

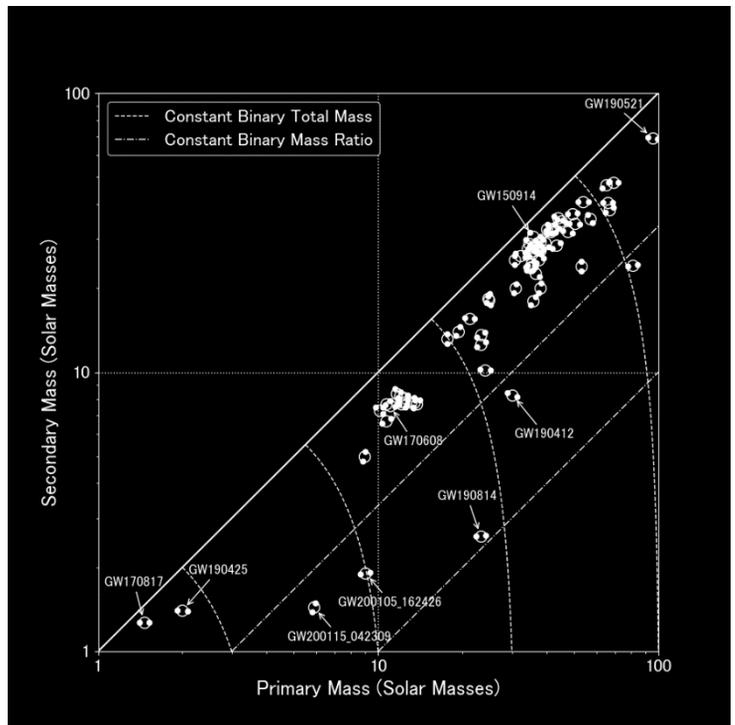
# LE PROPRIETÀ DELLE POPOLAZIONI DI BUCHI NERI E DI STELLE DI NEUTRONI DOPO IL TERZO PERIODO OSSERVATIVO DI LIGO E VIRGO

## Introduzione

Le onde gravitazionali che provengono dalla fusione di un sistema binario di **oggetti compatti** come **buchi neri** e **stelle di neutroni** possono rivelare le proprietà specifiche della singola sorgente. Invece, per capire come questi sistemi si formino ed evolvano nell'Universo abbiamo bisogno di una popolazione di eventi di questo tipo. Siamo particolarmente interessati alle distribuzioni di massa e di spin degli oggetti compatti, in quanto queste proprietà ci permettono di imparare quali processi portino alla loro formazione.

Gli scienziati si sono concentrati su due modi, o "canali", che descrivono la formazione di questi sistemi binari in natura. Nel canale di **evoluzione isolata**, i sistemi binari compatti si formano a partire da coppie di stelle massicce, ciascuna delle quali conclude la propria esistenza con un'esplosione il cui residuo è una stella di neutroni o un buco nero. Nel canale di **formazione dinamica**, le coppie di stelle di neutroni o buchi neri si formano in ambienti molto densi come gli [ammassi globulari](#) o gli [ammassi stellari nucleari](#). Ciascun canale di formazione lascia un'impronta caratteristica sulle proprietà osservabili degli oggetti compatti che riveliamo con le onde gravitazionali. Ci aspettiamo che le sorgenti rivelabili di LIGO e Virgo coprano un intervallo di massa compreso approssimativamente tra una e cento volte la massa del sole (indicata con il simbolo  $M_{\odot}$ ). Però, in questo intervallo di massa, processi astrofisici diversi possono far sì che ci siano regioni in cui non osserviamo buchi neri o stelle di neutroni. Per esempio, osservazioni precedenti di oggetti compatti nei raggi X e onde gravitazionali indicano la presenza di un **intervallo di massa inferiore** compreso tra 3 e 5  $M_{\odot}$ , che è la regione intermedia tra le stelle di neutroni più massicce e i buchi neri più leggeri. Ciò si potrebbe forse spiegare con il meccanismo fisico che governa il [processo di morte delle stelle massicce](#). Un **intervallo di massa superiore** per i buchi neri che è predetto per le [supernovae con instabilità di coppia](#) si trova nell'intervallo tra circa 50 e 120  $M_{\odot}$ . In questo caso gli strati esterni della stella morente vengono eiettati, e se resta qualcosa è solo un buco nero di piccola massa. Quindi la presenza di uno o entrambi questi intervalli di massa ci permette di capire come le stelle massicce concludono la loro vita.

