

LE PROPRIETÀ DELLE POPOLAZIONI DI OGGETTI COMPATTI DOPO IL RUN O3A DI LIGO / VIRGO

Come sono fatti i buchi neri tipici? Quanti ce ne sono? La popolazione di buchi neri è cambiata durante l'evoluzione dell'Universo? Cosa ci dicono le onde gravitazionali riguardo la formazione dei buchi neri?

Il terzo run osservativo (O3) degli osservatori LIGO e Virgo è terminato e con esso anche la stesura del nostro [secondo catalogo di osservazioni di onde gravitazionali](#) (GWTC-2) che include molti nuovi eventi associati a onde gravitazionali, osservati durante O3a, la prima metà di O3. Con questo nuovo catalogo abbiamo più che quadruplicato il numero di eventi rispetto a quelli che erano stati affidabilmente identificati nel nostro precedente catalogo ([GWTC-1](#)). E proprio come il nostro primo catalogo ci aveva permesso di andare oltre alla conoscenza dei buchi neri che avevamo ottenuto con le osservazioni elettromagnetiche, ne aveva svelato nuove distinte popolazioni e aveva dato vita a nuove domande riguardo la loro origine, questo catalogo solleva ulteriori domande sulle popolazioni astrofisiche di buchi neri e sfida le nostre migliori teorie sulla loro formazione.

I buchi neri astrofisici sono descritti da due proprietà: la loro massa e il loro spin. Le **coppie** astrofisiche di buchi neri sono ulteriormente caratterizzate dall'orientamento degli spin dei buchi neri rispetto al [piano orbitale](#) del sistema binario e dalla nostra distanza dal sistema binario. La distanza è un indicatore del [tempo cosmico](#) di fusione del sistema binario, poiché sappiamo che le onde gravitazionali [viaggiano alla velocità della luce](#).

Gli scienziati hanno proposto tre scenari possibili per la formazione dei buchi neri binari: "campo stellare", dinamico e primordiale. I sistemi binari di [buchi neri primordiali](#) sono costituiti da buchi neri che non sono mai stati stelle. Questi buchi neri si sono formati dalla [fluttuazioni di densità](#) nei primi minuti dell'universo, proprio dopo il [big bang](#). I sistemi binari del campo stellare sono costituiti da buchi neri che sono all'ultimo stadio della vita di alcune stelle: stelle che sono collassate sotto l'effetto della loro stessa gravità. I sistemi binari dinamici contengono buchi neri che si sono formati in punti lontani di un ambiente densamente popolato e che si sono incontrati solo più tardi. Ciascun scenario è associato a distribuzioni diverse dei parametri del sistema – parametri che possiamo misurare e che ci possono aiutare a distinguere tra questi diversi tipi di sistemi binari. Per esempio, ci si aspetta che i sistemi binari dinamici abbiano spin disallineati, mentre in generale i sistemi del campo stellare dovrebbero avere spin allineati.

I sistemi che si trovano in questo catalogo ampliano l'intervallo di massa dei sistemi binari di buchi neri riportati in quello precedente. All'estremo inferiore, gettano un ponte oltre il misterioso ["intervallo di massa"](#) tra le più pesanti stelle di neutroni e la popolazione dei buchi neri. All'estremo superiore, superano il taglio di massa previsto per le esplosioni di [supernova a instabilità di coppia](#). Osserviamo anche spin che sono distintamente non nulli e almeno in parte controallineati rispetto al [momento angolare](#) totale, cosa che suggerisce che almeno parte della popolazione abbia origine dinamica. Queste e altre scoperte chiave in questo catalogo sono passi importanti per dare risposte agli interrogativi sulla popolazione di buchi neri che occupa il nostro Universo, e forse anche per porre le domande giuste a questo riguardo.

