

Onde gravitazionali continue: nessuna rivelazione nei dati di O4a osservando 45 pulsar conosciute

La collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) ha condotto una nuova ricerca di onde gravitazionali continue (CW, dall'inglese onda continua - continuous wave) provenienti da stelle di neutroni, segnali che pensiamo siano molto deboli. Questa ricerca, in cui abbiamo utilizzato i dati dalla prima parte del quarto periodo osservativo (denominato O4a), rappresenta un altro passo in avanti verso la prima rivelazione di onde gravitazionali emesse da oggetti stabili e isolati: questo quindi è un caso diverso da eventi violenti come le fusioni di buchi neri. Le onde gravitazionali continue sono segnali deboli, persistenti e appunto quasi periodici che ci possono dare informazioni sulla materia all'interno delle stelle di neutroni, gli oggetti celesti più compatti dopo i buchi neri.

Che cosa sono le onde gravitazionali continue e perché sono importanti?

Le onde gravitazionali sono incurvature nello spazio-tempo causate da oggetti massicci in movimento. Ad oggi, la collaborazione LVK ha pubblicato l'osservazione di circa 100 segnali di onda gravitazionale, per lo più da fusioni di buchi neri. Diversamente da questi eventi esplosivi, si pensa che le onde continue (CW) arrivino da singole stelle di neutroni con piccole 'imperfezioni'. Le stelle di neutroni sono ciò che resta dall'esplosione di stelle massicce note come supernovae, che lasciano dietro di sé un nucleo centrale incredibilmente denso: può avere una massa simile a quella del nostro Sole ma concentrata in una palla di 20 km di diametro. Se una di queste stelle di neutroni avesse anche un piccolo rigonfiamento o deformazione, potrebbe emettere deboli e periodiche onde gravitazionali ruotando su sé stessa. Rivelare queste onde gravitazionali sarebbe una scoperta eccezionale, perché permetterebbe agli scienziati di studiare la rigidità e la struttura delle stelle di neutroni, ottenendo così preziose conoscenze sulla materia soggetta a condizioni estreme.

Perché le Pulsar?

Le pulsar sono oggetti di speciale interesse per le ricerche di onde CW. Esse sono stelle di neutroni con campi magnetici molto forti che causano l'emissione di fasci di onde elettromagnetiche in diverse bande di frequenza (radio, raggi X, raggi gamma). Mentre le pulsar ruotano, questi fasci spazzano lo spazio come fossero un faro cosmico, producendo sulla Terra degli impulsi elettromagnetici ogni volta che ci raggiungono. Le osservazioni elettromagnetiche delle pulsar fatte da diversi osservatori forniscono informazioni accurate sulla loro posizione nel cielo, la frequenza di rotazione e sulla loro evoluzione nel tempo. Queste informazioni fanno sì che le pulsar siano le candidate ideali per la ricerca di CW perché possiamo adattare con precisione lo studio alla regione di frequenza in



Figura 1: La nebulosa del Granchio vista in raggi X e nella banda di frequenza della luce visibile. La pulsar del Granchio è al centro di questa immagine. Crediti dell'immagine: raggi X: NASA/CXC/ASU/J. Hester et al.; luce visibile: NASA/HST/ASU/J. Hester et al.

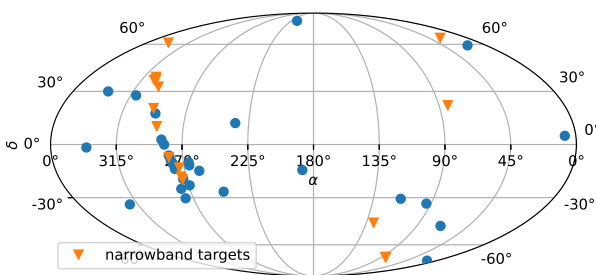


Figura 2: Localizzazione nel cielo delle sorgenti analizzate, espressa in coordinate equatoriali.

cui potremmo trovare le onde continue. In questa ricerca gli scienziati della collaborazione LVK si sono concentrati in particolare su 45 pulsar conosciute (vedere Figura 2) cercando la loro emissione debole e continua. I ricercatori hanno preso in considerazione due diversi modelli teorici di emissione che prevedono l'emissione di segnali continui al doppio della frequenza di rotazione (modello di emissione a singola armonica) o sia alla frequenza di rotazione che al suo doppio (modello a doppia armonica).

Come funziona questa ricerca

La collaborazione LVK usa gli strumenti più sensibili al mondo per cercare le onde gravitazionali. Questi rivelatori sono degli interferometri molto complessi e possono rilevare distorsioni estremamente piccole dello spaziotempo: tuttavia, nonostante la loro sensibilità, rivelare le onde CW rimane un'impresa estremamente difficile. Le onde CW sono così deboli che pensiamo siano affogate nel rumore di fondo: pertanto gli scienziati devono sviluppare e usare sofisticati algoritmi e tecniche di analisi dei dati per 'scavare' nel rumore.

Il gruppo di ricerca ha usato l'informazione dettagliata ottenuta da diversi osservatori elettromagnetici sulla posizione e rotazione di ciascuna pulsar. Questo è un esempio della *astronomia multi-messaggera*: le onde elettromagnetiche forniscono informazioni per le ricerche di onde gravitazionali continue per aumentarne le probabilità di successo, permettendo di specializzare le ricerche alle caratteristiche specifiche di ciascuna pulsar.

