# GWTC-4.0: PROPRIETÀ DELLA POPOLAZIONE DEGLI OGGETTI ASTROFISICI OSSERVATI

Il nostro Universo ospita stelle con un'ampia varietà di masse. Sebbene la maggior parte delle stelle abbia masse simili a quella del Sole, sappiamo che alcune stelle possono avere masse da decine a centinaia di volte più grandi. Alla fine della loro vita queste stelle massicce possono lasciare residui compatti come le stelle di neutroni e i buchi neri, e questi ultimi possono avere una gamma altrettanto ampia di masse. Possiamo ottenere informazioni sulla formazione, evoluzione ed infine sulla morte degli antenati astrofisici di questi oggetti compatti studiando le onde gravitazionali (GW) emesse dalle fusioni di sistemi binari che li contengono, e che vengono rivelate dagli interferometri laser terrestri gestiti dalle collaborazioni LIGO, Virgo e KAGRA (LVK). In generale è più utile studiare l'intera popolazione piuttosto che concentrarsi sulla singola fusione di un sistema binario di oggetti compatti. In questo documento, descriviamo le proprietà della popolazione di 161 fusioni di sistemi binari di oggetti compatti elencate in GWTC-4.0 – il più esteso catalogo di onde gravitazionali pubblicato ad oggi.

