

FARE IL SURF SUL *BIG GLITCHER*: ONDE GRAVITAZIONALI DA OSCILLAZIONI DI "MODO R" IN PSR J0537-6910

PSR J0537-6910, nota anche come "Big Glitcher", è una pulsar molto speciale che attira una grande attenzione da parte degli astronomi. Le pulsar sono [stelle di neutroni](#) – i nuclei collassati di stelle massicce – in rapida rotazione. Si tratta di oggetti con molte caratteristiche estreme. Non solo vi risiedono alcuni dei campi magnetici più intensi conosciuti in natura (con un'intensità più di un miliardo di volte maggiore del campo magnetico terrestre), ma sono anche tra gli oggetti più compatti dell'Universo. Contengono una massa maggiore di quella del Sole nello spazio di una grande città, e la densità della materia al loro interno è superiore a quella dei nuclei atomici.

Il nome "pulsar" deriva dal fatto che osserviamo questi oggetti registrando i loro impulsi di radiazione elettromagnetica. Gli impulsi sono dovuti alle onde elettromagnetiche emesse continuamente dai poli magnetici della stella di neutroni. Quando l'asse magnetico non è allineato con l'asse di rotazione il fascio di radiazione ruota come la luce di un faro e noi registriamo un impulso quando il fascio illumina la Terra (a [questo link](#) sono disponibili delle animazioni).

Misurando accuratamente i tempi di arrivo degli impulsi possiamo misurare la velocità di rotazione della stella e anche come questa velocità cambi nel corso tempo. L'evoluzione nel tempo della velocità di rotazione si può confrontare quindi con i modelli teorici per capire quale sia il principale meccanismo che dissipa l'energia rotazionale della stella e che la rallenta. In particolare gli astronomi quantificano il rallentamento in termini di un parametro noto come *indice di frenamento*. Se il principale meccanismo di rallentamento sono le onde elettromagnetiche, ci aspettiamo di misurare un indice di frenamento vicino a 3, mentre ci si attende di trovare valori più alti se sono le onde gravitazionali a causare lo *spin-down* (il rallentamento della rotazione) della stella.

PSR J0537-6910 è una pulsar che si è formata recentemente nella [Grande Nube di Magellano](#) e che ruota a 62 Hz (vale a dire 62 volte al secondo). La rotazione di questa pulsar rallenta velocemente, e inoltre si osservano spesso i cosiddetti "glitch", vale a dire improvvisi aumenti della frequenza di rotazione (da cui il soprannome della pulsar, "The Big Glitcher"). Diversamente dalla maggioranza delle altre pulsar, PSR J0537-6910 si osserva per mezzo dei raggi X invece che con le onde radio. Poiché i raggi X non penetrano l'atmosfera terrestre è necessario condurre queste osservazioni nello spazio, e PSR J0537-6910 fu scoperta usando il satellite per raggi X chiamato *Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE)*, che è stato operativo tra il 1996 e il 2012. Nel 2017 un telescopio per raggi X chiamato *Neutron star Interior Composition Explorer (NICER)* è stato installato sulla Stazione Spaziale Internazionale, e questo strumento viene usato ora per osservare PSR J0537-6910.

Nel corso degli anni le osservazioni hanno rivelato frequenti glitch in questa pulsar e hanno permesso misure dell'indice di frenamento nei periodi di tempo che separano i glitch. In particolare le osservazioni di *RXTE* e di *NICER* suggeriscono che lontano dai glitch l'indice di frenamento è circa 7, un valore decisamente insolito per una pulsar, ma atteso se la stella viene rallentata principalmente da onde gravitazionali dovute alle oscillazioni di [modo r](#). Un modo r è un tipo d'onda che si osserva nei fluidi ed è generata dalla forza di Coriolis, in modo simile alle [onde di Rossby](#) sulla Terra, e che può generare onde gravitazionali. Effettivamente, alcune teorie suggeriscono che l'emissione di onde gravitazionali dovute ai modi r sia attiva in tutte le pulsar giovani, facendo diminuire l'elevata frequenza di rotazione che avevano alla nascita fino ai valori più bassi che si osservano nella popolazione delle pulsar standard. La misura di un indice di frenamento di 7 suggerisce quindi che PSR J0537-6910 possa essere alla fine dell'epoca in cui lo spin evolve a causa del modo r, benché altri effetti, come per esempio il decadimento del campo magnetico, possano essere responsabili di ciò.

