

GW230529: OSSERVAZIONE DELLA FUSIONE DI UN STELLA DI NEUTRONI E UN OGGETTO COMPATTO NON IDENTIFICATO

La prima rilevazione diretta di [onde gravitazionali](#) (GW) realizzata nel 2015 con l'osservazione di [GW150914](#), ha segnato l'alba di una nuova era per l'astronomia. Da allora, sono state osservate molte altre GW, provenienti da diversi tipi di sorgente. In tutti i casi si tratta di **coalescenze di sistemi binari compatti**, costituite da stelle di neutroni (NS) e/o buchi neri (BH). Qui descriviamo la [rivelazione di GW230529](#), la fusione di due oggetti compatti osservata il 29 maggio 2023, durante la prima parte del quarto periodo osservativo (O4a) dei rivelatori **LIGO-Virgo-KAGRA**, in cui una delle componenti ha una natura incerta visto che la sua massa è maggiore di quanto previsto per le NS e inferiore ai quella dei BH.

COME ABBIAMO OSSERVATO QUESTO EVENTO?

I dati di ogni rivelatore attivo vengono analizzati utilizzando la tecnica dei **filtri ottimali**. In questo metodo confrontiamo diversi tipi di segnali previsti con i dati in cui essi si potrebbero nascondere per individuare la previsione che meglio si adatta ai dati. Da ciò si ottiene una stima della potenza, o del rapporto segnale/rumore, in funzione del tempo. Se c'è davvero un segnale astrofisico nei dati del rivelatore, il rapporto segnale/rumore sarà alto, altrimenti sarà basso. Questa tecnica si è dimostrata efficace nell'identificare deboli segnali gravitazionali nei dati del rivelatore, ma non è infallibile. Varie fonti di rumore possono interferire con le nostre misurazioni o addirittura imitare i segnali gravitazionali.

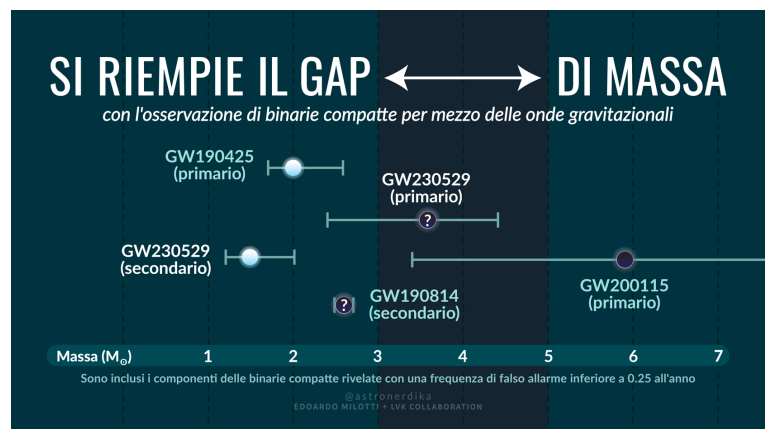


Figura 1: L'illustrazione mostra le masse degli oggetti componenti che si trovano all'interno o vicino alla regione da 3 a 5 masse solari, nota anche come "gap di massa inferiore", in alcuni eventi di onde gravitazionali. I cerchi azzurri rappresentano sorgenti che sono stelle di neutroni, i cerchi neri rappresentano sorgenti che sono buchi neri e i cerchi neri con punti interrogativi indicano che la sorgente è probabilmente un buco nero, ma c'è anche la possibilità che possa essere una stella di neutroni. La massa dell'oggetto più pesante di GW230529 si trova in questo gap di massa. (Credit: S. Galadage, Observatoire de la Côte d'Azur.)

COME FACCIAMO A SAPERE CHE GW230529 È UN EVENTO REALE?

