

UNA SINFONIA DI MOSTRI GIGANTESCHI:

ALLA RICERCA DI SISTEMI BINARI DI BUCHI NERI DI MASSA INTERMEDIA NEL TERZO PERIODO OSSERVATIVO DI ADVANCED LIGO E ADVANCED VIRGO

La ricerca di buchi neri di massa intermedia ([IMBHs](#)) è da molti anni al centro dell'attenzione degli astronomi. I rivelatori Advanced [LIGO](#) e Advanced [Virgo](#) hanno completato i loro primi due periodi osservativi (O1 e O2) tra il 2015 e il 2017, [senza fare alcuna osservazione significativa di fusioni di IMBH](#). La prima metà del nostro [terzo periodo osservativo](#) ha segnato la prima rivelazione confermata di un IMBH in un sistema binario: [GW190521](#), una scoperta che abbiamo annunciato nel 2020. Qui presentiamo una ricerca mirata a trovare altri IMBH nei dati di O3. In questa nuova ricerca ritroviamo nuovamente GW190521, ma con maggiore **significatività statistica**. Abbiamo trovato anche altri possibili candidati IMBH, ma nessuno si qualifica come significativo. Comunque grazie ai risultati di questa ricerca abbiamo migliorato la nostra conoscenza della frequenza astrofisica di fusioni di binarie IMBH.

GLI IMBH: IL PONTE MISTERIOSO TRA I BUCHI NERI DI MASSA STELLARE E QUELLI SUPERMASSICCII

Nel nostro Universo, i buchi neri (BH) sono grossolanamente suddivisi in tre categorie in base alle loro masse: i buchi neri di massa stellare, buchi neri supermassicci (SMBH) e i buchi neri di massa intermedia (IMBH). I più leggeri dei tre sono i BH di massa stellare. Questi hanno masse fino a 100 volte quella del Sole (M_{\odot}) e si formano nell'esplosione di una stella morente di massa superiore a $20 M_{\odot}$. Ad oggi (maggio 2021), i rivelatori Advanced LIGO e Advanced Virgo hanno osservato ~50 segnali di onde gravitazionali (GW) da binarie compatte coalescenti, pubblicati nei cataloghi [GWTC-1](#) e [GWTC-2](#).

Gli SMBH hanno masse superiori a $\sim 100.000 M_{\odot}$. Diverse teorie suggeriscono che questi BH si formino a seguito di collisioni multiple di BH stellari massicci o IMBH. In ambienti densi, i prodotti finali di fusioni di prima generazione di oggetti compatti possono subire ulteriori collisioni per formare enormi BH di seconda generazione. Questo processo potrebbe estendersi a generazioni successive, portando infine a quello che viene definito uno **scenario di fusione gerarchica**. Finora, le [osservazioni](#) nello spettro elettromagnetico (EM) hanno mostrato che gli SMBH risiedono al centro della maggior parte delle galassie nell'Universo. Benché ci siano indicazioni fusioni SMBH da osservazioni EM, non ci si aspetta alcuna osservazione nella banda di frequenza di LIGO-Virgo – anche se la futura missione spaziale [LISA](#) ha eccellenti prospettive di rivelare queste fusioni di SMBH a distanze cosmologiche.

Come suggerisce il nome, la terza categoria, gli IMBH, si trova tra i BH di massa stellare e gli SMBH. Le loro masse vanno da ~ 100 a $100.000 M_{\odot}$. Alcune teorie suggeriscono che questi BH siano i resti del collasso diretto del nucleo di stelle massicce a [bassa metallicità](#) della prima generazione stellare, la [Popolazione III](#), e altre suggeriscono che si siano formate nelle fusioni gerarchiche di stelle in densi ammassi stellari. In entrambi i casi, la loro stessa esistenza rimarrà un enigma fino a quando non si farà un'osservazione diretta. Al momento, [HLX-1](#) è il più probabile candidato IMBH, osservato nella banda X dello spettro elettromagnetico, con una massa dedotta da ~ 3000 a $300.000 M_{\odot}$. Però gli IMBH possono essere osservati direttamente per mezzo delle onde gravitazionali con Advanced LIGO e Advanced Virgo, rilevando i segnali emessi da una fusione binaria che coinvolge un IMBH – sia come componente del sistema binario che come residuo di fusione.

