# RICERCA GENERICA DI TRANSIENTI GRAVITAZIONALI DI LUNGA DURATA NEI PRIMI OTTO MESI DEL QUARTO PERIODO OSSERVATIVO DI LIGO-VIRGO-KAGRA

Tutti i segnali di onde gravitazionali (GW) osservati finora dagli osservatori della collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) provengono dalla coalescenza di sistemi binari di oggetti compatti, in cui coppie di stelle di neutroni o buchi neri si fondono dopo una lunga danza cosmica. Uno dei grandi successi della teoria della relatività generale di Einstein è quello di prevedere con precisione i segnali GW emessi in questi eventi cataclismici. Ma ci sono quasi certamente altre fonti di GW nell'Universo, non altrettanto ben comprese e ancora da rivelare. Alcune delle fonti più promettenti emettono segnali transienti la cui forma non è nota con precisione.

In questo articolo presentiamo una ricerca di segnali transienti che abbiamo realizzato durante la prima parte del più recente periodo osservativo di LVK, O4a, che si è svolto da maggio 2023 a gennaio 2024. In particolare, si tratta di una ricerca di transienti di lunga durata, approssimativamente nell'intervallo 1-1000 secondi. Anche se non sappiamo esattamente quali sorgenti possano emettere questi segnali, pensiamo che possano essere emessi da deformazioni non sferiche in stelle di neutroni appena nate, da dischi di accrescimento instabili attorno a buchi neri, o da stelle di neutroni o sistemi binari di buchi neri in orbite altamente eccentriche (cioè non circolari). In particolare, questi tipi di transienti potrebbero darci un'idea di ciò che accade dopo una fusione di stelle di neutroni come la spettacolare GW170817: se ciò che resta è una stella di neutroni molto massiccia o un buco nero.

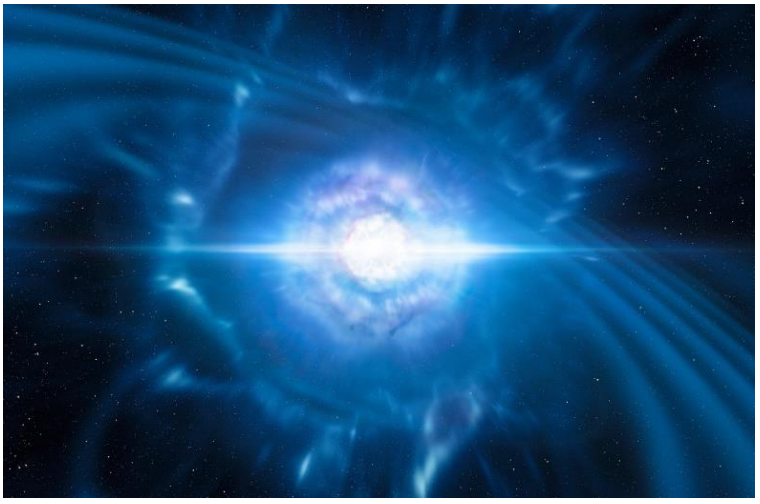

**Figura 1**: Rappresentazione artistica di una stella di neutroni ipermassiccia formatasi all'indomani di una fusione di stelle di neutroni. Questi oggetti esotici hanno una massa che supera il massimo valore teorico previsto per le stelle di neutroni ma sono instabili e alla fine un veloce collasso gravitazionale le trasforma in buchi neri. Queste stelle di neutroni sono possibili sorgenti di transienti gravitazionali di lunga durata. Crediti: ESO/L. Calçada/M. Kornmesser

La ricerca è stata eseguita utilizzando due algoritmi indipendenti, prendendo in esame circa 120 giorni di dati in cui entrambi i rivelatori LIGO Livingston e LIGO Hanford stavano raccogliendo dati di alta qualità – cruciali per distinguere i segnali astrofisici, che dovrebbero essere presenti in entrambi i rivelatori, dal rumore che potrebbe apparire solo in uno. Uno degli algoritmi di ricerca, coherent WaveBurst (cWB), è stato aggiornato per essere più sensibile a questi particolari tipi di segnali rispetto alla ricerca realizzata nel precedente periodo osservativo (O3). Questo miglioramento include l'uso di XGBoost, un metodo di apprendimento automatico basato su un albero decisionale altamente efficiente, che funge da classificatore per distinguere i segnali dal rumore, aumentando così la sensibilità di ricerca.

## PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Questa è la prima volta che l'apprendimento automatico viene utilizzato in una ricerca LVK. L'altro algoritmo, PySTAMPAS, sta eseguendo per la prima volta una ricerca in tutto il cielo.

Dopo aver rimosso i candidati corrispondenti alle fusioni di buchi neri noti, non sono stati trovati nuovi eventi astrofisici. I candidati più significativi trovati da cWB e PySTAMPAS hanno avuto una frequenza di falsi allarmi rispettivamente di 1 ogni 8 mesi e 1 ogni 6 mesi, entrambi compatibili con il rumore di fondo.

Nonostante questa assenza di osservazioni, la nostra ricerca ci permette comunque di dedurre interessanti informazioni astrofisiche. Utilizzando segnali campione che rappresentano particolari classi di sorgenti, possiamo quantificare la sensibilità di ogni ricerca e trovare con quale frequenza ciascuna classe di segnali potrebbe aver luogo nell'Universo. In effetti, il fatto che non abbiamo osservato nulla significa che questi transienti di lunga durata potrebbero essere più rari o più deboli di un certo "limite superiore". La Figura 2 mostra questi limiti superiori per l'ampiezza delle onde gravitazionali prodotte, indicati in nero, rispetto ai migliori limiti ottenuti durante O3, mostrati in grigio. Per la maggior parte delle classi di segnale, questi limiti sono circa 1,2 – 2 volte più rigorosi, grazie alla migliore sensibilità del rivelatore e agli algoritmi di ricerca più avanzati. Le future ricerche nei rimanenti dati di O4 (che dovrebbe continuare fino alla fine del 2025) avranno una sensibilità ancora migliore, rendendo possibili limiti più stretti e facendoci fare un ulteriore passo avanti nel percorso verso la possibilità di nuove scoperte rivoluzionarie.

