

# GWTC-4.0: AGGIORNAMENTO DEL CATALOGO CON LE OSSERVAZIONI DELLA PRIMA PARTE DEL QUARTO PERIODO OSSERVATIVO DI LIGO-VIRGO-KAGRA

Nell'agosto 2025, la Collaborazione [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) ha pubblicato i dati ottenuti nella prima parte del quarto periodo osservativo (O4a) che si è svolto da maggio 2023 a gennaio 2024. In questi dati, abbiamo scoperto 128 nuovi segnali di [Onde Gravitazionali](#) (GW) statisticamente significativi, provenienti da fusioni di [buchi neri](#) e [stelle di neutroni](#). Oltre a rendere pubblici i dati, pubblichiamo la versione 4.0 del Gravitational Wave Transient Catalog (Catalogo di Onde Gravitazionali Transienti, GWTC-4.0) che contiene la lista dei segnali candidati e delle loro proprietà. Stiamo anche pubblicando una serie di articoli che accompagnano il catalogo. Questi articoli sono stati inviati al giornale scientifico *Astrophysical Journal Letters* per essere pubblicati in un numero speciale del giornale. Qui, riassumiamo i primi tre articoli che si concentrano sui metodi e sui risultati del catalogo GWTC-4.0 stesso.

## INTRODUZIONE

L'articolo, "GWTC-4.0: Un'introduzione alla versione 4.0 del Catalogo di Onde Gravitazionali Transienti", fornisce una panoramica del numero speciale del giornale, assieme ai dettagli degli altri articoli e informazioni importanti per aiutare un lettore a comprendere la nomenclatura del campo.

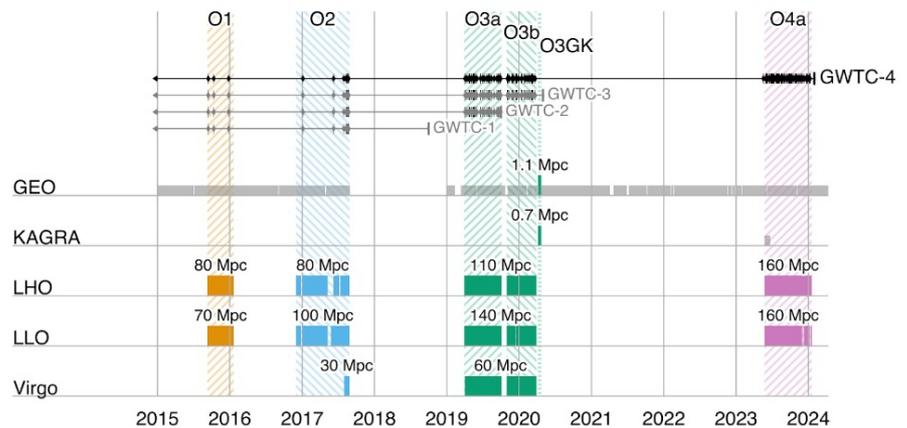
### Cosa significa il nome?

Diamo un nome alle nostre onde gravitazionali usando la data e l'ora in cui le osserviamo, in [Tempo Coordinato Universale](#) (UTC). Cronologicamente, primo nuovo evento nel nostro catalogo, indicato con GW230518\_125908, è stato osservato il 18 maggio 2023 alle 12:59:08 UTC. Aggiungiamo il prefisso GW a tutti i segnali candidati che osserviamo (ciò è leggermente diverso da quello che abbiamo fatto in passato, poiché i segnali che pensiamo siano stati probabilmente causati da effetti terrestri sono ora inclusi anch'essi nel catalogo, ma con dati aggiuntivi che spiegano perché pensiamo che potrebbero non essere vere onde gravitazionali).