La maggior parte delle volte cerchiamo segnali che siano coincidenti in tempo e che condividano le stesse caratteristiche della sorgente nei diversi rivelatori della nostra rete. Ma non ci limitiamo alla ricerca di eventi coincidenti. Abbiamo affinato le nostre tecniche di analisi in modo tale che basti un solo rivelatore per affermare con sicurezza la presenza di una rivelazione, ed è una fortuna che sia così, perché ciò ha permesso la rivelazione dell'evento eccezionale GW230529, quando gli unici dati utilizzabili provenivano da [LIGO-Livingston](#). Tre **pipeline di ricerca** indipendenti (o algoritmi di ricerca) hanno segnalato GW230529. Tutte usano la tecnica del filtro ottimale, ma la implementano in modo diverso e hanno sviluppato potenti strumenti per discriminare gli eventi astrofisici dal rumore di fondo. Siamo anche in grado di effettuare un controllo incrociato dei risultati delle pipeline.

Riteniamo estremamente improbabile che il rumore del rivelatore possa aver prodotto un segnale come GW230529. L'evento è stato osservato durante un'analisi in tempo reale dei dati del rivelatore e l'identificazione è stata confermata alla fine del periodo di osservazione. All'evento abbiamo associato una **frequenza di falso allarme** inferiore a uno ogni mille anni. Ciò significa che, in assenza di qualsiasi segnale di coalescenza binaria compatta nei dati del rivelatore, ci aspettiamo che segnale come questo si verifichi casualmente nel rumore meno di una volta ogni mille anni. La **Figura 2** mostra come questo evento si distingue dal resto dei candidati.

Visitate i nostri siti web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



PERCHÉ QUESTO EVENTO È INTERESSANTE?

Gli scienziati hanno proposto già da diversi anni l'esistenza di una regione compresa tra $3 M_{\odot}$ e $5 M_{\odot}$ – dove M_{\odot} indica la **massa solare** – in cui ci aspettiamo di trovare pochi oggetti compatti (regione indicata con il nome di **gap di massa inferiore**). Tuttavia, recenti [osservazioni di binarie compatte per mezzo di onde elettromagnetiche](#), così come altre realizzate con GW, hanno individuato oggetti che potrebbero avere una componente proprio in questa regione. Ad esempio, la massa dell'oggetto meno pesante in [GW190814](#) è stata stimata, con probabilità molto alta, tra $2,50 M_{\odot}$ e $2,67 M_{\odot}$ – superiore alla stella di neutroni più pesante conosciuta al momento dell'osservazione, ma inferiore alle masse previste per i buchi neri.

Con una massa stimata dell'oggetto più pesante di circa $3,6 M_{\odot}$, GW230529 è il primo sistema binario con la **componente primaria** nel gap di massa, come mostrato dalla **Figura 3**. Secondo le nostre conoscenze attuali sulle popolazioni di NS e BH, la massa primaria è compatibile con un BH di massa inferiore a $5 M_{\odot}$, con probabilità del 99%. Tuttavia, è stata stimata anche la probabilità che la componente primaria sia una NS, tenendo conto delle nostre attuali conoscenze teoriche e sperimentali della fisica nucleare, nonché delle popolazioni di sorgenti astrofisiche. La probabilità di essere una stella di neutroni è piccola ma diversa da zero, e con certe ipotesi può raggiungere qualche punto percentuale. Pertanto, non possiamo escludere con certezza questo scenario. D'altra parte, la componente secondaria di GW230529, la cui massa ha una probabilità del 90% di trovarsi tra $1,2 M_{\odot}$ e $2,0 M_{\odot}$, è quasi certamente una stella di neutroni.

Figura 3: Distribuzioni di probabilità delle masse che compongono diversi sistemi binari. I valori più probabili per la massa sono indicati dai picchi nelle funzioni di distribuzione di probabilità. Il grafico superiore è la distribuzione proiettata per la massa della componente primaria (l'oggetto più pesante nel sistema binario) e il grafico di destra è la distribuzione proiettata per la massa della componente secondaria (l'oggetto meno pesante). Vengono tracciate anche linee tratteggiate corrispondenti ad un rapporto di massa $q = m_2 / m_1$ fissato. GW170817 (rosa) e GW190425 (verde) erano compatibili con l'essere sistemi binari di stelle di neutroni.

