

RICERCA A BANDA STRETTA DI ONDE GRAVITAZIONALI CONTINUE E DI TRANSIENTI DI LUNGA DURATA PROVENIENTI DA PULSAR CONOSCIUTE DURANTE IL TERZO PERIODO OSSERVATIVO DI LIGO-VIRGO

Le stelle di neutroni sono resti di **supernovae**, esplosioni di stelle massicce, e sono gli oggetti più densi dell'universo dopo i buchi neri. Questi oggetti hanno una massa pari o maggiore a 1.4 volte la massa del sole, ma un raggio di poco più di 10 km! Hanno campi magnetici che possono essere tra cento milioni e un milione di miliardi di volte più intensi del campo magnetico terrestre. Mentre la stella di neutroni ruota, dai suoi poli magnetici emette **onde elettromagnetiche** (ad esempio onde radio o raggi X) e tramite telescopi sensibili a queste lunghezze d'onda (come i **telescopi a raggi X** e **radiotelescopi**), possiamo osservare sulla Terra queste onde sotto forma di impulsi quando intersecano la nostra visuale come la luce di un faro (vedi **Figura 1**). Le stelle di neutroni che possono essere osservate in questo modo vengono chiamate "pulsar". Gli impulsi sono molto regolari, e in alcuni casi gli astronomi possono predire il loro arrivo con una precisione di 10 nanosecondi. Le stelle di neutroni hanno superfici molto lisce, ma se su di esse

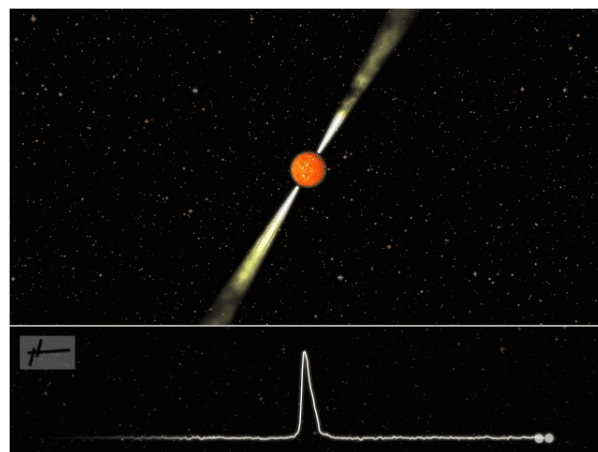


Figura 1: Interpretazione artistica di una pulsar, che mostra la stella di neutroni in rotazione, i fasci di radiazione elettromagnetica che emette e gli impulsi ricevuti da un telescopio. Crediti: [Joeri van Leeuwen](https://www.astron.nl/pulsars/animations/), Licenza: [CC-BY-AS](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). (Per la versione animata si veda: <https://www.astron.nl/pulsars/animations/>)

si trovano delle "montagne", allora possono emettere continuamente onde gravitazionali che possiamo osservare tramite **LIGO**, **Virgo** e **KAGRA**. Anche se le montagne fossero molto piccole, saremmo comunque in grado di osservare onde gravitazionali. Ad esempio, se una stella di neutroni a 100 **parsec** di distanza ruotasse con una velocità di più di 100 giri al secondo, saremmo potenzialmente in grado di rilevare una montagna alta meno di mezzo millimetro circa sulla superficie della stella!

In questo studio usiamo impulsi elettromagnetici osservati con telescopi a raggi X e radiotelescopi per guidare la ricerca di segnali gravitazionali continui usando i dati del terzo periodo osservativo (O3) di Advanced LIGO e Advanced Virgo. In uno [studio separato](#) avevamo assunto che la frequenza delle onde gravitazionali segua esattamente la frequenza con cui vediamo arrivare gli impulsi elettromagnetici. Tuttavia, qui lasciamo che quella frequenza, e il modo in cui cambia con il tempo (detto "spin-down"), possano differire leggermente da ciò che osserviamo con le onde elettromagnetiche. Procediamo in tal modo per lasciare aperta la possibilità che le onde gravitazionali possano essere state emesse da asimmetrie interne alla stella piuttosto che sulla superficie dove vengono emesse le onde elettromagnetiche. Questo approccio viene chiamato "a banda stretta", e noi lo utilizziamo per cercare onde gravitazionali continue provenienti da 18 pulsar. La **Figura 2** mostra l'ampiezza delle onde gravitazionali che potremmo osservare da diverse pulsar con le rispettive frequenze.

