

GWTC-5.0: AGGIORNAMENTO DEL CATALOGO CON OSSERVAZIONI EFFETTUATE DELLA COLLABORAZIONE LIGO-VIRGO-KAGRA NELLA SECONDA PARTE DEL QUARTO PERIODO OSSERVATIVO

Nel maggio 2026, le Collaborazioni [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) hanno reso pubbliche le misure di [deformazione gravitazionale](#) raccolte nella seconda parte del quarto periodo osservativo (O4b) che si è svolto da aprile 2024 a gennaio 2025, un periodo di circa nove mesi passato alla ricerca di [onde gravitazionali](#) (GW) provenienti dalla fusione di [oggetti compatti](#) come [stelle di neutroni](#) e [buchi neri](#). In questi dati abbiamo scoperto 161 nuovi segnali di onde gravitazionali sicure (GW), tutti associabili ad una fusione di buchi neri. A differenza della precedente pubblicazione del catalogo, non sono stati identificati nuovi eventi contenenti stelle di neutroni durante O4b. Parallelamente al rilascio dei dati di deformazione, abbiamo anche pubblicato la versione 5.0 del [Gravitational Wave Transient Catalog](#) (GWTC-5.0), che contiene gli elenchi dei segnali candidati GW e delle loro proprietà. GWTC-5.0 include anche un'analisi più raffinata di alcuni candidati già pubblicati. Un corpuso insieme di documenti accompagna il catalogo. Qui riassumiamo i primi tre articoli che introducono strumenti e metodi e forniscono una panoramica dei risultati di GWTC-5.0.

INTRODUZIONE

Il primo articolo, intitolato "GWTC-5.0: Introduzione alla versione 5.0 del Gravitational-Wave Transient Catalog", funge da panoramica del catalogo. Include informazioni sulla nomenclatura, i dettagli della pubblicazione dei dati del catalogo e dei documenti che lo accompagnano. L'articolo è pensato per aiutare i nuovi lettori ad orientarsi nel catalogo senza dover leggere tutte le versioni precedenti.

Il gioco dei nomi

Diamo un nome ai nostri eventi GW utilizzando la data e l'ora dell'osservazione in [Tempo Universale Coordinato](#) (UTC). Ad esempio, l'evento GW200105_162426 è stato rilevato il 5 gennaio 2020 alle 16:24:26 UTC. Alcuni eventi, come [GW150914](#) o [GW250114](#), sono abbastanza speciali da perdere l'indicazione dell'ora per migliorare la leggibilità quando ne scriviamo. Aggiungiamo il prefisso GW a tutti i segnali candidati che rileviamo, anche se c'è la possibilità che non siano di origine astrofisica. Ciò è coerente con il modo in cui gli eventi sono stati presentati nell'ultimo aggiornamento del catalogo ([GWTC-4.0](#)), ma è notevolmente diverso da come i candidati venivano trattati nelle precedenti versioni del catalogo. Detto ciò, per essere inclusi nel catalogo, gli eventi devono avere un'alta probabilità (almeno il 50%) di essere di origine astrofisica e devono superare tutti i nostri controlli di qualità dei dati e coerenza del segnale.

Ce ne può essere solo uno (di catalogo)

In linea con gli aggiornamenti precedenti di GWTC, i contenuti di GWTC-5.0 sono cumulativi. Ciò significa che ogni nuovo catalogo include non solo i nuovi candidati identificati in dati non rilasciati precedentemente (questa volta O4b), ma anche tutti i candidati di ciascuna delle edizioni precedenti. Ciò significa che GWTC-5.0 supera tutte le precedenti uscite del catalogo. Inoltre, GWTC-5.0 include anche risultati di ricerca aggiornati e le proprietà stimate delle sorgenti per eventi aggiuntivi dalla prima parte di O4 (O4a). Questo sottoinsieme del catalogo si chiama GWTC-4.1, in linea con la convenzione introdotta insieme alla versione precedente del catalogo, in cui i numeri di versione minore (.0 e .1) vengono incrementati ogni volta che c'è una modifica ai risultati precedentemente pubblicati. In ogni momento, il catalogo con il numero più alto è la pubblicazione di riferimento LVK.

