

# L'evoluzione degli oggetti compatti e delle loro galassie ospiti nel tempo cosmico \*

**Filippo Santoliquido**

Gran Sasso Science Institute, L'Aquila

---

Le onde gravitazionali ci permettono di svelare processi unici circa l'evoluzione degli oggetti compatti, come i buchi neri e le stelle di neutroni. La collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA (LVK), ovvero il gruppo che gestisce gli strumenti per rilevare e analizzare le onde gravitazionali, ha finora registrato 90 eventi associati alla fusione di questi oggetti compatti.

Negli ultimi anni la mia area di ricerca ha suscitato grande interesse, soprattutto per le straordinarie possibilità offerte dalla prossima generazione di osservatori terrestri. Strumenti come l'Einstein Telescope saranno in grado di misurare la fusione di buchi neri a distanze incredibili, quando l'universo – che oggi ha circa 13,8 miliardi di anni – aveva appena 120 milioni di anni. Nella mia tesi di dottorato mi sono concentrato sull'analisi di come le caratteristiche degli oggetti compatti e delle loro galassie ospiti cambiano nel corso della vita dell'universo.

## Introduzione

In meno di dieci anni il campo dell'astrofisica delle onde gravitazionali ha fatto significativi progressi nella nostra comprensione dell'universo, riuscendo a diventare uno strumento efficace per esplorare domande complesse. Per esempio, la prima rilevazione diretta delle onde gravitazionali è stata fondamentale in questo senso, confermando l'esistenza di buchi neri in grado di fondersi tra loro. Sono proprio le fusioni di oggetti compatti che generano i segnali di onde gravitazionali più forti, rendendoli così più facilmente osservabili da terra. La teoria della relatività generale ci insegna che più grande è la massa dei sistemi coinvolti, più forte è il segnale che questi emettono. Pertanto, i buchi neri di origine stellare che hanno una massa da circa 3 a circa 150 volte la massa del Sole emettono segnali più facilmente misurabili rispetto a quelli emessi dalle stelle di neutroni, la cui massa è poco più grande di quella del Sole.

La maggior parte degli eventi associati all'emissione di onde gravitazionali è generata dalla fusione di due oggetti compatti. Questi fino a poco prima di fondersi tra loro appartengono allo stesso sistema, detto *binaria*. Per esempio, una binaria di buchi neri è un sistema formato da due buchi neri che ruotano attorno a un punto comune. Uno degli sforzi compiuti dagli astrofisici teorici è capire perché e come questi due buchi neri appartengono alla stessa *binaria* e come riescono poi a fondersi tra loro.

Durante questo ultimo decennio, la collaborazione LVK ha effettuato tre periodi di osservazione, chiamati *O1*, *O2* e *O3*. Alla fine del 2018, la collaborazione LVK, basandosi sui dati raccolti in *O1* e *O2*, ha pubblicato il primo catalogo di fusioni di oggetti compatti rilevati tramite onde gravitazionali, riportando un totale di dieci fusioni di binarie di buchi

---

\* L'Autore presenta qui i contenuti essenziali delle ricerche svolte nel corso del Dottorato di Ricerca che gli sono valsi il "Premio Pietro Tacchini" della SAIT per l'anno 2023 – XVIII edizione; premio assegnato alla miglior tesi di Dottorato di carattere astrofisico.

neri (BBH) e una fusione di una binaria di stelle di neutroni (BNS). Questo catalogo contiene la già citata prima rivelazione diretta della fusione di due buchi neri e la prima rivelazione della fusione di due stelle di neutroni, che è stato anche il primo e unico, al momento della stesura di questo articolo, evento multi-messaggero.

Il secondo catalogo è stato pubblicato alla fine del 2020 e riporta la fusione di una binaria di buchi neri con la massa totale più grande, pari a circa 160 volte la massa del Sole.