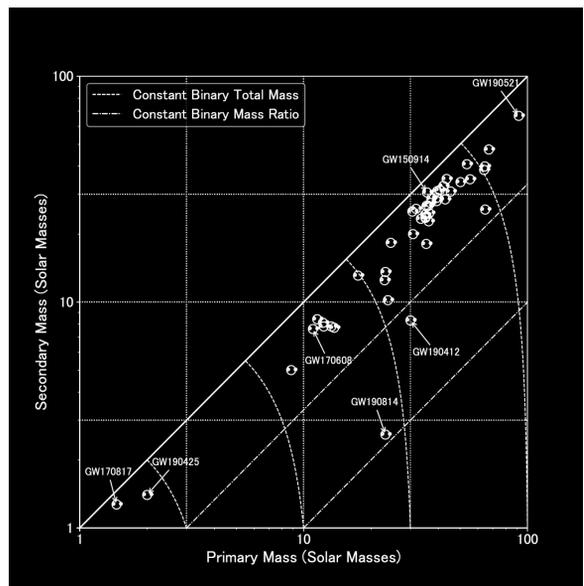


Figura 1: Masse degli oggetti componenti i sistemi binari di cui si sono osservate le fusioni in O1, O2 e O3a e che sono state usate per inferire le proprietà delle popolazioni in questo articolo. Vengono indicati con il loro nome alcuni eventi selezionati. (Crediti: LIGO-Virgo Collaboration / IGF AE / Thomas Dent.)

GWTC-2, IL SECONDO CATALOGO DELLE ONDE GRAVITAZIONALI TRANSITORIE

I dati per O3a, misurati con i rivelatori Advanced LIGO e Virgo, sono stati raccolti da aprile a ottobre 2019. Durante questo tempo sono state osservate 39 nuove fusioni: un sistema binario di stelle di neutroni, 36 sistemi binari che con ottima probabilità sono buchi neri e due sistemi candidati ad essere composti da un buco nero ed una stella di neutroni. Insieme alle 11 fusioni di [GWTC-1](#), questo porta il totale a 50 eventi in GWTC-2, tutti con una [frequenza di falsi positivi](#) inferiore a due all'anno. Per aumentare al purezza del campione qui abbiamo preso la frequenza di falsi positivi inferiore a 1 all'anno, passando così a 47 eventi.

DISTRIBUZIONE DI MASSA

Si crede che in buona parte i buchi neri siano i resti del collasso gravitazionale di una stelle e della successiva esplosione di supernova. Poiché la distribuzione di massa delle stelle segue una legge di potenza ci potremmo aspettare che i buchi neri facciano lo stesso.

In GWTC-1, la distribuzione di massa si adattava bene ad una legge di potenza troncata con un indice compreso tra -0.1 e 3.1 , nell'intervallo tra $\sim 7.9M_{\odot}$ e $\sim 42.0M_{\odot}$. Il valore inferiore dell'intervallo era misterioso e non ben vincolato. Il valore superiore veniva spiegato dal meccanismo di instabilità di coppia nelle supernove: si ritiene che il meccanismo si attivi quando una stella raggiunge una densità abbastanza alta da produrre [coppie elettrone-positrone](#), creando così un'improvvisa diminuzione di pressione interna nella stella. Ciò porta ad un collasso e ad un'esplosione che distrugge la stella, senza lasciare un buco nero residuo. Si pensa che le supernove a instabilità di coppia impediscano la formazione di buchi neri residui nell'intervallo di massa $\sim 50-150 M_{\odot}$.

Con GWTC-2, tutto questo è cambiato. Il buco nero più leggero è più piccolo di quanto si credesse possibile ($2.3M_{\odot}$ o $6M_{\odot}$, se si assume che l'oggetto di massa più bassa in [GW190814](#) sia un buco nero oppure una stella di neutroni), e il buco nero più massiccio è più grande ($\sim 85M_{\odot}$ o $55M_{\odot}$ se includiamo oppure no [GW190521](#), un evento estremo in cui uno dei due buchi neri ha una massa di $\sim 85M_{\odot}$). Adesso la distribuzione preferita è una legge di potenza con indice tra 2.00 e 2.73 . Invece di un taglio netto ad alte masse, la distribuzione è meglio caratterizzata con l'inserimento del picco di una [curva a campana](#) nella regione tra 28.0 e $38.0M_{\odot}$. Che spiegazione potrebbe esserci per un picco di questo genere? Ambienti stellari molto densi, come quelli nel nucleo degli [ammassi globulari](#) potrebbero far sì che buchi neri di passaggio riescano a disturbare il [potenziale gravitazionale](#) di buchi neri binari, restringendo il sistema ed aumentando la frequenza delle loro fusioni. Si dice che sistemi binari di questo tipo si fondono per mezzo di interazioni dinamiche.