GW200105_162426 e GW200115_042309 (rispettivamente in arancione e in azzurro) erano compatibili con l'essere sistemi costituiti da una stella di neutroni e un buco nero. La massa secondaria di GW190814 (rossa) può essere un buco nero o una stella di neutroni. Il gap di massa compreso tra 3 e $5 M_{\odot}$ corrisponde alla regione grigia. Vediamo che GW230529 (verde acqua) si trova proprio tra i due sistemi BNS e NSBH, con la sua massa primaria nella regione del gap di massa.

FIGURE TRATTE DALLA PUBBLICAZIONE

Per ulteriori informazioni su queste figure e su come sono state prodotte, si veda il [preprint](#) disponibile gratuitamente.

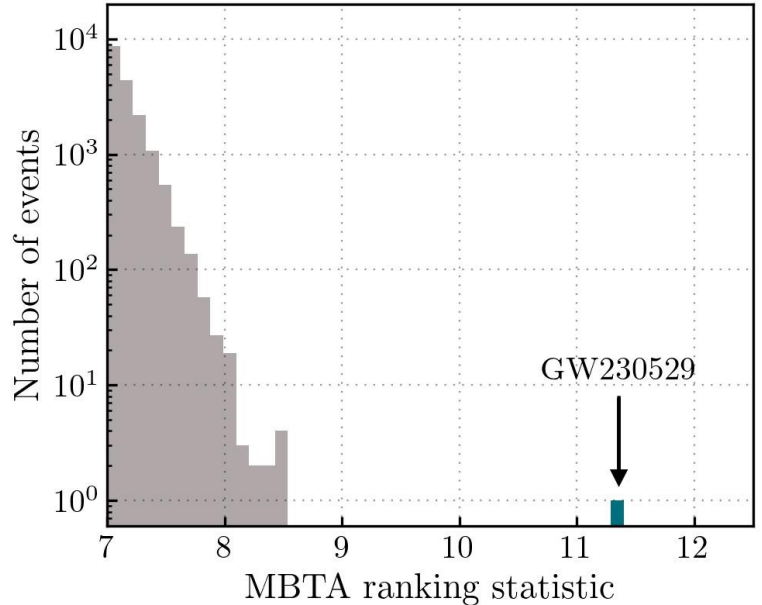
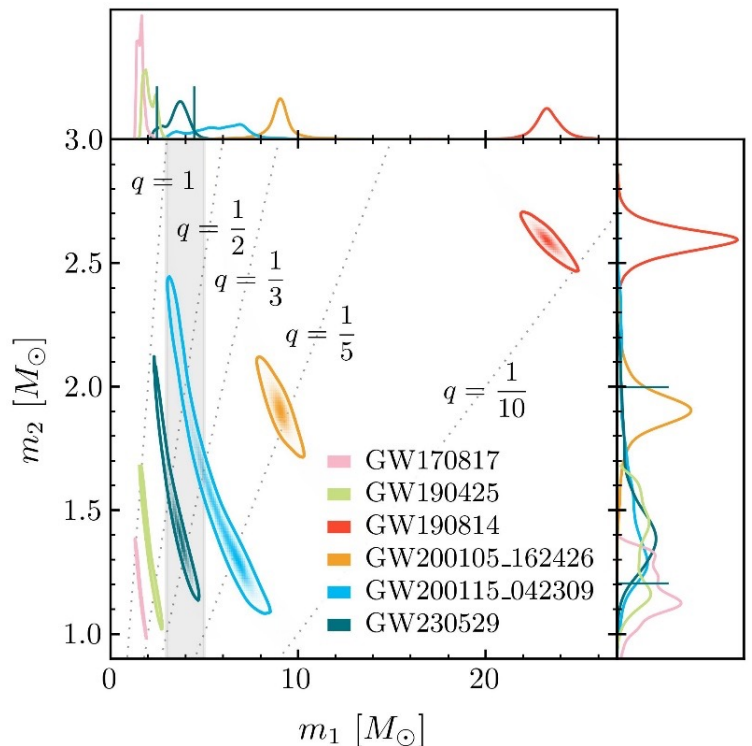