Questa misura ha messo alla prova i modelli astrofisici che interpretano tali sistemi esotici, portando a nuove e interessanti idee per i loro scenari di formazione.

Ad oggi, il catalogo più aggiornato è il terzo, con un totale di 90 eventi (ABBOTT 2023).

Questo catalogo riporta le prime due rilevazioni di binarie formate da un buco nero e una stella di neutroni. Da questo catalogo è quindi possibile estrarre informazioni sulle proprietà della popolazione considerando tutte e tre le classi di fusioni di oggetti compatti: binarie di stelle di neutroni (BNS), binarie formate da un buco nero e una stella di neutroni (BNHS) e binarie di buchi neri (BBH).

Una delle diverse domande che emergono osservando queste rilevazioni riguarda l'interpretazione dei tassi di fusione degli oggetti compatti. Il tasso di fusione è il numero di oggetti compatti che fondono per unità di tempo e unità di volume ed è una quantità estratta attraverso un'analisi statistica dalla popolazione di oggetti compatti. Questo numero rappresenta una misura chiave poiché ci dice quanto il nostro universo è capace di produrre binarie di oggetti compatti in grado di fondersi tra loro. La collaborazione LVK fornisce questa stima sia nell'universo locale sia in funzione del *redshift*.

Per semplicità, in questo contesto definiremo il *redshift* sia come la misura della distanza della binaria di oggetti compatti dal rilevatore di onde gravitazionali, sia come una stima dell'età dell'universo. Pertanto, più è alto è il *redshift*, più distanti sono gli oggetti e quindi più difficilmente misurabili, ma allo stesso tempo sono caratteristici di un momento passato della storia del nostro universo. Al contrario, sistemi a basso *redshift*, altrimenti detto *universo locale*, sono più facili da misurare poiché più vicini alla nostra Galassia.

Gli attuali osservatori di onde gravitazionali riescono a misurare una fusione di una binaria di buchi neri a *redshift* inferiore a 1. Con lo scopo di estendere il massimo *redshift* raggiungibile dalla rete di rilevatori di onde gravitazionali, sono previsti diversi miglioramenti: dall'aggiornamento della rete corrente allo sviluppo delle future generazioni di rilevatori: l'Einstein Telescope (ET) e il Cosmic Explorer. Questi strumenti presentano caratteristiche senza precedenti, essendo in grado di rilevare la fusione di buchi neri a *redshift* maggiore di 100 (BRANCHESI 2023).

Nella mia tesi di dottorato, ho studiato l'evoluzione delle proprietà degli oggetti compatti e delle loro galassie ospiti nel corso del tempo cosmico (o equivalentemente in funzione del *redshift*). Per raggiungere questo obiettivo, ho dovuto considerare due ampi aspetti. Il primo è l'evoluzione e la formazione degli oggetti compatti, sappiamo infatti che questi sono il prodotto finale dell'evoluzione di stelle massicce. Il secondo è l'evoluzione delle proprietà delle galassie che popolano il nostro universo. Ho sintetizzato e implementato la combinazione di questi due ambiti in due codici numerici: *cosmoRate* (SANTOLIVIDO 2020) e *galaxyRate* (SANTOLIVIDO 2022). Questi codici ricostruiscono l'evoluzione delle proprietà delle fusioni di oggetti compatti con la storia dell'universo e gli interessati possono trovare una loro copia sul sito <https://filippo-santolivido.github.io/software/>.

## ***cosmoRate* e il tasso di fusione**

Nella mia tesi di dottorato, ho calcolato i tassi di fusione di binarie di oggetti compatti. Il tasso di fusione non è altro che il numero di binarie di oggetti compatti che fondono nel

corso della storia dell'universo. Determinare l'evoluzione del tasso di fusione è impegnativo a causa di diverse fonti di incertezza. Per affrontare questo problema, come già detto, ho sviluppato un codice chiamato *cosmoRate*. Sappiamo che gli oggetti compatti si formano dalle stelle più massicce alla fine della loro vita. Pertanto, è fondamentale conoscere il numero e le caratteristiche delle stelle massicce generate dall'Universo per comprendere quante fusioni di buchi neri si sono verificate nel corso della sua storia. In questo senso *cosmoRate* ci aiuta, poiché è altamente adattabile e consente di esplorare in diverse regioni dello spazio dei parametri che influenzano significativamente il tasso di fusione.