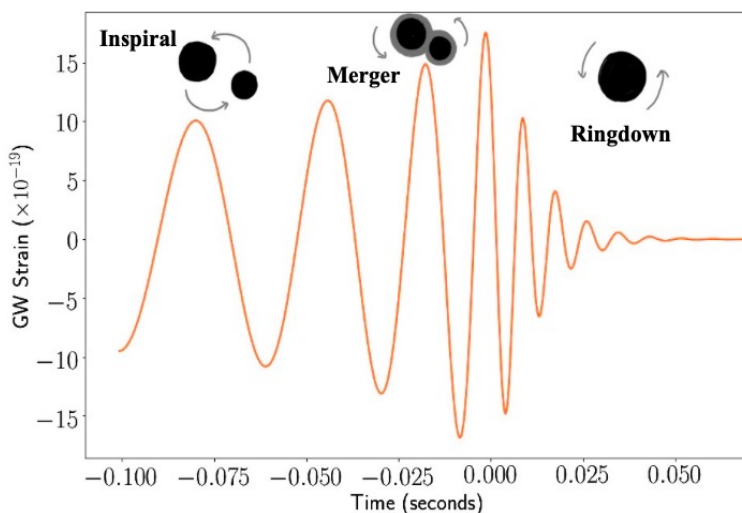


Figura 1: Rappresentazione pittorica delle tre fasi di un segnale di onda gravitazionale emesso da un sistema binario di buchi neri massicci. L'asse verticale rappresenta la deformazione prodotta dalle onde gravitazionali (deformazione dello spazio-tempo) mentre l'asse orizzontale mostra la durata del segnale.

Visitate i nostri siti web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



PERCHÉ È IMPORTANTE CERCARE GLI IMBH?

I sistemi IMBH sono un laboratorio perfetto per sottoporre a test la [teoria della relatività generale \(GR\)](#). Alcuni di questi sistemi binari potrebbero avere masse altamente disuguali o *asimmetriche*. In generale, sistemi di questo tipo possono produrre onde gravitazionali con [armoniche superiori](#) accanto al tono fondamentale, proprio come negli strumenti musicali. Queste armoniche superiori sono note anche come *modi di ordine superiore*. Una delle recenti osservazioni di LIGO-Virgo, [GW190412](#), ha mostrato l'[esistenza di modi di ordine superiore](#): è la prima volta che si osserva una [quinta giusta](#) nella sinfonia dei buchi neri che si fondono. Le osservazioni sistemi binari asimmetrici ampliano la nostra comprensione delle proprietà fondamentali dei BH come la loro massa, spin e [carica](#) – come descritto dal [teorema no-hair](#). Un altro vantaggio dello studio delle binarie IMBH è che i risultati ci danno informazioni sull'evoluzione delle stelle massicce. Ma questi studi possono fornire informazioni anche sul legame evolutivo tra BH di massa stellare e SMBH? Purtroppo no, i rivelatori LIGO e Virgo sono insensibili alle onde gravitazionali dei più pesanti SMBH, quindi per ottenere un quadro più completo potremmo dover aspettare le osservazioni LISA delle fusioni SMBH.

COME CERCHIAMO I SISTEMI BINARI IMBH?

I GW prodotti dalle coalescenze di sistemi binari compatti come stelle di neutroni o BH deformano lo [spazio-tempo](#) attorno ai rivelatori interferometrici. Le deformazioni create da questi allungamenti e contrazioni sono misurate con precisione dai rivelatori [LIGO](#) e [Virgo](#) tramite interferometria laser. I rivelatori non solo catturano i segnali GW, ma vedono anche molti tipi di rumore proveniente da fonti terrestri e strumentali, compresi alcuni che possono essere molto più "forti" dei segnali GW stessi. Per trovare segnali GW astrofisici incorporati in questi dati rumorosi, gli scienziati usano tecniche speciali come i [filtri ottimi](#), che utilizzano il modello di segnale GW previsto da GR per cercare modelli simili nei dati. Un'altra [tecnica indipendente dal modello](#) cerca un eccesso di potenza che si presenta in tutti i rivelatori entro un intervallo di tempo pari a quello impiegato dalla luce a viaggiare da un rivelatore all'altro, il che indica che questo eccesso potrebbe plausibilmente provenire da un segnale GW.