Come detto sopra, le stelle di neutroni ruotano per lo più in modo molto prevedibile. Tuttavia, alcune pulsar manifestano i cosiddetti "glitch" che sono eventi improvvisi durante i quali la stella ruota più velocemente, e quindi gli impulsi arrivano più frequentemente. La **Figura 3** mostra un esempio di un glitch osservato da un radiotelescopio. Questo evento indica che qualcosa di drastico è successo nella stella di neutroni, ma quello che avviene esattamente al suo interno durante un glitch è per lo più ancora un mistero. Onde gravitazionali più intense potrebbero essere emesse in prossimità del glitch o successivamente ad esso, e la loro osservazione potrebbe aiutarci a comprendere la struttura interna della stella di neutroni. Per verificare questa idea, cerchiamo anche onde gravitazionali dopo glitch stati osservati nelle onde radio o nei raggi X durante O3. Cerchiamo segnali gravitazionali di più breve durata, che possano durare tra un'ora e 120 giorni, dopo 9 diversi glitch.

Alla fine, queste ricerche non ci hanno permesso di dimostrare in modo convincente l'emissione di onde gravitazionali da nessuna delle stelle di neutroni analizzate. Perciò usiamo i nostri risultati per mettere dei **limiti superiori** sull'intensità dell'emissione di onde gravitazionali, a partire dalla sensibilità dei nostri rivelatori, dalla quantità di dati a disposizione, e dalla posizione delle stelle di neutroni. Riportiamo tali limiti in **Figura 2** con croci nere e pentagoni blu. Per confronto, possiamo anche fissare un altro tipo di limite superiore sull'ampiezza dell'emissione di onde gravitazionali con un semplice argomento fisico: lo spin-down osservato dai telescopi radio e a raggi X indica che la pulsar sta perdendo energia nel corso del tempo, energia che deve corrispondere all'energia persa dalla pulsar per emissione elettromagnetica o gravitazionale. Assumendo che tutta l'energia persa venga emessa sotto forma di onde gravitazionali, possiamo calcolare la massima intensità del segnale gravitazionale. Questi **limiti di spin-down** sono mostrati con triangoli arancioni in **Figura 2**. Per 7 delle 18 pulsar analizzate, i limiti superiori determinati dalle nostre osservazioni sono inferiori ai limiti di spin-down fissati da argomenti energetici. Ciò significa che non tutta l'energia viene emessa sotto forma di onde gravitazionali.

I nostri risultati pongono anche un limite superiore sulla "dimensione" di una montagna sulla pulsar, dato che tanto più grande è la montagna, tanto più intense sono le onde gravitazionali previste.

Figura 3: Un evento di glitch osservato nella pulsar nella Nebulosa del Granchio nel 2004, usando il radiotelescopio all'Osservatorio di Jodrell Bank. Nel riquadro superiore, possiamo vedere come la **frequenza di spin** della pulsar osservata è abbastanza costante lungo l'arco di molti mesi, ma poi tra due osservazioni ha un cambiamento repentino di diversi μHz (milionesimi di Hertz). (In confronto, la frequenza di spin attuale è circa 30 Hz.) La frequenza di spin decresce nuovamente nei mesi successivi. Analogamente, nel pannello inferiore, il rate di spin-down (il cambiamento in frequenza di spin, misurato in pHz al secondo, dove un pHz è un milionesimo di Hz) aumenta progressivamente ma lentamente prima del glitch, ma poi scende improvvisamente prima di recuperare nuovamente un andamento stabile. (Crediti: Pulsar and Time Domain Astronomy Group, University of Manchester)

