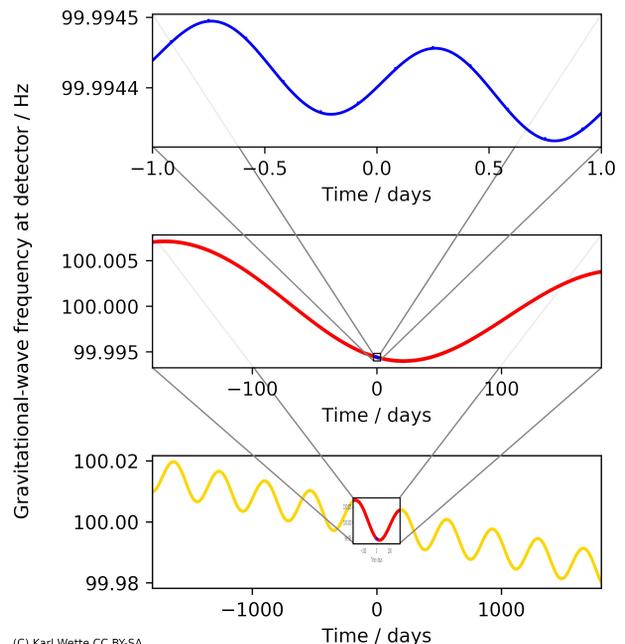


## COME TROVARE UNA GOBBA: UNA RICERCA A TUTTO CAMPO DI STELLE DI NEUTRONI SENZA SIMMETRIA ASSIALE

Gli scienziati di LIGO e Virgo stanno proseguendo una campagna decennale di ricerca di rigonfiamenti sulle stelle di neutroni. Le [stelle di neutroni](#) sono stelle estremamente compatte create dal collasso di una stella più pesante del nostro Sole quando gli elettroni nei suoi atomi si combinano con i protoni per formare una palla composta principalmente da neutroni, con un raggio non molto più grande di 10 km. Se fossero molto più compatte, le stelle di neutroni formerebbero buchi neri. Alcune stelle di neutroni sono delle pulsar, caratterizzate da una rotazione veloce e dal fatto che – proprio come dei fari – emettono fasci di radiazione elettromagnetica con una periodicità estremamente regolare quando vengono osservate da un punto d'osservazione fisso. Le loro frequenze di rotazione sono così stabili da rivaleggiare con gli orologi atomici sulla Terra. Un rigonfiamento asimmetrico su una stella di neutroni potrebbe creare onde gravitazionali continue. Immaginate, ad esempio, un grande promontorio sopraelevato con un'altezza di un millimetro o un centimetro su un lato della stella. Mentre la stella di neutroni, e quindi anche questa leggera irregolarità, ruota intorno al proprio asse – da decine a centinaia di volte nel caso delle stelle potenzialmente rivelabili – essa disturba lo spazio-tempo tutto attorno, producendo radiazione gravitazionale. La frequenza delle onde gravitazionali emesse è doppia di quella di rotazione della stella ed è quasi costante, a parte una graduale, leggera diminuzione dovuta all'emissione di onde gravitazionali. Poiché l'emissione è dovuta al moto di rotazione, queste onde gravitazionali sono *continue* nel tempo.

La nostra ricerca di [onde gravitazionali continue](#) di questo tipo continua da anni nella speranza che ogni nuovo miglioramento dei rivelatori di onde gravitazionali in giro per il mondo ci consenta di dare un'occhiata alle onde incredibilmente lievi che potrebbero venire emesse da una stella di neutroni bitorzoluta. Prendiamo come riferimento la [deformazione](#) (*strain* in inglese) prodotta dalla prima onda gravitazionale rivelata nel settembre 2015, che era circa  $10^{-21}$ . Quel segnale ci raggiunse da una coppia di buchi neri massicci a 1.3 miliardi di anni luce di distanza, e fu rilevabile solo per un paio di decimi di secondo. Le onde gravitazionali continue dovrebbero essere ancora più deboli, e di parecchi ordini di grandezza, nonostante le distanze delle stelle che le emettono siano solo di qualche centinaio di migliaia di anni luce, perché l'energia irradiata dovrebbe essere molto inferiore.