Ciò significa che GWTC-5.0 contiene tutti i candidati transienti GW confermati a partire dal primo periodo osservativo (O1, a partire da settembre 2015) fino alla seconda parte del quarto periodo osservativo (O4b), e tutto ciò che sta nel mezzo. Nel frattempo, i nostri rivelatori sono diventati progressivamente più sensibili. La cronologia dei miglioramenti di sensibilità è mostrata nella timeline dei periodi osservativi in **Figura 1**.

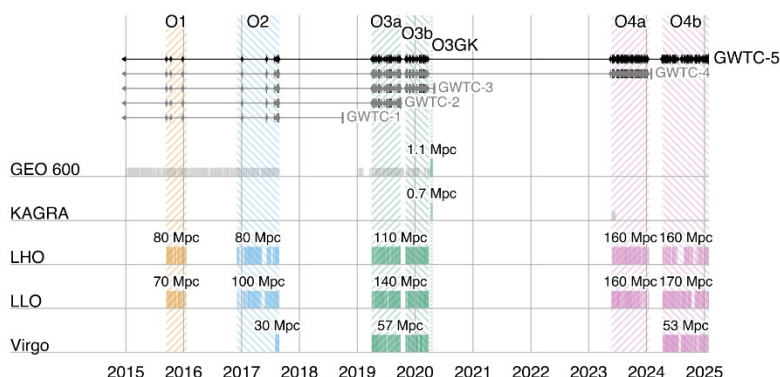


Figura 1: Una cronologia dei periodi osservativi che mostra i tempi in cui si è svolta la raccolta dati degli osservatori di onde gravitazionali [GEO 600](#), [KAGRA](#), [LIGO-Hanford](#) (LHO), [LIGO-Livingston](#) (LLO) e [Virgo](#). I numeri sopra i blocchi colorati corrispondono alla distanza approssimativa (in [megaparsec](#), Mpc) in cui il rivelatore può vedere una [fusione standard di stelle di neutroni binarie](#), fornendo una misura della sua sensibilità. Nella parte superiore indichiamo il numero di eventi osservati, oltre a barre orizzontali che mostrano l'estensione nel tempo di ogni catalogo.

PER SAPERNE DI PIÙ:

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



Nella **Figura 1** si nota anche che il rivelatore Virgo partecipa alle osservazioni di O4 a partire da O4b con sensibilità comparabile a quella ottenuta durante il terzo periodo osservativo. Ciò è importante non solo perché aumenta la sensibilità complessiva della rete di rivelatori, ma anche perché migliora notevolmente la capacità della rete di individuare la posizione precisa di ogni evento nel cielo, e vedremo un esempio sorprendente di localizzazione nella sezione risultati.

Esplorare l'Universo un ipervolume alla volta

La risoluzione angolare migliorata nel cielo e la maggiore sensibilità alla distanza portano GWTC-5.0 ad essere la ricerca di onde gravitazionali più sensibile mai realizzata. Spesso quantifichiamo la sensibilità calcolando il volume a 4 dimensioni (sia nel tempo che nello spazio) che i rivelatori hanno osservato. In linea con le precedenti pubblicazioni del catalogo, chiamiamo questo un 'ipervolume' perché è un volume in quattro dimensioni. Simuliamo come dovrebbero apparire i segnali GW nei nostri rivelatori, se dovessero verificarsi a varie distanze astrofisiche e luoghi nel cielo. Poi proviamo a vedere se il nostro software di analisi riesce a trovare con successo i segnali simulati quando li inseriamo artificialmente nei nostri dati. Una volta corretta la percentuale di tempo

in cui i nostri rilevatori sono attivi, cioè il loro [duty cycle](#), siamo in grado di arrivare a una stima realistica dell'ipervolume nell'universo vicino da cui possiamo rilevare in modo affidabile l'emissione di onde gravitazionali.

