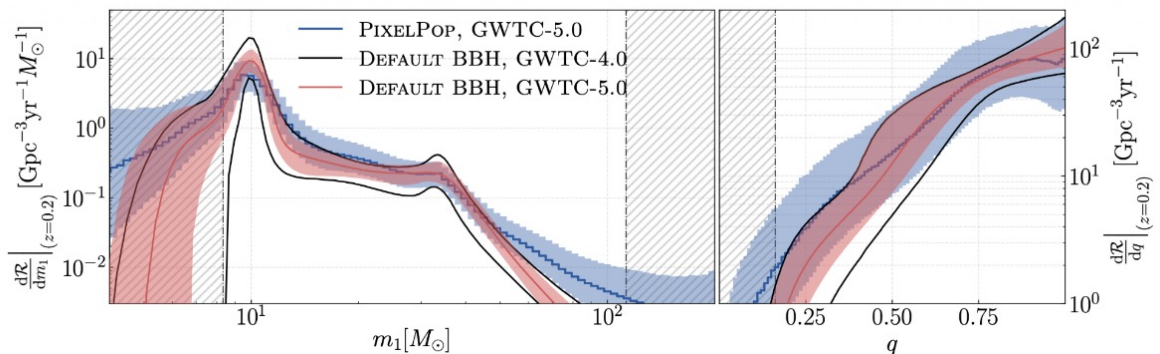


# GWTC-5.0: PROPRIETÀ DELLA POPOLAZIONE DEI SISTEMI BINARI DI OGGETTI COMPATTI

Presentiamo le proprietà della popolazione di sistemi binari di oggetti compatti dedotte dalle osservazioni di 267 [fusioni](#) di oggetti componenti sistemi di questo tipo e riportate nel nostro ultimo Gravitational-Wave Transient Catalog, [GWTC-5.0](#). Quest'ultima versione del catalogo si basa su [GWTC-4.0](#) e include i dati più recenti raccolti tra il 10 aprile 2024 e il 28 gennaio 2025. Sebbene i singoli eventi individuali forniscano di per sé molte preziose informazioni, studiare la popolazione nel suo insieme offre un quadro più completo di come questi sistemi binari si formino, si evolvano e si fondano.

Le stelle del nostro Universo coprono una vasta gamma di masse e fasi evolutive. Alcune stelle sono relativamente piccole e possono vivere per decine di miliardi di anni. Altre vivono poco e muoiono giovani, consumando il loro combustibile nucleare in pochi milioni di anni. Alla fine della loro vita queste stelle massicce, con masse che vanno da decine a centinaia di volte la [massa solare](#), diventano estremamente compatte. Tutto ciò che resta è diventato una [stella di neutroni](#) oppure un [buco nero](#), e talvolta questi oggetti possono formare coppie che alla fine si fondono. Tali [fusioni](#) producono [onde gravitazionali](#) (GW), increspature nello spaziotempo che sono rapidamente diventate uno degli strumenti principali per comprendere la formazione e l'evoluzione degli oggetti astrofisici compatti nell'Universo. Le onde gravitazionali possono viaggiare attraverso lo spazio per miliardi di anni, passando quasi indisturbate attraverso materia e galassie prima di essere infine rivelate sulla Terra.

I nostri rivelatori continueranno a scrutare l'Universo e nel corso del tempo gli studi sulle popolazioni binarie compatte forniranno una visione sempre più dettagliata di come si comportano buchi neri e stelle di neutroni e di come interagiscono tra loro. Ci permetteranno anche di capire la natura, l'evoluzione e la morte delle stelle massicce che plasmano la storia cosmica dei buchi neri e delle stelle di neutroni.



**Figura 1** (Fig. 2 nel nostro articolo). A sinistra: distribuzione della massa primaria (cioè quella della componente più massiccia) nella popolazione dei buchi neri binari. I risultati ottenuti a partire da GWTC-5.0 (curve blu e rosse) mantengono la struttura complessiva vista a partire da GWTC-4.0 (curva nera continua), con caratteristiche persistenti intorno a  $10 M_{\odot}$  e  $35 M_{\odot}$ . A destra: la distribuzione del [rapporto di massa](#),  $q$ : un rapporto di massa  $q = 1$  indica che i due buchi neri nel sistema binario hanno la stessa massa.

## METODI

I nostri ultimi risultati sulla popolazione di oggetti compatti sono stati ottenuti studiando i sistemi binari di stelle di neutroni (BNS), i sistemi formati da una stella di neutroni ed un buco nero (NSBH) e i sistemi binari di buchi neri (BBH).

