

SE UNA PULSAR HA IL SINGHIOZZO, RIUSCIAMO A SENTIRLA CON LE ONDE GRAVITAZIONALI?

Nel 2024, una vecchia conoscenza celeste dei [radioastronomi](#) ha fornito un'entusiasmante opportunità per la ricerca delle [onde gravitazionali](#): in una [stella di neutroni](#), nota come [pulsar delle Vele](#) e così chiamata perché si trova nella costellazione delle Vele, si è verificata una breve irregolarità, in inglese **glitch**, una specie di singhiozzo nei suoi segnali radio altrimenti regolari. I processi fisici che causano queste irregolarità delle [pulsar](#) non sono ancora ben compresi, e l'osservazione di onde gravitazionali ad essi associate potrebbe essere un passo cruciale per risolvere questo enigma.

I GLITCH DELLE PULSAR

La pulsar delle Vele, situata a circa mille [anni luce](#) dalla Terra e poco più vecchia di diecimila anni, è un oggetto estremamente denso e particolarmente affascinante: si tratta di una [stella di neutroni](#), ciò che resta dopo che una stella massiccia è esplosa come una [supernova](#) alla fine della sua vita. Inoltre ruota così rapidamente (oltre 11 volte al secondo) e ha un campo magnetico così intenso (oltre mille miliardi di volte più intenso di quello terrestre) che emette potenti fasci di [radiazione elettromagnetica](#). Quando questi fasci incontrano la Terra i radiotelescopi captano impulsi emessi ad ogni rotazione della stella, da cui il termine *pulsar*. La pulsar perde lentamente energia nel tempo e rallenta; una piccola parte di questa perdita di energia potrebbe essere spiegata da un [emissione continua di onde gravitazionali](#).



Figura 1: La nebulosa che circonda la pulsar delle Vele e il getto che proviene dalla stella. Immagine composita ottenuta con osservazioni a raggi X (crediti: NASA/CXC/Università di Toronto/M. Durant et al.) e ottiche (credit: DSS/Davide De Martin).

Nel caso della pulsar delle Vele, questa serie molto regolare di impulsi mostra una caratteristica insolita all'incirca ogni due anni: si tratta dei cosiddetti glitch, in seguito ai quali la velocità di rotazione della pulsar aumenta improvvisamente. Tali glitch si osservano anche in diverse altre pulsar, ma la pulsar delle Vele è stata la prima in cui sono stati osservati, ed è anche tra quelle che hanno mostrato questo strano fenomeno con maggiore frequenza ed intensità. Tuttavia le sole osservazioni elettromagnetiche non riescono a risolvere l'enigma dei glitch. Probabilmente sono collegati a potenti "terremoti stellari", ad effetti legati alla [superfluidità](#) dell'interno denso della stella, o a una combinazione di entrambi, ma i dettagli rimangono ignoti.

L'ultimo grande glitch della pulsar delle Vele, rivelato dai radiotelescopi a fine aprile 2024 proprio mentre i rivelatori LIGO e Virgo erano in piena modalità osservativa, ha suscitato un grande interesse nella [Collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK). Poiché le Vele sono una costellazione del cielo meridionale, i due radiotelescopi che hanno fornito informazioni precise su questo glitch sono quelli dell'[Istituto Argentino di Radioastronomia](#) e dell'[Osservatorio di Mount Pleasant](#) dell'Università della Tasmania (Australia).

PERCHÉ I GLITCH DELLE PULSAR DOVREBBERO CAUSARE ONDE GRAVITAZIONALI?

A causa della loro estrema densità e veloce rotazione, le stelle di neutroni sono interessanti come potenziali sorgenti di onde gravitazionali. Oltre a segnali deboli di lunga durata dovuti alla lenta diminuzione della velocità di rotazione, potrebbero venire prodotti segnali più intensi di breve durata ogni volta che la stella subisce un evento violento come un glitch. E in effetti esistono diversi modelli su come un glitch di una pulsar possa produrre onde gravitazionali.



Figura 2: I quattro osservatori partecipanti a questo lavoro: due radiotelescopi in Argentina e Tasmania, e i due rivelatori di onde gravitazionali LIGO negli Stati Uniti. Credits: Argentine Institute of Radioastronomy, University of Tasmania, LIGO Laboratory (Caltech/MIT).