### Cataloghi cumulativi

Il catalogo GWTC è cumulativo: in altre parole GWTC-4.0 contiene non solo i nuovi risultati osservati in O4a ma anche tutti i cataloghi passati. Per illustrare ciò, nella Figura 1 mostriamo una cronologia di tutti i periodi osservativi (bande colorate) e l'intervallo di dati di ciascun catalogo. Si nota che i nostri cataloghi seguono una convenzione di denominazione GWTC- $\langle$ maggiore $\rangle$ . $\langle$ minore $\rangle$ , dove il numero maggiore viene incrementato all'aumentare dell'intervallo di presa dati e il numero minore aumenta se c'è un cambiamento nei metodi/dati che descrivono i segnali (ad esempio, una nuova analisi dei dati come è accaduto con [GWTC-2.1](#)). In passato, abbiamo regolarmente omesso il numero minore quando era 0 (vedi, ad esempio, [GWTC-3](#)). Tuttavia, abbiamo notato che questo può creare un po' di confusione: ad esempio, GWTC-2 si riferisce a GWTC-2.0 o GWTC-2.1? Pertanto, da ora in avanti includeremo sempre il numero minore quando ci riferiamo a un catalogo specifico. Tuttavia, omettiamo ancora il numero minore quando ci riferiamo solo all'intervallo di presa dati (come mostrato nella Figura 1).

Dalla Figura 1 si vede anche che solo i due rivelatori LIGO erano online durante O4a: tutti i segnali candidati e le misurazioni sono state effettuate unicamente sui dati di questi due rivelatori. KAGRA ha raccolto brevemente i dati durante l'inizio del periodo osservativo, ma la sensibilità era insufficiente per contribuire al catalogo.



**Figura 1:** Una cronologia dei periodi osservativi che mostra quando gli osservatori di onde gravitazionali [GEO](#), [KAGRA](#), [LIGO-Hanford](#) (LHO), [LIGO-Livingston](#) (LLO) e [Virgo](#) hanno preso dati. I numeri sopra i blocchi colorati corrispondono approssimativamente alla distanza massima a cui il rivelatore può vedere una fusione di stelle di neutroni binarie standard, fornendo così una misura della sensibilità di ciascun rivelatore. Nella parte superiore, i tratti verticali mostrano quando gli eventi sono stati aggiunti al GWTC e le linee orizzontali mostrano l'intervallo temporale coperto da ciascun catalogo.

## PER SAPERNE DI PIÙ:

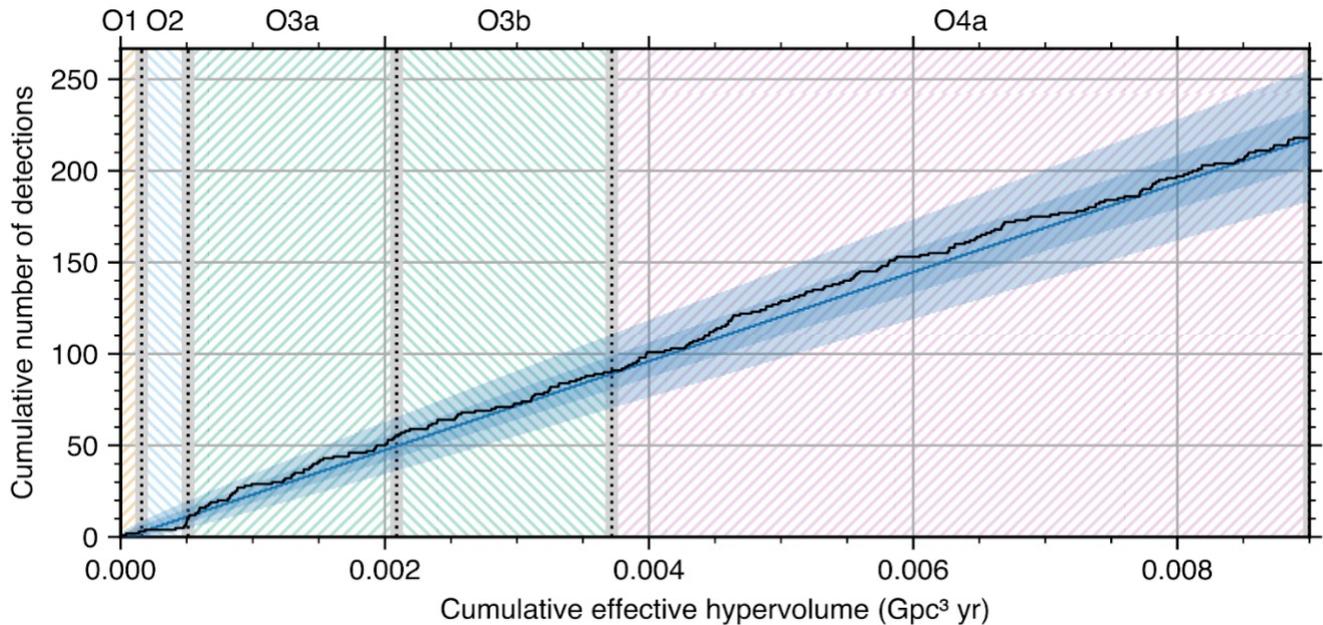
Visitate i [www.ligo.org](http://www.ligo.org)  
 nostri siti [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)  
 web: [gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