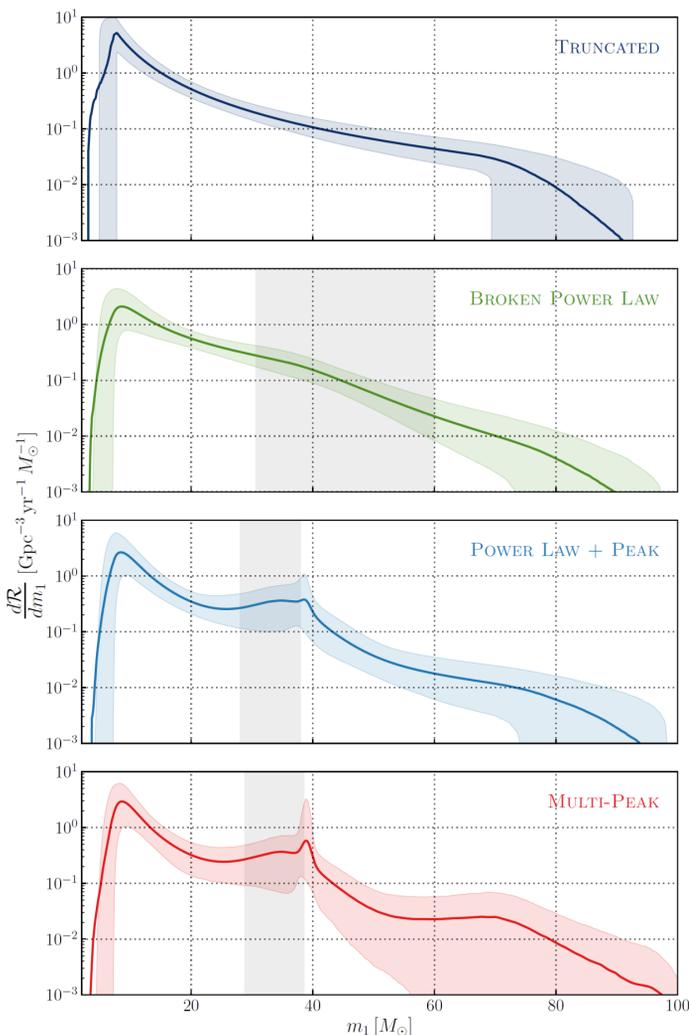


Figura 2: Questi grafici mostrano la probabilità di osservare una certa massa di buco nero per quattro diverse ipotesi sulla forma della distribuzione di massa. La curva continua è la predizione media, mentre la regione colorata mostra l'intervallo di credibilità al 90%. I dati mostrano una preferenza per i modelli con un picco nella distribuzione. (Figura 3 del nostro [articolo](#))

Le interazioni dinamiche creano una particolare distribuzione di massa e spin dei buchi neri che si fondono. La conservazione della quantità di moto favorisce masse più grandi con velocità più basse, e masse piccole con velocità più alte, confinando gli oggetti di alta massa a orbite vicine al centro dell'ammasso. I sistemi binari di alta massa si trovano così in un ambiente più denso, con una probabilità maggiore di interazione dinamica e quindi contano di più nella distribuzione di massa delle fusioni di buchi neri. Se i buchi neri prodotti da fusioni dinamiche si fondono più avanti con un altro buco nero (in un sistema binario detto di seconda generazione) potrebbe essere possibile vedere buchi neri che si fondono nella regione di instabilità di coppia. Altri meccanismi di formazione, come i buchi neri primordiali, potrebbero produrre uno o più picchi tipo curva a campana nello spettro di massa.

In alternativa, se il taglio netto che caratterizza le supernove a instabilità di coppia potesse venire addolcito, questo accumulo di sistemi binari di alta massa potrebbe venire spiegato senza la necessità di interazioni dinamiche. I diversi scenari di formazione sono stati tenuti in conto aggiungendo una curva a campana in cima alla nostra legge di potenza di riferimento. Se più di un meccanismo fosse presente, ne terremmo conto aggiungendo altre curve a campana a masse più alte. La **Figura 2** mostra i diversi modelli astrofisici considerati per le popolazioni.

Inoltre, mentre ogni sistema binario di GWTC-1 aveva masse componenti molto simili (cioè rapporti di massa vicini ad 1), GWTC-2 contiene due eventi, [GW190814](#) e [GW190412](#), con rapporti di massa chiaramente diversi da 1. GW190814, che è fuori statistica sia per minima massa componente che per rapporto di massa, potrebbe segnalare l'esistenza di una nuova popolazione.

