

CERCA DE BANDA ESTRETA D'ONES GRAVITACIONALS CONTÍNUES I TRANSITÒRIES DE LLARGA DURADA PROCEDENTS DE PÚLSARS CONEGUTS EN EL TERCER PERÍODE D'OBSERVACIÓ DE LIGO-VIRGO

Els estels de neutrons són romanents de **supernoves**, les explosions d'estels massius, i els objectes més densos de l'univers després dels forats negres. Tenen una massa d'1,4 vegades la del nostre Sol o més, però un radi de només uns 10 km! Presenten camps magnètics que poden ser d'entre cent milions i mil bilions (mil vegades un milió de milions) vegades més forts que el camp magnètic de la Terra. A mesura que l'estel de neutrons gira, emet **ones electromagnètiques** (com ones de ràdio o raigs X) pels seus pols magnètics i, amb telescopis sensibles a aquestes longituds d'ona (vegeu **raigs X** i **radiotelescopis**), podem veure a la Terra polsos d'aquestes ones quan passen sobre nostre com un far (vegeu **Figura 1**). Anomenem "pulsars" els estels de neutrons que podem observar d'aquesta manera. Els polsos són molt regulars, tant que en alguns casos els astrònoms poden predir quan arribaran els següents amb una precisió de 10 nanosegons. Els estels de neutrons tenen superfícies molt llises, però si hi tenen alguna "muntanya", també podrien emetre ones gravitacionals de forma continuada, les quals podem detectar amb **LIGO**, **Virgo** i **KAGRA**. Aquestes muntanyes podrien ser molt petites i així i tot podríem detectar les ones gravitacionals. Per exemple, si l'estel de neutrons es troba a 100 **parsecs** i gira més de 100 vegades per segon, podríem detectar una muntanya de menys d'aproximadament mig mil·límetre a la superfície de l'estel!

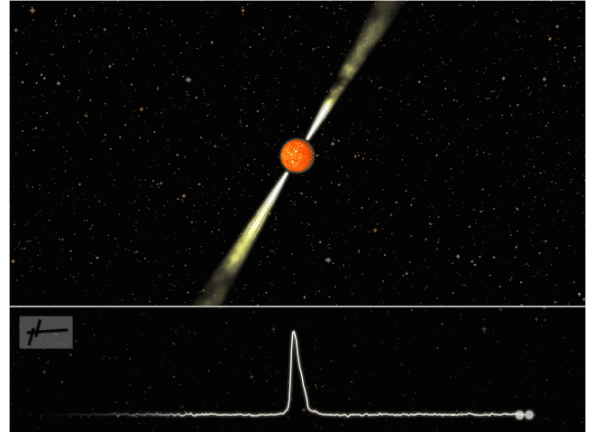


Figura 1: [Reproducció artística d'un pulsar](#) que mostra l'estel de neutrons en rotació, els feixos de radiació electromagnètica que emet i l'arribada regular dels polsos a un telescopi. Crèdit de la imatge: [Joeri van Leeuwen](#). Llicència: [CC-BY-AS](#). (Per una versió animada vegeu <https://www.astron.nl/pulsars/animations/>).

En aquest estudi, fem servir els polsos electromagnètics observats amb els telescopis de ràdio i de raigs X per guiar la nostra cerca de senyals d'ones gravitacionals contínues a les dades del tercer període d'observació (O3) d'Advanced LIGO i Advanced Virgo. En un [estudi separat](#), hem assumit que la freqüència de les ones gravitacionals segueix exactament la freqüència amb la qual veiem arribar els polsos electromagnètics. Aquí, però, permetem que aquesta freqüència i la manera com canvia amb el temps (coneguda com a "spin-down") difereixin lleugerament del que observem amb les ones electromagnètiques. Ho fem per tenir en compte la possibilitat que les ones gravitacionals s'emetin a partir d'asimetries que hi ha a l'interior de l'estel, a diferència de la superfície, on s'emeten les ones electromagnètiques. D'això en diem enfocament de "banda estreta", i l'utilitzem per buscar ones gravitacionals contínues procedents de 18 pulsars. A la **Figura 2** es mostren els nostres resultats. Per a cada pulsar, mostrem la màxima amplitud d'ona gravitacional que la nostra cerca hauria pogut detectar. Els resultats es troben classificats segons la freqüència de rotació del pulsar.