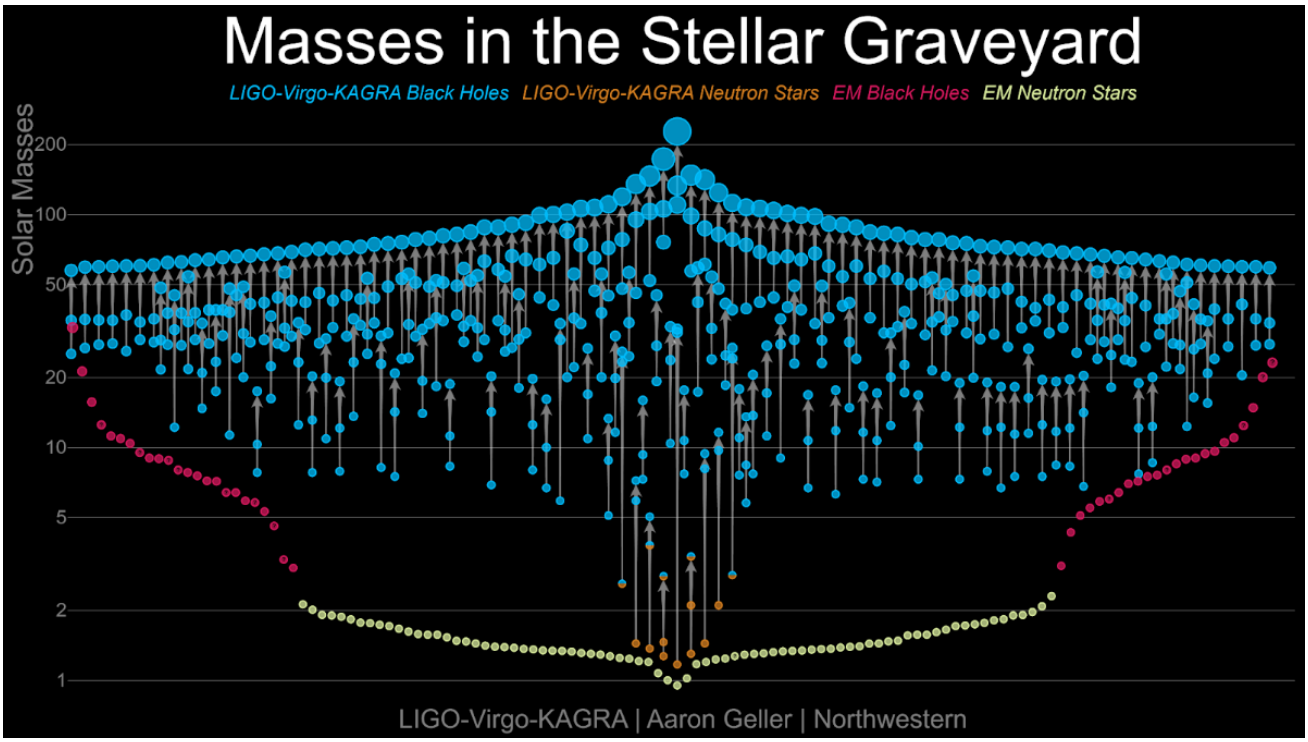


**Figura 1.** Le osservazioni con onde gravitazionali di buchi neri (blu) e stelle di neutroni (arancione) nel catalogo LIGO-Virgo-KAGRA GWTC-4.0 sono mostrate insieme alle osservazioni elettromagnetiche di buchi neri (rosso) e stelle di neutroni (giallo). Il grafico evidenzia l'ampia gamma di masse degli oggetti compatti, la regione di sovrapposizione tra buchi neri e stelle di neutroni e la struttura emergente nel cosiddetto "mass gap inferiore". Le osservazioni elettromagnetiche con punti interrogativi denotano candidati non confermati e/o determinazioni di massa altamente incerte. [Credito immagine: LIGO-Virgo-KAGRA/Aaron Geller/Northwestern]

Si pensa che ci siano due possibili canali di formazione dei sistemi binari di oggetti compatti. Il primo, chiamato "evoluzione binaria isolata", coinvolge una coppia di stelle massicce che durante la loro vita non hanno quasi nessuna interazione con altri oggetti. Infine queste stelle massicce collassano lasciando dietro di sé buchi neri o stelle di neutroni. L'altro canale, chiamato "formazione dinamica", prevede la formazione di un sistema binario quando più oggetti interagiscono tra loro in un ambiente stellare denso come gli ammassi globulari.

## PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

## METODI

Le fusioni di sistemi binari compatti presentate in questo lavoro comprendono sistemi binari formati da due stelle di neutroni (BNS), da una stella di neutroni e un buco nero (NSBH) e da due buchi neri (BBH). Il nostro articolo illustra il la storia della formazione e della fusione di questi sistemi si formino e si fondano nel tempo cosmologico. I sistemi qui discussi sono stati selezionati dal catalogo di osservazioni di onde gravitazionali GWTC-4.0 appena pubblicato e comprendono eventi rivelati nella prima parte della quarto periodo osservativo (O4a) di LVK, iniziata nel maggio 2023 e terminata nel gennaio 2024. Gli eventi sono stati identificati adottando una soglia della frequenza di falsi allarmi (FAR) inferiore ad un evento all'anno per i BBH (con 84 nuovi BBH osservati in O4a, per un totale cumulativo di 153 BBH rivelati fino ad oggi) e un FAR più stringente inferiore ad un evento ogni 4 anni per i sistemi contenenti stelle di neutroni (conservando solo GW230529 tra i nuovi candidati NSBH di O4a) per garantire che la contaminazione dovuta al rumore di fondo sia minima.

Per dedurre le proprietà della popolazione è necessario includere una correzione degli "effetti di selezione", un problema comune in molte aree dell'astronomia osservativa: i nostri rivelatori di onde gravitazionali sono più sensibili alle fusioni di sistemi di grande massa che si trovano vicino a noi piuttosto che a quelle di sistemi di massa inferiore a grande distanza, e dobbiamo tenere conto di ciò nella nostra analisi. I segnali prodotti da sistemi binari sono previsti con precisione dalla relatività generale e, a differenza della luce, tali segnali sono solo debolmente influenzati dalla materia interposta. Questo ci permette di stimare gli effetti di selezione in modo accurato e preciso. Abbiamo iniettato milioni di segnali simulati, che coprono distribuzioni plausibili di massa, spin e redshift, nel flusso di dati reale e abbiamo misurato l'efficienza di rivelazione da parte degli algoritmi di ricerca, ovvero la frazione di questi segnali simulati che sono stati rivelati con successo. In tal modo queste iniezioni possono essere utilizzate per calcolare la funzione di selezione, che ci aiuta a correggere gli effetti di selezione e consente di dedurre in modo oggettivo le distribuzioni di massa, spin e redshift della *vera* popolazione di sorgenti nell'universo, e non solo di ciò che osserviamo. Abbiamo anche convalidato e incrociato i nostri risultati utilizzando più modelli, ognuno con specifici compromessi tra accuratezza e precisione.