DISTRIBUZIONE DI SPIN

È conveniente parametrizzare le forme d'onda gravitazionali con due parametri fenomenologici: lo spin di precessione efficace e lo spin efficace. Lo spin di precessione efficace descrive la [precessione](#) del piano orbitale indotta dallo spin, mentre lo spin efficace descrive il modo in cui la fusione viene accelerata o rallentata a causa dell'allineamento dello spin con il [momento angolare](#).

Si pensa che i sistemi binari di buchi neri che si formano nel campo stellare contengano componenti con spin quasi allineati, mentre ci si aspetta che i sistemi che si formano dinamicamente siano disallineati. Perciò ci si aspetta che questi ultimi mostrino la presenza di [precessione](#), e che circa la metà abbia spin anti-allineati.

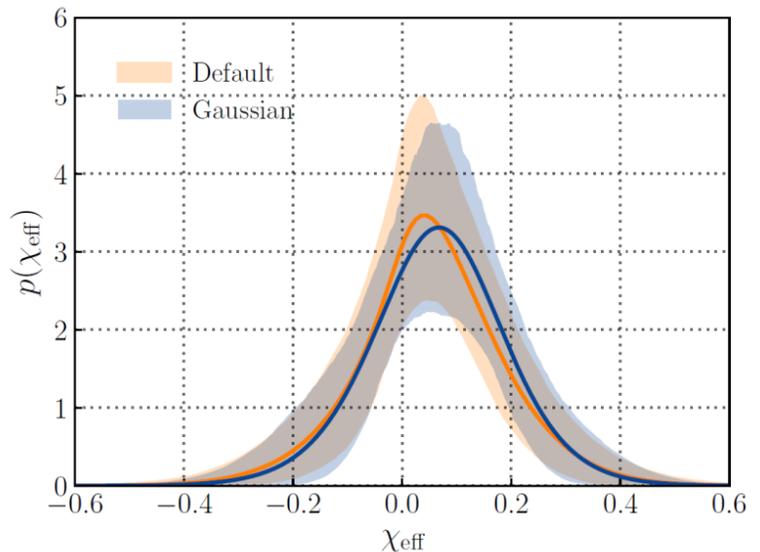


Figura 3: Il grafico mostra la distribuzione del parametro di spin efficace χ_{eff} per due diversi modelli. Si vede che mentre la maggior parte degli spin sono allineati con il momento angolare, c'è una frazione significativa in cui parte dello spin ruota in direzione opposta. (Adattato dalla Figura 11 del nostro [articolo](#))

Mentre i sistemi binari di buchi neri in GWTC-1 non mostravano alcun segno di questa precessione relativistica dello spin, noi vediamo segni di precessione in GWTC-2. Inoltre, benché ci sia una preferenza per piccoli spin allineati con il momento angolare orbitale, il catalogo mostra che tra il 2% e il 50% dei sistemi binari di buchi neri hanno spin anti-allineati (e questo anche eliminando GW190814, il caso che si allontana di più dalle medie in tutte le categorie)

Ci si aspetta che sistemi che contengono buchi neri formati in precedenti fusioni ereditino buona parte del loro spin dal momento angolare dei sistemi progenitori. Perciò la pistola fumante che segnala una formazione dinamica sarebbe rappresentata dall'identificazione di diverse distribuzioni di spin per diverse componenti di massa. Noi però non troviamo alcuna indicazione di una popolazione di questo tipo.

FREQUENZA E REDSHIFT

Si pensa che l'Universo si stia [espandendo in modo omogeneo](#) e che lo stia facendo dal momento del big bang. Questa espansione trascina tutto con sé, incluse le onde elettromagnetiche e gravitazionali. Quando un'onda si allunga, la sua frequenza cambia. Per la luce visibile questo significa passare dal blu al rosso, vale a dire c'è uno [spostamento verso il rosso](#) (redshift). Tanto più un oggetto è lontano, tanto maggiore è lo spostamento verso il rosso. Perciò questo spostamento è un'altra misura di distanza, e, dal momento che la velocità della luce e delle onde gravitazionali è fissata, è anche una misura di tempo. Redshift più alti indicano sistemi binari più antichi.

Misurando la correlazione tra redshift e frequenza delle fusioni di sistemi binari di buchi neri, e confrontandola con la frequenza di formazione delle stelle ci permette di capire meglio come si formano i sistemi binari compatti. In un cubo con lati lunghi 1000 volte la distanza che ci separa dalla [galassia di Andromeda](#), ci aspettiamo che ci siano ogni anno 11 fusioni di sistemi binari. Come mostrato nella **Figura 4**, questa frequenza è compatibile con una distribuzione di sistemi binari che non evolvono nel corso del tempo cosmico, ma anche con una distribuzione che segue localmente la frequenza di formazione delle stelle. Con l'aumento del tempo di osservazione e con un solo nuovo evento rivelato, troviamo che il numero di fusioni di sistemi binari di stelle di neutroni sarebbe 151, un numero inferiore a quello di GWTC-1.