Innanzitutto, una stella di neutroni può risuonare come una campana con [vari tipi di oscillazioni](#). Le più forti sono chiamate "f-modes", abbreviazione di "fundamental modes". I glitch possono attivare questi modi f, proprio come una campana che suona quando viene colpita con un martello. Quando la stella di neutroni vibra, ci aspettiamo che emetta onde gravitazionali solo per una frazione di secondo o al massimo pochi secondi, e con frequenze dell'ordine dei **kilohertz**.

In secondo luogo, un glitch potrebbe anche deformare la stella di neutroni. Ciò è equivalente alla formazione di una specie di "montagna temporanea" che per un certo tempo si alza sulla forma per lo più liscia della pulsar. In questo caso la stella in rotazione emetterebbe anche onde gravitazionali. A causa dell'immensa gravità della stella di neutroni, la montagna verrebbe rapidamente riassorbita. Queste onde gravitazionali avrebbero frequenze molto più basse (il doppio della velocità di rotazione della pulsar stesso, quindi circa 22 Hertz per la pulsar delle Vele) e ampiezze inferiori rispetto a quelle dei modi f, ma potrebbero potenzialmente durare giorni o addirittura mesi, così da avere buone possibilità di osservarne l'effetto complessivo.

RICERCHE DI ONDE GRAVITAZIONALI

Nel loro **quarto periodo osservativo** i rivelatori **LIGO** hanno raggiunto una sensibilità così elevata che ora, per la prima volta, abbiamo una reale possibilità di individuare le onde gravitazionali prodotte da un evento come un glitch della pulsar delle Vele. Per cogliere questa occasione, abbiamo usato una combinazione di metodi diversi per assicurarci di trovare qualcosa nonostante le grandi incognite su cosa accada effettivamente durante il glitch. L'utilizzo di diversi algoritmi di ricerca per ciascuna classe di segnale è importante per garantire la robustezza della ricerca a fronte di una fisica sconosciuta e complessi modelli di [rumore del rivelatore](#).

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate www.ligo.org
i nostri www.virgo-gw.eu
siti web: gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



Abbiamo utilizzato tre diversi algoritmi per cercare segnali con una durata massima che va dai secondi ai minuti. Essi coprono un'ampia gamma di frequenze e non presuppongono modelli di segnale specifici, quindi sono sensibili ai modi f attesi così come ad altri segnali di breve durata che una stella di neutroni perturbata potrebbe emettere.

Altri quattro algoritmi sono pensati per segnali di lunga durata, da mezz'ora fino a quattro mesi. Questi si concentrano su frequenze di segnale di circa 11 Hertz e circa 22 Hertz, come ci si aspetta ad esempio dallo scenario della "montagna temporanea".

PRIMI RISULTATI SUI LIMITI FISICI E PROSPETTIVE FUTURE

Purtroppo, nonostante la [sensibilità](#) record dei rivelatori LIGO durante il periodo osservativo, non abbiamo ancora trovato segni convincenti di onde gravitazionali provenienti dalla pulsar della Vela. Tuttavia, questo insieme di risultati rappresenta una tappa importante: per la prima volta, abbiamo avuto una sensibilità sufficiente per porre dei limiti fisicamente significativi su quanta radiazione gravitazionale venga emessa dopo un glitch della pulsar. Questo significa che se tutta l'energia rilasciata dall'evento di glitch fosse stata utilizzata per produrre onde gravitazionali, avremmo dovuto trovare qualcosa. Questo vale per tutta la gamma di segnali a lunga durata, mentre nel caso del modo f otteniamo nuovi limiti solo a frequenze inferiori ad un kilohertz, mentre la maggior parte dei modelli realistici di stelle di neutroni afferma che l'emissione dovrebbe avvenire a frequenze più alte.

Non avendo trovato nulla in questa ricerca, le migliori indicazioni che abbiamo ottenuto sulla pulsar delle Vele riguardano lo scenario della "montagna temporanea". In questo caso possiamo dire che:

- l'idea che le variazioni osservate nell'emissione radio della pulsar dopo il glitch siano causate da una "montagna transitoria" non è corretta, oppure
- se questa idea è corretta e le onde gravitazionali sono state emesse come previsto in questo scenario, allora la pulsar deve essere un residuo stellare compatto del tipo più piccolo e leggero consentito. Questo perché una stella di neutroni più grande o più pesante avrebbe emesso un segnale da una "montagna transitoria" che avremmo dovuto trovare (si veda la figura 3).