## RISULTATI

Nella nostra analisi ritroviamo alcune caratteristiche già identificate nei dati di GWTC-3.0. In particolare, c'è un eccesso di oggetti con masse comprese tra 1 e 2 $M_\odot$ (qui e nel seguito, $M_\odot$ si riferisce alla massa del sole), che sono molto probabilmente stelle di neutroni sia in sistemi binari di stelle di neutroni così come in sistemi composti da una stella di neutroni e un buco nero. Come possiamo vedere nella Figura 2, la distribuzione di massa dei buchi neri (cioè la proporzione relativa di buchi neri di diverse masse) è tutt'altro che regolare: può essere descritta tramite una legge di potenza con una pendenza piccola a basse masse ed una pendenza elevata ad alte masse, a cui vanno aggiunti dei picchi vicino a 10 $M_\odot$ e 35 $M_\odot$. Sembra inoltre esserci un picco vicino a 20 $M_\odot$. Infine i buchi neri nel picco di 35 $M_\odot$ formano spesso sistemi binari con compagni di masse simili.

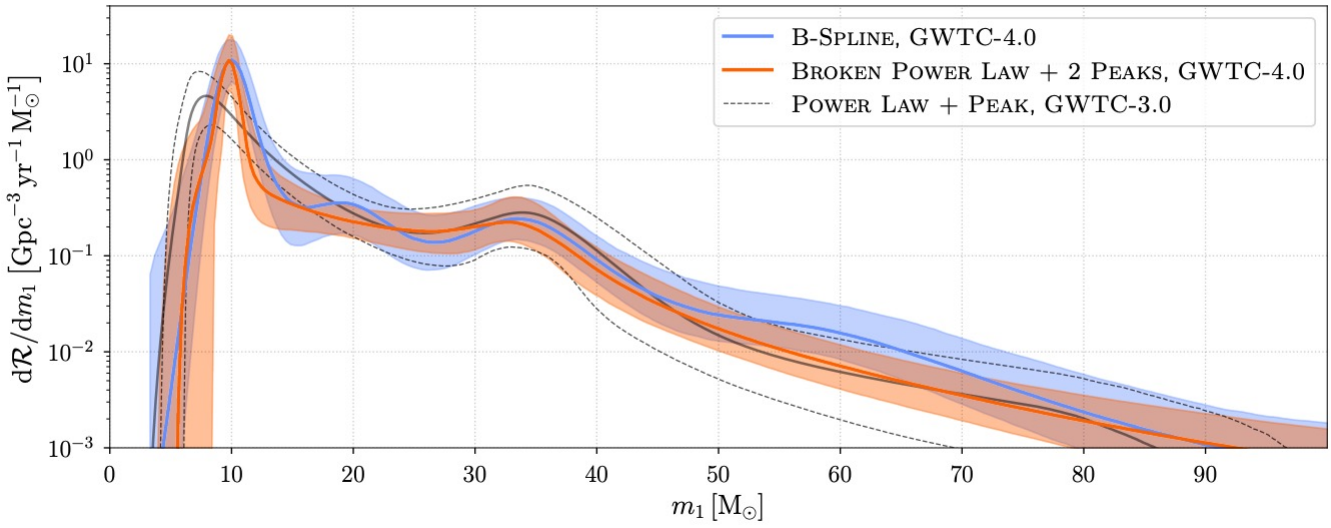


**Figura 2.** Spettro di massa del buco nero primario, cioè la distribuzione di massa del buco nero di massa maggiore (il 'primario') nei sistemi binari che abbiamo osservato. GWTC-4.0 (blu/arancione) migliora la precedente approssimazione trovata con i dati di GWTC-3.0, legge di potenza + picco singolo (nero tratteggiato), e fornisce una chiara indicazione della presenza di due picchi a ~10 $M_\odot$ e ~35 $M_\odot$.