La formazione e l'evoluzione di stelle massicce in grado di generare oggetti compatti è implementata nei cosiddetti codici di sintesi di popolazione. Questi sono una serie di programmi numerici gestiti da computer ad alte prestazioni in grado di ricostruire la vita evolutiva di centinaia di milioni di stelle in sistemi binari. Il che è possibile perché utilizzano relazioni semplici e analitiche per analizzare l'evoluzione della stella singola e l'interazione fra di esse. Osservando i codici di sintesi di popolazione come scatole nere, notiamo che in ingresso accettano una serie di condizioni iniziali e in uscita forniscono cataloghi di fusioni di oggetti compatti. Un esempio di questi codici di sintesi di popolazione è *sevn* (LORIO 2023). Se ne può trovare una copia nel sito <https://gitlab.com/sevncodes/sevn>.

*cosmoRate* combina cataloghi di oggetti compatti con una stima basata su osservazioni del tasso di formazione stellare in funzione della metallicità. Il tasso di formazione stellare è una misura della capacità dell'universo di produrre nuove stelle e molteplici osservazioni hanno dimostrato che questa quantità dipende proprio dalla metallicità. La metallicità in astronomia non è altro che la misura della frazione di tutti gli elementi più pesanti dell'elio. Per esempio, il Sole ha una metallicità del 2%, questo significa che il 2% della sua massa è composta da elementi che non sono idrogeno ed elio. La metallicità ha un impatto significativo sull'evoluzione della vita di una stella. Per esempio, con *sevn* abbiamo imparato che i buchi neri formati da stelle principalmente composte da idrogeno ed elio si fondono in modo molto efficiente.

Gli elementi più pesanti di idrogeno ed elio si formano all'interno delle stelle durante i processi di combustione nucleare. Stelle formate quando l'universo era ancora giovane tenderanno ad avere un contenuto di metalli inferiore rispetto a stelle formate nell'universo locale. Questo accade poiché ogni generazione di stelle si forma dal gas rilasciato dalla generazione precedente, che risulterà quindi sempre più ricco di metalli mano a mano che l'universo invecchia: è un fenomeno che prende il nome di arricchimento chimico. Di conseguenza, il numero di buchi neri che si sono fusi durante la storia dell'universo dipende dalla nostra precisa conoscenza del tipo di stelle che li hanno generati.

Il tasso di formazione stellare è una quantità ricavata da osservazioni di stelle e galassie ed è pertanto, come ogni altra misura, affetto da incertezze. Sono stato in grado attraverso *cosmoRate* di controllare l'effetto delle incertezze dovute al tasso di formazione stellare in funzione della metallicità. Per esempio, il tasso di fusione delle BNS non è significativamente influenzato dall'evoluzione della metallicità. Al contrario, l'evoluzione della metallicità ha un enorme impatto sul tasso di fusione delle BBH. Gli oggetti compatti possono formarsi attraverso due principali canali di formazione: l'evoluzione di binarie isolate e quello cosiddetto dinamico. Il canale di formazione isolato si ha quando studiamo l'evoluzione di due stelle che interagiscono solamente fra loro. Queste interazioni sono riprodotte nei codici di sintesi di popolazione. Si ha il canale di formazione dinamico invece quando le binarie di stelle massicce e stelle singole interagiscono fra loro in ammassi stellari. Questo canale di formazione è studiato

attraverso le simulazioni a  $N$  corpi. Questo tipo di simulazioni segue sia l'evoluzione delle interazioni dinamiche fra le varie stelle che compongono l'ammasso, che l'evoluzione di stelle in sistemi binari. Ovvero, i codici a  $N$  corpi sono integrati con i codici di sintesi di popolazione.