Usando i primi sei mesi di dati dell'ultimo periodo osservativo di LIGO e Virgo (O3), abbiamo esteso più a fondo che mai la ricerca di stelle di neutroni con irregolarità significative all'interno della nostra galassia. Questa nuova ricerca è estesa a stelle isolate in ogni direzione del cielo ed è capace di rivelare deformazioni inferiori a  $10^{-25}$ : ciò la rende la ricerca più precisa mai realizzata, sensibile a irregolarità estremamente piccole.

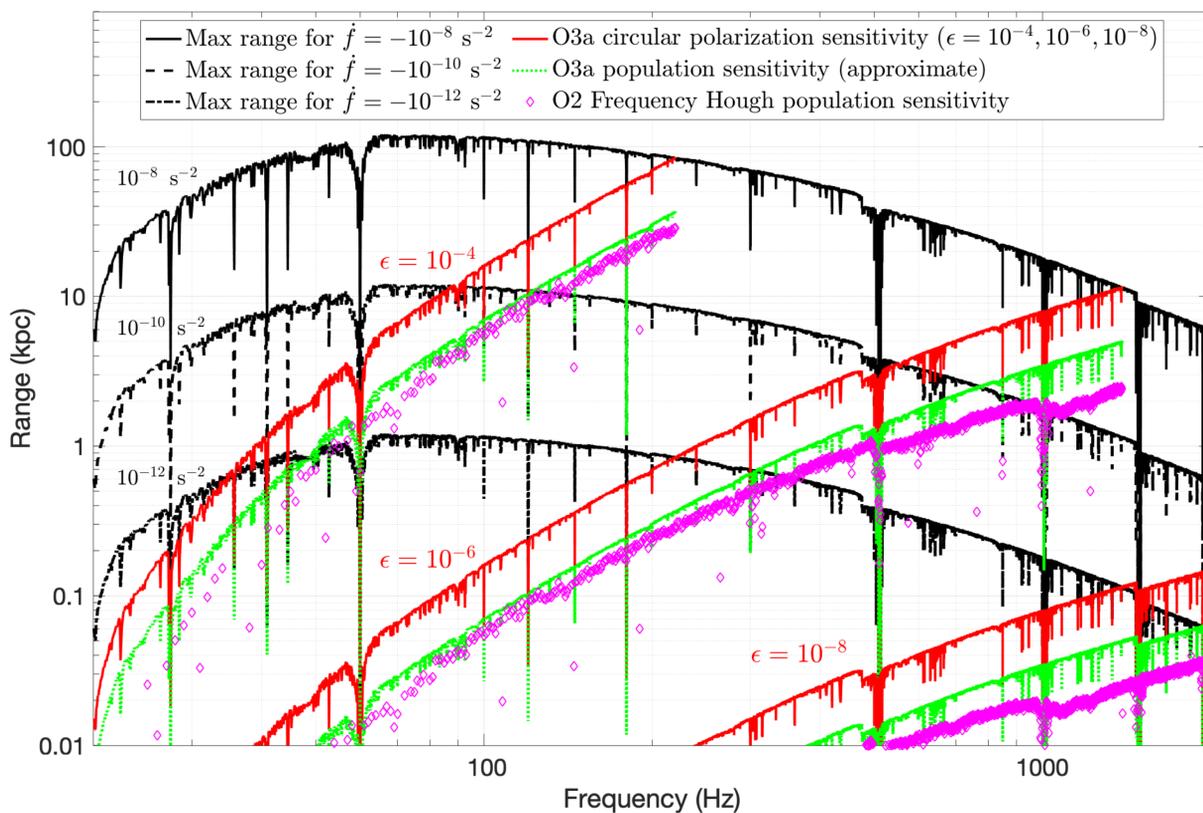


(C) Karl Wette CC BY-SA

**Figura 1:** Evoluzione a lungo termine della frequenza di un segnale di continuo di onda gravitazionale. In periodi brevi, il segnale di una stella di neutroni galattica apparirà quasi perfettamente costante sia in frequenza, sia in ampiezza. Però su tempi maggiori la frequenza cambia lentamente, per due ragioni. La prima ragione è che la stella di neutroni perde energia emettendo onde gravitazionali ed elettromagnetiche, e per questo ruota più lentamente. La seconda ragione è che il rivelatore qui sulla Terra si muove rispetto alla stella di neutroni, e questo modifica la frequenza delle onde gravitazionali osservate nel rivelatore. (Crediti: K. Wette)