Il nostro articolo descrive la formazione di questi sistemi, le loro proprietà e il meccanismo di fusione. La lista degli eventi è tratta dal nostro ultimo catalogo di osservazioni di onde gravitazionali, [GWTC-5.0](#), che include osservazioni statisticamente significative effettuate nella seconda parte del quarto [periodo osservativo](#) (O4b) della Collaborazione [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK). Inoltre, grazie a un aggiornamento dei risultati della prima parte del quarto periodo osservativo (O4a), i nostri 267 candidati includono anche due eventi della [popolazione studiata a partire da GWTC-4.0](#).

## 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/)



Per inferire correttamente le proprietà della popolazione dobbiamo considerare attentamente gli [effetti di selezione](#), una problema frequente nell'astronomia osservativa. I rivelatori di onde gravitazionali sono più sensibili alle fusioni di sistemi vicini e massicci rispetto a quelle di sistemi distanti e di massa inferiore, e questa sistematicità deve essere correttamente considerata nell'analisi. I segnali di onde gravitazionali che provengono da sistemi binari di oggetti compatti sono ben descritti dalla [relatività generale](#) e usiamo queste previsioni per capire i segnali partendo dal presupposto che le orbite siano quasi interamente circolari.

A differenza dei [segnali elettromagnetici](#) come l'emissione radio, le onde gravitazionali sono influenzate dalla materia intermedia in modo assai debole, e ciò permette di costruire modelli precisi degli effetti di selezione. Per quantificare questi effetti, iniettiamo milioni di segnali simulati corrispondenti a diverse masse, [spin](#) e [redshift](#) nei dati reali del rivelatore e misuriamo la capacità di rivelarli dei nostri [metodi di ricerca](#). Queste misure, a loro volta, ci permettono di [annullare](#) gli effetti di selezione e costruire la distribuzione reale della popolazione dei sistemi binari di oggetti compatti che si fondono. Per tenere conto di altre sistematiche dovute, ad esempio, a un errore nel modello della popolazione, validiamo e controlliamo i nostri risultati utilizzando differenti modelli della popolazione.

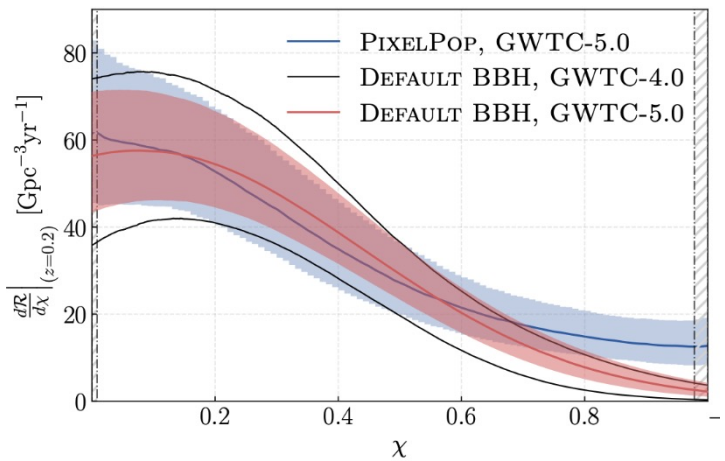
## RISULTATI IN EVIDENZA

**Distribuzione di massa:** La struttura e le caratteristiche che avevamo già identificato nell'analisi degli eventi di O4a persistono in quest'ultimo studio. Sul lato sinistro la **Figura 1** mostra la distribuzione della massa dei buchi neri; essa può essere descritta genericamente come una doppia legge di potenza con un picco di densità intorno a  $10 M_{\odot}$  (dove il simbolo  $M_{\odot}$  indica la [massa solare](#)) e una variazione di pendenza intorno a  $35 M_{\odot}$ . Sul lato destro la **Figura 1** mostra che i buchi neri sono più propensi ad accoppiarsi con altri buchi neri di masse comparabili, una tendenza ancora più marcata per i buchi neri con masse intorno a  $35 M_{\odot}$ . In generale anche le stelle amano anche formare sistemi binari con stelle di massa comparabile, quindi non è strano che ciò accada anche con i buchi neri.