Questi risultati sono compatibili con quelli di altre osservazioni di stelle di neutroni (come la famosa [fusione del sistema binario che ha dato origine a GW170817](#)), che ci dicono già che la pulsar della Vela deve avere una [massa superiore a quella del nostro Sole](#) racchiusa in una sfera con un raggio inferiore a 15 km, non molto più di grande dell'estensione della maggior parte delle città sulla Terra!

Dopo questo risultato fondamentale, possiamo aspettarci che futuri glitch delle pulsar che si verifichino quando i rivelatori di onde gravitazionali saranno diventati ancora più sensibili produrranno limiti ancora migliori. E alla fine, una rivelazione diretta delle onde gravitazionali da una pulsar ci aiuterà a svelare il misterioso motivo per cui la pulsar delle Vele e altre pulsar simili soffrono di questi strani singhiozzi.

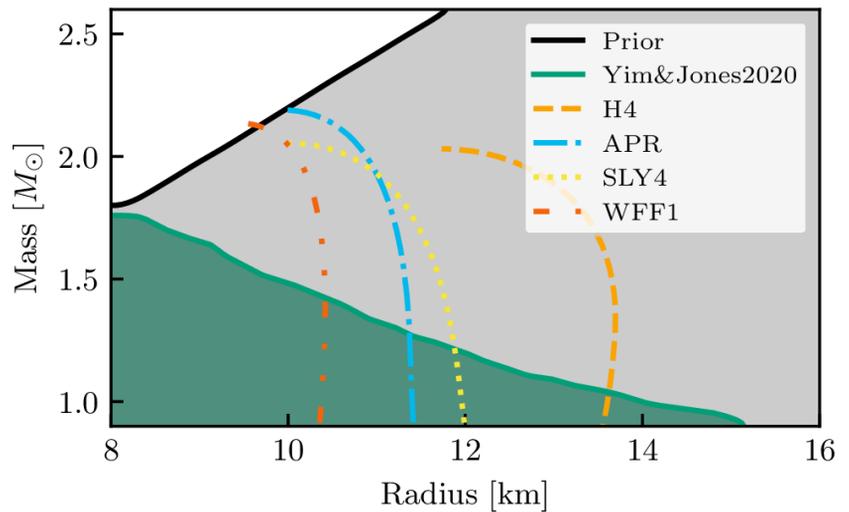


Figura 3: (figura 7 del nostro [articolo scientifico](#)): il fatto che i rivelatori LIGO non abbiano trovato alcun segnale proveniente dalla pulsar delle Vele dopo il suo glitch del 2024, implica che o alcuni modelli di emissione non siano del tutto corretti, oppure che questa stella di neutroni abbia proprietà tali che le onde gravitazionali siano così deboli da non essere rivelabili. In particolare, i nostri risultati sui segnali di lunga durata ci dicono che o le variazioni del periodo osservate nell'emissione radio della pulsar dopo il glitch non sono causate da una "montagna temporanea", oppure, se lo sono, che la pulsar non può avere massa o dimensioni superiori a certi limiti. Questo grafico mostra i limiti sul raggio (asse orizzontale) e sulla massa (asse verticale). L'ampia area sotto la linea nera continua rappresenta l'insieme dei valori che abbiamo considerato inizialmente, mentre l'area ombreggiata di verde in basso a sinistra indica la regione dei parametri che risultano ancora compatibili in seguito alla mancata osservazione di segnali di lunga durata, ma dove assumiamo comunque che una montagna abbia emesso onde gravitazionali secondo il modello specifico che abbiamo considerato. Le linee a tratti e punti corrispondono a diversi modelli teorici della relazione tra raggio e massa di una stella di neutroni.

GLOSSARIO

Radioastronomia: Lo studio della radiazione elettromagnetica a grande lunghezza d'onda, simile a quella usata per i segnali radio e TV sulla Terra, proveniente dallo spazio.