Cosa significa questo in termini pratici? Il rigonfiamento di una stella di neutroni è caratterizzato dalla sua [ellitticità equatoriale](#). Questo è un numero che descrive la deviazione di una stella dalla simmetria rispetto l'asse di rotazione. Bisogna dire che ci si aspetta che una stella di neutroni in rapida rotazione non abbia una simmetria sferica, e che sia schiacciata ai poli a causa degli stessi effetti centrifughi che producono lo schiacciamento terrestre. Però l'[ellitticità polare](#) risultante non genera onde gravitazionali perché mentre la stella gira non c'è alcun cambiamento nei suoi effetti gravitazionali sullo spazio circostante. Non c'è alcuna "vorticosità" dello spazio come quella causata da un rigonfiamento che continua a girare. Non sappiamo precisamente quale possa essere il valore tipico di ellitticità equatoriale di una stella di neutroni. La teoria nucleare convenzionale ammette valori che possono arrivare a  $10^{-5}$ , corrispondenti a un rigonfiamento fino a 10 cm di altezza, ma anche rigonfiamenti significativi che potrebbero essere presenti su una stella di neutroni subito dopo la sua nascita da una supernova vengono assorbiti nel tempo e le ellitticità si riducono. In pratica ci aspettiamo che stelle di neutroni tipiche abbiano ellitticità molto più basse, ma non sappiamo di quanto.

Ci si potrebbe aspettare che sia facile rivelare un segnale continuo a frequenza fissa. La [Trasformata di Fourier Veloce](#) che viene largamente utilizzata nell'analisi dei segnali potrebbe venire applicata anche alla deformazione gravitazionale e rivelare un picco alla frequenza giusta. Ma ci sono delle complicazioni che rendono il compito più difficile di così. Anzitutto, poiché la rotazione della stella rallenta gradualmente, si deve compensare continuamente per tenere conto della diminuzione della frequenza, e poiché non si conosce in anticipo la velocità con cui avviene questo declino, si devono provare molte possibilità. Nella più recente indagine su tutto il cielo, sono state provate dozzine di valori della velocità del rallentamento ([spin-down](#)), facendo crescere il costo computazionale di questa ricerca.



**Figura 2:** Distanze (in kpc) raggiungibili dalla ricerca di stelle di neutroni il cui rallentamento è dovuto alla sola emissione di radiazione gravitazionale; la frequenza della radiazione gravitazionale (in Hz) è mostrata sull'asse orizzontale. Le tre curve nere (continua, tratteggiata, a punti e linee) che hanno un picco a 100 Hz rappresentano le distanze massime possibili facendo l'ipotesi che la massima velocità di rallentamento  $f$  della stella di neutroni (vale a dire lo spin-down massimo) sia rispettivamente per le tre curve  $10^{-8}$ ,  $10^{-10}$ ,  $10^{-12}$  al secondo quadrato. Gli altri tre insiemi di curve colorate corrispondono ai risultati migliori (rosso) e tipici (verdi) ottenuti qui con i dati di O3, mentre gli andamenti segnati dai diamanti color magenta mostrano i risultati tipici ottenuti da una ricerca precedente che utilizzava i dati del secondo periodo osservativo (O2): la differenza tra le curve mostra il miglioramento della sensibilità della ricerca attuale che potrebbe osservare stelle di neutroni con una data ellitticità a distanze maggiori.

E tuttavia, quello che alza molto il costo computazionale è l'effetto del moto della Terra, sia la sua rotazione diurna, sia il moto orbitale intorno al Sole. Si deve compensare esplicitamente lo spostamento Doppler della frequenza apparente del segnale di onda gravitazionale dovuto al moto della Terra relativamente alla stella che emette il segnale (in modo analogo a quanto accade allo [spostamento Doppler](#) del suono di una sirena su una vettura dei pompieri che ci passa vicino). Si veda [qui](#) per un'illustrazione degli effetti sulla frequenza. Sfortunatamente, la compensazione della modulazione Doppler rotazionale ed orbitale è diversa in ogni punto del cielo, e questo significa che si devono fare continuamente degli aggiustamenti quando si osserva nei diversi punti del cielo. Una complicazione aggiuntiva è che l'apparente variazione di ampiezza del segnale rispetto al tempo dipende dall'orientamento relativo dell'asse di rotazione della stella rispetto alla nostra linea di vista. La variazione dipende anche dall'orientamento dei rivelatori di onde gravitazionali sulla superficie della Terra (latitudine, longitudine e direzione dei bracci dell'interferometro) – e noi non conosciamo l'orientamento della stella!