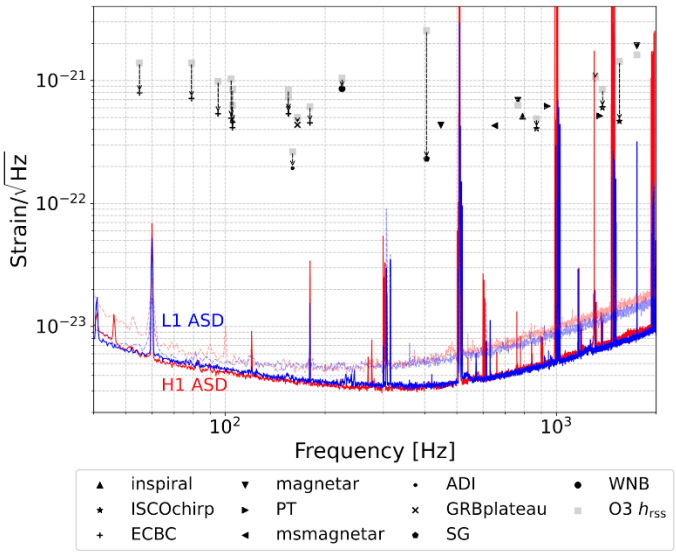


**Figura 2:** I limiti superiori per l'ampiezza dell'onda gravitazionale rispetto alla sensibilità del rivelatore LIGO (blu e rosso), per vari tipi di segnali transienti di lunga durata. Sull'asse verticale è mostrata 'ampiezza ("la deformazione gravitazionale") e sull'asse orizzontale la frequenza dell'onda gravitazionale. Ogni simbolo nero rappresenta il limite superiore di ampiezza ottenuto con i dati di O4a per un dato tipo di segnale transiente, rispetto alla sua controparte di O3 in grigio. La maggior parte dei limiti è migliorata di un fattore di 1,2 – 2. Ad esempio, la "magnetar" (freccia verso il basso) e la "msmagnetar" (millisecondo, freccia sinistra) rappresentano segnali che derivano da due diversi tipi di magnetar, mentre "ECBC" (coalescenza di un sistema binario compatto eccentrico, simbolo +) si riferisce a binarie in orbite eccentriche. Altri tipi includono "inspiral" (fusioni di sistemi binari di stelle di neutroni), "ISCOchirp" (onde gravitazionali provenienti dalle orbite circolari stabili più interne attorno a buchi neri in rotazione), "PT" (accrescimento su stelle di neutroni), "ADI" (instabilità del disco di accrescimento), "GRBplateau" (magnetar di nuova formazione che alimentano estese ripetizioni di lampi di raggi gamma), "SG" (forme d'onda sinusoidali-gaussiane) e "WNB" (transienti di rumore bianco).

## GLOSSARIO

**Coalescenza di sistemi binari di oggetti compatti** – comunemente abbreviata con CBC, si riferisce al graduale avvicinamento seguito dalla fusione finale di due buchi neri, due stelle di neutroni o un buco nero e una stella di neutroni. L'intero processo produce onde gravitazionali che aumentano di frequenza e ampiezza man mano che i due oggetti si avvicinano l'uno all'altro e accelerano. L'oggetto risultante dalla fusione può essere una stella di neutroni o un buco nero, a seconda del sistema iniziale. Gli oggetti che formano il sistema binario sono chiamati "componenti", il componente principale è definito come quello che ha la massa maggiore.

**Relatività generale** – La teoria della gravità proposta da Albert Einstein nel 1915. In questa teoria, lo spazio e il tempo sono come un tessuto malleabile che si deforma in presenza di materia ed energia, e gli oggetti seguono traiettorie attraverso questo spazio curvo.

**Ricerca di transienti** – Una ricerca basata sulla presenza di un eccesso di energia osservato contemporaneamente in più rivelatori di onde gravitazionali, senza ipotizzare un modello di forma d'onda specifico.

**Transiente** – Fenomeno astronomico su scale temporali brevi; in contrasto con molti eventi astrofisici che durano da migliaia a miliardi di anni.

**Periodo osservativo** – Un periodo di osservazione in cui i rivelatori di onde gravitazionali raccolgono dati.

**Frequenza di falsi allarme** – Questa frequenza viene utilizzata per quantificare la probabilità che un evento sia stato causato dal rumore. Viene calcolata simulando eventi provenienti dal rumore e osservando la loro intensità, per ottenere una distribuzione del numero atteso di tali eventi in funzione dell'intensità del segnale. In termini più concreti, se un evento ha una frequenza di falso allarme di 1 al giorno, significa che ci aspettiamo che il rumore del nostro rilevatore produca un tale evento circa una volta al giorno. In tal caso sarebbe difficile credere che si tratti di un vero evento astrofisico.

**Limite superiore** – Indica il valore massimo che una certa quantità può assumere pur essendo coerente con una mancata osservazione. I nostri limiti sono definiti con una credibilità del 95%, ovvero c'è una probabilità del 95% che la quantità in gioco sia inferiore a questo limite.

## PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

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

Leggete qui un preprint gratuito dell'articolo scientifico completo.



Traduzione italiana di Edoardo Milotti e Agata Trovato (dall'originale inglese https://ligo.org/science-summaries/O4aBurstLong/)