Nella **Figura 2**, rappresentiamo un aggiornamento di questo ipervolume rispetto al numero totale di osservazioni. Il grafico mostra quanti segnali sono stati rilevati in ogni periodo osservativo si vede che in O4b abbiamo quasi raddoppiato il numero totale di segnali osservati!

A testimonianza dell'aumento della sensibilità di ricerca, confrontando le prime due parti di O4 (O4a+O4b) con i precedenti periodo osservativi, troviamo che i risultati di O4 rappresentano circa il 75% del numero totale di rilevamenti di onde gravitazionali fino ad oggi. (La Figura 3 mostra un altro modo per visualizzare questo.)

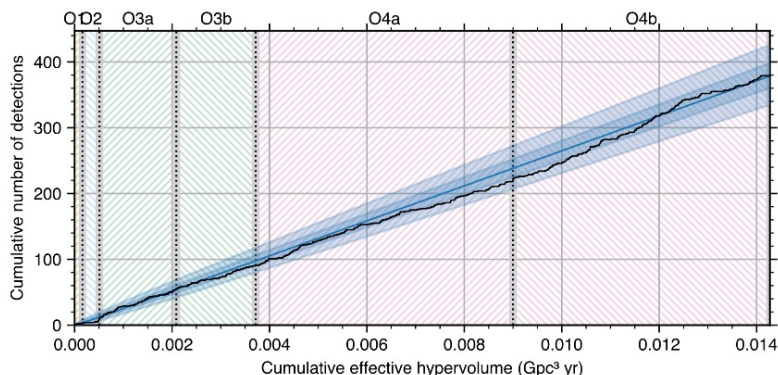


Figura 2: Il numero cumulativo di rilevazioni si è rappresentato rispetto all'ipervolume spazio-temporale approssimativo rilevato dai rivelatori, mostrando sia l'aumento del numero di eventi GW osservati sia quanto abbiamo esplorato l'universo locale. La linea nera traccia gli eventi che abbiamo osservato, e le bande blu sfumate intorno ad essa mostrano l'incertezza in quella misurazione. L'incertezza deriva dal fatto che anche gli eventi che hanno un'alta probabilità di essere di origine astrofisica hanno una possibilità (anche se minima) di essere qualcos'altro. Questa incertezza si accumula man mano che osserviamo sempre più eventi, fornendoci una misura statistica di quanto bene comprendiamo il nostro conteggio totale.

METODI

Il secondo articolo, intitolato "GWTC-5.0: Metodi per l'identificazione e la caratterizzazione di onde gravitazionali transienti", fornisce i dettagli della metodologia utilizzata per produrre GWTC-5.0. L'inizio dell'articolo tratta le tecniche utilizzate per modellare i segnali GW che stiamo cercando e il software di analisi che utilizziamo per cercarli nei dati. Poi descrive come gestiamo le fluttuazioni di rumore che possono influire sulla qualità dei nostri dati. L'articolo si conclude con una panoramica degli strumenti che utilizziamo per stimare i parametri astrofisici di ciascun sistema (come le masse degli oggetti compatti che si sono fusi), verificare la coerenza dei nostri risultati e gestire le complesse strutture dati necessarie per completare tutto questo ambizioso lavoro.

La pratica rende perfetti

La maggior parte della metodologia di base in GWTC-5.0 rimane in gran parte invariata rispetto all'analisi GWTC-4.0 degli eventi O4a. Ma abbiamo anche identificato e corretto diversi piccoli problemi, tra cui uno che influenza il modo in cui calibriamo i nostri dati e un altro che influenza le tecniche che usiamo per stimare le proprietà astrofisiche di ogni evento. In tutti i casi, gli effetti di questi problemi rientrano nelle incertezze statistiche dei singoli eventi, e nessuna delle conclusioni scientifiche delle precedenti pubblicazioni dei cataloghi viene influenzata.