Tener conto di tutte queste correzioni fa aumentare enormemente il costo computazionale rispetto a quello di una semplice trasformata di Fourier, nonostante i compromessi che si possono fare sulla sensibilità ottenibile segmentando i dati. Nella recente ricerca sono state utilizzate più di 15 milioni di ore di CPU in un periodo di circa un anno, utilizzando computer ospitati dal LIGO Laboratory e utilizzando altri computer disponibili a livello globale sulla [Open Science Grid](#).

Dopo avere setacciato i primi sei mesi di dati di O3 e avere identificato più di 140 000 candidati potenziali in frequenza, spin-down e posizione nel cielo, li abbiamo seguiti ancora più approfonditamente in molteplici stadi di analisi, compresa una ricerca finale relativa a un piccolo numero di candidati residui su tutti gli 11 mesi di durata di O3. Alla fine, nessuno di questi candidati ha superato la selezione: ciò significa che non è stata osservata alcuna onda gravitazionale continua, e quindi possiamo dare solo dei [limiti superiori](#) sull'intensità dei segnali.

Un modo per caratterizzare la sensibilità della ricerca consiste nel fornire la distanza (in kiloparsec) alla quale avremmo potuto osservare un segnale emesso da una stella di neutroni avente una certa ellitticità. La **Figura 2** mostra questa distanza in funzione della frequenza delle onde gravitazionali utilizzando i dati iniziali di O3. Stelle con ellitticità più grandi emettono onde gravitazionali più intense e quindi possono venire osservate a distanza più grande.

La sensibilità di quest'ultima ricerca è notevolmente migliore delle precedenti ricerche che hanno esplorato tutto il cielo in un intervallo confrontabile di frequenza e spin-down, specialmente alle frequenze più alte. Il miglioramento viene in gran parte dall'implementazione dello "[squeezing quantistico](#)" negli interferometri di LIGO, un'intelligente tecnica per aumentare la sensibilità senza cambiare l'intensità del laser. Ricerche aggiuntive verranno portate avanti con tutti i dati di O3, usando metodi complementari di ricerca, per scavare ancora più a fondo nel rumore, e ci si attende di avere guadagni ulteriori nei futuri periodi osservativi O4 e O5, in seguito ad altri miglioramenti dei rivelatori. Ci aspettiamo che le ricerche future si estendano ancora di più nella nostra galassia per tutti i valori di ellitticità, facendo aumentare costantemente le possibilità di una scoperta.

## PER SCOPRIRE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

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

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

Visitate i nostri siti web:

<http://www.ligo.org>

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



## GLOSSARIO

**Stella di neutroni:** Ciò che resta dopo che una stella di massa compresa tra 10 e 25 volte quella del Sole produce un'esplosione di supernova. Stelle di neutroni tipiche hanno masse comprese tra 1 e 2 masse solari ed un raggio di 10-15 km, e sono tra gli oggetti più compatti che sono stati scoperti.

**Deformazione:** Cambiamento relativo di lunghezza indotto dal passaggio di un'onda gravitazionale.

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

**Ellitticità equatoriale:** Una misura dell'allontanamento dalla forma sferica, definita come il rapporto tra la differenza dei momenti di inerzia nel piano equatoriale e il momento di inerzia nella direzione polare.

**Ellitticità polare:** Concetto simile all'ellitticità equatoriale, solo che in questo caso il piano di riferimento passa attraverso i poli.

**Spin-down:** Velocità di rallentamento di una stella di neutroni, dovuta all'emissione di energia sotto forma di onde elettromagnetiche o gravitazionali.

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

**Kiloparsec (kpc):** Mille parsec. Un [parsec](#) è un'unità di lunghezza che si usa in astronomia e che corrisponde a circa 3 anni luce o 30mila miliardi di km.

**Limite superiore:** Un'asserzione sul massimo valore che una qualche quantità può assumere mantenendo la compatibilità con i dati. Qui noi usiamo il concetto per mettere dei vincoli sulle deformazioni a diverse frequenze. Usiamo un limite con un grado di credibilità del 95%, vale a dire, con i dati che abbiamo a disposizione c'è una probabilità del 95% che la quantità stia al di sotto di questo limite.