Onde gravitazionali (GW, dall'inglese Gravitational Waves): Increspature nello spazio-tempo create da oggetti massicci in movimento. Come le radiazioni elettromagnetiche, viaggiano alla velocità della luce. Sono previste dalla teoria della relatività generale di Einstein e sono comunemente conosciute come onde gravitazionali. Per saperne di più si possono consultare le nostre altre pagine sulla scienza delle onde gravitazionali.

Pulsar: Da "pulsating star" (stella pulsante): una stella compatta con un intenso campo magnetico che ruota velocemente su se stessa e che emette fasci di radiazione elettromagnetica dai suoi poli magnetici. [\(Wikipedia\)](#)

Pulsar delle Vele: Una stella di neutroni nella costellazione di Vela nel cielo meridionale, a circa 1000 anni luce dalla Terra. È uno delle pulsar più vicine, luminose e attive conosciute. Per ulteriori informazioni e un video della pulsar, si veda anche <https://www.nasa.gov/missions/chandra/veela-pulsar/>

Stelle di neutroni: Ciò che resta alla fine della vita di una stella massiccia. Una stella massiccia che esaurisce il suo combustibile nucleare termina la sua vita con un'esplosione di supernova che può portare alla formazione di una stella di neutroni: un oggetto così massiccio e denso (anche se non quanto un buco nero) che gli atomi non possono mantenere la struttura che osserviamo sulla Terra. Le stelle di neutroni hanno una massa vicina a quella del nostro sole, ma con un raggio di circa dieci chilometri. [\(Wikipedia\)](#)

Glitch delle pulsar: Cambiamenti improvvisi della velocità di rotazione di una pulsar. I meccanismi responsabili all'interno della stella di neutroni non sono ancora ben compresi. Da non confondere con i glitch del rivelatore, fastidiosi componenti del rumore che rendono più difficili le nostre ricerche sulle onde gravitazionali.

Radiazione elettromagnetica: La luce visibile si estende dal rosso al viola, ma oltre questo intervallo lo spettro continua. Oltre la luce rossa ci sono la luce infrarossa, le microonde e le onde radio, mentre oltre il viola ci sono la luce ultravioletta, i raggi X e i raggi gamma. Gli astronomi utilizzano diverse parti dello spettro per osservare diversi aspetti dell'Universo. Tuttavia, alcuni oggetti sono oscuri e quindi difficili da vedere in qualsiasi parte di questo spettro. [\(Wikipedia\)](#)

Onde gravitazionali continue (CWs): Onde gravitazionali estremamente deboli ma persistenti, che ci aspettiamo vengano emesse da stelle di neutroni in rotazione e con superficie irregolare. Abbiamo cercato questo tipo di emissione nei dati recenti LIGO studiando molte pulsar, inclusa la pulsar delle Vele, trovando che meno dell'1% della perdita di energia osservata per rallentamento può essere dovuta alle onde gravitazionali. (si veda [qui](#).)

Superfluido: Uno stato peculiare della materia in cui il fluido scorre senza viscosità. [\(Wikipedia\)](#)

kilohertz (kHz): Unità di misura della frequenza corrispondente a mille Hertz. Per le onde sonore, un'oscillazione con questa frequenza sarebbe nell'intervallo superiore dell'udito umano. Anche per le onde gravitazionali ciò rende più difficile rivelare segnali a tale frequenza rispetto a quelle di qualche centinaio di Hertz dove i nostri rivelatori sono più sensibili.

Quarto periodo osservativo: Periodo osservativo in cui i rivelatori di onde gravitazionali della rete globale LIGO-Virgo-KAGRA hanno raccolto dati da maggio 2023 a novembre 2025.

LIGO: il Laser Interferometer Gravitational Observatory è una coppia di rivelatori di onde gravitazionali che si trova negli Stati Uniti. Uno si trova vicino a Livingston, Louisiana, e l'altro vicino a Hanford, Washington. Entrambi i rivelatori sono interferometri laser con due bracci perpendicolari lunghi 4 km. [\(Wikipedia\)](#)

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

- www.ligo.org
- www.virgo-gw.eu
- gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/ (KAGRA)
- www.iar.unlp.edu.ar (Argentine Institute of Radioastronomy – in Spanish)
- ra-wiki.phys.utas.edu.au UTAS Radio Astronomy Group (Mt. Pleasant Radio Observatory)

Il preprint gratuito dell'articolo scientifico completo è disponibile [qui](#) oppure su arxiv.