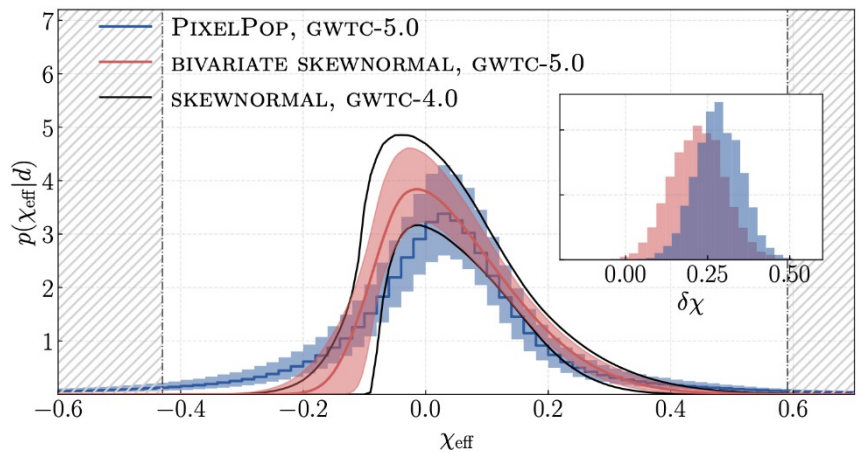
**Spins:** Le proprietà dei buchi neri astrofisici sono determinate dai loro spin oltre che dalle loro masse. Questi spin, sia individualmente che in combinazione con masse, possono codificare informazioni sugli ambienti di nascita, sui canali di formazione e sulle storie evolutive.

Caratterizziamo gli spin dei buchi neri con il parametro di spin adimensionale  $\chi$ , che è un numero situato nell'intervallo  $[0, 1]$ . Un buco nero con  $\chi = 0$  non ruota affatto, mentre un buco nero con  $\chi = 1$  ruota alla velocità massima consentita dalla relatività generale. Abbiamo scoperto che, sebbene la maggior parte dei buchi neri abbia spin adimensionali piccoli (vedi Fig. 2), circa il 15% di essi ha spin grandi, superiori a 0.7.

Un altro modo utile per studiare gli spin dei binari compatti è attraverso lo [spin efficace](#),  $\chi_{\text{eff}}$ , che misura l'allineamento degli spin con il [momento angolare orbitale](#) ed è generalmente il parametro di spin che si misura meglio con le onde gravitazionali.



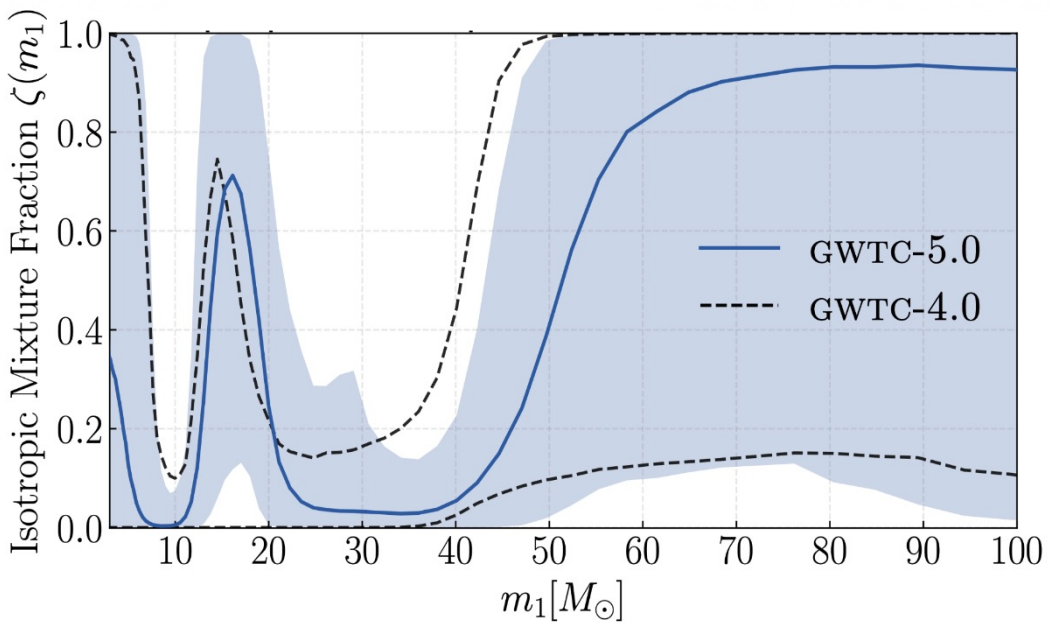
**Figura 2** (adattata dalla Fig. 3 del nostro articolo): La distribuzione della velocità di rotazione dei singoli buchi neri. Denotiamo questa velocità mediante lo spin adimensionale che rappresenta la frazione dello spin massimo consentita dalla relatività generale. I modelli stimati dagli eventi di GWTC-5.0 (bande blu e rosse) sono coerenti con i precedenti risultati ottenuti con GWTC-4.0 (linee nere continue) e preservano la struttura complessiva della distribuzione. La maggior parte dei buchi neri ha spin adimensionali piccoli, ma una frazione di essi ha valori elevati.