Un modello di segnale GW generico è suddiviso nelle fasi di *inspiral* (l'avvicinamento a spirale dei buchi neri componenti il sistema), *merger* (la fusione vera e propria tra componenti) e *ringdown* (le oscillazioni finali dopo la fusione, si veda la [Figura 1](#)), la cui durata dipende dalle proprietà della sorgente di onde gravitazionali. Più il sistema binario è pesante, più è breve il segnale GW che esso emette. Estrarre segnali molto brevi da dati rumorosi è davvero complicato e il livello di difficoltà può aumentare ulteriormente a causa di artefatti di origine terrestre o strumentale che assomigliano al segnale reale. Pertanto è decisivo calibrare attentamente le tecniche di ricerca in modo che possano identificare al meglio solo i segnali GW reali.

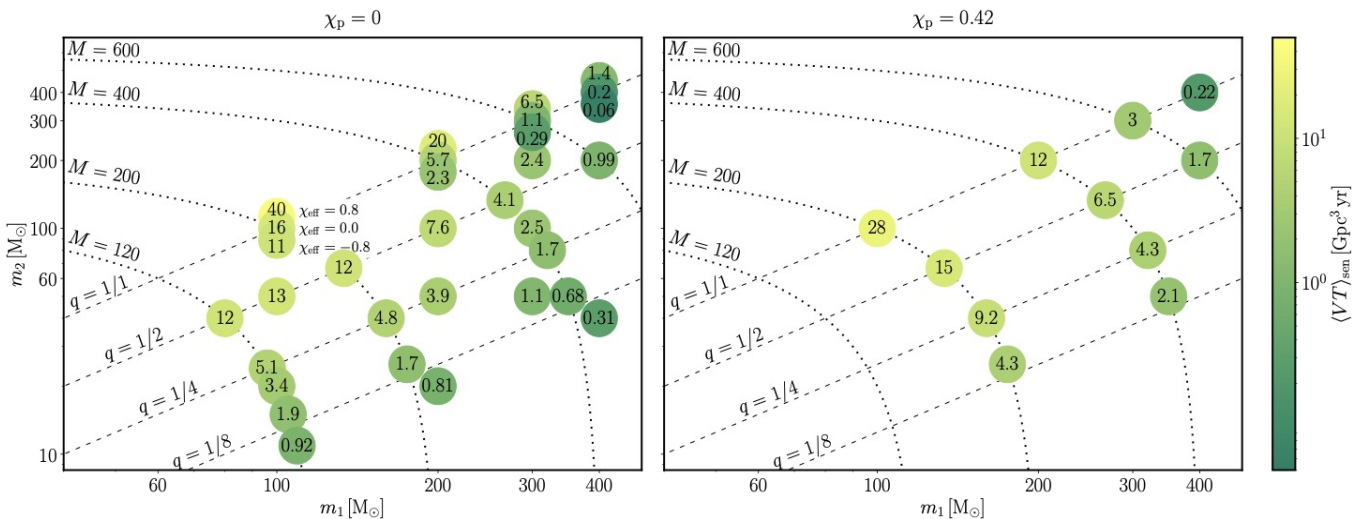


Figura 2: (Figura 1 del nostro articolo) Il prodotto volume-tempo sensibile medio $\langle VT \rangle_{\text{sen}}$, in Gpc³ anno (in gigaparsec cubi per anno) per i sistemi binari IMBH senza precessione (pannello a sinistra) e con precessione (pannello a destra) che abbiamo studiato. Ogni cerchio corrisponde a una classe di binaria IMBH con masse date. Per la classe delle binarie IMBH senza precessione, la distanza raggiungibile nella nostra ricerca diminuisce con l'aumentare della massa totale (M) del sistema binario per un rapporto di massa costante (q). Nel caso di sistemi binari con precessione, corrispondenti a valori non nulli di χ_p , la sensibilità di ricerca è direttamente correlata alla spin efficace totale del sistema.

