

ONDE GRAVITAZIONALI DA PULSARS CONOSCIUTE? UN'OCCHIATA DENTRO E OLTRE LA RELATIVITÀ GENERALE.

COSA SONO LE ONDE GRAVITAZIONALI?

Dopo la prima osservazione di un'onda gravitazionale nel 2015 abbiamo registrato molte altre volte l'emissione di onde gravitazionali. Ciò che tutti questi eventi hanno in comune è che si tratta di segnali transienti che provengono dalla fusione di oggetti compatti. Essi includono l'avvicinamento (in inglese, *inspiral*) e la fusione (in inglese, *merger*) di coppie di buchi neri, di coppie di stelle di neutroni, e infine di una stella di neutroni e un buco nero. I segnali di onda gravitazionale associati a questi eventi sono caratterizzati da ampiezza e frequenza crescenti in un tempo molto breve. Però noi cerchiamo anche onde gravitazionali di altro tipo. Per esempio, prodotti da sorgenti che emettono onde gravitazionali con continuità, con ampiezza e frequenza abbastanza costanti.

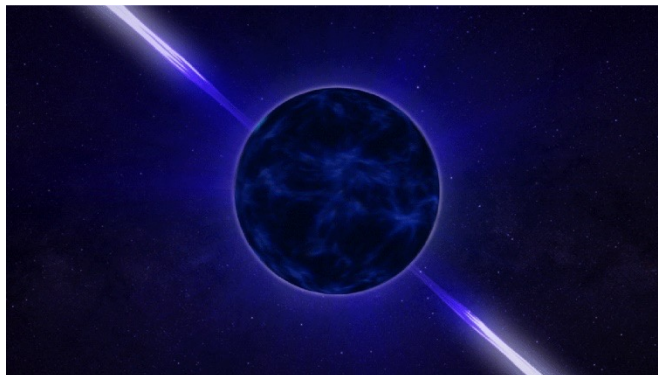


Figura 1: Rappresentazione artistica di una pulsar/stella di neutroni. Crediti: [NASA's Goddard Space Flight Center](#)

COSA SONO LE PULSARS (STELLE DI NEUTRONI)?

Le stelle di neutroni – alcune delle quali sono viste per mezzo delle loro emissioni elettromagnetiche e sono note come *pulsars* – sono una possibile sorgente di onde gravitazionali continue. Quando una stella con una massa 8-20 volte quella del sole consuma tutto il suo combustibile non è più capace di sostenere il proprio peso e produce una potente esplosione, diventando così una supernova. Una stella di neutroni è ciò che resta successivamente del nucleo della stella. È un oggetto incredibilmente denso, con una massa come quella del Sole ($\sim 2 \times 10^{30}$ kg) compressa in una sfera con la dimensione di una città (~ 10 km di raggio). Ci si aspetta che queste stelle siano molto rigide, diversamente da stelle più giovani come il nostro Sole. Ruotano velocemente, talvolta centinaia di volte al secondo (vale a dire con frequenze di rotazione superiori a 100 Hz) se durante la loro esistenza sono state accelerate dalla cattura di materiale proveniente da una stella compagna. Questa incredibile frequenza di rotazione corrisponde ad una velocità alla superficie che vale circa il 10% della velocità della luce. La rapida rotazione alimenta fasci concentrati di intensa radiazione elettromagnetica (che in alcuni casi va dalle onde radio ai raggi gamma) emessa dai poli magnetici. Se il fascio di radiazione punta in un certo istante verso la Terra e l'asse di rotazione non è allineato con i poli magnetici, possiamo vedere la stella di neutroni pulsare come un faro. È da ciò che viene il nome "pulsar".

Perché una pulsar emetta onde gravitazionali è necessario che ci sia una qualche asimmetria di massa intorno all'asse di rotazione (un quadrupolo di massa). Per esempio, se una pulsar avesse delle deformazioni sulla crosta, in un certo senso delle "montagne", allora potrebbero venire emesse onde gravitazionali. Queste montagne potrebbero essere ciò che resta delle condizioni al momento della formazione della stella durante l'esplosione di supernova oppure potrebbero essersi formate durante la vita della pulsar, per esempio a causa della cattura di massa. Una montagna su una pulsar non assomiglia molto alle montagne come l'Everest sulla Terra. La gravità sulla superficie di una pulsar è così intensa che, secondo le nostre misure, qualunque montagna più alta di pochi centimetri verrebbe appiattita crollando sotto il proprio peso. L'ellitticità è un modo per descrivere l'entità della deformazione come frazione del raggio della stella. Anche alcuni processi sotto la crosta possono causare l'emissione di onde gravitazionali, ad esempio per mezzo di un intenso campo magnetico interno.