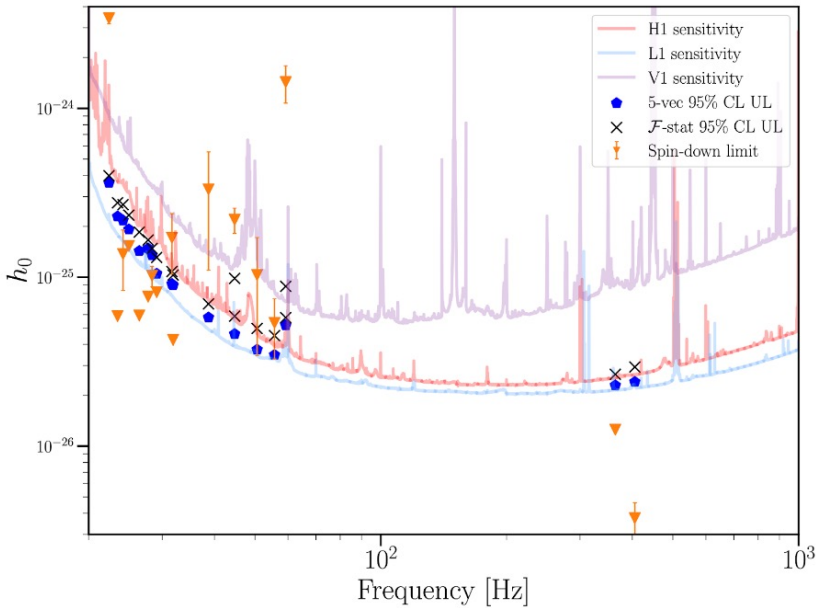
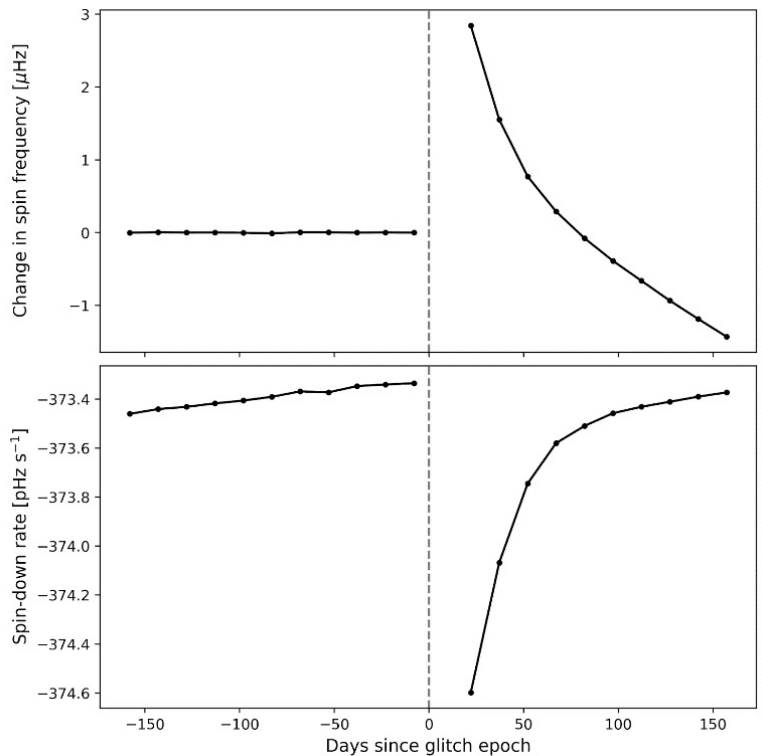


Figura 2 (figura 1 nella pubblicazione): I risultati delle nostre ricerche di onde gravitazionali continue. L'asse verticale è l'ampiezza dello **deformazione** dell'onda gravitazionale mentre l'asse orizzontale è la frequenza a cui l'onda gravitazionale oscilla. Le linee solide indicano le stime di sensibilità che pensavamo di poter raggiungere con i rivelatori LIGO Hanford (in rosso), LIGO Livingston (in blu) e Virgo (in viola). I triangoli arancioni indicano i **limiti di spin-down** per ciascuna pulsar. Le croci nere indicano i **limiti superiori** fissati usando un metodo di ricerca per onde continue ("F-stat"), mentre i pentagoni blu indicano quelli fissati usando un altro metodo ("5-vec"). Per entrambi i metodi, otteniamo questi limiti simulando segnali di onde gravitazionali da ogni pulsar e verificiamo quanto intensi essi debbano essere per venire misurati il 95% delle volte. Vediamo che in 7 casi le croci e i pentagoni sono sotto i triangoli arancioni, indicando che i nuovi limiti superiori sono migliori del limite di spin-down.



