

# ALLA SCOPERTA DI SORGENTI DI ONDE GRAVITAZIONALI DI BREVE DURATA NEL BUIO COSMICO

## INTRODUZIONE

La quarta campagna di osservazione (O4) dei rivelatori Advanced LIGO, Advanced Virgo e KAGRA (collaborazione LVK) è iniziata a maggio 2023 e il primo periodo osservativo (O4a) si è concluso a gennaio 2024. Durante questo periodo, sono stati rilevati numerosi segnali di onde gravitazionali (*Gravitational Waves*, GW) compatibili con la caratteristica impronta delle [coalescenze di sistemi binari di oggetti compatti](#) (*Compact Binary Coalescence*, CBC). Tuttavia, queste fusioni binarie non rappresentano le uniche possibili sorgenti di GW. In questo studio ci concentriamo sulla ricerca di [transienti](#) gravitazionali di breve durata (meno di un secondo), noti come *“burst”*. Le possibili sorgenti di questi segnali, non ancora osservati direttamente, includono [supernovae](#), [glitch di pulsar](#) e anche fenomeni imprevisi o ancora sconosciuti. La rivelazione, per la prima volta, di un'onda gravitazionale proveniente da una di queste sorgenti rappresenterebbe un risultato di grande rilievo scientifico.

## RICERCHE NON MODELLATE

Per i segnali CBC, disponiamo di modelli ben consolidati che descrivono la forma attesa delle GW, il che rende molto più semplice la loro ricerca nei dati. Al contrario, per molte delle possibili sorgenti di segnali transienti di breve durata, come le supernovae, è molto più difficile modellare con precisione il segnale gravitazionale. Poiché non sappiamo esattamente cosa cercare, ricorriamo a tecniche di ricerca “non modellate”, che si basano su ipotesi minime sulla forma delle GW. Queste ricerche si fondano sull'individuazione di un eccesso di potenza nei dati provenienti da più rivelatori, entro una stretta finestra temporale di coincidenza. In presenza di un vero segnale astrofisico, ci si aspetta, infatti, che esso appaia in tutti i rivelatori coinvolti. In questo studio sono state utilizzate tre diverse ricerche, tutte basate su varianti dell'algorithm coerent WaveBurst (cWB). Dall'ultimo periodo osservativo (O3), queste tecniche sono state migliorate grazie all'integrazione di metodi di machine learning, che aiutano a distinguere tra segnali astrofisici e rumore strumentale.

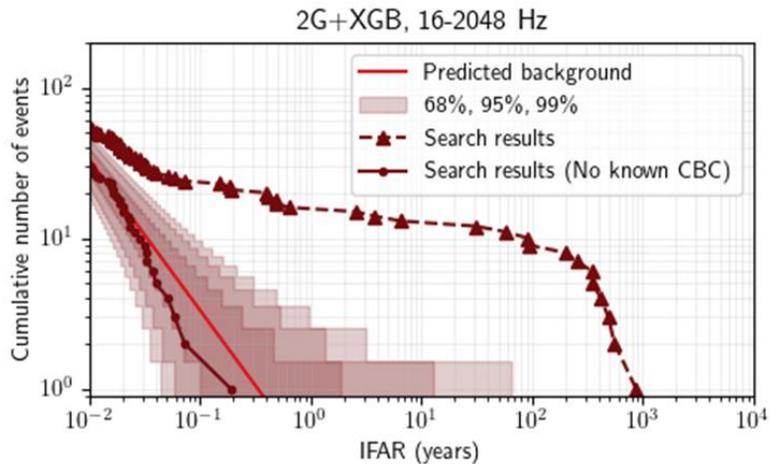
## RISULTATI

La **Figura 1** mostra i risultati della ricerca. Per cercare segnali di tipo *burst*, si rimuovono innanzitutto i candidati già individuati dalle

ricerche dedicate della collaborazione LVK ai segnali GW imputabili a CBC. Successivamente, si confronta la distribuzione dei candidati rimanenti con quella attesa in presenza del solo rumore strumentale: uno scostamento significativo indicherebbe una probabile rivelazione di un *burst*. Nessun candidato di GW di breve durata è stato rivelato. Tuttavia, anche in assenza di una rivelazione, è possibile caratterizzare la sensibilità della ricerca analizzando segnali simulati. Stimare la sensibilità di una ricerca è utile per comprendere le proprietà delle sorgenti che ci aspettiamo di poter rivelare. Per esempio, possiamo escludere alcune teorie sulla natura delle GW emesse da supernovae, aggiungendo segnali GW simulati da supernovae ai dati dei rivelatori e studiando in quali condizioni le ricerche con cWB riescono a trovarli. Se un determinato modello teorico prevede GW che dovrebbero essere rivelabili con l'attuale sensibilità, la mancata osservazione nei dati di O4a suggerisce che quel modello è improbabile.