CHE TIPO DI ONDE CI SI ASPETTA DI TROVARE?

Nel corso del tempo la frequenza di rotazione delle pulsar diminuisce. Questo fenomeno è noto come **spin-down**. A causa della conservazione dell'energia, ogni perdita di energia di rotazione deve venire convertita in qualche altra forma di energia. Supponendo che tutta l'energia di rotazione venga emessa sotto forma di radiazione gravitazionale, possiamo porre un limite superiore all'ampiezza delle onde ricevute dagli strumenti sulla Terra. Questo è quello che si chiama **limite di spin-down**. Quando le nostre ricerche raggiungono una **sensibilità** che ci porta sotto questo limite, allora possiamo porre nuovi **limiti superiori** all'ampiezza, e addirittura osservare le onde gravitazionali stesse. Però ci sono altri meccanismi, come la radiazione di dipolo magnetico, che probabilmente contribuiscono allo spin-down, e quindi noi ci aspettiamo che questo limite superiore sia una sovrastima.

Assumiamo che valgano certe relazioni tra la frequenza di rotazione della pulsar (misurata per mezzo del segnale elettromagnetico) e la frequenza delle onde gravitazionali emesse. In generale, ci aspettiamo che l'emissione delle onde gravitazionali abbia una frequenza doppia di quella di rotazione della pulsar. Ci sono anche altri meccanismi che causano emissione proprio alla frequenza di rotazione. Per esempio, nel caso della precessione libera della stella in cui è lo stesso asse di rotazione a cambiare, e nel caso in cui un nucleo stellare superconduttore ruota indipendentemente dalla crosta.

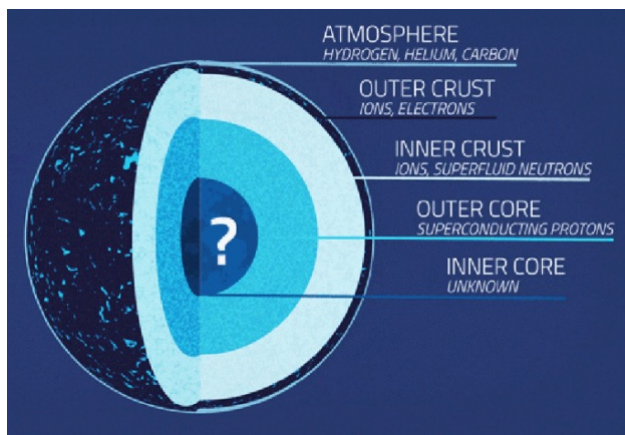


Figura 2 Rappresentazione artistica dell'interno di una pulsar/stella di neutroni. Crediti: [NASA's Goddard Space Flight Center](#)

LA NOSTRA ANALISI

In questa analisi abbiamo cercato onde gravitazionali in corrispondenza alla prima e alla seconda armonica della frequenza di rotazione di ciascuna pulsar nei dati del secondo e del terzo periodo osservativo di LIGO-Virgo (a cui ci riferiamo con le sigle O2 e O3). Abbiamo incluso nella ricerca 236 pulsar, comprese 74 pulsar che non erano state considerate nella nostra [precedente analisi](#) dei dati del primo e del secondo periodo osservativo. C'erano 168 pulsar in sistemi binari e 161 pulsar con frequenze superiori a 100 Hz, chiamate **pulsar millisecondo**. Le osservazioni elettromagnetiche di vari osservatori ci hanno fornito la posizione di ciascuna pulsar, la frequenza, oltre a osservazioni nel dominio della frequenza che sono state usate per inseguire potenziali segnali di onda gravitazionale nei dati per mezzo di un processo chiamato integrazione coerente.