I giovani ammassi stellari sono stati il luogo di nascita più comune di stelle massicce nel corso di tutta la storia cosmica. Di conseguenza, una grande frazione di BBH, BNHS e BNS potrebbe essersi formata in giovani ammassi stellari e potrebbe conservare il segno di processi dinamici che avvengono in questi ultimi. Ad esempio, l'efficienza di fusione delle BBH dinamiche a metallicità solare è cento volte più alta rispetto all'efficienza di fusione delle BBH isolate. La ragione è che gli scambi dinamici potenziano la fusione delle BBH formate da stelle ricche di metalli. Di conseguenza, il tasso di fusione delle BBH dinamiche è maggiore rispetto al tasso di fusione delle BBH isolate. D'altra parte, il tasso di fusione delle BNS dinamiche è circa la metà rispetto a quello delle BNS isolate. In questo caso, i processi dinamici sopprimono la formazione di binarie di piccola massa.

La principale differenza tra le BBH isolate e le BBH dinamiche è la massa dei buchi neri coinvolti. I sistemi dinamici ospitano buchi neri con una massa fino a 90 volte la massa del Sole, significativamente più alta rispetto ai sistemi binari isolati, che non arrivano a 45 volte la massa del Sole. Questi risultati forniscono un indizio per differenziare lo scenario di formazione dinamica e isolata delle binarie di oggetti compatti.

Nella mia tesi ho esplorato le principali fonti di incertezza che influenzano l'evoluzione del tasso di fusione degli oggetti compatti formati nel canale di formazione isolato (SANTOLIVIDO 2021), che è caratterizzato da diverse fasi evolutive, alcune di queste estremamente rilevanti.

Per esempio, le stelle massicce a mano a mano che invecchiano tendono ad espandersi. Ciò che si espande è lo strato esterno, detto involucro, che quindi crea una netta divisione con la parte centrale detta nucleo. Durante questo processo di espansione può accadere il trasferimento di massa da una stella all'altra. Se il trasferimento di massa è instabile, ovvero se il tasso con cui la stella donatrice perde massa porta a una completa evaporazione degli strati esterni della stella stessa, si accede a una fase detta di involucro comune. In questa fase l'involucro, ovvero lo strato esterno che compone la struttura della stella, è condiviso fra entrambi i sistemi. Per visualizzare questa fase, i due nuclei di ciascuna stella ruotano dentro questa nube condivisa di gas. La fase dell'involucro comune è una delle più importanti fasi della vita di una stella in binaria e allo stesso tempo una delle fasi più complicate da modellare.

Il processo fisico chiave della fase dell'involucro comune è la forza di attrito che agisce tra i due nuclei in rotazione e l'involucro stesso. In altre parole, la rotazione dei due nuclei è rallentata dalla presenza della nube di gas. Si ha quindi trasferimento di energia tra il sistema dei due nuclei e l'involucro. Pertanto, la distanza tra i due nuclei si contrae a favore di un aumento di energia dell'involucro, che può portare alla sua completa evaporazione e quindi alla fine della fase dell'involucro comune.

L'efficienza di trasferimento di energia tra il sistema dei due nuclei e l'involucro comune è determinata da un parametro chiamato  $\alpha$ , di cui non è noto il valore a priori. Questo parametro è una delle principali fonti di incertezza della fase dell'involucro comune ed è per questo che è stato variato in un intervallo tra 0,5 e 10. Ho calcolato infatti che il tasso di fusione delle BNS copre fino a tre ordini di grandezza se il parametro  $\alpha$  varia da 0,5 a 10. Questo significa che il tasso di fusione delle BNS può variare dall'ordine delle decine all'ordine delle migliaia a seconda del parametro  $\alpha$  selezionato. Nello stesso intervallo di  $\alpha$  i tassi di fusione delle BNHS e BBH possono al più raddoppiare, quindi variano molto meno rispetto alle BNS. Ho appurato che solamente valori di  $\alpha$  maggiori di 0,5 forniscono tassi di

fusione di BNS nell'universo locale in accordo con quanto trovato dalla collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA.