Com hem dit anteriorment, la major part del temps els estels de neutrons giren de forma molt predictable. No obstant això, alguns pulsars pateixen "*glitches*", és a dir, esdeveniments en què de sobte l'estel gira més ràpidament que abans, de manera que els polsos comencen a arribar amb més freqüència. A la **Figura 3** es mostra un exemple d'un *glitch* observat per un radiotelescopi. Aquests esdeveniments indiquen que algun fet dràstic ha passat a l'estel de neutrons, però el que ocorre exactament és encara un misteri. Podrien emetre's ones gravitacionals més potents al voltant o després del moment del *glitch*, i la seva mesura ens podria donar una visió única de l'interior de l'estel de neutrons. Per a provar aquesta idea, també cerquem ones gravitacionals emeses després d'un *glitch* observades per ràdio o raigs X durant l'O3. Cerquem senyals d'ones gravitacionals de més curta duració, de durada entre 1 hora i 120 dies, després de 9 *glitches* de pulsars diferents.

No s'han trobat proves convincents de l'existència d'ones gravitacionals a cap dels estels de neutrons d'aquestes cerques. Llavors, fem servir els nostres resultats per establir **límits superiors** en la intensitat de l'emissió d'ones gravitacionals basats en la sensibilitat dels nostres detectors, la quantitat de dades que tenim i la ubicació dels estels de neutrons. Es mostren aquests límits a la **Figura 2** amb creus negres i pentàgons blaus. Com a comparació, també podem establir un altre tipus de límit en la intensitat de l'emissió d'ones gravitacionals mitjançant un simple argument físic: l'alentiment del gir observat pels telescopis de ràdio i rajos X significa que el púlsar està perdent energia amb el temps, la qual ha de correspondre a l'energia perduda pel púlsar a través de l'emissió de radiació electromagnètica o gravitacional. Si suposem que tota aquesta energia s'emet en forma d'ones gravitacionals, podem deduir la màxima intensitat que podria tenir el senyal. Aquests **límits d'alentiment** es mostren amb triangles taronges a la **Figura 2**. A 7 dels 18 púlsars en què cercàvem emissió contínua, els nostres límits superiors observacionals establerts a partir de la recerca d'ones gravitacionals estaven per sota d'aquests límits d'alentiment establerts per arguments energètics. Això vol dir que sabem que almenys part de l'energia ha de ser alliberada d'alguna forma diferent de les ones gravitacionals.

També podem traduir els nostres resultats en límits sobre la "mida" d'una muntanya al púlsar, ja que com més gran sigui la muntanya, més fortes seran les ones gravitacionals que esperem d'ella.

Figura 3: Un glitch observat al púlsar del Cranc el 2004, fent servir el radiotelescopi de l'Observatori de Jodrell Bank. Al panell superior, podem veure com la **frequència de gir** observada del púlsar és força constant durant molts mesos, però després, entre dues observacions, va saltar diversos μHz (milionèsimes de Hertz). (Per comparar, la freqüència real de gir del Cranc és d'uns 30 Hz.) La freqüència de gir torna a disminuir durant els mesos següents. De la mateixa manera, al panell inferior, la taxa de disminució del gir (el canvi en la freqüència de gir, mesurat en pHz per segon, on un pHz és una milionèsima part d'una milionèsima part d'un Hz) estava augmentant de forma constant però lenta abans del glitch, però després va saltar cap avall abans de recuperar una tendència estable de nou. (Crèdit: Grup d'Astronomia de Púlsars en Domini Temporal, Universitat de Manchester)

