofísica i de física fonamental: un cop detectada una font de CW, es pot monitoritzar, en principi, durant intervals de temps indefinits. Això ens permetrà incrementar la certesa de la detecció fins a ser gairebé absoluta, mesurar paràmetres del NS amb una precisió extremadament alta, calibrar els nostres detectors i provar teories sobre la gravetat.

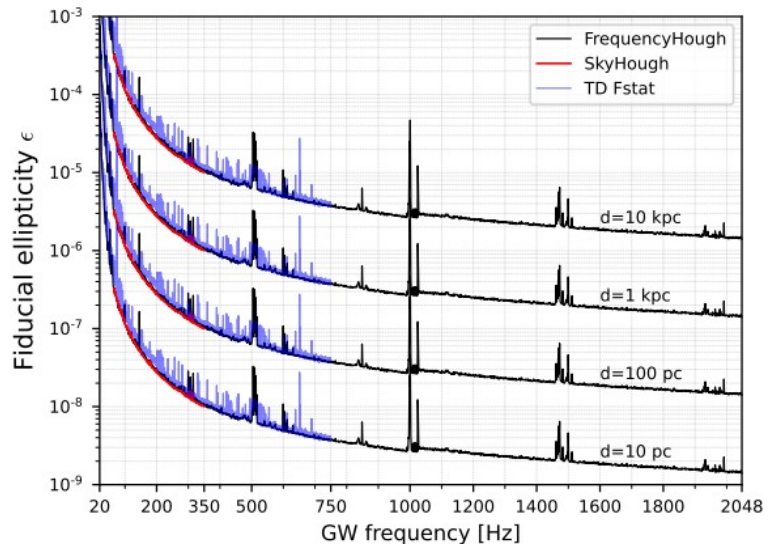
## INFORMACIÓ ADDICIONAL

Visiteu 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/)

Llegiu una preimpresió gratuïta de l'article científic complet [aquí](#).

Traducció al català per Joan-René Mèrou Mestre i Joan Moragues Roca.



**Figure 3:** El·lipticitat de NS detectable, com a funció de la freqüència de GW a distàncies de 10 kpc, 1 kpc, 100 pc i 10 pc (de dalt a baix). Els resultats del mètode d'anàlisi FrequencyHough estan marcats en negre, els de SkyHough en vermell i els de Time-Domain F-statistic en blau (Panell esquerra a la figura 16 de la publicació).

## Glossari

**Ones gravitacionals contínues:** Forma de llarga durada de radiació gravitacional. Accedir [aquí](#) per a veure més detalls

**El·lipticitat:** Aproximadament, l'el·lipticitat es pot considerar com la proporció entre  $\Delta r$ , la mida de la deformació, o "muntanya" sobre la superfície de l'estel de neutrons, en comparació a  $r$ , radi de l'estrella:  $\Delta r/r$ . L'el·lipticitat equatorial mesura com de lluny d'un cos esfèric es troba, definida com la deformació relativa a través del pla equatorial respecte a la deformació al llarg de la direcció perpendicular al mateix pla. De manera similar, l'el·lipticitat polar mesura la diferència entre un pla que passa pels pols esteHars i el pla equatorial.

**Hz:** L'hertz és una unitat del Sistema Internacional d'Unitats (SI), definida com un cicle per segon. Aquesta unitat porta el nom de Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), qui va demostrar l'existència de les ones electromagnètiques.

**Aprenentatge automàtic:** L'estudi dels algorismes informàtics que poden millorar automàticament mitjançant experiència i l'ús de dades.

**Filtratge adaptat:** Mètode d'anàlisi de dades que consisteix en correlacionar les dades amb una forma d'ona simulada per intentar identificar senyals amagades en el soroll del detector de fons.

**Parsec (pc):** Unitat de distància molt emprada en astronomia. Correspon aproximadament a 3.26 anys llum, o 31 bilions de quilòmetres. Un kiloparsec (kpc) equival a mil pc.

**Púlsar:** De "font de radio polsant": una estel compacte altament magnetitzada que emet feixos de radiació electromagnètica a través dels seus pols magnètics.

**"Spin-down":** Els púlsars són estels de neutrons en rotació que giren tan regularment que en una llarga escala de temps es poden tractar com [indicadors referencials de posició](#). La seva velocitat de rotació en general es pot observar que disminueix amb el temps (equivalent a un augment del període de rotació), atès que perden energia de rotació amb el temps. Aquesta disminució de la velocitat de rotació es coneix com "spin-down". Per contra, un augment de la velocitat de rotació es coneix com "spin-up" - això pot ocórrer si un púlsar es troba en un sistema binari i està accelerant degut a l'acreció de matèria provinent del seu company esteHars.

**Sensibilitat:** Descripció de la capacitat d'un detector per detectar un senyal. Els detectors amb menys renou són capaços de detectar senyals més febles i per tant es diu que tenen una sensibilitat més alta (o més gran)

**Límit superior:** El límit superior d'alguna quantitat (per exemple, l'amplitud d'una ona gravitacional) és el valor menor que podria ser detectat amb un 95% de confiança. Així que si no s'ha detectat res, tenim un 95% de confiança de que no hi ha fonts que estiguin produint valors més alts.

**Forma d'ona:** El comportament de l'amplitud del senyal en funció del temps.