### ***galaxyRate* e le galassie ospiti**

Un punto di svolta storico si è verificato nell'agosto del 2017, quando i rilevatori LIGO e Virgo hanno osservato la fusione di due stelle di neutroni, seguita, circa 1,7 secondi dopo, dalla rilevazione di un lampo gamma dalla stessa fonte tramite il telescopio spaziale Fermi (ABBOTT 2017). Queste osservazioni hanno permesso di individuare la fonte con precisione sufficiente affinché la sua galassia ospite fosse trovata rapidamente da telescopi ottici. La rilevazione del lampo gamma ha permesso di individuare senza dubbi la galassia ospite, nominata NGC 4993. Questi risultati osservativi ci hanno fornito informazioni su questioni astronomiche irrisolte da decenni. Ad esempio, hanno verificato che le onde gravitazionali viaggiano essenzialmente alla velocità della luce e hanno confermato che le fusioni di stelle di neutroni generano lampi gamma.

Le galassie ospiti delle sorgenti di onde gravitazionali contengono pertanto preziose informazioni sulla formazione e l'evoluzione degli oggetti compatti. Per studiare questo argomento, ho sviluppato un codice chiamato *galaxyRate*: un programma estremamente innovativo perché per stimare i tassi di fusione e le proprietà delle galassie ospiti utilizza le cosiddette relazioni di scala. Queste sono delle proprietà osservate su una larga porzione delle galassie che popolano il nostro universo. Per esempio, la maggior parte delle galassie che producono stelle mostrano una forte correlazione tra la massa stessa della galassia e il tasso di formazione stellare. In altre parole, ci aspettiamo che galassie più massicce producano anche nuove stelle ad un ritmo maggiore.

Il funzionamento di *galaxyRate* è intuitivo. Prima di tutto, crea una popolazione di galassie di formazione, ovvero quelle galassie in cui le stelle progenitrici di oggetti compatti si formano. Poi segue l'evoluzione di ciascuna di queste stelle progenitrici fino a quando non si fondono i due oggetti compatti. Una volta che questo accade, *galaxyRate* estrae le proprietà della galassia in cui si sono fusi gli oggetti compatti seguendo un approccio probabilistico.

Le proprietà della popolazione di galassie di formazione vengono ricavate dalle relazioni di scala. La prima da tenere in considerazione in ordine logico è la funzione di massa delle galassie, che ci dice quante galassie di una determinata massa si trovano in unità di volume ad un certo momento della vita evolutiva dell'universo. La seconda relazione di scala è la sequenza principale delle galassie. Questa lega la massa di ciascuna galassia al suo tasso di formazione stellare.

La terza relazione di scala fornisce la metallicità della galassia. Come abbiamo mostrato nella sezione precedente, la metallicità ha un ruolo essenziale nel predire il tasso di fusione e in questo caso anche le proprietà delle galassie ospiti. Per quanto riguarda questo aspetto, abbiamo a disposizione due relazioni: la relazione massa-metallicità e la relazione di metallicità fondamentale. Queste due relazioni prevedono due diversi funzionamenti del nostro universo. La relazione massa-metallicità mostra che ad alto *redshift*, l'universo produce galassie con pochissimo contenuto di metalli, mentre la relazione di metallicità fondamentale afferma che la quantità di metalli rimane sostanzialmente invariata nel corso del tempo cosmico. Dobbiamo tenere conto di entrambe queste relazioni, poiché le osservazioni da cui sono ricavate sono estremamente incerte ad alto *redshift*. Le relazioni coincidono come ci aspettiamo nell'universo locale.