Ricordiamo il nostro passato mentre continuiamo a crescere

In linea con le convenzioni degli aggiornamenti precedenti del catalogo, il documento sui metodi contiene anche descrizioni storiche degli algoritmi utilizzati fin dal primo periodo osservativo. Questo è essenziale perché GWTC è un catalogo cumulativo che include tutti i risultati precedenti, anche se non li abbiamo rianalizzati. Se qualcuno vuole comprendere un evento a partire dal primo periodo osservativo (ad esempio, la prima osservazione, [GW150914](#)) mentre si naviga nel catalogo GWTC-5.0, c'è bisogno del contesto completo degli strumenti di analisi utilizzati all'epoca. L'obiettivo è garantire che i lettori nuovi del catalogo non debbano consultare versioni precedenti dei documenti per aggiornarsi allo stato attuale.

Accanto a questo contesto storico, ci impegniamo anche a incorporare nuove tecniche potenti per continuare a migliorare e migliorare le nostre analisi con ogni successiva pubblicazione del catalogo. Per GWTC-5.0, abbiamo aggiunto analisi potenziate dal [machine learning](#) come forma di validazione incrociata per aumentare la credibilità statistica dei nostri risultati. Questi nuovi approcci addestrano reti neurali su grandi insiemi di segnali simulati in modo che, una volta addestrate, possano stimare le proprietà di un nuovo segnale in una frazione minuscola del tempo richiesto finora dai nostri metodi di analisi tradizionali. Un successivo passaggio di ricalibrazione corregge eventuali piccole discrepanze tra l'approssimazione rapida fatta con la rete neurale e un calcolo più rigoroso.

RISULTATI

Il terzo articolo, intitolato "GWTC-5.0: Osservazioni nella seconda parte del quarto periodo osservativo di LIGO-Virgo-KAGRA e aggiornamenti al catalogo delle onde gravitazionali", fornisce un riassunto dei risultati astrofisici per i nuovi candidati aggiunti in GWTC-5.0. Si concentra sulle proprietà fondamentali di ogni evento (inclusi parametri come massa, [spin](#) e distanza, tra gli altri). Ulteriori analisi che coprono interpretazioni più ampie dei risultati saranno incluse in diversi articoli complementari che appariranno insieme o poco dopo la pubblicazione dei dati di GWTC-5.0.

La strada verso il numero 400

Abbiamo trovato 161 nuovi candidati durante O4b che sono probabilmente di origine astrofisica. Sulla base di ciò che siamo riusciti a dedurre relativamente alle loro masse, tutti questi eventi sembrano essere fusioni sistemi binari di buchi neri. A differenza della precedente pubblicazione del catalogo, non ci sono stati nuovi eventi che coinvolgono stelle di neutroni durante O4b.

I nuovi eventi portano il numero totale di candidati all'interno di GWTC a 390 (vedi **Figura 4**). Dei 161 nuovi candidati, forniamo anche un'analisi dettagliata di follow-up sui 104 eventi più significativi. Indichiamo la significatività statistica per mezzo della [frequenza di falso allarme](#) (FAR, dall'inglese *false alarm rate*), una misura di quanto spesso ci aspetteremmo che le fluttuazioni casuali del rumore producano qualcosa che assomiglia a un segnale GW. Effettuiamo analisi di follow-up su eventi con un FAR inferiore a uno all'anno.