C'è un'altra importante caratteristica che riguarda la storia della formazione di un sistema binario compatto, l'orientazione dell'asse di rotazione (spin) di ciascuna componente, relativamente all'asse dell'orbita. Per esempio, l'inclinazione dell'asse di spin della Terra relativamente al suo asse di rotazione intorno al Sole è ciò che causa le stagioni. Le binarie compatte che si formano in isolamento hanno di solito gli assi di spin allineati con l'asse dell'orbita, mentre quelle che si formano dinamicamente possono avere gli spin che puntano in direzioni casuali. La distanza del sistema dalla Terra è un'altra importante quantità che si può osservare per mezzo delle onde gravitazionali, e la si può esprimere come spostamento verso il rosso (**redshift**) tramite la [legge di Hubble](#). La distribuzione di redshift dà indicazioni sulla **frequenza di formazione stellare** in momenti diversi dell'evoluzione dell'Universo e sulla [composizione dell'Universo](#) (quali elementi sono presenti e le loro abbondanze relative). Questo accade perché la composizione delle stelle influenza la velocità con cui evolvono in oggetti compatti che alla fine si fondono. Così, la misura delle distribuzioni di masse, spin e redshift nelle fusioni di binarie compatte, insieme alle possibili correlazioni tra questi parametri, è uno degli obiettivi principali dell'astronomia con onde gravitazionali.



**Figura 1:** Binarie incluse nelle popolazioni analizzate nel nostro articolo, con massa primaria sull'asse orizzontale e massa secondaria sull'asse verticale. Gli eventi particolarmente interessanti sono indicati con il nome, e vengono mostrate le curve che corrispondono a rapporto di massa costante e massa totale costante. (Crediti: LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration / IGFAE / Thomas Dent.)

## Modelli e metodi

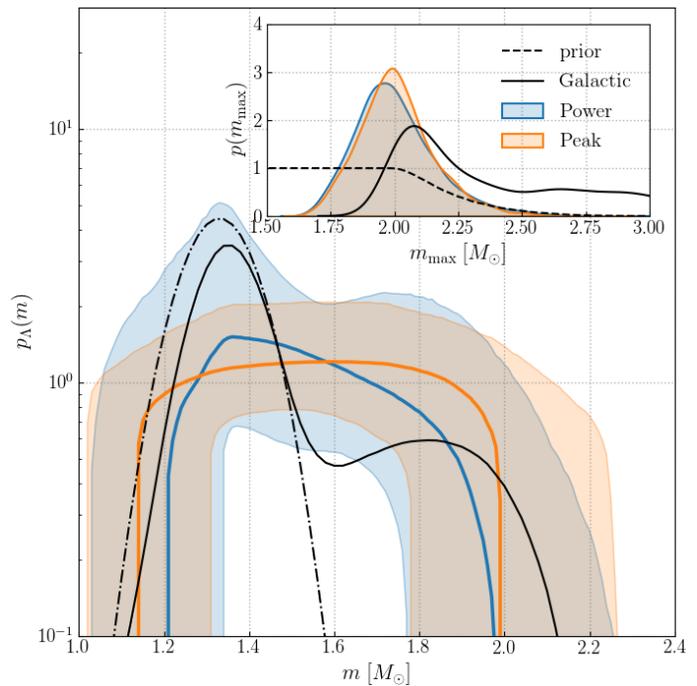
In questo lavoro utilizziamo un insieme di 74 fusioni di binarie compatte identificate nei dati di LIGO-Virgo fino alla conclusione del terzo periodo osservativo. L'insieme contiene 70 eventi di buco nero binario (BBH), due stelle di neutroni binarie (BNS) e due fusioni di una stella di neutroni con un buco nero (NSBH). Questi eventi sono stati scelti sulla base della significatività statistica con cui sono stati rivelati, per assicurarci che non ci siano contaminazioni della popolazione da parte di eventi non astrofisici. Per vincolare le proprietà globali della popolazione di oggetti compatti stimiamo fin dall'inizio i parametri (masse, spin e redshift) di ogni singolo evento e poi le combiniamo, tenendo conto dell'incertezza di ciascuna misura. Quindi applichiamo diversi modelli delle distribuzioni di massa, spin e redshift all'intera popolazione per decidere quale modello si adatti meglio ai dati. Alcuni dei modelli sono governati da parametri che si possono chiaramente associare a processi astrofisici. Un esempio è fornito dalla massa minima dei buchi neri, che ci può dire qualcosa sulla presenza o assenza di un intervallo di massa inferiore. Altri modelli hanno maggiore flessibilità nell'adattarsi a caratteristiche inattese dei dati, ma non tutti i loro parametri sono necessariamente correlati a fenomeni astrofisici. Gli oggetti compatti che riveliamo con le onde gravitazionali non sono un vero campione casuale della popolazione globale prodotta dalla natura. L'intensità del segnale di onda gravitazionale cresce con la massa del sistema e diminuisce con la distanza (o redshift), così che possiamo osservare fusioni più massicce a distanze più grandi. Noi teniamo conto di questo errore sistematico detto "[bias di Malmquist](#)" simulando segnali da una popolazione di sorgenti con parametri distribuiti casualmente e quindi misurando quali sono più facili da osservare di altre. Questo ci permette di correggere l'errore sistematico osservativo.