Con *galaxyRate* abbiamo scoperto che l'evoluzione con il *redshift* del tasso di fusione cambia radicalmente a seconda della scelta della sequenza principale e del modello di metallicità. Per esempio, la scelta del modello di metallicità ha un effetto importante sulla velocità con cui cresce il tasso di fusione delle BBH e BNHS in funzione del tempo cosmico. Questa è maggiore se assumiamo la relazione massa-metallicità rispetto alla relazione di metallicità fondamentale. Infatti, quest'ultima prevede una diminuzione più graduale della metallicità con il *redshift*. Al contrario, le BNS non sono influenzate dalla scelta della relazione di metallicità.

Ho confrontato l'evoluzione del tasso di fusione ottenuta con *galaxyRate* con quella ottenuta con *cosmoRate*. L'evoluzione del tasso di fusione delle BNS ottenuta con *cosmoRate* e *galaxyRate* è in buon accordo, mentre il tasso di fusione di BBH e BNHS valutato con *galaxyRate* è superiore rispetto a quello ottenuto con *cosmoRate*. La ragione principale è che le relazioni di scala osservative supportano una maggiore popolazione di stelle povere di metalli, rispetto a quanto implementato in *cosmoRate*, dovuto al fatto che in *cosmoRate*, non utilizzando direttamente le proprietà delle galassie, teniamo conto di stime meno precise del tasso di formazione stellare.

La galassia che ospita la fusione di due oggetti compatti può mostrare caratteristiche diverse dalla galassia in cui i due oggetti compatti si sono formati. Infatti, il tempo trascorso dalla formazione della binaria di stelle massicce e la fusione dei due oggetti compatti, detto anche tempo di ritardo, può essere molto lungo. In alcuni casi, il tempo di ritardo può superare i dieci miliardi di anni. Questo vuol dire che in questi casi la galassia di formazione ha avuto a disposizione miliardi di anni per evolvere.

Complessivamente, le galassie ospiti delle BBH e BNHS sono più massicce delle loro galassie di formazione, perché sia le BBH che le BNHS tendono a formarsi in galassie più piccole e povere di metalli e a fondersi in galassie più grandi e ricche di metalli. Al contrario, le galassie di formazione e le galassie ospiti delle BNS sono molto simili tra loro. Inoltre, la distribuzione di massa delle galassie ospiti è influenzata dalla distribuzione del tempo di ritardo. Nei nostri modelli, diversi valori del parametro di efficienza dell'involuppo comune  $\alpha$  danno luogo a diverse distribuzioni del tempo di ritardo, con valori più elevati di  $\alpha$  associati a tempi di ritardo più lunghi. Il contributo delle galassie ad alta massa aumenta con  $\alpha$ . Infatti, con  $\alpha = 5$ , ovvero tempi di ritardo più lunghi, la galassia di formazione ha più tempo per evolvere e per fondersi con altre galassie e formare così una galassia ospite più massiccia. D'altra parte, per  $\alpha = 1$ , ovvero tempi di ritardo più brevi, una grande frazione di BBH è ospitata in galassie di piccola massa.

Il nostro universo ospita una tipologia di galassie che non è più in grado di formare nuove stelle. Queste galassie si chiamano galassie passive. Se non formano più stelle non sono nemmeno in grado di formare nuovi oggetti compatti. Pertanto, le galassie passive possono solamente ospitare le fusioni di oggetti compatti. Ciò avviene quando una binaria di stelle massicce si forma in una galassia che è in grado di formare nuove stelle, e questa stessa galassia evolve o si fonde con una galassia passiva, che quindi sarà in grado di ospitare la fusione di oggetti compatti ma non la loro formazione. La frazione di fusioni di oggetti compatti in galassie passive aumenta avvicinandosi all'universo locale. Abbiamo trovato che tra il 5 e 35% di tutte le fusioni di BNS, BNHS e BBH nell'universo locale avviene in una galassia passiva. Questo ci indica che le binarie di oggetti compatti hanno più probabilità di essere ospitati in galassie passive se la loro distribuzione del tempo di ritardo è più lunga: un fatto che ha delle implicazioni importanti. Per esempio, potremmo utilizzare il numero di fusioni di oggetti compatti in galassie passive per stimare qual è la distribuzione del tempo di ritardo degli oggetti compatti.