Questa ipotesi è stata investigata dalle Collaborazioni LIGO Scientific, Virgo, e KAGRA, insieme al team di NICER, cercando un segnale di [onde gravitazionali continue](#) dovuto ai modi r della pulsar J0537-6910. È già stato fatto un tentativo di individuare i modi r in questa pulsar usando i dati pubblici del primo e del secondo periodo osservativo (periodi indicati rispettivamente come O1 e O2), ma in quei periodi non erano disponibili i tempi di misure effettuate con raggi X. Nella nostra ricerca, noi utilizziamo i dati più recenti del terzo periodo osservativo degli osservatori LIGO e Virgo.

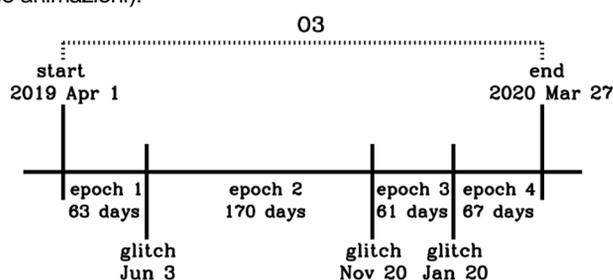


Figura 1: Sequenza temporale del periodo osservativo O3 di LIGO-Virgo O3, dei glitch di J0537-6910 e delle epoche tra i glitch osservate dal telescopio a raggi X NICER (collocato sulla Stazione Spaziale Internazionale).

Visitate i nostri siti web:

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en
www.nasa.gov/nicer



SCOPRITE DI PIÙ:

Leggete un preprint gratuito dell'articolo scientifico completo [qui](#) oppure su arXiv.org.

I dati di O3 hanno un livello di rumore molto più basso e sono di qualità considerevolmente migliore di quelli di O1 e O2, e, cosa importantissima, si sovrappongono con le osservazioni di PSR J0537-6910 effettuate da *NICER* a partire dal 2017. I dati di *NICER* registrano con precisione la frequenza di rotazione della pulsar, permettendoci di sapere esattamente quando si verificano i glitch e di analizzare con precisione i dati di onda gravitazionale, come illustrato in Figura 1, ottenendo così la ricerca più sensibile di un segnale debole. La relazione tra la frequenza dell'onda gravitazionale e la frequenza di rotazione della pulsar non è conosciuta con precisione, dal momento che dipende dalla massa e dal raggio della stella che non sono noti. Quindi è necessario cercare segnali di onda gravitazionale in un intervallo di frequenze (all'incirca da 86 a 97 Hz; si veda [qui](#) per una ricerca a diverse frequenze). Per questa ricerca sono stati usati due metodi indipendenti. Entrambi i metodi implicano il confronto dei dati tra i glitch con una banca di forme d'onda teoriche che modellano il segnale di onda gravitazionale dovuto all'emissione di modo r. Le forme d'onda teoriche dipendono da due parametri ignoti – la frequenza e la velocità di variazione della frequenza, che sono correlate all'indice di frenamento. Non troviamo alcuna indicazione della presenza di un segnale di onda gravitazionale, ma questo risultato negativo ci permette comunque di mettere dei vincoli stringenti sui modelli teorici che descrivono il rallentamento di PSR J0537-6910 e che sono basati sul modo r. In particolare otteniamo una serie di limiti superiori sull'ampiezza delle onde gravitazionali emesse dalla stella, vale a dire i valori al di sopra dei quali la ricerca sarebbe stata abbastanza sensibile da rivelare un'emissione. La Figura 2 confronta il nostro limite superiore sull'ampiezza di onda gravitazionale con le predizioni dei modelli teorici di rallentamento da modo r di PSR J0537-6910. Queste predizioni sono rappresentate da una banda dal momento che l'ampiezza esatta dipende dalla massa e dal raggio della stella, che non sono noti.

I nostri risultati indicano che stiamo sondando a fondo la regione delle predizioni teoriche, e per alcuni dei metodi di ricerca che usiamo, e specialmente alle alte frequenze, i limiti superiori sono ben al di sotto dell'ampiezza dell'onda gravitazionale suggerita dai modelli teorici. Nella Figura 3 presentiamo i nostri risultati in termini di limiti sulla massa della stella di neutroni. I nostri risultati escludono la possibilità che PSR J0537-6910 sia una stella di neutroni di alta massa che emette onde gravitazionali dovute ai modi r, ma questo scenario sarebbe ancora possibile per stelle di neutroni di massa inferiore. Nel prossimo periodo osservativo (O4), che dovrebbe iniziare nella seconda metà del 2022, avremo una nuova opportunità di cercare onde gravitazionali emesse dalla pulsar J0537-6910 con una più alta sensibilità della rete di rivelatori LIGO, Virgo, e KAGRA, e sperabilmente con le precise misure in tempo del telescopio a raggi X *NICER*.