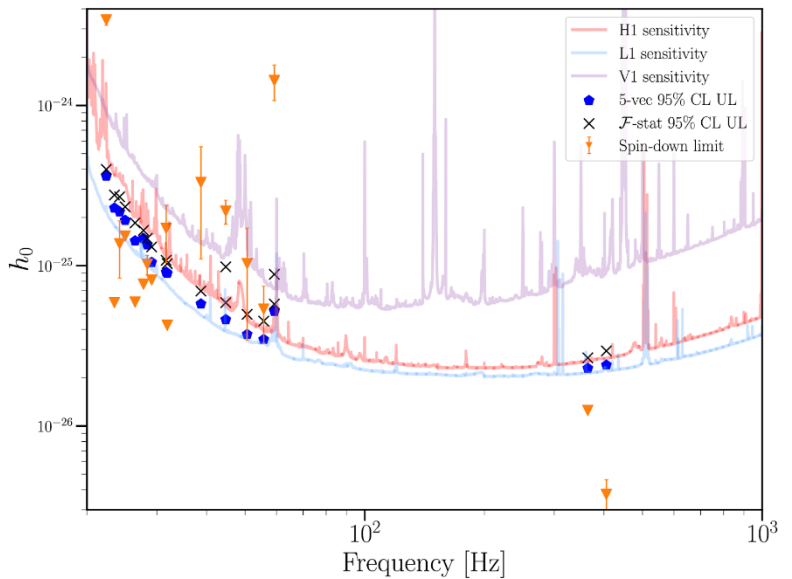
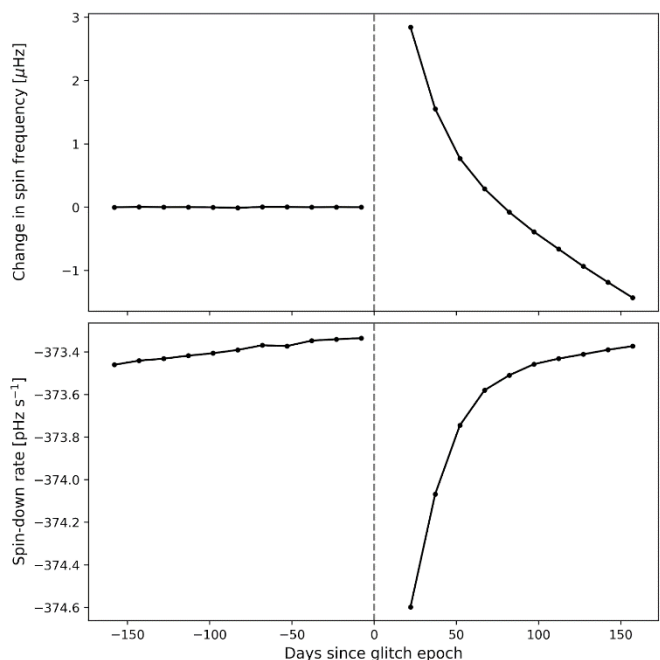


Figura 2 (Figura 1 a la publicació): Els resultats de les nostres cerques d'ones gravitacionals contínues. L'eix vertical és l'amplitud de la deformació intrínseca de les ones gravitacionals, mentre que l'eix horitzontal és la freqüència amb la qual oscil·len les ones gravitacionals. Les línies contínues indiquen una estimació prèvia a la cerca del nivell d'ones gravitacionals que pensem que podríem detectar amb els detectors LIGO Hanford (vermell), LIGO Livingston (blau) i Virgo (morat). Els triangles taronges indiquen els límits d'alentiment per a cada púlsar. Les creus negres indiquen els límits superiors establerts utilitzant un mètode de cerca d'ones contínues ("F-stat"), mentre que els pentàgons blaus indiquen els establerts utilitzant un altre mètode ("5-vec"). Per a ambdós mètodes, obtenim els límits superiors simulant els senyals d'ones gravitacionals de cada púlsar i comprovant com de forts han de ser per poder ser detectats el 95% de les vegades. Veiem que en 7 casos, les creus i els pentàgons estan per sota dels triangles taronges, fet que indica que fixem límits superiors millors que el límit d'alentiment.



Els límits més restrictius, per a PSR J0711-6830, fixen la mida màxima de la muntanya a 0,17 mm (suposant una estel de 10 km de radi). Proporcionalment, si la Terra fos una esfera perfecta, la "muntanya" de la qual parlem aquí tindria la mida d'una pilota de futbol! En el cas de la cerca posterior als *glitches*, els límits deguts als arguments energètics van ser inferiors als límits establerts per la cerca de tots els *glitches* observats, la qual cosa significa que encara hem d'esperar futures millores dels nostres detectors per establir restriccions físicament significatives a partir d'aquest tipus de cerca.