## Conclusioni

Negli ultimi sette anni, l'astrofisica delle onde gravitazionali ha rivoluzionato la nostra comprensione degli oggetti compatti. Dal 2015 infatti, la collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA ha rilasciato un numero sempre crescente di eventi di onde gravitazionali, rilevando e studiando le quali impariamo sempre di più sull'origine e sull'evoluzione di oggetti esotici, come i buchi neri e le stelle di neutroni.

Una delle principali domande aperte che derivano dall'osservare l'insieme delle rilevazioni riguarda l'interpretazione dei tassi di fusione delle fonti di onde gravitazionali. Nella mia tesi di dottorato ho esplorato approfonditamente questo problema, prevedendo l'evoluzione del tasso di fusione degli oggetti compatti nel corso del tempo cosmico. In futuro, la prossima generazione di rilevatori di onde gravitazionali, ovvero l'Einstein Telescope e il Cosmic Explorer, osserveranno le fusioni di BBH fino a *redshift* 100 e le fusioni di BNS fino a *redshift* 2, consentendoci di indagare la distribuzione delle proprietà degli oggetti compatti in funzione della storia dell'universo.

L'esplorazione delle proprietà delle galassie ospiti delle fusioni di oggetti compatti è un altro importante elemento del dibattito sull'astrofisica delle onde gravitazionali. Infatti, nel 2017, la prima e unica rivelazione combinata di una fusione di BNS e la sua controparte elettromagnetica ha permesso l'identificazione della galassia ospite (ABBOTT 2017). È previsto inoltre che il numero di identificazioni di galassie ospiti aumenti con i rilevatori di prossima generazione.

Nella mia tesi di dottorato mostro quindi i risultati ottenuti sviluppando due codici: *cosmoRate* e *galaxyRate*. *cosmoRate* valuta il tasso di fusione combinando cataloghi di fusioni di oggetti compatti con l'evoluzione del tasso di formazione stellare in funzione di metallicità e *redshift*. *galaxyRate* accoppia gli stessi cataloghi di fusioni di oggetti compatti questa volta con le proprietà delle galassie di formazione. In altre parole, per riprodurre la popolazione di galassie in cui si formano e si fondono gli oggetti compatti, adotta le principali relazioni di scala, come la funzione di massa delle galassie, la sequenza principale delle galassie e la relazione di metallicità fondamentale.

Ho scoperto che il tasso di fusione di BBH formate in giovani ammassi stellari è maggiore rispetto a quello delle BBH formate da sistemi binari isolati. Questo non è il caso delle BNS formate in giovani ammassi stellari, che sono meno propense a fondersi a causa dell'influenza della dinamica sulla loro formazione.

Concentrandomi sullo scenario di formazione isolata, ho esaminato le principali fonti di incertezza che influenzano il tasso di fusione. Ad esempio, il tasso di fusione di BNS varia nell'universo locale dall'ordine delle decine all'ordine delle migliaia, quando il parametro di efficienza dell'involuppo comune viene variato da  $\alpha = 7$  a 0,5. La principale fonte di incertezza per il tasso di fusione delle BBH è l'incertezza nell'evoluzione della metallicità stellare, che porta a una variazione del tasso di fusione di un ordine di grandezza, passando quindi dall'ordine delle decine all'ordine delle centinaia.