All'interno del documento introduttivo, forniamo per la prima volta una descrizione dettagliata dell'evoluzione dei singoli rivelatori. Raccogliendo queste informazioni in un unico luogo, speriamo di migliorare il collegamento tra la comunità astronomica che analizza le osservazioni con la comunità degli scienziati che costruiscono i rivelatori.

### **Sbirciando nel buio**

Possiamo calcolare il volume quadridimensionale sia nel tempo che nello spazio che i rivelatori hanno osservato (lo chiamiamo "ipervolume" perché è un volume in più di tre dimensioni) simulando i segnali e vedendo se vengono identificati e quindi combinando queste informazioni con i dettagli sull'effettivo tempo di osservazione (il [duty cycle](#)) dei rivelatori. Nella Figura 2, mostriamo un'approssimazione di questo ipervolume rispetto al numero totale di eventi candidati aventi una probabilità di origine astrofisica superiore al 50%. Questo mostra quanti segnali sono stati rivelati in ogni periodo osservativo e mostra che in O4a abbiamo più che raddoppiato il numero di segnali osservati! Le bande nella figura rappresentano l'incertezza statistica: molti eventi candidati hanno una probabilità di avere una reale origine astrofisica molto vicina al 100%, mentre quelli con una probabilità del 50% hanno la stessa probabilità di essere un evento reale oppure una fluttuazione spuria del [rumore](#). Le bande indicano l'incertezza teorica attesa del numero di eventi osservati.



**Figura 2:** Il numero totale di osservazioni (candidati trovati con una probabilità di essere veri eventi astrofisici superiore al 50%) rispetto all'ipervolume spazio-temporale totale esplorato dai nostri rivelatori.

Nel resto dell'articolo, forniamo una rassegna delle sorgenti di [onde gravitazionali transienti](#) osservate prima di terminare con un riassunto. La rassegna non intende sostituire i molti eccellenti libri di testo nel campo, ma fornire una breve introduzione al linguaggio e alla matematica che usiamo per descrivere le nostre sorgenti in tutto il numero speciale del giornale. Questo ci assicura di essere coerenti nella nostra notazione e fornisce un unico punto di riferimento per le persone interessate al campo. Includiamo anche, come appendici, una tabella di acronimi e definizioni di glossario di uso frequente e una breve discussione che definisce le convenzioni per l'analisi dei dati.

Il documento introduttivo pone le basi per il resto del numero speciale del giornale. Sebbene non contenga risultati scientifici sostanziali, l'intenzione è quella di rimuovere le duplicazioni tra altri articoli, garantire che rimangano coerenti e fornire definizioni chiare per il campo.