Eventi eccezionali

Diversi eventi eccezionali, alcuni dei quali sono già stati annunciati, sono inclusi nel catalogo. Tra questi ci sono [GW250114](#), il segnale GW più forte registrato ad oggi; [GW241011](#) e [GW241110](#), che hanno fornito prove convincenti dell'esistenza di fusioni 'gerarchiche' di buchi neri; e [GW240925](#), che è stato uno dei due eventi utilizzati nella prima applicazione della calibrazione astrofisica. Ad ognuno di questi eventi è stato dedicato un articolo specializzato, ma vale comunque la pena di evidenziarle nel catalogo come osservazioni degne di nota. Per il lettore curioso riassumiamo ciascuno di questi eventi eccezionali nell'inserto in fondo a questo sommario scientifico con link ai sommari scientifici dedicati.

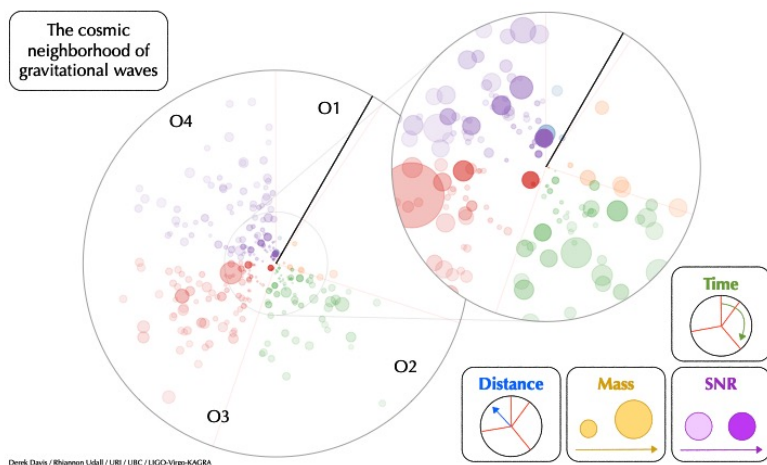


Figura 3: Anche se il quarto periodo osservativo rappresenta meno della metà del tempo totale dedicato all'osservazione, contribuisce con il 75% circa di tutte le osservazioni di GW fino ad oggi. In questo grafico a torta, ogni evento GW è rappresentato da un cerchio. La dimensione di ciascun cerchio rappresenta la massa totale della fusione. L'intensità di colore di ogni cerchio rappresenta una misura di rumorosità dell'evento nei nostri rivelatori (misurato dal rapporto segnale-rumore, o SNR). La distanza di ogni cerchio dal centro della mappa rappresenta la distanza dalla Terra della fusione. Ogni fetta di torta rappresenta una delle serie di osservazione (da O1 a O4, fino a O4b), con il tempo di ogni evento che procede in senso orario attorno a ogni fetta.

Il cielo (la localizzazione) è il limite!

GWTC-5.0 stabilisce anche un nuovo record per l'astronomia di precisione con onde gravitazionali, con localizzazioni notevolmente migliorate per diversi eventi. Per capire perché questo sia degno di nota, dobbiamo prima capire come i rivelatori GW individuino la posizione degli eventi.

Un singolo rivelatore GW da solo ci può dire se si è verificato un evento GW, ma non può dirci in che posizione ne cielo. Nel migliore dei casi, ci può dire dove non si trovava escludendo le poche direzioni in cui il rivelatore è effettivamente cieco. Ma quando due rivelatori catturano lo stesso segnale, possiamo confrontare il momento preciso in cui il segnale è apparso in ciascun rivelatore e usare questo insieme al fatto che le onde gravitazionali viaggiano alla velocità della luce, per triangolare la posizione d'origine del segnale in modo molto simile a come un telefono usa il tempo dei segnali GPS per dirci dove ci si trovi sulla Terra. Quando ci sono tre o più rivelatori che osservano, possiamo eseguire questa triangolazione più volte, una volta per ogni coppia unica di rivelatori, migliorando significativamente la nostra capacità di determinare dove sia avvenuto l'evento nel cielo.