## La popolazione di oggetti compatti

Quando costruiamo un unico modello di tutte le fusioni di oggetti compatti, troviamo che la frequenza con cui avvengono nell'Universo per unità di volume e per unità di tempo è compresa tra 71 e 2200 fusioni per  $\text{Gpc}^3$  per anno ( $\text{Gpc}^3 = 1$  Gigaparsec cubo; 1 Gigaparsec = 1 miliardo di parsec, dove un parsec è un'unità di distanza uguale a circa 3.26 anni luce). Se tracciamo il confine tra stelle di neutroni e buchi neri in corrispondenza a  $2.5 M_{\odot}$ , otteniamo i seguenti intervalli per la frequenza di ciascuna sottopopolazione di fusioni: (13.0 – 1900.0), (7.4 – 320.0), e (16.0 – 130.0) per  $\text{Gpc}^3$  per anno per BNS, NSBH, e BBH, rispettivamente. Nonostante il numero di fusioni di sorgenti BBH che riveliamo sia significativamente più alto delle altre due classi di segnali, in realtà essi sono molto meno comuni nell'Universo. Ciò accade perché la frequenza di fusioni di sistemi binari è una funzione decrescente della loro massa, e quindi sistemi più pesanti producono fusioni sempre più rare. Però una singola legge di potenza non riesce a descrivere la relazione tra la frequenza delle fusioni e la massa primaria nell'intera popolazione di binarie, dalle più leggere stelle di neutroni ai buchi neri più pesanti. I nostri dati suggeriscono una diminuzione significativa della frequenza di fusioni con masse superiori alle stelle di neutroni, ma non c'è una chiara interruzione prima dell'intervallo di massa dei buchi neri. Avremo bisogno di più dati per determinare con certezza se questa caratteristica esiste.

## La distribuzione di massa delle stelle di neutroni

Successivamente stimiamo la distribuzione di massa delle stelle di neutroni rivelate per mezzo delle onde gravitazionali. Precedenti misure della distribuzione di massa delle stelle di neutroni hanno usato osservazioni di stelle di neutroni all'interno della nostra galassia rivelate come [pulsar](#), che emettono nella banda radio o nei raggi X ad intervalli regolari a causa della loro rotazione veloce e campi magnetici intensi. Diversamente dalle misure con le pulsar che mostrano una preferenza per una distribuzione di massa con due picchi, troviamo che le osservazioni di stelle di neutroni con le onde gravitazionali favoriscono una distribuzione con un solo picco centrata su masse più alte rispetto a quelle della popolazione galattica. Ciò potrebbe indicare che la popolazione extragalattica osservata con le onde gravitazionali è distinta dalla distribuzione galattica osservabile con le pulsar. Troviamo inoltre che la massa più alta delle stelle di neutroni sta nell'intervallo tra  $1.8$  e  $2.3 M_{\odot}$ , analogamente a quanto accade con le osservazioni delle pulsar.