La **Figura 2** mostra le distanze fino alle quali le ricerche si attendono di poter rivelare segnali GW da diversi modelli di supernova.

La **Figura 3** indica l'ampiezza di un glitch in una pulsar necessaria affinché le nostre ricerche riescano a rivelare il 50% dei segnali potenziali, usando come riferimento la pulsar Vela.



**Figura 1** (Figura 3 dell'articolo): Risultati della ricerca ottenuti con una delle varianti dell'algorithm cWB. Il grafico mostra il numero cumulativo di candidati di GW rivelati dalla ricerca in funzione dell'*Inverse False Alarm Rate* (IFAR), una misura della frequenza con cui un candidato di GW viene generato casualmente da un eccesso di rumore. Un valore più alto di IFAR indica una minore probabilità che l'evento sia dovuto al rumore. Due insiemi di simboli collegati da linee rappresentano il numero totale di eventi rivelati dalla ricerca (triangoli) e il numero di eventi rimasti dopo aver escluso tutte le sorgenti CBC note dai dati (cerchi). La linea rossa continua rappresenta la mediana del numero di eventi attesi come effetto del solo rumore nei dati, mentre la fascia ombreggiata intorno indica l'incertezza statistica su questa stima. La somiglianza tra il numero di eventi previsti dal rumore (linea rossa continua con fascia di incertezza rappresentata dall'ombreggiatura) e quello osservato una volta rimossi i segnali CBC (linea marrone continua) suggerisce che questa ricerca non ha rivelato nuovi *burst* di GW. Se fosse stato rivelato un segnale GW non già identificato dalle ricerche CBC, esso sarebbe apparso nel grafico come un simbolo marrone circolare situato a destra della zona di incertezza.

## SCOPRI DI PIÙ:

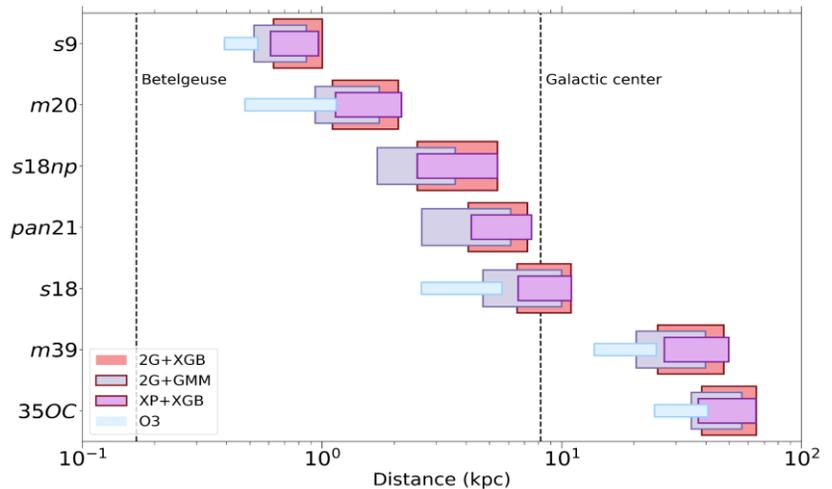
Visita i nostri siti web: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu), [gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



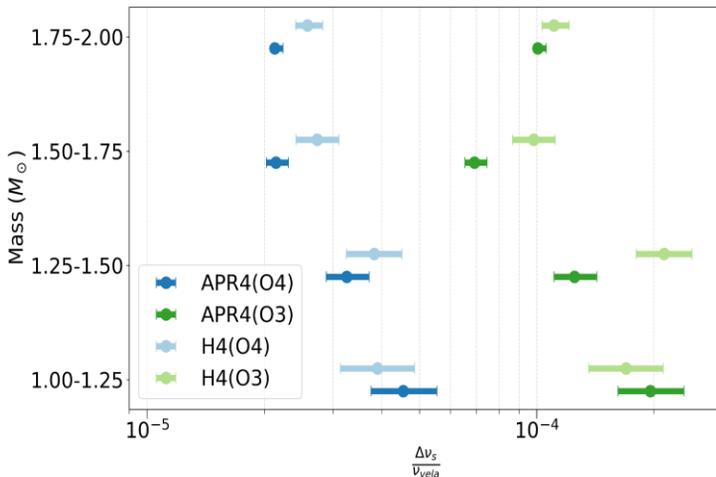
Le Figure 2 e 3 illustrano i miglioramenti nella sensibilità rispetto alla stessa analisi condotta durante O3. Le ricerche sono ora in grado di rivelare segnali da supernovae, così come una varietà di *burst* di GW (si veda ad esempio la Tabella II nell'articolo), a distanze maggiori che in passato. Questi miglioramenti in sensibilità sono il risultato di importanti aggiornamenti ai rivelatori e di perfezionamenti negli algoritmi di analisi.