I limiti più stringenti, per PSR J0711-6830, fissano la massima dimensione della montagna a 0.17 mm (assumendo una stella di raggio 10 km). In proporzione, se la Terra fosse una sfera perfetta, la “montagna” di cui stiamo parlando avrebbe circa la dimensione di una palla da calcio! Nel caso della ricerca di segnali dopo eventi di glitch, i limiti ottenuti con l’argomento energetico sono al di sotto dei limiti fissati dalla nostra analisi dei glitch, quindi dobbiamo aspettare ulteriori miglioramenti dei nostri rivelatori per fissare vincoli significativi con questo tipo di ricerca.

Pur non avendo trovato onde gravitazionali in questa ricerca, le stelle di neutroni in rapida rotazione restano sorgenti molto promettenti. Ci ripromettiamo di ripetere la ricerca con i dati più precisi che prenderemo nel quarto periodo osservativo di LIGO, Virgo e KAGRA, che si prevede inizi alla fine del 2022.

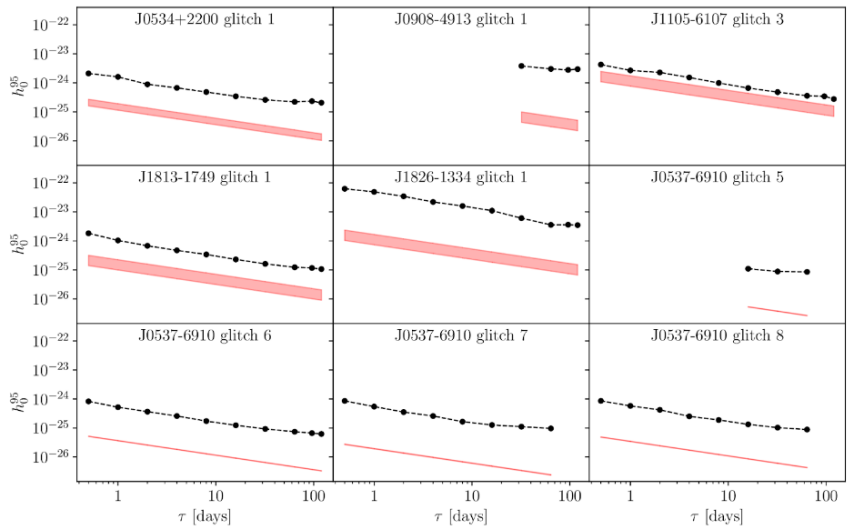


Figura 4 (figura 7 nella pubblicazione): I limiti superiori sull’ampiezza della deformazione gravitazionale ottenuti dai dati in corrispondenza e dopo gli eventi di glitch che sono stati osservati con telescopi elettromagnetici per 6 pulsar durante O3. Ciascun riquadro riporta i limiti superiori per una singola ricerca, dove 5 pulsar hanno avuto un unico glitch e quindi un insieme di risultati ciascuno per O3, mentre il “Big Glitcher” J0537-6910 ha avuto quattro glitch durante O3, e dunque i suoi risultati sono mostrati in quattro insiemi di risultati. Gli upper limits h_0^{95} sono stati ottenuti in modo simile alla Figura 2, ovvero sono il valore della deformazione per cui il 95% dei segnali simulati sono stati trovati con successo dal nostro metodo. Tuttavia, qui abbiamo cercato segnali transienti, e i segnali più brevi sono più difficili da misurare. Perciò questi limiti superiori (curva nera e i cerchi neri) sono mostrati in funzione della durata del segnale τ (in giorni) e sono generalmente più piccoli (quindi più stringenti) verso durate più lunghe. Per confronto, la fascia rossa in ciascun riquadro indica una stima indiretta di quanto potrebbe realisticamente essere forte un segnale da un evento di glitch di quella pulsar, tenendo in considerazione la sua frequenza di rotazione e quanto quella frequenza aumenta durante il glitch. Purtroppo, poiché i nostri risultati osservativi non raggiungono valori inferiori alle stime indirette per nessuno dei glitch, non abbiamo ancora la sensibilità sufficiente ad esplorare la fisica di quello che succede dentro una stella di neutroni durante un glitch. (Ci si potrebbe chiedere perché alcune delle curve non coprono tutta la gamma di valori di τ . È così perché per quegli eventi e per quelle date, non abbiamo a disposizione dati del rivelatore di onde gravitazionali.)

GLOSSARIO

Onde elettromagnetiche (EM): onde composte da campi elettrici e magnetici accoppiati. Quando ci si riferisce a queste onde si parla comunemente di *luce*, nonostante solo una piccola parte delle lunghezze d’onda EM possa essere vista dall’occhio umano. In ordine crescente di lunghezza d’onda, i tipi di luce EM menzionati in questo articolo sono: raggi gamma, raggi X, UV (luce ultravioletta), luce visibile, onde radio.