*galaxyRate* stima il tasso di fusione di oggetti compatti binari e le proprietà delle loro galassie ospiti, basandosi su relazioni di scala osservative. *galaxyRate* genera prima la galassia di formazione di ciascun oggetto compatto, ossia la galassia in cui si forma la stella progenitrice. Ogni galassia di formazione è descritta dalla sua massa stellare, dal tasso di formazione stellare e dalla metallicità. Con *galaxyRate*, posso effettuare molte realizzazioni del tasso di fusione e delle proprietà delle galassie ospiti nel corso del tempo cosmico, al fine di comprendere le principali incertezze derivanti sia dalla formazione degli oggetti compatti in sistemi binari che dall'evoluzione delle galassie.

Per migliorare la precisione delle mie previsioni, utilizzerò nuove informazioni che diventeranno disponibili nel prossimo futuro. Un elemento chiave in questo senso sarà il

telescopio spaziale James Webb (JWST), che ci offrirà una maggiore comprensione della natura delle stelle massicce durante le prime fasi dell'universo. Inoltre, saranno effettuate nuove osservazioni di onde gravitazionali che indicheranno ancora meglio le caratteristiche degli oggetti compatti. Sfruttando quindi la combinazione di queste due fonti attraverso *cosmoRate* e *galaxyRate*, potremo ampliare la nostra conoscenza sul funzionamento dell'universo.

#### REFERENZE BIBLIOGRAFICHE

##### *Articoli Scientifici*

- RICHARD ABBOTT *et al.*, *Population of merging compact binaries inferred using gravitational waves through GWTC-3*, «Physical Review X», 2023, 13, 011048.
- MARICA BRANCHESI *et al.*, *Science with the Einstein Telescope: a comparison of different designs*, «Journal of Cosmology and Astroparticle Physics», 2023, 07, 068.
- FILIPPO SANTOLIVIDO *et al.*, *The cosmic merger rate density evolution of compact binaries formed in young star clusters and in isolated binaries*, «The Astrophysical Journal», 2020, 898, 152.
- FILIPPO SANTOLIVIDO, MICHELA MAPELLI, M. CELESTE ARTALE, LUMEN BOCO, *Modelling the host galaxies of binary compact objects mergers with observational scaling relations*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 2022, 516, 3297.
- GIULIANO IORIO *et al.*, *Compact object mergers: exploring uncertainties from stellar and binary evolution with SEVN*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 2023, 524, 426.
- FILIPPO SANTOLIVIDO, MICHELA MAPELLI, NICOLA GIACOBBO, YANN BOUFFANAIS, M. CELESTE ARTALE, *The cosmic merger rate density of compact objects: impact of star formation, metallicity, initial mass function, and binary evolution*, «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 2021, 502, 4877.
- BENJAMIN P. ABBOTT *et al.*, *GW170817: observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral*, «Physical Review Letters», 2017, 119, 161101.

##### *Libri divulgativi*

- DARIO MENASCE, *L'urlo dell'universo. Il lungo viaggio delle onde gravitazionali*, Hoepli, 2018.
- FEDERICO FERRINI, *Le onde gravitazionali. Una nuova porta sul cosmo*, Il Mulino, 2018.
- GOVERT SHILLING, *Onde nello spaziotempo. Einstein, le onde gravitazionali e il futuro dell'astronomia*, Codice, 2018.

---

**Filippo Santolivido** nasce a Verona nel 1995. Si è laureato in Fisica presso l'Università di Trento e in Astronomia presso l'Università di Padova. Nello stesso ateneo, ha conseguito il dottorato in Astrofisica. Ora lavora al Gran Sasso Science Institute a L'Aquila. Si occupa dello studio della demografia degli oggetti compatti, quali i buchi neri e le stelle di neutroni osservabili con i rilevatori di onde gravitazionali. I suoi studi hanno un largo impatto per la comprensione e analisi delle potenzialità scientifiche dei rilevatori di prossima generazione, come l'Einstein Telescope. Nel 2023 ha vinto il Premio 'Pietro Tacchini' della SAIT.