In O4a, solo i due rivelatori LIGO erano online, il che limitava fortemente la nostra capacità di localizzare gli eventi GW. Ma Virgo ha partecipato al periodo osservativo O4b, aggiungendo un terzo rilevatore alla rete. Questo ha migliorato enormemente la nostra precisione, e non c'è esempio migliore di GW240615_113620, che ha la migliore localizzazione ottenuta finora, con un'area di soli 6 gradi quadrati, più o meno la zona di cielo che il pollice copre quando lo guardiamo alla distanza di un braccio teso. Per confronto, la migliore localizzazione ottenuta in GWTC-4.0 è stata di 110 gradi quadrati, quasi venti volte meno precisa, con molti altri eventi che si estendevano su migliaia (o addirittura decine di migliaia) di gradi quadrati del cielo.

Verso GWTC-5.0 e oltre!

GWTC-5.0 segna un altro traguardo significativo nella nostra esplorazione dell'universo GW. In poco più di un decennio dalla [prima rilevazione di GW150914](#), siamo passati da un singolo segnale confermato a un catalogo di quasi 400 segnali. Nel corso di ogni periodo osservativo aumentiamo ciò che sappiamo sulle popolazioni di buchi neri e stelle di neutroni nascoste nel cosmo.

Figura 4: GWTC-4.0 ha notoriamente più che raddoppiato il numero totale di candidati osservati da ~90 (GWTC-3.0) a oltre 200 (GWTC-4.0). Con 390 eventi totali fino alla fine di O4b in GWTC-5.0, abbiamo quasi raddoppiato di nuovo la dimensione del catalogo! I restanti candidati osservati nella terza e ultima parte di O4 (O4c) saranno analizzati e pubblicati in una versione successiva del catalogo.

EVENTI ECCEZIONALI

GW250114 – l'evento GW più luminoso di sempre

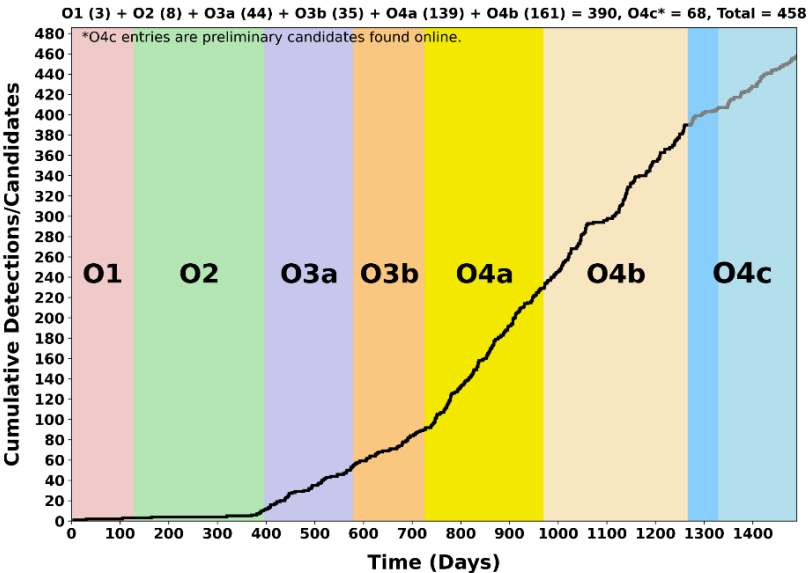
GW250114 è un segnale con un'intensità eccezionale proveniente da una coalescenza binaria di buchi neri. Misuriamo l'intensità degli eventi GW tramite il rapporto segnale-rumore (SNR) – di fatto l'intensità del segnale divisa per la dimensione tipica delle fluttuazioni di rumore nel rivelatore. Il precedente detentore del record, [GW230814](#), aveva un SNR di 42,4. [GW250114](#) è stato osservato con un SNR di 76,9, quasi il doppio, il che ci ha permesso di eseguire rigorosi [test di relatività generale](#) e confermare la validità della "Area Law" di Hawking. In particolare, i due buchi neri che si sono fusi (con masse circa 34 e 32 volte la [massa del nostro Sole](#)) sono quasi identici ai buchi neri di massa solare ~36 e ~29 di GW150914, la prima osservazione di GW. Inoltre, questi eventi si sono verificati a una distanza più o meno uguale dalla Terra – rispettivamente 1,3 e 1,4 miliardi di anni luce, per GW250114 e GW150914. Il massiccio miglioramento del SNR è dovuto quasi interamente ai miglioramenti ai rivelatori stessi, non a qualcosa di speciale nella sorgente.