Abbiamo anche introdotto un nuovo metodo di ricerca pensato per rivelare la radiazione di dipolo presente nella [teoria di Brans-Dicke](#). La teoria di Brans-Dicke, motivata dal principio di Mach, fu proposta da [Carl Brans](#) e [Robert Dicke](#). La teoria fu costruita partendo da precedenti studi di Pascual Jordan e di Markus Fierz, e talvolta ci si riferisce ad essa con il nome di teoria di Jordan-Fierz-Brans Dicke. Nella relatività generale di Einstein la costante di accoppiamento tra materia e spazio-tempo è G (la [costante di gravitazione universale](#)). Nella teoria di Brans-Dicke l'accoppiamento dipende anche da un parametro ζ attraverso la relazione $G(1-\zeta)$. Il parametro di Brans-Dicke (ζ) si ottiene dagli esperimenti, e l'esperimento Cassini nel 2003 ha posto il vincolo $\zeta < 0.0000125$. La radiazione gravitazionale in relatività generale è dominata dalla parte variabile nel tempo del momento di quadrupolo e la radiazione di dipolo è proibita dalla conservazione della quantità di moto. D'altra parte nella teoria di Brans-Dicke è possibile produrre onde gravitazionali anche con momenti di dipolo variabili nel tempo, analogamente a quanto accade in elettromagnetismo. Possiamo immaginare il momento di quadrupolo come uno allungamento di una massa lungo un asse, mentre il momento di dipolo descrive l'allontanamento in una certa direzione di una massa rispetto un punto di riferimento. Inoltre, nel caso dell'emissione di quadrupolo, la frequenza dell'onda gravitazionale è doppia rispetto alla frequenza della pulsar, mentre nel caso della radiazione di dipolo le onde vengono emesse alla frequenza di rotazione della stella, proprio come nel caso elettromagnetico.

I RISULTATI

In nessun caso abbiamo trovato onde gravitazionali provenienti dalle pulsar esaminate, né con la ricerca regolare, né con il metodo di Brans-Dicke. Abbiamo però aggiornato i limiti superiori sulle ampiezze dei segnali e migliorato i limiti di spin-down per 23 pulsar, 9 delle quali sono state analizzate per la prima volta. Due pulsar millisecondo sono incluse in questo conteggio: J0437-4715 e J0711-6830, così come J0537-6910 che non è stata analizzata in questo lavoro ma che in un'[analisi precedente](#) sembrava superare il suo limite di spin-down. È un fatto eccitante perché la maggioranza delle pulsar che superano il limite di spin-down si sono formate da poco tempo e rallentando più velocemente possono produrre onde gravitazionali più intense. Inoltre, a causa delle frequenze più alte delle pulsar millisecondo, anche montagne più basse riescono ad emettere onde gravitazionali osservabili. E così con queste pulsar otteniamo limiti molto stringenti, dell'ordine di frazioni di millimetro, sull'altezza delle montagne. Nel caso della pulsar della nebulosa del Granchio abbiamo migliorato i limiti dell'analisi precedente, trovando che il limite superiore alla frazione di spin-down dovuta all'emissione di onde gravitazionali è inferiore allo 0.009% (il limite precedente era ~0.02%). Ciò significa che la gran parte dello spin-down è dovuta ad altri meccanismi. Prendendo un'ellitticità 7.2×10^{-6} ciò corrisponde ad un'altezza massima delle montagne di ~2 cm (in precedenza il limite era ~3 cm). Durante il quarto periodo osservativo – se saremo fortunati – potremo finalmente osservare le onde gravitazionali emesse dalle pulsar. Altrimenti metteremo dei limiti ancora più stringenti sulla forma quasi perfettamente sferica di questi strani oggetti.

PER SAPERNE DI PIÙ

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

VISITATE I NOSTRI SITI WEB:

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

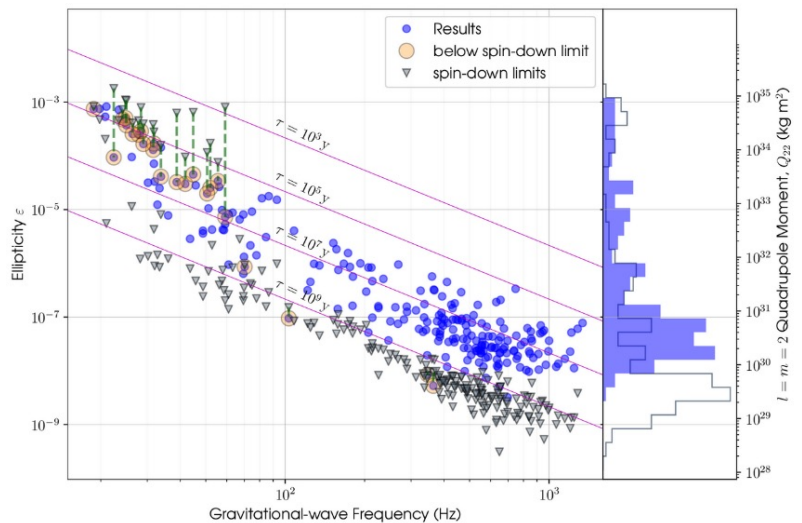


Figura 3: **Limiti superiori sull'ellitticità e sul quadrupolo di massa di tutte le 236 pulsar.** I limiti superiori per ciascuna pulsar sono rappresentati da cerchi blu mentre i **limiti di spin-down** sono indicati da triangoli grigi. Le pulsar per cui i nostri limiti superiori hanno superato i limiti di spin-down sono contrassegnate da dischi ombreggiati con una linea verde punteggiata che collega il limite al limite di spin-down. Sono incluse anche delle linee rosa corrispondenti ai contorni di uguale **età caratteristica**, assumendo che lo spin-down sia causato soltanto dall'emissione di onde gravitazionali.

GLOSSARIO

LIGO: Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory (LIGO), una coppia di rivelatori di onde gravitazionali negli Stati Uniti. Si trovano a Livingston, Louisiana, e vicino Hanford, Washington. Entrambi i rivelatori sono grandi interferometri laser, con due bracci perpendicolari lunghi 4 km, costruiti in modo da misurare qualunque cambiamento relativo della lunghezza dei bracci dovuto al passaggio di un'onda gravitazionale.

Virgo: Rivelatore di onde gravitazionali situato vicino a Pisa. È un interferometro laser proprio come LIGO, ma con bracci lunghi 3 km.

Ellitticità: Quantità che corrisponde approssimativamente al rapporto tra l'entità della deformazione, in pratica l'altezza della "montagna" Δr , e il raggio della stella r : $\epsilon \sim \Delta r/r$. Più tecnicamente si tratta del rapporto tra la differenza di due momenti di inerzia ed il momento d'inerzia principale.

Sensibilità: Un modo per indicare la capacità di uno strumento di rivelare un segnale. Strumenti con rumore più basso riescono a rivelare segnali più deboli e quindi si dice che hanno una sensibilità più alta.

Spin-down (rallentamento): Le pulsar sono stelle di neutroni in cui si osserva la diminuzione della velocità di rotazione con il passare del tempo. Ciò corrisponde ad un aumento del periodo di rotazione.

Limite di spin-down: Il limite che si pone sull'ampiezza delle onde gravitazionali provenienti da una pulsar assumendo che tutta l'energia cinetica di rotazione persa dalla stella mentre rallenta venga convertita in radiazione gravitazionale. Il calcolo richiede una conoscenza precisa della distanza della pulsar, ma in realtà le distanze delle pulsar sono note solo entro un fattore due. Però sappiamo che ci sono altri modi in cui una pulsar può perdere energia, in particolare per mezzo della radiazione di dipolo magnetico.

Periodo osservativo: Il periodo entro il quale gli osservatori di onde gravitazionali prendono dati.

Deformazione: cambiamento frazionario della distanza tra due punti di misura causato dalla deformazione dello spazio-tempo dovuta al passaggio di un'onda gravitazionale. La deformazione tipica delle onde gravitazionali che raggiungono la Terra è molto piccola (inferiore a 10^{-22} utilizzando le misure di LIGO).

Limite superiore: un'affermazione sul massimo valore che una certa quantità può avere mantenendo la consistenza con i dati sperimentali. Qui una quantità di interesse è la massima ampiezza della deformazione prodotta da una data onda gravitazionale continua che raggiunge la Terra. Noi usiamo un livello di credibilità del 95%, vale a dire che la probabilità che la quantità sia sotto il limite dato è del 95%, tenendo conto dei dati che utilizziamo.

Età caratteristica: l'età di una pulsar determinata utilizzando la frequenza di rotazione attuale e la velocità di spin-down, oltre ad una stima del meccanismo che sta rallentando la rotazione, vale a dire dell'emissione di radiazione gravitazionale.

Pulsar millisecondo: Una pulsar che ruota velocemente, con un periodo inferiore a circa 30 millisecondi e un ridotto valore di spin-down.

Pulsar riciclata: Una pulsar che non è sempre una pulsar millisecondo, ma che si pensa abbia acquisito un'alta velocità di rotazione strappando materia ad una stella compagna.