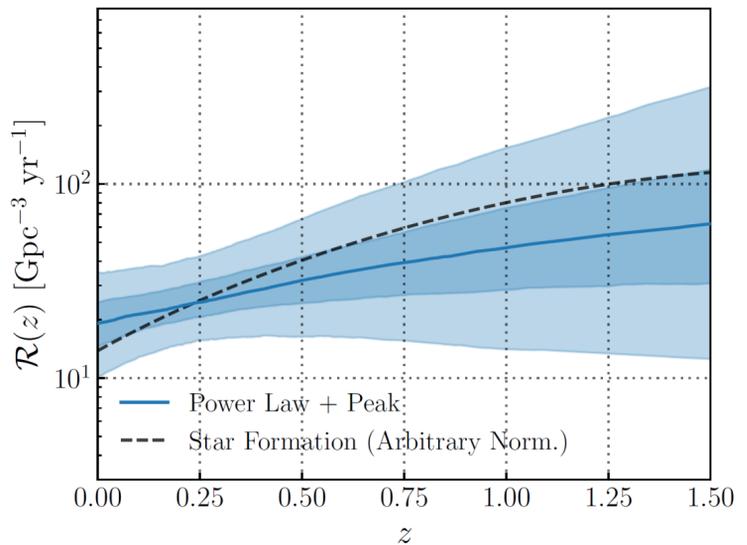


Figura 4: La frequenza di fusioni per unità di volume in funzione del redshift, nel modello Evoluzione a legge di potenza. La linea continua mostra il valore mediano, mentre la regione colorata scura (chiarata) mostra l'intervallo di credibilità ad "1-sigma" ("2-sigma"). I dati indicano un possibile cambiamento della frequenza in funzione del redshift, ma sono anche compatibili con una distribuzione piatta. (Figura 14 del nostro [articolo](#))

DOMANDE FUTURE

Benché ora stia emergendo un'immagine più chiara delle proprietà delle popolazioni di sistemi binari compatti, restano alcune domande chiave: Come possiamo caratterizzare al meglio le deviazioni dalla legge di potenza nello spettro di massa dei buchi neri primari, e qual è l'origine fisica di queste nuove caratteristiche? Qual è l'origine delle fusioni di buchi neri nella parte alta dell'intervallo di massa: fusioni gerarchiche, stelle che producono residui più pesanti di quanto atteso dalla teoria delle supernove a instabilità di coppia, oppure qualcos'altro? L'osservazione di spin anti-allineati indica delle fusioni dinamiche? Quest'ipotesi potrebbe venire confermata dalle osservazioni di sistemi binari eccentrici, anch'essi un prodotto di fusioni dinamiche. Un'osservazione certa di fusioni gerarchiche (caratterizzate da alta massa e alto spin) potrebbe anche costituire una prova circostanziale del ruolo delle fusioni gerarchiche nella regione osservabile da LIGO-Virgo.

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

<http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>

Leggete l'articolo completo gratis online [qui](#).

Leggete l'articolo principale sul catalogo GWTC-2 gratis online [qui](#).

Esplorate i dati del catalogo GWTC-2 [qui](#) e presso il [Gravitational Wave](#)

[Open Science Center](#).



Visitate i nostri siti web:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>



GLOSSARIO

Esplosione di supernova: Una breve e luminosa esplosione stellare che avviene quando una stella massiccia raggiunge l'ultimo stadio della sua evoluzione.

Legge di potenza per la distribuzione di massa: In questo modello la probabilità di trovare un buco nero con una certa massa è proporzionale ad una potenza della massa stessa: $p(m) \propto m^\alpha$ dove α è la pendenza della legge di potenza che esprime la velocità di cambiamento della probabilità in funzione della massa.

Massa solare M_\odot : la massa del Sole. La massa solare è usata di frequente per rappresentare le massa in astronomia. 1 massa solare = 1.989×10^{30} kg.

Spin: Velocità e direzione di rotazione (vale a dire il momento angolare) di un buco nero intorno al suo centro di massa.