Figura 2: Classificazione statistica di una delle pipeline di ricerca (chiamata MBTA) per tutti gli eventi candidati in LIGO Livingston durante le prime due settimane del quarto periodo osservativo (O4a). L'asse orizzontale fornisce il valore dell'indicatore statistico che viene utilizzato per classificare i trigger della pipeline di ricerca e incorpora anche vari test per discriminare il rumore. Quanto più grande è il valore dell'indicatore, che viene ottenuto dal rapporto segnale/rumore, tanto più l'evento è significativo e coerente con un segnale astrofisico. La distribuzione grigia si riferisce agli eventi non abbastanza significativi da essere classificati come di origine astrofisica. La tacca blu indica la posizione di GW230529 in questo grafico. Vediamo che il valore dell'indicatore associato a GW230529 è molto più significativo di quelli del resto degli eventi, tutti con valori inferiori a 8,5, ad eccezione di GW230529 il cui indicatore statistico raggiunge 11,4.



COSA CI INSEGNA QUESTO EVENTO?

Le fusioni NS-BH sono eventi rari. Perciò ogni nuova osservazione è estremamente preziosa per lo studio della frequenza con cui si verifica questo fenomeno, così come per caratterizzare le popolazioni di buchi neri e stelle di neutroni, che è uno degli obiettivi dell'astronomia GW. Ciò significa dedurre la forma delle loro distribuzioni di massa, derivare la massa minima e massima di buchi neri e stelle di neutroni e studiare l'abbondanza di oggetti compatti in rotazione in funzione della loro massa. Usando solo GW230529, la frequenza delle fusioni dedotta per eventi simili è di circa 39 eventi all'anno in un volume di circa $3,5 \times 10^{28}$ anni luce cubi. Un'analisi che include altri eventi [candidati NSBH](#) rivelati durante il terzo periodo osservativo (O3) indica circa 61 eventi all'anno in un volume di circa $3,5 \times 10^{28}$ anni luce cubi. Un'altra analisi che include candidati aggiuntivi, meno significativi, fornisce una frequenza di fusioni di circa 95 eventi all'anno in un volume di circa $3,5 \times 10^{28}$ anni luce cubi. Da queste analisi si evince che la frequenza di fusioni dedotta per sistemi binari simili a GW230529 è paragonabile quella dedotta durante O3 per altri eventi il cui l'oggetto principale era senza dubbio un buco nero. Ciò rafforza l'ipotesi che la componente con massa maggiore nel sistema binario GW230529 fosse anch'essa un buco nero. La distribuzione di probabilità della frequenza di fusioni di NSBH è mostrata nella **Figura 4**.