GW241011 e GW241110 – prove di fusioni gerarchiche

Quando due buchi neri nascono da una coppia di stelle che hanno vissuto insieme, ci si aspetta che la loro 'rotazione' (rotazione intrinseca, separata dal loro moto orbitale) sia almeno in parte allineata con la rotazione dell'orbita, analogamente a quanto accade alla maggior parte dei pianeti del nostro sistema solare, riflettendo la loro origine comune in una singola nube di gas rotante. Ma sia [GW241011](#) che [GW241110](#) hanno mostrato spin ben misurati che non si allineano come ci si aspetterebbe, insieme a masse decisamente disuguali. Complessivamente, questi sono indizi che i sistemi probabilmente si sono formati in un ambiente affollato come un denso ammasso stellare, dove i buchi neri possono incontrarsi e catturarsi [dinamicamente](#), e dove uno dei buchi neri che si è fuso può essere esso stesso il residuo di una fusione precedente. Questi eventi sono la nostra migliore prova fino ad oggi di tali 'fusioni gerarchiche', in cui i prodotti delle precedenti fusioni dei buchi neri vivono per fondersi nuovamente.

GW240925 – il primo utilizzo significativo della calibrazione astrofisica

Osservare le onde gravitazionali richiede una [calibrazione](#) accurata e rigorosa dei nostri rivelatori in corrispondenza ad ogni evento. Nella maggior parte dei casi questo non è un problema, ma lo stato di calibrazione può talvolta essere sconosciuto, ad esempio quando i rivelatori hanno cambiato stato e necessitano di tempo per stabilizzarsi. L'universo, ovviamente, non è sempre così gentile da aspettare. Nel caso di [GW240925](#), è esattamente quello che è successo. L'evento stesso è stato ingannevolmente tipico, la fusione di due buchi neri con masse di circa 9 e 7 masse solari, ma avvenuta in un periodo in cui il rivelatore LIGO Hanford era mal calibrato. Fortunatamente, il segnale stesso era piuttosto forte (SNR di 31,9) e, poiché le onde gravitazionali provenienti dalla fusione dei buchi neri sono ben comprese, siamo riusciti a confrontare i nostri dati mal calibrati con i modelli teorici su come dovrebbero apparire le onde gravitazionali nel rivelatore. Questo ci ha permesso di usare il segnale stesso per calcolare a posteriori la calibrazione del rivelatore. Questo ha segnato il primo caso in cui eventi astronomici sono stati utilizzati direttamente per calibrare i nostri rivelatori. (Un evento complementare che utilizzava anch'esso la calibrazione astrofisica, GW250207, è stato pubblicato insieme a GW240925. Tuttavia, poiché è avvenuto dopo la conclusione di O4b, non appare in GWTC-5.0 e sarà invece incluso in un futuro aggiornamento del catalogo.)



LIGO-G2302098 (no gitlab commit), updated on 20 May, 2026 Credit: LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration

PER SAPERNE DI PIÙ:

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

Leggete i preprints gratuiti degli articoli scientifici GWTC-5.0:

- Introduzione: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500701/public/>
- Metodi: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600166/public/>
- Risultati: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600152/public/>

Accesso ai dati di GWTC-5.0 tramite il Gravitational-Wave Open Science Centre:
<https://gwosc.org/GWTC-5.0/>.