I buchi neri sono definiti non solo dalla loro massa, ma anche dal loro spin, che è una misura di quanto rapidamente (e in quale direzione e con che allineamento rispetto all'asse orbitale) stanno ruotando. Questi spin (indipendentemente o in combinazione con le loro masse) possono darci informazioni sull'ambiente, la formazione e la storia evolutiva del sistema binario. Gli spin dei buchi neri osservati suggeriscono la presenza di più canali di formazione. La **Figura 3** mostra la distribuzione di spin dei buchi neri dedotta dai dati di GWTC-4.0. Sebbene la distribuzione sia ampia, il 90% dei buchi neri ha intensità di spin inferiori a 0,57 volte il massimo consentito dalla relatività generale. La distribuzione degli spin efficaci dedotti dalla parte della forma d'onda prima della fusione mostrata nella **Figura 4** è asimmetrica rispetto allo zero ed è inclinata verso valori positivi. In particolare, il 20-40% dei buchi neri ha spin efficaci negativi, che si pensa siano prodotti solo nel canale di formazione dinamica.

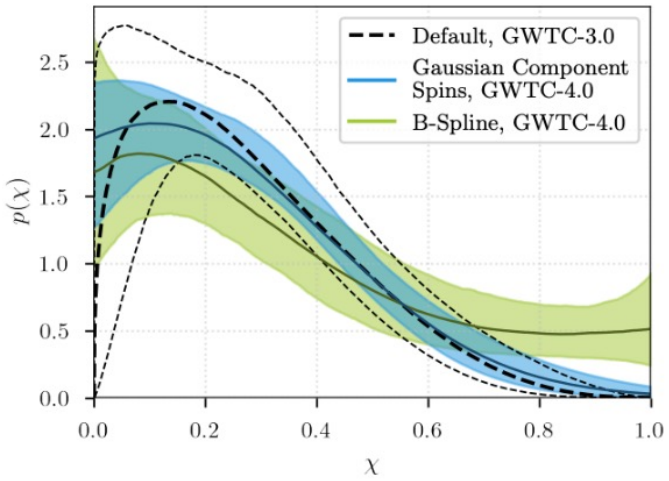


**Figura 3:** Distribuzione dei valori di spin dei singoli buchi neri (χ), dove χ è un numero adimensionale espresso come frazione del valore massimo consentito dalla relatività generale. I modelli GWTC-4.0 (blu e verde) suggeriscono velocità di rotazione mediamente più basse e con maggiore variabilità rispetto al risultato ottenuto con i dati di GWTC-3.0 (linea tratteggiata nera).