KAGRA: Il Kamioka Gravitational Wave Detector (**KAGRA**) è un rivelatore interferometrico di onde gravitazionali lungo 3 km nella miniera del Kamioka nella Prefettura di Gifu, Giappone. Una volta completato, userà specchi criogenici per migliorare la sensibilità del rivelatore, soprattutto a bassa frequenza.

LIGO: Il **Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory** è formato da due rivelatori interferometrici di onde gravitazionali lunghi 4 km separati da circa 3000 km, situati in Livingston, LA e Hanford, WA negli Stati Uniti d’America.

Limite di spin-down: il limite fissato sull’ampiezza di onde gravitazionali provenienti da una pulsar assumendo che tutta l’energia cinetica rotazionale persa dalla stella con la diminuzione della velocità di rotazione sia radiazione gravitazionale. Ciò presuppone che si conosca la distanza esatta dalla pulsar, mentre in realtà le distanze dalle pulsar possono essere incerte entro un fattore due. Tuttavia sappiamo che ci sono altri modi in cui le pulsar perdono energia. Si pensa che il meccanismo principale di perdita sia **la radiazione di dipolo magnetico**.

Frequenza di spin: La rotazione di una pulsar attorno al proprio asse (il suo “spin”) può essere misurata con telescopi radio, a raggi X e altri contando quante volte arrivano gli impulsi (ovvero quando la “luce del faro” interseca la terra) e calcolando il tempo medio tra essi. L’unità di misura della frequenza è l’Hertz (Hz).

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



Leggete un **preprint gratuito** dell’articolo scientifico completo.

Supernova: Una supernova è l’esplosione di una stella massiccia alla fine della sua vita. Questa esplosione è estremamente luminosa: per qualche settimana la supernova può superare la luminosità di un’intera galassia e irradiare tanta energia quanto quella che il Sole potrebbe irradiare in tutta la sua vita. La maggior parte del materiale della stella viene espulsa e quello che rimane è un oggetto estremamente denso e compatto, ad esempio una stella di neutroni o un buco nero.

Parsec (pc): Unità di lunghezza usata in astronomia corrispondente a circa 3 anni luce o un milione di milioni di chilometri.

Radiotelescopi: Telescopi che misurano onde radio provenienti dall’universo. I radiotelescopi possono presentarsi in diverse forme. In alcuni casi assomigliano a grandi parabole satellitari (ad esempio, il **Lovell Telescope all’Osservatorio di Jodrell Bank**) che possono puntare nelle direzioni in cui si spera di rivelare onde radio. In altri casi ci sono molte parabole più piccole (~10m di diametro, come il **telescopio MeerKAT**) i cui segnali sono combinati insieme per migliorare la sensibilità a onde radio deboli. Infine, ci sono alcuni radiotelescopi che sono strutture metalliche lunghe e rigide che non puntano in una direzione precisa e sono sensibili al cielo direttamente sopra di essi (un esempio è **CHIME**). In questa analisi, usiamo dati da tutti questi diversi tipi di telescopi. Una lista di radiotelescopi è riportata nell’articolo.

Deformazione: la variazione frazionaria nella distanza tra due punti in cui si effettua una misura (per esempio gli specchi in un rivelatore interferometrico) dovuta alla deformazione dello spazio-tempo con il passaggio di un’onda gravitazionale.

Limite superiore: il valore massimo che una certa quantità può raggiungere, rimanendo consistente con i dati. Qui, la quantità di interesse è la massima ampiezza della deformazione gravitazionale intrinseco di un dato segnale continuo che arriva sulla terra. Usiamo un livello di credibilità del 95%, intendendo che tenendo conto dei dati osservati la quantità è sotto questo limite con una probabilità del 95%.

Virgo: Un rivelatore di onde gravitazionali situato vicino Pisa, in Italia. Come LIGO, è un interferometro a laser, ma con i bracci lunghi 3 km.

Telescopi a raggi X: Telescopi che misurano raggi X provenienti dall’universo. Tipicamente, questi telescopi contano i singoli fotoni che arrivano, a differenza dei radiotelescopi che misurano un flusso di radiazione continua.