

TU MI FAI GIRAR (COME UNA STELLA): ALLA RICERCA DI ONDE GRAVITAZIONALI CONTINUE DA COPPIE SCONOSCIUTE DI STELLE DI NEUTRONI

Le stelle di neutroni (NS, dall'inglese Neutron Stars) sono il risultato di un'esplosione di supernova, ciò che resta di una stella che aveva una massa compresa tra 10 e 25 volte la massa del Sole. Questi oggetti compatti hanno un raggio tipico di 10 km e una massa simile a quella del nostro Sole, e ciò rende le NS uno degli ambienti più estremi in cui si osserva la materia. Il campo di ricerca sulla struttura e la composizione di questi oggetti compatti è attualmente molto attivo e interdisciplinare, e ad esso lavorano insieme le comunità di fisici delle particelle e di astrofisici.

L'estrema compattezza (o densità) di questi oggetti fa di loro un interessante laboratorio in cui mettere alla prova effetti relativistici come l'emissione di onde gravitazionali. Ed effettivamente i rivelatori Advanced LIGO e Advanced Virgo hanno osservato diversi eventi di onda gravitazionale legati alla fusione tra due NS. Una di queste osservazioni, [GW170817](#), è stata accompagnata pure da una controparte elettromagnetica, ed è stata la prima osservazione multi-messaggera di un evento astrofisico, per mezzo di onde gravitazionali e luce.

Le onde gravitazionali continue (CW dall'inglese Continuous Waves) sono un altro canale che permette di esplorare la struttura interna delle NS in rapida rotazione.

Secondo la teoria, una NS può deviare da una forma perfettamente simmetrica, sia a causa di imperfezioni nella crosta esterna, sia per una perturbazione oscillante nella struttura interna, o per la precessione libera dovuta ad un disallineamento tra l'asse di simmetria e quello di rotazione. Siccome la NS ruota velocemente su sè stessa, queste deformazioni causano l'emissione di radiazione gravitazionale nella forma di CW. Questa forma di radiazione gravitazionale è di parecchi ordini di grandezza più debole di quella prodotta durante la fusione di oggetti compatti; essa dura però per lunghi periodi di tempo (da mesi ad anni), e questo permette di integrare una grande quantità di dati per raggiungere un elevato rapporto segnale-rumore.

Ricerche di questo tipo vengono classificate secondo ciò che si sa sulle potenziali sorgenti. Per esempio, le ricerche mirate si concentrano sulle NS di cui grazie a studi basati sul segnale elettromagnetico sono note la posizione nel cielo e la frequenza di rotazione, mentre le ricerche direzionali puntano verso certe posizioni nel cielo dove potrebbe essere collocata una NS ancora ignota.

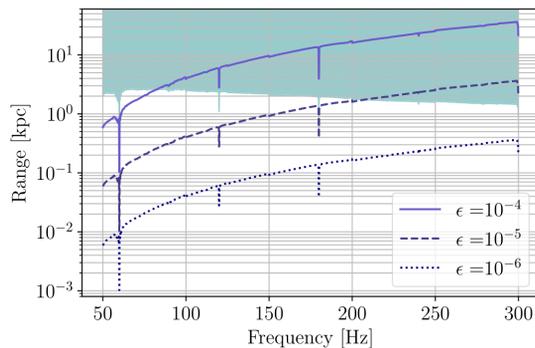


Figura 2: Massima distanza astrofisica coperta dalla nostra ricerca in funzione della frequenza. Le curve rappresentano diversi valori di deformazione, caratterizzata per mezzo dell'ellitticità di una NS. Deformazioni più grandi e frequenze più alte tendono a produrre CW più intense, permettendoci di sondarle a distanze maggiori. La regione ombreggiata corrisponde a velocità di **spindown** superiori a quelle considerate in questa ricerca, se non si assume alcun altro meccanismo di bilanciamento. Per confronto, la NS conosciuta più vicina a noi si trova a 0.1 kpc di distanza.