Encara que no hagem trobat ones gravitacionals en aquesta cerca, els estels de neutrons en rotació en segueixen sent una font potencial prometedora. Esperem poder tornar a fer la cerca amb les dades més sensibles que arribaran amb el quart període d'observació de LIGO, Virgo i KAGRA, el qual actualment s'espera que comenci a finals del 2022.

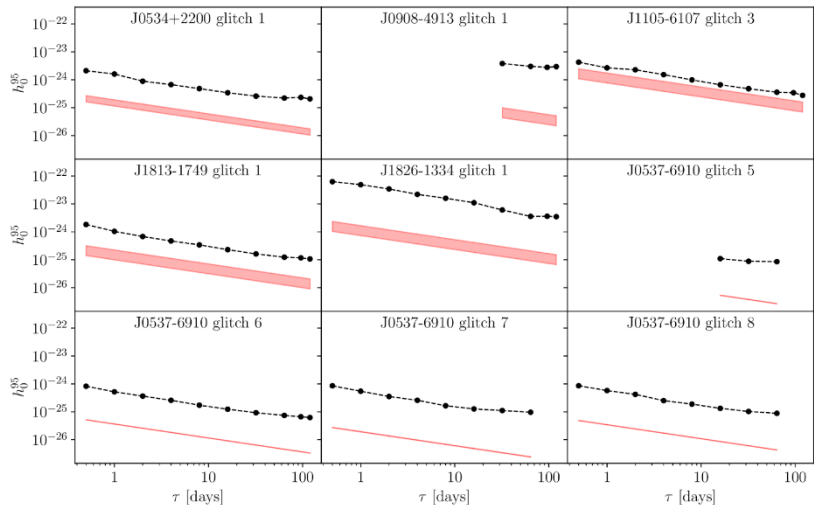


Figura 4 (Figura 7 a la publicació): Els límits superiors de l'amplitud de la deformació de les ones gravitacionals que varem obtenir observant les dades al voltant i després dels *glitches* dels pulsars que es van observar amb telescopis electromagnètics en el cronometratge de 6 pulsars durant l'O3. Cada panell mostra els límits superiors d'una cerca, en la qual 5 pulsars van tenir un únic *glitch* i, per tant, un únic conjunt de resultats cadascun durant O3, mentre que el "Gran Glitcher" J0537-6910 va tenir quatre *glitches* a O3 i és present amb quatre conjunts de resultats. Els límits superiors h_{95}^{95} s'obtenen de forma similar als de la Figura 2, és a dir, com el valor de la deformació en què el 95% dels senyals simulats es recuperen amb èxit amb el nostre mètode de cerca. No obstant això, aquí hem buscat senyals transitoris, on els senyals més curts són més difícils de detectar. Així que aquests límits superiors (corba negra i punts de dades) es mostren com a funcions de la durada del senyal τ (en dies), i són generalment més baixos (més restrictius) cap a durades més llargues. A tall de comparació, la banda vermella de cada panell mostra una estimació indirecta del fort que podria ser el senyal d'aquest pulsar, tenint en compte l'energia alliberada al *glitch* en funció de la distància al pulsar, la seva freqüència de rotació i quant va augmentar aquesta freqüència en el *glitch*. Com que els nostres resultats observacionals no arriben a estar per sota d'aquesta estimació indirecta per a cap dels *glitches*, malauradament encara no disposem de prou sensibilitat per a sondejar realment la física del que pot estar passant a l'interior d'un estel de neutrons durant un *glitch*. (Un podria preguntar-se per què algunes de les corbes no cobreixen tot el rang de valors de τ . Això és degut al fet que no disposem de dades del detector d'ones gravitacionals pels rangs de dates corresponents després d'aquests *glitches*).

GLOSSARI

Deformació: El canvi fraccionari de la distància entre dos punts de mesura (per exemple, els miralls d'un detector interferomètric) degut a la deformació de l'espai-temps provocada per una ona gravitacional que passa.

Freqüència de gir: La rotació d'un pulsar al voltant del seu propi eix (el seu "gir") es pot mesurar amb telescopis de ràdio, raigs X i altres comptant l'arribada de polsos (quan el "feix de llum" escombra la Terra) i el temps mitjà entre ells. La unitat estàndard de freqüència és el Hertz (Hz).