**Figura 3** (adattata dalla Fig. 4 del nostro articolo): Distribuzione dello spin efficace ( $\chi_{\text{eff}}$ ) dei sistemi binari. L'inserto mostra l'asimmetria di questa distribuzione, che può essere particolarmente sensibile a come si formano i sistemi binari di buchi neri, per i due modelli utilizzati in GWTC-5.

Come per tutte le nostre stime,  $\chi_{\text{eff}}$  non è caratterizzato da un singolo numero ma da una distribuzione di probabilità che ci dice quanto siano probabili i diversi valori di una variabile fisica, considerati i nostri dati. La **Figura 3** mostra la distribuzione dello spin efficace; la sua forma può essere un indicatore utile del meccanismo di formazione dei buchi neri. Troviamo che la distribuzione è asimmetrica attorno allo zero, con un numero maggiore di sistemi binari con spin efficace positivo (cioè spin allineati con il momento angolare orbitale) piuttosto che negativi (anti-allineati con il momento angolare orbitale). Sulla base di questa asimmetria, troviamo che almeno il 6% dei buchi neri binari deve essere stato prodotto in canali di formazione che prediligono sistemi binari in cui gli spin sono allineati, forse a causa di effetti come maree o alle interazioni dei buchi neri con altre stelle.

Nel caso dei buchi neri ruotano rapidamente, li troviamo preferenzialmente intorno a due regioni di massa distinte, come mostrato nella **Figura 4**, con masse approssimativamente tra 10 e 20  $M_{\odot}$  o superiori a 45  $M_{\odot}$ . Per queste regioni di massa, spin così grandi sono generalmente difficili da spiegare nei modelli tradizionali di formazione stellare. Questo suggerisce che potrebbero essere coinvolti meccanismi alternativi di formazione come le fusioni gerarchiche (dove buchi neri formati dalla fusione delle generazioni precedenti di buchi neri si fondono nuovamente)! Questa possibilità sarebbe anche coerente con le recenti osservazioni di [GW241110](#) e [GW241011](#), dove entrambi i sistemi mostravano spin coerenti con fusioni gerarchiche. Sebbene questa connessione sia molto interessante, non possiamo ancora escludere con certezza altri possibili meccanismi di produzione di buchi neri con spin elevato.



**Figura 4** (adattata dalla Fig. 10 del nostro articolo): La frazione di sistemi con un buco nero che ruota rapidamente in funzione della massa. Sembra che i buchi neri con spin elevati abbiano masse nella regione tra 10 e 20  $M_{\odot}$  o in quella sopra 45  $M_{\odot}$ . La linea blu continua mostra la frazione [mediana](#) dedotta da GWTC-5.0 e la regione blu ombreggiata mostra il corrispondente [intervallo di credibilità](#) del 90% per questa frazione.

## CONCLUSIONI

Il nuovo elenco di osservazioni di onde gravitazionali contenuto in GWTC-5.0 ci offre la visione più approfondita della distribuzione della popolazione di buchi neri e stelle di neutroni che si fondono. Diverse caratteristiche affascinanti in queste distribuzioni si sono chiarite in questa analisi, tra cui la presenza di buchi neri con spin elevati. Al momento questo insieme di dati fornisce la prova più chiara che i buchi neri binari possono formarsi in diversi modi. L'ultimo aggiornamento basato sui dati di O4, GWTC-6.0, che è previsto tra qualche mese, getterà maggiore luce su queste nuove entusiasmanti scoperte.

## 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 dell'articolo scientifico completo qui: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2600045/public/>  
oppure qui: <https://arxiv.org/abs/2605.xxxxx>

Altri articoli che presentano i risultati di 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/>

Link ai dati di GWTC-5.0 resi pubblici dal Gravitational-Wave Open Science Centre: <https://gwosc.org/GWTC-5.0/>