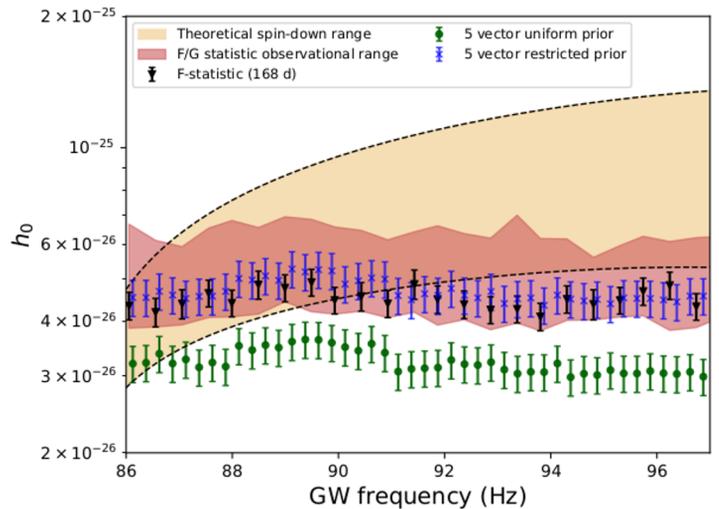


Figura 2: Una scelta di limiti superiori sull'ampiezza dell'onda gravitazionale $h_0(f)$ (asse verticale) in funzione della frequenza dell'onda gravitazionale (asse orizzontale) che abbiamo ottenuto per mezzo della cosiddetta "statistica F/G" e con il metodo dei 5-vettori. Le curve tratteggiate marcano l'intervallo teorico di rallentamento mentre la regione ombreggiata mostra i limiti stabiliti dal nostro lavoro; si veda l'articolo per ulteriori dettagli.

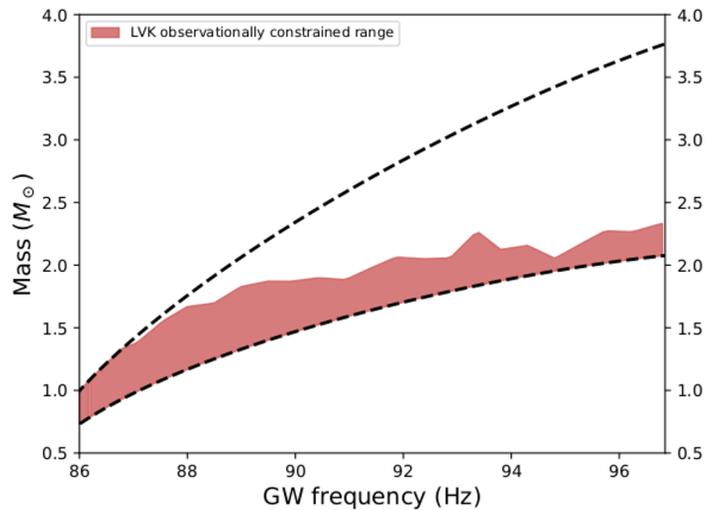


Figura 3: Limiti sulla massa della pulsar J0537-6910 (asse verticale) in funzione della frequenza dell'onda gravitazionale (asse orizzontale), nell'ipotesi che l'emissione di onda gravitazionale dovuta ai modi r stia causando il rallentamento della rotazione della stella di neutroni. La regione ombreggiata mostra i valori che non sono esclusi dai nostri risultati.

GLOSSARIO

Grande Nube di Magellano: Una galassia nana satellite della Via Lattea ad una distanza di 50.000 parsec. Sia la Grande che la Piccola Nube di Magellano sono visibili ad occhio nudo nel cielo meridionale.

Modo r: Un'onda di fluido che viaggia intorno alla stella e che viene spinta dalla forza di Coriolis dovuta alla rotazione della stella.

Onde gravitazionali continue: Un segnale di onda gravitazionale che è sempre presente a una frequenza quasi fissa, diversamente dalla fusione di buchi neri in cui il segnale è visibile in un rivelatore solo per poco tempo e ha una frequenza rapidamente crescente. Si veda [qui](#) per ulteriori dettagli.

Spin-down: La velocità con cui una stella di neutroni rallenta la sua rotazione a causa dell'emissione di energia.

Stella di neutroni: Residuo del processo di supernova di una stella con massa compresa tra 10 e 25 volte la massa del nostro Sole. Le stelle di neutroni hanno tipicamente una massa compresa tra 1 e 2 masse solari e un raggio di 10-15 km, e ciò significa che si tratta di alcuni degli oggetti più compatti che siano mai stati scoperti.