KAGRA: El "Kamioka Gravitational Wave Detector" (**KAGRA**) és un detector interferomètric d'ones gravitacionals de 3 km de longitud situat a la mina de Kamioka, a la prefectura de Gifu (Japó). Quan estigui acabat, utilitzarà miralls criogènics per millorar la sensibilitat del detector, especialment a les freqüències més baixes.

LIGO: El "**Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory**" consisteix en dos detectors d'ones gravitacionals interferomètriques de 4 km de longitud, separats per uns 3000 km, situats a Livingston (LA) i Hanford (WA), als Estats Units.

Límit superior: valor màxim que pot tenir alguna quantitat sense deixar de ser consistent amb les dades. Aquí la quantitat d'interès és la màxima amplitud de deformació intrínseca d'una ona gravitacional contínua que arriba a la Terra. Prenem el límit tal que hi ha un 95% de probabilitat que la quantitat estigui per sota aquest límit.

MÉS INFORMACIÓ:

Visiteu les nostres webs:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

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

Traducció al català per Felip Antoni Ramis Vidal, Maria Rosselló Sastre i Rodrigo Tenorio (a partir de la [versió original en anglès](#)).



Límit d'alentiment: límit de l'amplitud de les ones gravitacionals procedents d'un pulsar basat en la suposició que tota l'energia cinètica rotativa que perd l'estel en ralentitzar la seva rotació es produeix a través de la radiació gravitacional. Això suposa que es coneix amb precisió la distància al pulsar, mentre que en realitat les distàncies dels pulsars poden ser incertes fins a un factor de dos, aproximadament. No obstant això, sabem que hi ha altres formes en què els pulsars perden energia, essent el principal mecanisme assumit la [radiació de dipol magnètic](#).

Ones electromagnètiques (EM): ones compostes per camps elèctrics i magnètics acoblats. Aquestes ones es coneixen comunament com a llum, encara que només una petita part de les longituds d'ona EM pot ser vista per l'ull humà. Per ordre de longitud d'ona creixent, els tipus de llum EM esmentats en aquest recent document són: raigs Gamma, raigs X, UV (ultraviolat), visible (òptics), ràdio.

Parsec: Unitat astronòmica de longitud que correspon aproximadament a 3 anys llum o 30 bilions de quilòmetres.

Radiotelescopis: Telescopis que mesuren les ones de ràdio procedents de tot l'Univers. Els radiotelescopis poden tenir formes molt distintes. En alguns casos semblen grans antenes parabòliques individuals (per exemple, el Telescopi [Lovell de l'Observatori de Jodrell Bank](#)) que poden apuntar cap on esperen detectar les ones de ràdio. En altres casos, hi ha moltes antenes parabòliques "més petites" (d'uns 10 m de diàmetre, com el [telescopi MeerKAT](#)) els senyals dels quals es combinen per millorar la seva sensibilitat a les ones de ràdio febles. Finalment, hi ha alguns radiotelescopis que són estructures metàl·liques llargues i rígides que no necessàriament "apunten", sinó que són sensibles al cel directament per sobre ([aquí](#) se'n mostra un exemple). En aquesta anàlisi utilitzem dades de tots aquests tipus de telescopis. La llista de radiotelescopis utilitzats figura al document.

Supernova: Una supernova és una explosió d'un estel massiu al final de la seva vida. Aquesta explosió és extremadament lluminosa: pot eclipsar tota una galàxia i irradiar tanta energia com la que podria irradiar el Sol durant tota la seva vida en unes poques setmanes. La major part del material de l'estel és expulsat i el que queda és un objecte extremadament dens i compacte, com ara un estel de neutrons o un forat negre.

Telescopis de raigs X: Telescopis que mesuren els raigs X provinents de tot l'univers. En general, aquests telescopis compten els fotons individuals que arriben, en lloc de mesurar un flux constant com fan els radiotelescopis.

Virgo: Detector d'ones gravitacionals situat a prop de Pisa (Itàlia). Com LIGO, és un interferòmetre làser, però amb braços de 3 km de longitud.