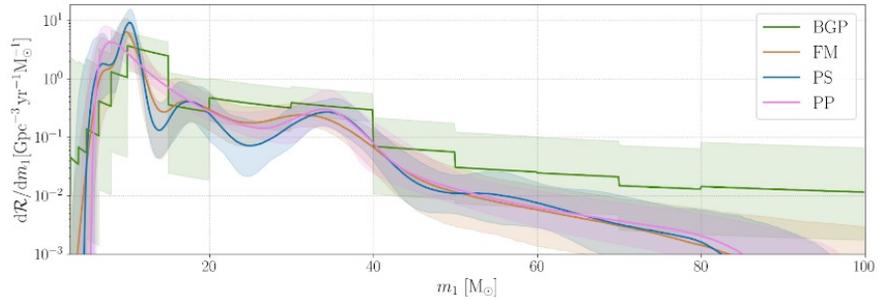
**Figura 2:** Distribuzione di massa delle stelle di neutroni nelle binarie compatte osservate con le onde gravitazionali. L'asse verticale dà la probabilità di osservare una stella di neutroni con la massa indicata sull'asse orizzontale, misurata in masse solari. Le curve continue blu e arancione mostrano le distribuzioni più probabili che ricaviamo dai dati facendo due diverse assunzioni, mentre le aree ombreggiate contengono il 90% delle distribuzioni compatibili con i dati. La linea nera a tratti e punti mostra la distribuzione più probabile dedotta dai sistemi doppi di stelle di neutroni galattiche, mentre la linea nera continua mostra la distribuzione che include tutte le stelle di neutroni galattiche. Il grafico in alto a destra mostra la distribuzione di probabilità del massimo della massa delle stelle di neutroni con un schema di colori simile. In questo caso l'asse verticale fornisce la probabilità relativa che la massa più alta di una stella di neutroni sia data dal corrispondente valore sull'asse orizzontale. La linea nera tratteggiata mostra l'ipotesi iniziale per il massimo della massa prima che i dati venissero analizzati. (Questa è la Fig. 7 del nostro articolo)

## Le proprietà dei buchi neri

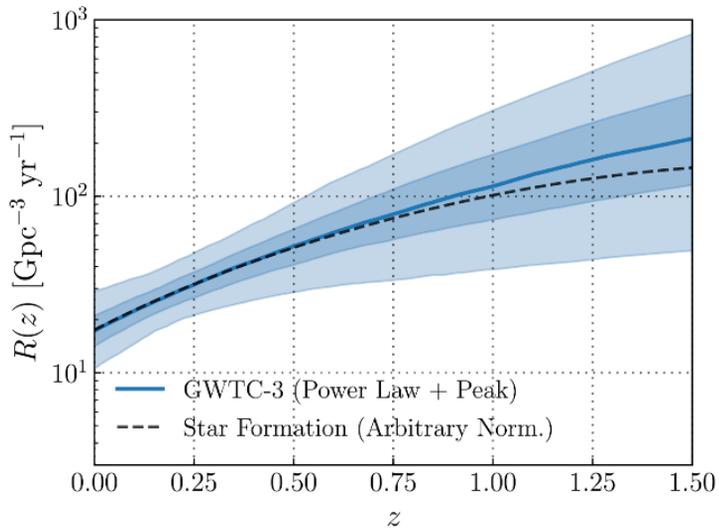
Rispetto ai precedenti vincoli sulla distribuzione di massa dei buchi neri, ora preferiamo binarie con massa diseguale e una più alta frazione di eventi di bassa massa nella popolazione. I nuovi modelli sono più flessibili e identificano due gobbe nella distribuzione dei buchi neri più pesanti in ciascun sistema binario (i cosiddetti *primari*) a circa 10 e 18  $M_{\odot}$ , in aggiunta al picco identificato in precedenza a circa 35  $M_{\odot}$ . Sebbene i modelli di evoluzione isolata riescano a spiegare l'addensamento delle sorgenti nell'intervallo 8-10  $M_{\odot}$ , l'origine degli altri picchi non è ancora capita. Analogamente all'intervallo di massa inferiore già discusso nella sezione sulla totalità della popolazione, non riusciamo ad identificare con sicurezza la presenza di un intervallo di massa superiore nel caso dei buchi neri binari. La mancanza di un taglio ben definito sopra circa 50  $M_{\odot}$ , come predetto per le supernovae con instabilità di coppia, suggerisce che ci possa essere una componente della popolazione che non si forma tramite l'evoluzione isolata. Scenari di formazione dinamica possono portare ad una gerarchia di fusioni, in cui il residuo di una fusione precedente incontra un altro oggetto compatto con cui si fonde ulteriormente. Tutto ciò può portare ad una distribuzione di massa che si estende sia nell'intervallo di massa inferiore, sia in quello superiore. Alternativamente, l'intervallo di massa superiore potrebbe venire riempito da binarie che si trovano in un ambiente gassoso, visto che i buchi neri componenti possono crescere per mezzo dell'**accrescimento** (in inglese **accretion**), quando il gas circostante ricade nel buco nero.