Queste ricerche mirate sono diverse da quelle a 'tutto cielo' in cui gli scienziati cercano qualsiasi segnale che giunga da qualsivoglia parte del cielo, non sapendo in quel caso da che parte possa provenire. Qui, usando le pulsar note come guida, i ricercatori possono focalizzarsi su intervalli di frequenza specifici dove le onde CW sono attese. Le ricerche a obiettivo sono le analisi più sensibili ma dipendono fortemente dal modello di emissione considerato, cioè sul meccanismo fisico che si ritiene generi l'emissione CW e che ne determina le caratteristiche del segnale atteso.

Che cosa abbiamo trovato?

L'analisi dei dati di O4a non ha rivelato alcun segnale di onde continue proveniente dalle 45 pulsar studiate. Ciò nonostante i nostri risultati restano importanti. Analizzando i dati siamo stati in grado di porre dei limiti sulla massima deformazione equatoriale, o 'ellitticità', che queste stelle di neutroni possono avere tenendo conto della mancata rivelazione di segnali CW (i cosiddetti *limiti superiori*, si veda anche la Figura 3). Ciò significa che gli scienziati ora hanno stime più precise sulla deformazione massima che queste pulsar possono avere in mancanza di un segnale rivelato. Si ottiene il limite più stringente sull'ellitticità per la pulsar J0437-4715, che è vicina a noi e che ruota con un periodo di una decina di millisecondi (e per questo fa parte dell'insieme delle cosiddette pulsar al millisecondo): in questo caso l'ellitticità deve essere inferiore a circa 9 parti per miliardo, corrispondente a una deformazione inferiore a 0.1 mm considerando un raggio di 10 km per la stella di neutroni!

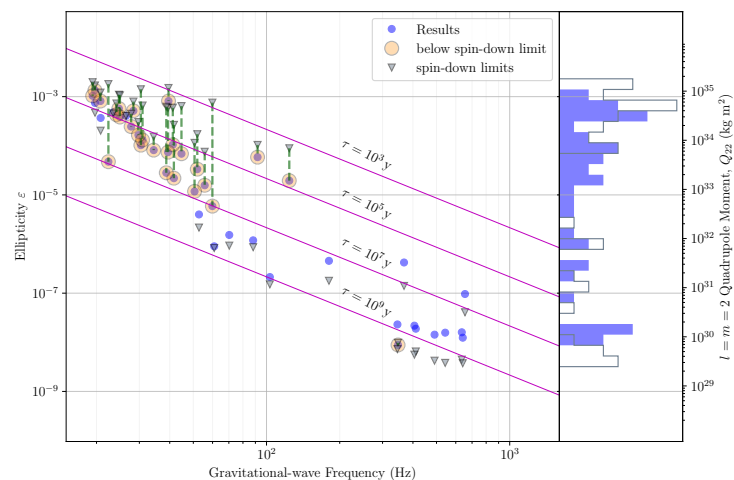


Figura 3: Cerchi blu: limite sperimentale superiore all'ellitticità di ciascuna pulsar, in funzione della frequenza attesa del segnale CW. Triangoli grigi: limite superiore teorico dell'ellitticità assumendo che il rallentamento della rotazione delle pulsar sia dovuto interamente all'emissione di onde gravitazionali continue.

Sviluppi futuri

Anche se i segnali gravitazionali CW continuano a essere elusivi, ogni nuova ricerca ci avvicina sempre più a una loro osservazione. Ogni miglioramento nella sensibilità aumenta le probabilità di rivelare un giorno un segnale CW e, quindi, di ottenere un nuovo strumento per studiare l'universo. La

collaborazione LVK continuerà a raffinare le proprie tecniche e a migliorare i propri rivelatori in preparazione ai prossimi periodi osservativi, avvicinandoci quindi al momento della prima rivelazione di un segnale CW. Nel frattempo, anche le mancate osservazioni possono essere interessanti perché comunque ci aiutano a migliorare la nostra conoscenza della massima deformazione che una stella di neutroni può avere.

La ricerca dei segnali di onde gravitazionali continue richiede molto tempo e ogni nuovo studio ci avvicina alla quella debole, persistente emissione proveniente dalle stelle di neutroni. Una volta rivelate, queste onde ci potranno offrire una moltitudine di informazioni su alcuni dei più misteriosi oggetti che popolano l'universo, e ci aiuteranno quindi a rispondere ad alcuni dei grandi interrogativi su ciò che succede alla materia a densità estreme.

Glossario

Ellitticità: Una misura di quanto la forma di una stella di neutroni differisca da una sfera perfetta. L'intensità delle onde gravitazionali emesse da una stella di neutroni è tanto più grande quanto maggiore è l'ellitticità.

Onde gravitazionali continue: Onde gravitazionali persistenti, di solito emesse da stelle di neutroni in rotazione attorno al proprio asse.

Pulsar: Un tipo di stella di neutroni con un intenso campo magnetico che emette fasci di radiazione elettromagnetica. Ruotando, la stella spazza lo spazio circostante con questi fasci di radiazione che noi osserviamo come singoli impulsi elettromagnetici quando il fascio incontra la Terra.

Stella di neutroni: Queste stelle incredibilmente dense sono ciò che resta dopo che le stelle di grande massa esplodono come supernovae.

Per saperne di più

Visita i nostri siti web:

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



Leggi liberamente l'anteprima dell'articolo scientifico:

<https://dcc.ligo.org/P2300352/public> oppure <https://arxiv.org/abs/2501.01495>

Traduzione in italiano a cura di Livia Conti e Edoardo Milotti.

Versione originale in inglese disponibile all'indirizzo:

<https://ligo.org/science-summaries/O4aKnownPulsars/>.