## **METODI**

L'articolo sui metodi, "GWTC-4.0: Metodi per identificare e caratterizzare gli eventi transienti di onde gravitazionali", fornisce i dettagli della metodologia utilizzata per produrre GWTC-4.0. Partendo dallo sviluppo di modelli teorici di [forme d'onda](#) gravitazionali per la collisione di buchi neri e stelle di neutroni, si passa poi a discutere i [programmi di analisi dati](#) che producono le liste di eventi candidati. Di ogni candidato si verifica la qualità dei dati prima di passare alla [stima dei parametri](#), che permette di comprendere le proprietà della sorgente, e di realizzare un test di coerenza della forma d'onda misurata per convalidare le ipotesi di base.

### **Alzando il tiro: l'analisi più complicata di sempre**

Dalla fine dell'O3 e dalla pubblicazione di GWTC-3.0, ci siamo impegnati molto per migliorare ulteriormente le nostre analisi. Abbiamo introdotto nuovi modelli di forme d'onda che descrivono meglio la fisica delle nostre sorgenti e sono più veloci dal punto di vista computazionale. Non solo utilizziamo le forme d'onda più recenti in GWTC-4.0, ma per analizzare molti eventi ne utilizziamo ben quattro diverse, il doppio di quelle utilizzate per GWTC-3.0, permettendoci di tenere meglio conto delle imprecisioni nei modelli.

Abbiamo anche messo a punto i nostri algoritmi di ricerca, introducendo nuovi approcci per migliorare l'efficienza di rivelazione. Molti di questi miglioramenti hanno aumentato la complessità della costruzione del nostro catalogo e abbiamo continuato a sviluppare tecnologie innovative per automatizzare il più possibile l'analisi per consentirci di fare di più e assicurarci che i nostri risultati siano facili da riprodurre.

### Una prospettiva storica

Nell'articolo sui metodi, si potrebbe restare sorpresi di trovare descrizioni storiche di algoritmi utilizzati fin dal primo periodo osservativo. Facciamo così per rispettare la natura cumulativa del catalogo: se i vecchi dati non vengono rianalizzati con nuovi metodi, allora è importante quando si utilizzano i risultati di quei vecchi eventi che gli utenti comprendano i metodi che hanno prodotto i risultati (che possono essere molto diversi dai metodi eseguiti su nuovi dati). Pertanto, nel nostro documento sui metodi, forniamo una prospettiva storica e una descrizione delle nuove modifiche alla metodologia.

In sintesi, il documento sui metodi fornisce una panoramica del flusso di lavoro che utilizziamo, dimostrando come sfruttiamo le [analisi online/offline](#), gli studi preliminari e l'attenta verifica per garantire che i prodotti finali siano rigorosi e di altissimo livello.

## RISULTATI

### Più segnali, più varietà

Abbiamo trovato 128 nuovi candidati con una probabilità di essere astrofisici superiore al 50%. Questo porta il numero totale di candidati nel catalogo a 218 e ne raddoppia le dimensioni! Presentiamo un'analisi dettagliata di un sottoinsieme di 86 segnali. Questo numero così elevato di nuove rivelazioni è stato reso possibile dall'aumento della sensibilità dei rivelatori e dagli sviluppi nelle tecniche di analisi che utilizziamo per estrarre i segnali dal rumore.

È emozionante avere così tante nuove osservazioni, poiché questo nuovo insieme di dati contiene soprattutto fusioni di [sistemi di buchi neri binari](#), ma anche sistemi costituiti da buchi neri e stelle di neutroni, che sono diversi da qualsiasi cosa si sia mai vista prima.