Durante il periodo osservativo O3, è stata utilizzata una combinazione di [filtri ottimi](#) basati sui modelli attesi di forme d'onda ed una ricerca indipendente dai modelli per cercare sistemi binari IMBH. La combinazione dei due metodi si traduce in un elenco di possibili sistemi binari IMBH osservati in più di un rivelatore. Tra questi candidati, selezioniamo quelli che hanno una massa finale superiore a 100 M_{\odot} e la massa primaria (cioè la massa del BH più pesante nel sistema binario) superiore a 65 M_{\odot} , che è il limite inferiore dell'intervallo di massa dovuto all'[instabilità di coppia](#). Richiediamo inoltre che i candidati selezionati abbiano una [frequenza di falso allarme](#) (in inglese, *false alarm rate* o FAR) inferiore ad una certa soglia, il che significa che c'è una bassa [probabilità](#) di trovare un candidato con un segnale altrettanto intenso che è semplicemente rumore di fondo.

COSA ABBIAMO TROVATO?

Sulla base dei criteri di selezione che abbiamo utilizzato in questa ricerca, riteniamo che **GW190521** sia il candidato **IMBH più significativo** nella ricerca combinata. La scoperta di GW190521 è stata annunciata il 2 settembre 2020 e le proprietà del segnale sono state studiate in una [pubblicazione dedicata](#). L'evento ha avuto origine da una fusione di due BH del peso di $66 M_{\odot}$ e $85 M_{\odot}$, che ha prodotto alla fine un buco nero di massa $\sim 142 M_{\odot}$. In questo lavoro, ritroviamo questo evento con una maggiore significatività statistica rispetto all'analisi precedente.

La ricerca IMBH è sensibile ai sistemi binari con una massa elevata e funziona in modo ottimale anche per sistemi di buchi neri binari pesanti (BBH). Con questa ricerca, recuperiamo quindi anche i segnali GW provenienti da altre sorgenti BBH pesanti già presenti nel catalogo GWTC-2. Tuttavia, in questa ricerca non sono stati osservati nuovi segnali IMBH significativi.

COSA POSSIAMO DIRE RIGUARDO LA FREQUENZA DELLE FUSIONI DEI SISTEMI BINARI DI IMBH?

Per stimare la frequenza con cui i sistemi binari IMBH si fondono in un dato volume dell'Universo e in un dato tempo (la loro cosiddetta "densità di frequenza di fusione") dobbiamo determinare la sensibilità della ricerca, cioè quanto è probabile che si osservino segnali da sistemi binari IMBH. Per indagare su questo aspetto, eseguiamo simulazioni che comportano l'iniezione di segnali GW artificiali nei dati. Per prima cosa usiamo modelli di Relatività Numerica che generano segnali GW risolvendo numericamente le [equazioni di Einstein](#) per sistemi binari IMBH coalescenti con masse totali fino a $800 M_{\odot}$ e rapporti di massa (indicati con il parametro q) variabili da 0.1 a 1. Quindi distribuiamo questi segnali in modo uniforme in termini di posizione del cielo, [orientazione orbitale](#) e [volume comovolume](#) e utilizziamo la nostra ricerca combinata per cercare di recuperarli dai dati. I segnali recuperati in un dato volume e tempo di osservazione ci forniscono una misura della sensibilità della nostra ricerca (si veda la [Figura 2](#)) e pongono limiti ai tassi di fusione delle sorgenti binarie IMBH, come mostrato nella [Figura 3](#).

In questo lavoro abbiamo scoperto che la frequenza di fusione per sistemi binari IMBH di massa uguale con una massa totale di $200 M_{\odot}$ e spin di 0.8 è inferiore a 0.06 gigaparsec cubo anno. Questo limite superiore è 3.5 volte inferiore al valore riportato nella [precedente ricerca IMBH nei periodi osservativi O1 e O2](#). Questa frequenza corrisponde a 0.2 fusioni nel corso della vita tipica di un [ammasso globulare](#) (che si presume sia di 10 miliardi di anni). Infine aggiorniamo la stima della frequenza di fusione per sorgenti simili a GW190521 al valore di 0.08 per gigaparsec cubo all'anno.