## CONCLUSIONI

Finora, la collaborazione LVK ha rivelato numerosi segnali GW da CBC. Perché, allora, le onde gravitazionali generate da sorgenti di tipo *burst* restano così elusive? Una prima ragione è che la luminosità delle GW, cioè l'intensità delle onde emesse, nei CBC è molto più elevata rispetto a quella prodotta da glitch di pulsar o da supernovae. L'assenza di *burst* di breve durata tra gli eventi rivelati suggerisce che queste sorgenti siano estremamente rare, troppo lontane per essere rivelate con la sensibilità attuale, oppure entrambe le cose. Tuttavia, non possiamo sapere quali potenziali sorgenti di GW l'universo nasconda. Proprio per questo, continuiamo a esplorare il buio cosmico.



**Figura 2** (Figura 5 dell'articolo): Distanze delle sorgenti dalla Terra a cui le nostre ricerche sono in grado di rivelare diverse forme d'onda associate a supernovae. Betelgeuse (una stella vicina che potrebbe esplodere in supernova in tempi astronomicamente brevi) e il centro della Via Lattea (una regione con un'elevata frequenza di supernovae) sono indicati con linee tratteggiate come riferimento. Il lato sinistro e destro di ciascun rettangolo rappresentano le distanze (in migliaia di parsec, indicate come kpc) alla quale riveliamo, rispettivamente, il 10% e il 50% dei segnali simulati aggiunti ai dati. Nell'asse verticale vengono indicate le diverse forme d'onda considerate per le supernovae; per maggiori dettagli sui modelli si rimanda all'articolo scientifico. Il rettangolo azzurro mostra la sensibilità ottenuta durante il precedente periodo osservativo O3, mettendo in evidenza un netto miglioramento in termini di distanza a cui le nostre ricerche riuscirebbero a rivelare GW prodotte da una supernova, qualora dovesse verificarsi. Gli altri rettangoli si riferiscono alle diverse varianti dell'algoritmo cWB applicato ai dati di O4a.



**Figura 3** (Figura 6 dell'articolo): Questo grafico mostra nell'asse orizzontale quanto deve essere intenso un glitch in una pulsar affinché le nostre ricerche riescano a rivelare il 50% dei segnali potenziali. Si assume che la pulsar sia simile alla Vela, cioè si considera una distanza fissa di 900 anni luce e una frequenza di rotazione (intorno all'asse della stella di neutroni) di circa 11 giri al secondo. L'errore sull'asse orizzontale di ciascun punto rappresenta la variazione dei glitch in funzione dei diversi intervalli di massa possibili per la stella di neutroni, come indicato sull'asse verticale. Sono considerate due equazioni di stato estreme (indicate con APR4 e H4). In verde è mostrata la sensibilità ottenuta con i dati di O4, mentre in blu quella risultante dalla stessa analisi condotta durante O3. Durante O4, possiamo rivelare glitch di dimensioni più piccole rispetto a O3, il che indica che l'analisi condotta in O4 è più sensibile.

## PER SAPERNE DI PIÙ:

Visita i nostri siti web:

- [www.ligo.org](http://www.ligo.org)
- [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)
- [gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)

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

## 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.

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

**Ricerca di Burst** – 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.

**Supernova** – Un'esplosione violenta, che si manifesta spesso come un oggetto luminoso che appare improvvisamente nel cielo per poi affievolirsi nel tempo. Una supernova può brillare più intensamente del resto della sua galassia. Esistono diversi tipi di supernovae: alcune derivano dal collasso di stelle molto massive, altre possono essere causate dalla collisione tra due nane bianche.

**Glitch di pulsar** – Una pulsar è una stella di neutroni osservata attraverso impulsi di radiazione elettromagnetica (solitamente nella banda radio). Non tutte le stelle di neutroni sono visibili come pulsar: alcune non emettono radiazione elettromagnetica nella direzione della Terra, altre potrebbero non emetterne affatto. Alcune stelle di neutroni mostrano dei rapidi aumenti della loro frequenza di rotazione, detti glitch, osservati grazie a misure elettromagnetiche degli impulsi emessi. I due meccanismi più studiati in letteratura per spiegare questi glitch sono i quake stellari (fratture nella crosta della stella) e le interazioni tra il superfluido interno e la crosta.

**Coherent WaveBurst (cWB)** – L'algoritmo cWB è un metodo per rilevare segnali di onde gravitazionali senza basarsi su modelli delle forme d'onda attese. L'algoritmo funziona confrontando i segnali misurati da più rivelatori, per verificare se un evento si distingue in modo coerente dal rumore di fondo.

**Vela pulsar** – Una pulsar situata nella costellazione delle Vela, residuo di un'esplosione di supernova.