### Da online a offline (e viceversa)

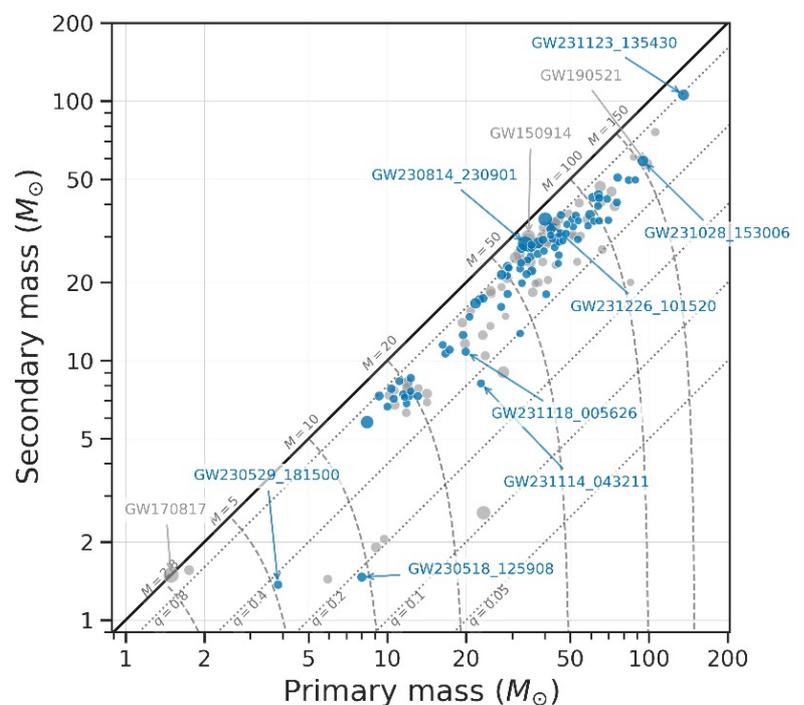
Durante O4 abbiamo annunciato il più velocemente possibile l'osservazione di probabili candidati. Ciò consente ad altri astronomi di eseguire osservazioni di follow-up per cercare segnali luminosi provenienti dalla direzione dei candidati. Ci sono stati 1697 annunci in O4a, di cui 82 sono stati ritenuti altamente probabili come veri segnali astrofisici e non hanno avuto problemi di qualità dei dati. Come detto in precedenza, il catalogo contiene 128 candidati altamente probabili: questi sono il risultato di analisi cosiddette "offline" che utilizzano metodi di ricerca migliorati. Tuttavia, di questi 128, solo 8 non sono stati trovati online! Ciò dimostra che le ricerche online funzionano bene e individuano la maggior parte dei candidati, assicurando così che gli astronomi ricevano informazioni altamente accurate su cui lavorare.

### Aspetti interessanti

Due segnali tra quelli nel catalogo sembrano essere stati prodotti da buchi neri che si fondono con stelle di neutroni. Segnali come questi sono molto interessanti perché, rispetto alle fusioni tra buchi neri, che coinvolgono poca o nessuna materia "reale", la presenza di materia dalla stella di neutroni può potenzialmente essere identificata nel segnale osservato. Per i due segnali in questione non siamo riusciti a rivelare nessuno di questi effetti, ma con l'aumento delle osservazioni di questo tipo molto probabilmente riusciremo a misurare gli effetti dovuti alla materia proveniente dalla stella di neutroni.

### Grandi masse

Il segnale ci permette di misurare direttamente la massa del sistema binario. Nella Figura 3, mostriamo i valori più probabili della massa delle due componenti: questo mostra che, anche se non abbiamo trovato nuovi sistemi di stelle di neutroni binarie (che dovrebbero stare nell'angolo in basso a sinistra), troviamo invece interessanti sistemi di buchi neri e stelle di neutroni ed eventi con masse totali superiori a 150 masse solari!



**Figura 3:** Il grafico massa-massa che mostra i nuovi candidati trovati in O4a (in blu) e i candidati da O1-O3 (in grigio). Si tratta di stime puntuali che ignorano l'incertezza di misura e riportano solo i valori più probabili. La dimensione del punto è proporzionale all'intensità del segnale (più esattamente al rapporto segnale-rumore in ampiezza). Le linee punteggiate indicano valori diversi del rapporto di massa,  $q$ , che è il rapporto tra la massa inferiore e quella superiore nel sistema dei due oggetti, mentre le linee tratteggiate denotano valori diversi della massa totale. Tutte le masse sono espresse in unità di masse solari.

(Credito: G. Ashton, Royal Holloway University of London.)