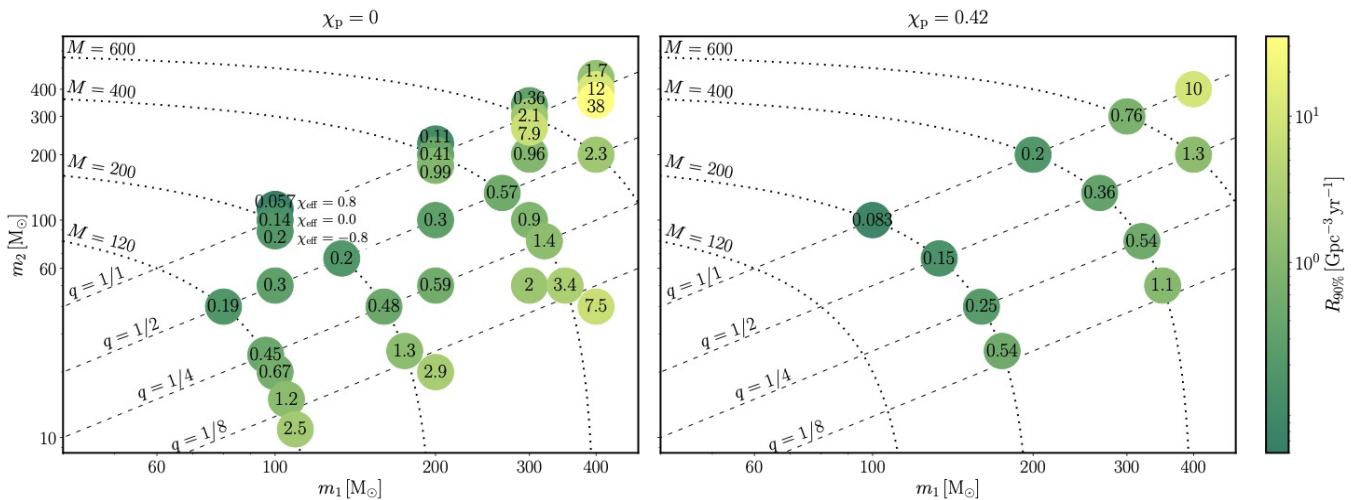


Figura 3: (Figura 3 del nostro articolo) Il limite superiore alla densità della frequenza di fusione ($R_{90\%}$, corrispondente alla probabilità del 90% che la quantità sia inferiore al limite che riportiamo) in $\text{Gpc}^{-3} \text{anni}^{-1}$ (per gigaparsec cubo e per anno) per i sistemi binari IMBH senza precessione (pannello sinistro) e con precessione (pannello destro). Ancora una volta ogni cerchio corrisponde a una classe di binaria IMBH con masse date.

GLOSSARIO

Gigaparsec (Gpc): Una misura di distanza pari a un miliardo di [parsec](#), che vale circa tre miliardi di anni luce o circa 3×10^{22} km.

Limite superiore: Il valore massimo che una quantità fisica può assumere.

Massa solare: Massa del Sole (M_{\odot}), uguale a 1.989×10^{30} kg.

Modi di ordine superiore: Termini sub-dominanti nell'espansione delle [armoniche sferiche](#) che descrive le onde gravitazionali oltre il termine dominante, quadrupolare. Il termine di quadrupolo è analogo al tono fondamentale nelle onde sonore.

Precessione: La precessione è presente nei sistemi binari in cui la direzione di spin dei componenti è disallineata con la direzione del loro [momento angolare](#) orbitale. χ_{eff} , chiamato "spin allineato efficace" è un parametro che caratterizza una particolare combinazione di spin degli oggetti compatti prima che si fondano. Un valore negativo di χ_{eff} indica spin anti-allineati rispetto al momento angolare del sistema. χ_p , chiamato "spin di precessione efficace", è un'altra combinazione di singoli spin che misura la quantità di precessione presente nel sistema. Tanto più questo valore è alto, tanto maggiore è la precessione.

Prodotto tempo-volume sensibile: Volume dello spazio tempo all'interno del quale la tecnica di ricerca è sensibile alle sorgenti di GW.

Rapporto di massa: Rapporto tra la massa del componente più leggero e la massa del componente più pesante ($q = m_2/m_1$).

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

<https://www.ligo.org>

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

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Leggete gratuitamente un preprint gratuito dell'articolo scientifico [disponibile a questo link](#)

Un'altro articolo sulla scoperta di GW190521 [è disponibile a questo link](#)

Per capire meglio le implicazioni astrofisiche di GW190521, leggete [qui](#)