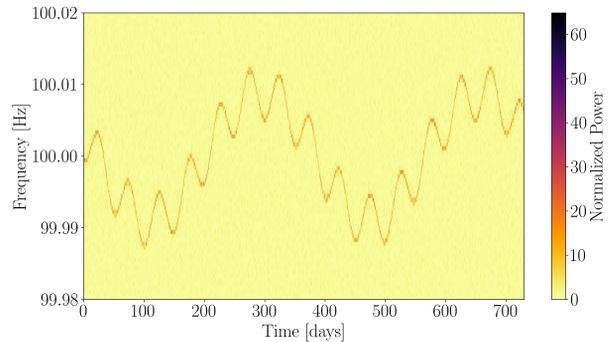


Figura 1: Esempio di spettrogramma di un'intensa CW simulata. Questo segnale corrisponde ad una NS deformata che ruota 50 volte al secondo ed orbita intorno ad un compagno con un periodo di 50 giorni. La frequenza centrale, 100 Hz, è data dal doppio della frequenza di rotazione dell'oggetto. Le oscillazioni più ampie, con periodicità di 365 giorni, corrispondono alla modulazione Doppler indotta dal moto orbitale della Terra intorno al Sole. Quelle più strette, con una periodicità di 50 giorni, corrispondono al moto orbitale della sorgente CW intorno al suo compagno. La durata coperta dall'insieme di dati (2 anni) è più lunga di quella usata in questa ricerca (6 mesi) per scopi illustrativi.

Qui mostriamo i risultati di una ricerca su tutto il cielo, in cui abbiamo cercato segnali CW da NS sconosciute e provenienti da qualsiasi direzione nel cielo. In particolare, ci concentriamo su NS non conosciute in sistemi binari. Il segnale atteso da NS isolate è un'onda di lunga durata, la cui frequenza diminuisce lentamente a causa dell'emissione di energia dovuta a cause diverse come radiazione elettromagnetica o gravitazionale. Questo effetto di rallentamento della rotazione (**spindown** in inglese) è abbastanza lento da poter essere trascurato, data la popolazione di NS considerata in questa ricerca. Dal punto di vista di un rivelatore sulla Terra, il segnale presenta una modulazione di frequenza dovuta alla rotazione giornaliera e al moto orbitale del nostro pianeta. Questo segnale viene complicato ulteriormente per le NS in sistemi binari, dal momento che deve essere tenuta in conto un'ulteriore **modulazione Doppler**, dovuta al moto relativo della NS attorno al corpo celeste compagno nel sistema binario.

In questa ricerca applichiamo una variante della trasformata di Hough, chiamata BinarySkyHough, che funziona per mezzo di uno spettrogramma dei dati. Questo spettrogramma fornisce informazioni su quali siano le frequenze predominanti durante il periodo osservativo.

L'idea di base è che un segnale CW si mostrerebbe sotto forma di un eccesso di potenza con una modulazione caratteristica nello spettrogramma, come mostrato nella **Figura 1**. Possiamo descrivere queste tracce di potenza usando un insieme di parametri legati alle proprietà fisiche della sorgente considerata, come la sua frequenza di rotazione o la sua posizione nel cielo; quindi, cercare una CW corrisponde all'identificazione di tracce significative in mezzo ai dati.

A causa dell'inclusione dei parametri orbitali che descrivono la forma dell'orbita del sistema binario, dobbiamo determinare un numero di parametri maggiore che nella ricerca di NS singole. Questo mette in difficoltà gli algoritmi utilizzati di solito, dal momento che il costo computazionale diventa presto ingestibile. In questo caso il problema può essere diviso in molti problemi minori e tra loro simili, e la ricerca può essere velocizzata usando le unità di elaborazione grafica (GPU, dall'inglese [Graphics Processing Units](#)) che possono risolvere un gran numero di questi sotto-problemi in parallelo.

Usiamo i dati della prima parte del terzo periodo osservativo dei rivelatori Advanced LIGO e Advanced Virgo, che coprono sei mesi di dati da aprile a settembre 2019, per cercare CW provenienti da NS ignote in sistemi binari sconosciuti nella banda di frequenza dove i rivelatori sono più sensibili. Non abbiamo trovato alcuna evidenza di segnali CW. Stimiamo quindi la sensibilità della nostra ricerca contando il numero di NS che riusciamo a recuperare da una popolazione di segnali simulati. Questa sensibilità viene espressa inizialmente in termini della più piccola ampiezza di onda gravitazionale rivelabile dal nostro programma di analisi. Troviamo una sensibilità che è la migliore finora entro lo spazio dei parametri analizzato, con l'ampiezza minima rivelabile che è del 60% inferiore a quella delle stime precedenti.