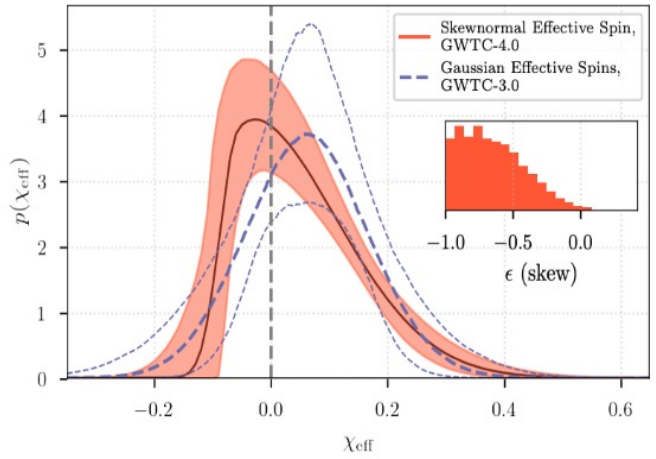


**Figura 4.** Distribuzione dello spin inspirale efficace ($\chi_{\rm eff}$). GWTC-4.0 (rosso) preferisce una distribuzione asimmetrica, mentre GWTC-3.0 (tratteggiato blu) assume una gaussiana simmetrica. Il riquadro mostra la distribuzione del parametro ε che quantifica l'asimmetria.

In GWTC-3.0, abbiamo osservato che i sistemi con un rapporto di massa vicino ad 1 (il rapporto di massa è definito dalla frazione $m_2/m_1$, dove $m_1$ è la massa del componente più pesante) hanno uno spin efficace medio più elevato rispetto ai sistemi con componenti che hanno stessa massa. In questo lavoro, confermiamo una correlazione tra il rapporto di massa e lo spin efficace, anche se non è chiaro se ciò rifletta un cambiamento nella media o un cambiamento nella larghezza della distribuzione di spin. Troviamo anche che i buchi neri al di fuori dell'intervallo di 30-40 $M_\odot$ favoriscono una distribuzione asimmetrica dello spin orientata verso valori più grandi, mentre quelli all'interno di questo intervallo non mostrano tale tendenza. Forse queste tendenze qualitativamente distinte indicano che meccanismi fisici diversi influenzano le correlazioni spin-massa nei sistemi binari di buchi neri.

Sulla base della nostra analisi dei dati di GWTC-4.0, possiamo aggiornare la frequenza con cui le fusioni di sistemi binari di oggetti compatti hanno luogo nell'Universo vicino, portando questo valore a 8-250 $\rm Gpc^{-3}$ anno per i sistemi di stelle di neutroni, a 9-84 $\rm Gpc^{-3}$ anno per i sistemi costituiti da una stella di neutroni e da un buco nero, e 14-26 $\rm Gpc^{-3}$ anno per i sistemi binari di buchi neri. Sebbene il limite massimo del tasso di fusione dei sistemi di stelle di neutroni sia diminuito, l'incertezza sulle stime del tasso di fusione dei buchi neri binari si è ridotta a quasi metà di quella determinata con GWTC-3.0. Troviamo anche che le fusioni BBH per unità di volume sono più frequenti a valori alti di redshift rispetto a quanto accade nell'Universo locale, e possiamo escludere che la frequenza di fusioni non dipenda dal redshift.

## CONCLUSIONI

Il set di dati di GWTC-4.0, più ampio rispetto a GWTC-3.0, ha permesso la scoperta di nuove caratteristiche nei nostri dati, rafforzando al contempo l'importanza di caratteristiche precedentemente note. Con il resto della quarta sessione osservativa e l'imminente quinta sessione osservativa che promettono un catalogo molto più ampio di binarie compatte, siamo pronti a perfezionare ulteriormente queste caratteristiche, colmare le lacune e tracciare le storie di vita complete delle binarie compatte. Ci aspettiamo che questi risultati svolgano un ruolo chiave nella scoperta dei processi che governano la formazione e l'evoluzione delle binarie compatte, informando la nostra più ampia comprensione dei processi astrofisici nel tempo cosmico.

## 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 oppure su arxiv.

Altri articoli che presentano i risultati di GWTC-4.0:

- Articolo introduttivo: qui oppure su arxiv.
- Descrizione dei metodi: qui oppure su arxiv.
- Descrizione dei risultati: qui oppure su arxiv.

I dati pubblicati dal Gravitational-Wave Open Science Centre data per GWTC-4.0 sono disponibili qui.



Traduzione italiana di Edoardo Milotti e Agata Trovato (dall'originale inglese https://ligo.org/science-summaries/O4a_Astro_Distrib/)