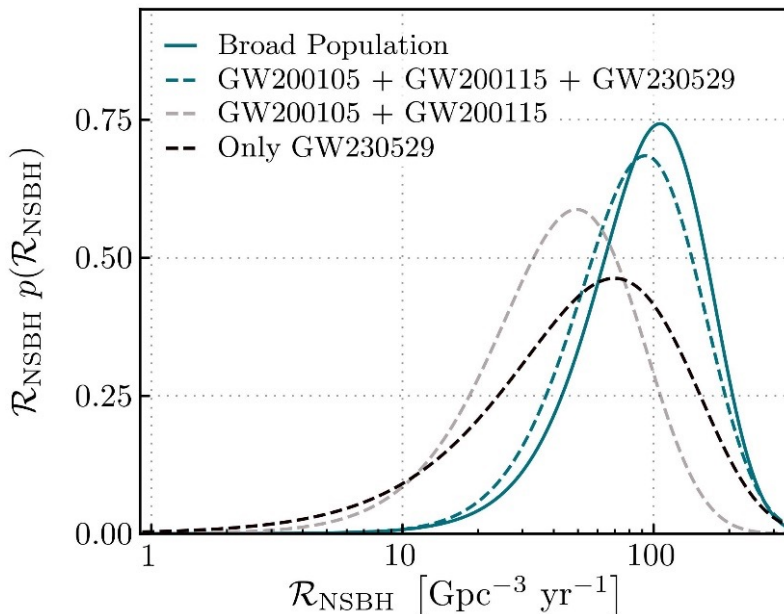


Figura 4: Distribuzioni di probabilità per la frequenza di fusione dei sistemi NSBH. Le funzioni di distribuzione di probabilità hanno un picco al valore più probabile della frequenza di fusione mostrata sull'asse orizzontale. Le linee tratteggiate sono ottenute utilizzando i modelli di popolazione dei sistemi NSBH indicati nella didascalia. La linea continua, indicata con "popolazione estesa" (broad population), è ottenuta utilizzando un modello di popolazione che include ulteriori eventi meno significativi, come spiegato nel testo. Vediamo che i valori di picco per le varie distribuzioni sono relativamente vicini l'uno all'altro, nel senso che tutte le popolazioni si sovrappongono in una certa misura. In particolare, il valore di picco trovato utilizzando solo GW230529 è paragonabile al valore di picco trovato quando si includono altri sistemi NSBH.

A causa del fatto che la massa dell'oggetto più pesante si trova molto probabilmente nel gap di massa, GW230529 ci dà la possibilità di migliorare i **modelli di popolazione**. Prendiamo in considerazione tre modelli di popolazione per studiare come sono influenzati dall'osservazione di GW230529. I primi due modelli comprendono tutti i tipi di sistemi binari di oggetti compatti (BNS+BBH+NSBH), mentre il terzo considera solo la popolazione NSBH. L'inclusione di GW230529 nei primi due modelli non cambia in modo significativo il risultato, il che significa che GW230529 non è un valore anomalo per questi modelli. Il terzo modello, tuttavia, è significativamente alterato, come mostrato nella **Figura 5**. Vediamo che in questo caso l'abbondanza di BH di bassa massa è aumentata e la massa minima di un BH viene spinta verso valori più bassi. Quando includiamo GW230529, troviamo una massa minima di circa $3,36 M_{\odot}$ rispetto al valore precedente di circa $6,04 M_{\odot}$ per questo modello.

Il processo di formazione che ha portato a GW230529 è incerto. Secondo l'attuale conoscenza delle **supernove da collasso del nucleo** nelle stelle massicce è improbabile che una di esse sia all'origine della componente primaria nel sistema binario, a causa della sua piccola massa. Uno scenario più plausibile è la formazione per **fallback**, in cui un buco nero si forma dopo l'esplosione di supernova a causa dell'accrescimento di materia su ciò che resta del nucleo della stella. Recenti risultati di modelli numerici hanno dimostrato che la formazione di buchi neri da $3 M_{\odot}$ a $6 M_{\odot}$ è possibile attraverso questo meccanismo. Le simulazioni del collasso del nucleo per le stelle di elio hanno previsto masse di BH fino alla massa massima delle NS, anche se l'intervallo di massa al di sotto di $5 M_{\odot}$ è meno popolato. Ad oggi, i modelli di collasso del nucleo presentano ancora grandi incertezze riguardo all'esito del processo, rendendo difficile determinare con precisione i limiti per le masse degli oggetti compatti. GW230529 è, quindi, una risorsa preziosa per definire i parametri di questi modelli.

Un altro possibile scenario per la formazione della componente primaria è attraverso una fusione di un sistema binario di stelle di neutroni. In questo caso possiamo immaginare che la componente secondaria sia membro di un precedente sistema triplo o quadruplo, o che sia stata catturata dalla componente primaria mentre si stava evolvendo in un giovane ammasso stellare o in un nucleo galattico attivo. Inoltre, non possiamo escludere un'origine non stellare come un **buco nero primordiale**.