Questi risultati ci permettono di rispondere a due domande astrofisicamente interessanti, vale a dire a che distanza dalla Terra possiamo estendere la ricerca e qual è la massima deformazione permessa per una sorgente CW all'interno della regione esplorata dalla nostra ricerca. Le **Figure 2 e 3** riassumono la massima portata della nostra ricerca e la massima deformazione permessa per una sorgente CW in funzione della frequenza dell'onda gravitazionale. Come detto sopra, consideriamo sorgenti CW con **spindown** trascurabile. Questa assunzione pone un limite implicito alla massima deformazione che viene esplorata per le NS, rappresentata dalle regioni ombreggiate nelle figure. In altre parole, se non ci sono meccanismi di bilanciamento le regioni ombreggiate sono escluse dai nostri risultati perché implicherebbero velocità di **spindown** maggiori di quelle coperte da questa ricerca. Un possibile meccanismo di bilanciamento che si oppone allo **spindown** di una NS potrebbe essere il [flusso di materia](#) proveniente dall'oggetto compagno. Questi risultati dimostrano il notevole miglioramento dei rivelatori Advanced LIGO e Advanced Virgo che sono prossimi alla sensibilità di progetto e che ci consentono così di porre dei limiti superiori alle proprietà delle NS che sono sempre più vicini alle previsioni teoriche.

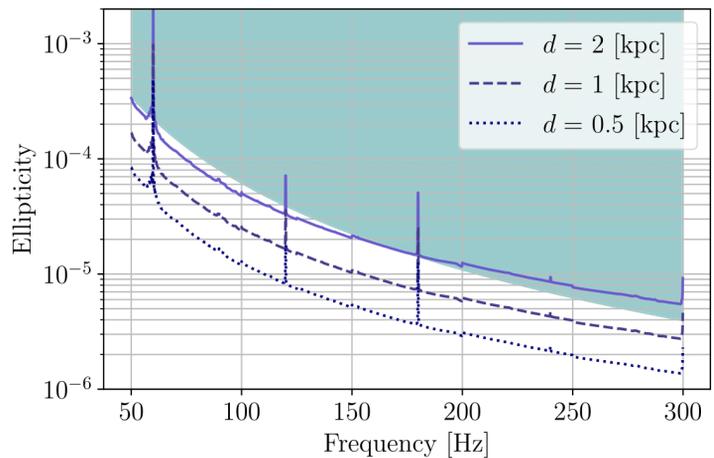


Figura 3: Deformazione massima consentita per una NS entro la nostra portata di ricerca in funzione della frequenza. Queste curve rappresentano l'entità della deformazione necessaria per produrre una CW rivelabile dalla nostra ricerca. Poiché l'ampiezza della CW diminuisce al crescere della distanza, le sorgenti più vicine sono al di sotto di questa soglia di rivelabilità solo se hanno **ellitticità** inferiori rispetto a quelle più lontane. La regione ombreggiata corrisponde a velocità di **spindown** superiori a quelle considerate in questa ricerca, se non si assume alcun altro meccanismo di bilanciamento.

PER SCOPRIRE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu

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

Leggete [qui](#) un'introduzione alle onde gravitazionali continue.

La versione originale inglese di questo sommario scientifico è [qui](#).

Visitate i nostri siti web:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>



GLOSSARIO

Ellitticità: Misura dell'allontanamento dalla forma sferica, definito come la deformazione relativa nel piano equatoriale rispetto la deformazione lungo la direzione perpendicolare.

Flusso di materia (accretion): Trasferimento di materia tra due corpi orbitanti grazie all'azione della gravità.

Kiloparsec (kpc): Un migliaio di parsec. Un **parsec** è un'unità astronomica di lunghezza che corrisponde a circa 3 anni luce o 30000 miliardi di km.

Graphics Processing Unit (GPU): Hardware specializzato, adatto all'analisi di dati con un'elevata parallelizzazione.

Onda gravitazionale continua: Tipo di radiazione gravitazionale di lunga durata. Si veda [qui](#) per ulteriori dettagli.

Sistema binario: Coppia di oggetti astronomici legati insieme dalla loro attrazione gravitazionale.

Spettrogramma: Rappresentazione visiva dell'evoluzione della frequenza in una serie temporale.

Spindown: Rallentamento della rotazione di una stella di neutroni dovuto ad emissione di energia per mezzo di onde elettromagnetiche o gravitazionali.

Spostamento Doppler: Cambiamento di frequenza di un'onda dovuto al moto relativo di sorgente e osservatore.

Stella di neutroni: Ciò che resta di una stella con massa compresa tra 10 e 25 volte la massa del nostro Sole dopo l'esplosione di supernova. Stelle di neutroni tipiche hanno massa di 1-2 masse solari e un raggio di 10-15 km, e sono alcuni degli oggetti più compatti mai scoperti.

Trasformata di Hough: Algoritmo per identificare delle forme ben descritte all'interno di immagini come quelle prodotte da uno spettrogramma.