## Conclusioni

Il nostro nuovo e più ampio catalogo di fusioni binarie compatte ci ha permesso di sondare le proprietà dei buchi neri e delle stelle di neutroni osservate con le onde gravitazionali in modo più preciso che mai. Stiamo iniziando ad approfondire la formazione e i percorsi evolutivi degli oggetti compatti osservabili con LIGO e Virgo. Con più dati provenienti da futuri periodi osservativi, ci aspettiamo di risolvere il problema dell'esistenza degli intervalli di massa, e di comprendere meglio le caratteristiche inattese che abbiamo scoperto. Questo ci aiuterà a porre nuovi vincoli diretti su fenomeni astrofisici, sul modo in cui le stelle muoiono, su come gli oggetti compatti si accoppiano dinamicamente, e a capire di cosa è fatto l'Universo.



**Figura 3:** La distribuzione di massa primaria dedotta utilizzando quattro diverse ipotesi del modello, mostrate in tre diversi colori. Ciascuno dei tre modelli più flessibili (escluso il rosa) mostra indicazioni dell'esistenza di una sottostruttura, con picchi significativi a circa 10 e 35 masse solari e un altro possibile picco a circa 18  $M_{\odot}$ . L'asse verticale indica la velocità con cui i sistemi con la corrispondente massa primaria sull'asse orizzontale si fondono nell'Universo, e le regioni ombreggiate mostrano l'incertezza su ogni misurazione. Un valore più alto sull'asse verticale significa che quelle masse sono più comuni. (Fig. 11 del nostro articolo)



**Figura 4:** La linea blu continua mostra la densità mediana del tasso di fusione (asse verticale) in funzione del redshift (asse orizzontale). L'ombreggiatura mostra le regioni di incertezza di misura del 50% (più scure) e del 90% (più chiare). La linea nera tratteggiata è proporzionale al tasso di formazione stellare. (Fig. 13 del nostro articolo)

## Glossario

**Accrescimento (accretion):** il processo mediante il quale il gas o altra materia cade verso il centro di un sistema gravitazionale.

**Buco nero:** una regione di spazio-tempo con una gravità così intensa da impedire a qualsiasi cosa, compresa la luce, di fuoriuscire.

**Evoluzione isolata:** l'evoluzione di un sistema stellare binario dalla nascita alla morte di ciascuna delle due stelle che alla fine termina in un oggetto binario compatto.

**Formazione dinamica:** la creazione di un oggetto compatto binario dovuta ad un incontro gravitazionale casuale tra due oggetti compatti in un ambiente denso.

**Frequenza di formazione stellare:** la velocità con cui il gas viene trasformato in stelle nel tempo cosmico.

**Intervallo di massa inferiore:** l'assenza di oggetti compatti con masse comprese tra le stelle di neutroni più massicce e i buchi neri meno massicci, circa da 3 a 5 masse solari.

**Intervallo di massa superiore:** l'assenza di buchi neri con masse comprese tra circa 50 e 120 masse solari a causa di supernovae a instabilità di coppia.

**$M_{\odot}$  (massa solare):** La massa del Sole (circa  $2 \times 10^{30}$  chilogrammi). La massa solare è un'unità comune per rappresentare le masse in astronomia.

**Oggetto compatto:** oggetti estremamente densi, come nane bianche, stelle di neutroni o buchi neri, che corrispondono ai punti terminali del ciclo di vita di una stella.

**Redshift:** quantità utilizzata per misurare le distanze cosmologiche, basata sullo stiramento della radiazione verso lunghezze d'onda più lunghe (più rosse) da parte dell'espansione di Hubble dell'universo.

**Spin:** il momento angolare di un oggetto compatto, dovuto alla materia solida rotante di una stella di neutroni o a una proprietà "rotazionale" dello spazio-tempo deformato attorno a un buco nero.

**Stella di neutroni:** un oggetto estremamente denso composto prevalentemente da neutroni, che rimane dopo la morte di una stella massiccia in un'esplosione di supernova.

## Per saperne di più

Leggi l'articolo scientifico completo:  
<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2100239/public/main>

Leggi le notizie riguardanti GWTC-3:  
<https://www.ligo.org/news.php>  
<https://www.virgo-gw.eu/gwtc3>  
<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>

Rilascio dati GWTC-3:  
<https://www.gw-openscience.org/>

## 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/)