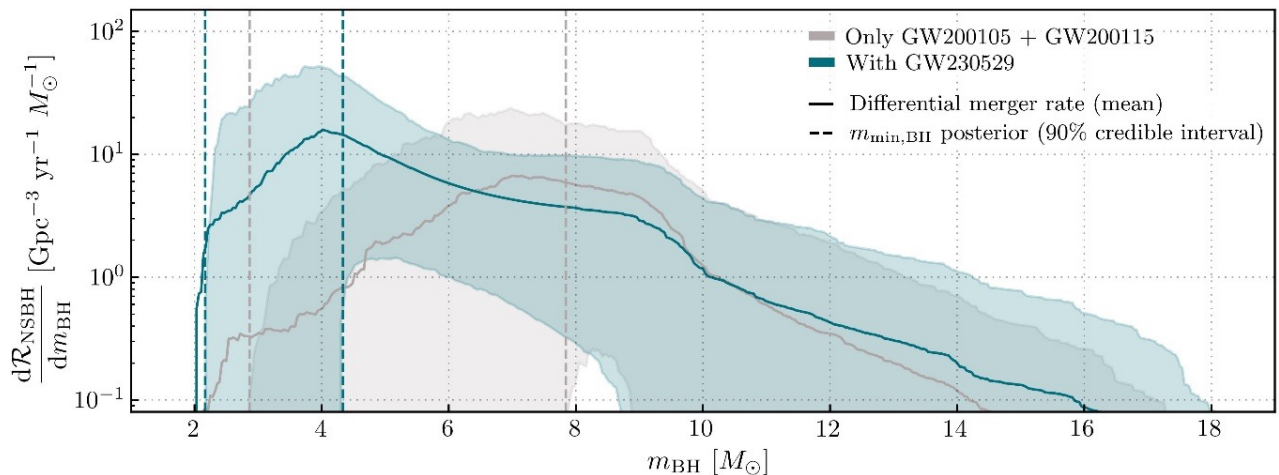


Figura 5: Frequenza delle fusioni di sistemi binari NSBH (asse verticale) in funzione della massa del buco nero nel sistema (asse orizzontale). Le curve continue mostrano le frequenze di fusione per due diversi modelli e le aree ombreggiate mostrano le incertezze corrispondenti a questi modelli. Le linee verticali tratteggiate mostrano l'intervallo previsto per la massa minima di un buco nero, con una probabilità del 90%. Il colore grigio considera un modello di popolazione costituita unicamente da NSBH, escludendo GW230529. Il colore blu include invece anche GW230529 nel modello di popolazione NSBH. Vediamo che l'inclusione di GW230529 aumenta l'abbondanza di binarie con buchi neri di massa bassa, oltre a spingere la massa minima dei buchi neri verso valori più bassi.

Ulteriori indagini sui sistemi nel gap di massa come GW230529 ci permetteranno di affinare la nostra comprensione delle popolazioni di buchi neri e stelle di neutroni. Questo a sua volta ci permetterà di comprendere meglio i loro meccanismi di formazione e, per le stelle di neutroni, la loro struttura interna.

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu, gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

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

GLOSSARIO

Coalescenza di un sistema binario compatto: Comunemente abbreviato in CBC (Compact Binary Coalescence), indica la fusione di un sistema costituito da due buchi neri, da due stelle di neutroni o da un buco nero ed una stella di neutroni che si avvicinano sempre più e alla fine si fondono. L'intero processo produce GW che aumentano in 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 detti *componenti*, la componente primaria è definita come quella che ha la massa maggiore.

Buco nero (BH): Oggetto compatto che è così denso che la velocità necessaria per sfuggire alla sua attrazione è superiore alla velocità della luce. Questo lo fa apparire come una regione nera dello spazio poiché nessuna luce proveniente da questa regione può raggiungerci.

Stella di neutroni (NS): Oggetto compatto estremamente denso costituito quasi interamente da neutroni con una piccola mescolanza di protoni ed elettroni poiché gli atomi non possono resistere alla pressione dovuta alla forza di gravità. Derivano dal collasso di stelle massicce a seguito di un processo chiamato supernova da collasso del nucleo. La massa massima prevista per le NS è di circa 3 M_{\odot} .

Buco nero primordiale: Un ipotetico buco nero che potrebbe essersi formato nell'universo primordiale subito dopo il Big Bang. Le masse previste variano da circa $10^{-18} M_{\odot}$ a $10^{36} M_{\odot}$.

LIGO, Virgo e KAGRA: Situati rispettivamente negli Stati Uniti, in Italia e in Giappone, questi sono gli strumenti che ci permettono di rivelare le onde gravitazionali. Schematicamente, i rivelatori LIGO, Virgo e KAGRA consistono in due bracci di lunghezza chilometrica, che formano una "L", con specchi alle loro estremità e in cui circola un raggio laser. Usiamo il laser per misurare le variazioni relative della lunghezza dei bracci causate dalle onde gravitazionali che attraversano la Terra. La differenza delle lunghezze dei due bracci di ciascun rivelatore è costantemente monitorata e ciò ci permette di osservare le onde gravitazionali.