## Stelle in rotazione

Possiamo misurare due proprietà dei buchi neri o delle stelle di neutroni che fanno parte della fusione: la loro massa e il loro [spin](#). Per quel che riguarda lo spin, possiamo misurare la velocità con cui ciascuno degli oggetti astrofisici sta ruotando e l'orientamento relativo degli assi di rotazione. Calcoliamo un valore chiamato "[spin efficace](#)" per ogni segnale, che fornisce un'utile panoramica dello spin (una misura della velocità di rotazione) dei due componenti. Un grande spin efficace positivo implica che uno o entrambi i componenti stiano ruotando velocemente e che il loro asse sia all'incirca nella stessa direzione dell'asse orbitale; uno spin efficace negativo ci dice che gli assi di rotazione puntano in direzione opposta all'asse orbitale.

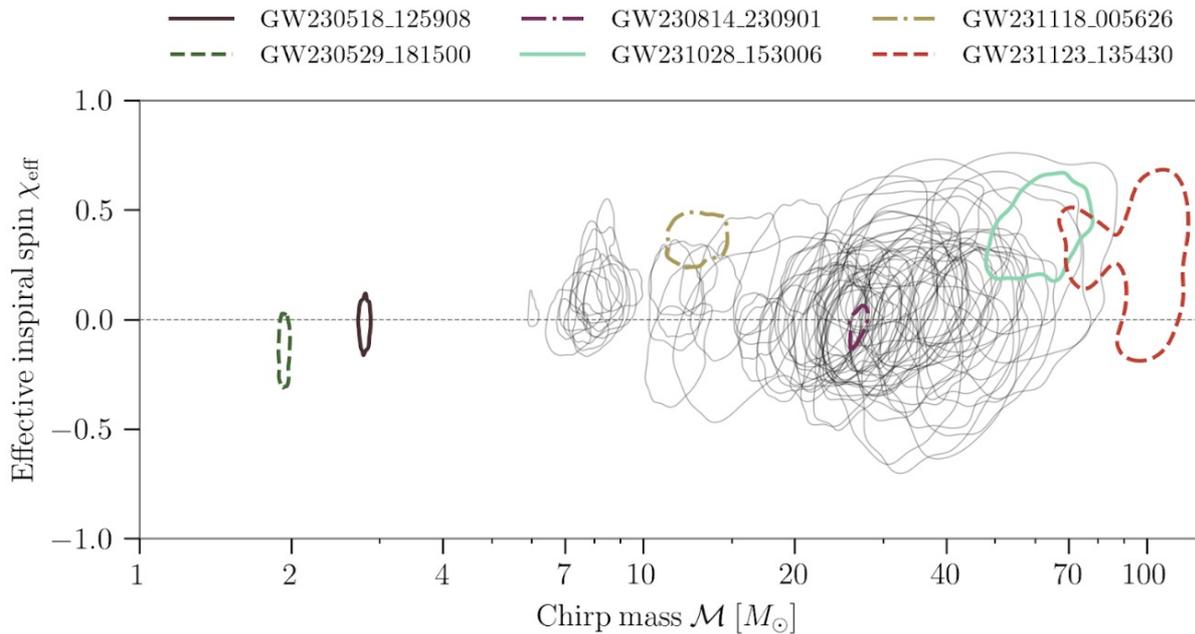


Figura 4: Un grafico della [massa di chirp](#) rispetto allo spin efficace per tutti i nuovi candidati in GWTC-4.0 con una selezione di candidati particolarmente interessanti evidenziati a colori. Ogni contorno racchiude la [regione di confidenza](#) del 90% per i parametri di quel candidato.