Filtri ottimali: Questo è un metodo che utilizziamo per analizzare i dati del rivelatore e rivelare eventi di coalescenza di sistemi binari compatti. Si tratta di confrontare in ogni momento i dati dei nostri rivelatori con i segnali di onda gravitazionale previsti teoricamente e che dipendono dalle proprietà del sistema binario. Quando un vero segnale di onda gravitazionale attraversa la Terra, dovremmo trovare una buona corrispondenza tra i dati del rivelatore ed uno dei segnali previsti.

Gap di massa inferiore: Intervallo di massa in cui ci aspettiamo che non esistano oggetti compatti o che ne esistano pochi. Questo intervallo si estende da circa 3 M_{\odot} in corrispondenza alla massa massima di una stella di neutroni, a 5 M_{\odot} per la massa minima attesa di un buco nero.

Massa solare o M_{\odot} : Massa del Sole, usata come unità di massa standard in astronomia. Equivale a circa 2×10^{30} kg.

Anno luce: Unità di distanza. 1 anno luce è la distanza percorsa dalla luce in un anno, calcolata in base alla velocità della luce nel vuoto, pari a circa $9,5 \times 10^{12}$ km.

Modello di popolazione: Modello teorico che fornisce l'abbondanza di oggetti compatti di un dato tipo in funzione di qualsiasi combinazione di parametri dei sistemi binari compatti.

Supernova da collasso del nucleo: In una stella, la pressione del suo gas compensa costantemente l'attrazione gravitazionale del suo nucleo. Quando si avvicina la fine della sua vita, la pressione scende e la stella non può più resistere all'attrazione gravitazionale. Subisce un collasso gravitazionale estremamente rapido verso il suo nucleo che ha diversi esiti possibili. L'improvviso collasso può creare una pressione estremamente elevata nella stella, facendola esplodere in una supernova, da cui il nome "supernova da collasso del nucleo". La supernova può quindi lasciare dietro di sé una stella di neutroni o un buco nero in caso di fallback. Se inizialmente la stella è troppo massiccia essa collassa direttamente in un buco nero saltando la fase di supernova.

Fallback: Nello scenario di una supernova da collasso del nucleo che forma una stella di neutroni, la materia residua può "ricadere" verso la stella di neutroni. Questo accrescimento di materia può portare la massa della stella di neutroni al di sopra della sua massa massima e condurre alla formazione di un buco nero.

Pipeline di ricerca: Programmi informatici che consistono in una catena di diversi processi. Preparano i dati per l'analisi, li filtrano e poi calcolano varie quantità al fine di eliminare il maggior numero possibile di eventi dovuti al rumore di fondo e infine stimare la significatività degli eventi astrofisici candidati. Alcune pipeline vengono eseguite in tempo reale, altre vengono eseguite offline e altre ancora fanno entrambe le cose. Ulteriori informazioni sono disponibili nella [guida per l'utente relativa agli annunci pubblici IGWN](#).

Ricerca offline: Analisi eseguite su dati di un precedente periodo osservativo, in genere durante le pause in cui i rivelatori non sono in funzione, per la manutenzione e gli aggiornamenti. Integrano le analisi in tempo reale (dette anche analisi online) che vengono effettuate durante i periodi osservativi.

Frequenza di falsi allarmi: Viene utilizzata per quantificare la probabilità che un evento sia stato causato dal rumore. Viene calcolata simulando eventi provenienti dal rumore e osservando la potenza del loro segnale, per ottenere alla fine una distribuzione della frequenza attesa di tali eventi in funzione della potenza del segnale. In termini più concreti, se un evento ha un tasso di falsi allarmi di 1 al giorno, ciò significa che ci aspettiamo che il rumore del nostro rivelatore produca un evento simile circa una volta al giorno. In tal caso avremmo scarsa fiducia nel fatto che questo evento sia di origine astrofisica.