**GWTC-4.0 raddoppia il numero di segnali di onde gravitazionali conosciuti. Questo è un risultato fantastico e testimonia la rilevanza dei numerosi miglioramenti apportati ai rilevatori. I nuovi segnali ci forniscono molte nuove idee sui buchi neri e sulle stelle di neutroni e genereranno grande entusiasmo all'interno della comunità scientifica, consentendo una vasta gamma di nuovi studi.**

## PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate 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 un preprint gratuito degli articoli scientifici completi:

- Articolo introduttivo:  
a [questo link](#)  
oppure su [arxiv](#)
- Descrizione dei metodi:  
a [questo link](#)  
oppure su [arxiv](#)
- Articolo sui risultati:  
a [questo link](#)  
oppure su [arxiv](#)

I dati di GWTC-4.0 sono pubblicati dal Gravitational-Wave Open Science Centre su [questo link](#).

### GLOSSARIO

**Buco nero:** Una regione dello spazio-tempo con una gravità così intensa da impedire a qualsiasi cosa, compresa la luce, di sfuggire. I buchi neri sono di diverse dimensioni: i buchi neri di massa stellare hanno origine dal collasso stellare e le loro masse variano da poche masse solari a circa 65 masse solari. I buchi neri di massa intermedia hanno una massa compresa tra circa 100 masse solari e  $10^7$  masse solari. Infine, i buchi neri supermassicci vanno da più di  $10^5$  masse solari a più di  $10^9$  masse solari.

**Deformazione gravitazionale:** La variazione frazionaria della distanza tra due punti di riferimento dovuta alla deformazione dello spazio-tempo da parte di un'onda gravitazionale che lo attraversa. La deformazione tipica anche delle onde gravitazionali più intense che raggiungono la Terra è molto piccola, in genere inferiore a  $10^{-21}$ .

**Duty cycle:** Frazione di un periodo in cui un segnale o un sistema è attivo.

**Efficienza:** La frazione di segnali simulati rivelati, assumendo una direzione e un tempo di arrivo casuali. Espressa in funzione del tipo di forma d'onda e dell'intensità.

**Forma d'onda:** L'andamento dell'ampiezza di un segnale di onde gravitazionali in funzione del tempo.

**Livello di confidenza:** La frazione di tempo in cui si prevede che il valore reale sia contenuto all'interno dell'intervallo quotato.

**Massa di chirp:** Una combinazione matematica di masse per ogni oggetto compatto in un sistema binario. La massa di chirp determina l'evoluzione orbitale dell'ordine principale del sistema come risultato della perdita di energia dovuta all'emissione di onde gravitazionali.

**Onde gravitazionali:** Increspature nello spazio-tempo generate da alcuni dei processi più violenti dell'universo, come la fusione di stelle di neutroni o buchi neri.

**Programma di analisi (pipeline):** Programmi di calcolo costituiti da una catena di processi che preparano i dati per l'analisi, li filtrano e quindi calcolano varie quantità al fine di rifiutare il maggior numero possibile di eventi di rumore e stimare la significatività degli eventi astrofisici candidati.

**Ricerca offline:** Le analisi offline sono ricerche eseguite su dati di un periodo osservativo concluso, in genere durante le pause quando i rivelatori non sono in funzione per la manutenzione e gli aggiornamenti. Esse integrano le analisi in tempo reale (dette anche analisi online) che vengono effettuate durante i periodi osservativi.

**Rumore:** Fluttuazioni nel segnale di misura delle onde gravitazionali dovute a vari effetti strumentali e ambientali. La sensibilità di un rivelatore di onde gravitazionali è limitata dal rumore.

**Spin:** Momento angolare di un buco nero rotante; una delle proprietà che definiscono i buchi neri, insieme alla massa e alla carica.

**Stella di neutroni:** Il residuo di una stella di grande massa. Quando la stella ha esaurito il suo combustibile nucleare, essa muore in un modo catastrofico diventando una supernova. Questo evento può portare alla formazione di una stella di neutroni: un oggetto così massiccio e denso (anche se non tanto quanto un buco nero) che gli atomi non possono sostenere la loro struttura che osserviamo normalmente sulla Terra. Queste stelle sono massicce quanto il nostro sole, ma con un raggio di circa dieci chilometri.

**Stima di parametri:** Tecnica statistica utilizzata per dedurre i parametri astrofisici corrispondenti a un segnale di onde gravitazionali.