

UN NUOVO TIPO DI SORGENTE DI ONDE GRAVITAZIONALI: I SISTEMI BINARI COSTITUITI DA UNA STELLA DI NEUTRONI E DA UN BUCO NERO

COSA ABBIAMO SCOPERTO?

Il 5 gennaio 2020 il rivelatore [Advanced LIGO](#) a [Livingston](#) (Louisiana) negli Stati Uniti e il rivelatore [Advanced Virgo](#) in Italia hanno osservato onde gravitazionali provenienti da un tipo di sistema astronomico del tutto nuovo. Le onde gravitazionali sono state prodotte dalla spirale mortale di due tra gli oggetti più estremi nell'Universo: il primo, una [stella di neutroni](#), l'altro, un [buco nero](#). LIGO e Virgo hanno osservato le ultime orbite della spirale (in inglese, [inspiral](#)), seguite dalla fusione della stella di neutroni con il buco nero. È capitato poi che solo dieci giorni dopo è stato osservato un secondo segnale di onda gravitazionale da inspiral e fusione di una stella di neutroni con un buco nero, questa volta da entrambi i rivelatori Advanced LIGO e dal rivelatore Advanced Virgo. È la prima volta che si sono osservate onde gravitazionali provenienti da una miscela di stelle di neutroni e buchi neri (si veda la [Figura 1](#)). Prima di questa nuova scoperta, erano state osservate onde gravitazionali da coppie di buchi neri e da coppie di stelle di neutroni. I nomi di queste nuove scoperte sono **GW200105** e **GW200115**.

Queste due scoperte rappresentano le prime osservazioni di sistemi composti da una stella di neutroni e da un buco nero (NSBH, dall'inglese Neutron Star e Black Hole). L'esistenza di questi sistemi era stata predetta decenni fa, ma, fino ad adesso, senza che ci fosse una convincente evidenza osservativa. A questo punto con l'osservazione di sistemi NSBH abbiamo visto tutti e tre i tipi di sistemi binari che si possono formare con buchi neri e stelle di neutroni. Sistemi che sono composti da buchi neri e da stelle di neutroni sono noti con il nome di "[sistemi binari compatti](#)". Queste nuove scoperte, insieme a future osservazioni di sistemi binari compatti, getteranno luce sulla nascita, vita e morte delle stelle, così come sull'ambiente in cui si formano.

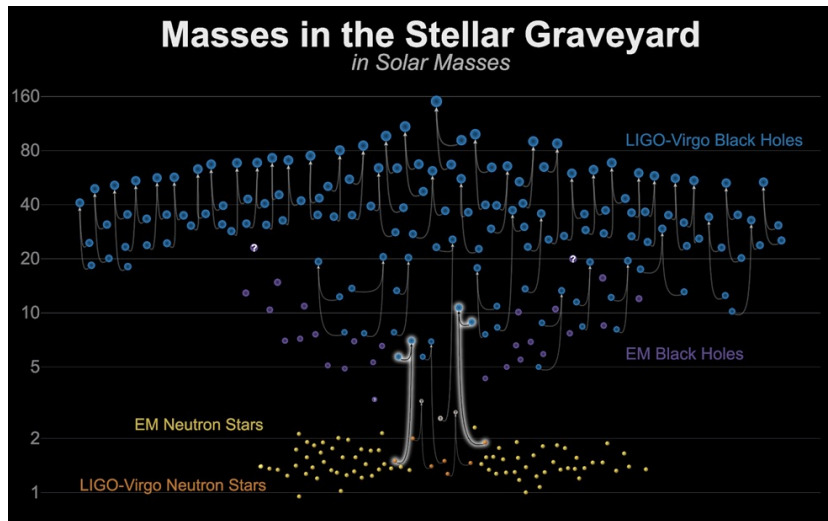


Figura 1: Le masse delle stelle di neutroni e dei buchi neri misurate per mezzo delle onde gravitazionali e di osservazioni elettromagnetiche. I cerchi gialli e viola rappresentano le misure elettromagnetiche rispettivamente di stelle di neutroni e di buchi neri, mentre i cerchi arancioni e blu sono le corrispondenti misure effettuate con onde gravitazionali. I nostri segnali **GW200105** e **GW200115**, sono evidenziati come fusioni di stelle di neutroni e buchi neri. (Image credit: LIGO-Virgo & Frank Elavsky, Aaron Geller, Northwestern University)

LA RIVELAZIONE DEI SEGNALI DI ONDA GRAVITAZIONALE

La ricerca di segnali di onda gravitazionale nei dati registrati dai rivelatori utilizza il metodo del [filtraggio ottimale](#). Esso confronta i dati osservati, che contengono rumore, con le predizioni dei segnali ottenute con la [Relatività Generale](#) di Einstein. Il filtraggio ottimale riesce a distinguere i segnali di onda gravitazionale in mezzo al rumore dei dati in modo simile a quello che ci permette di distinguere i singoli strumenti in un pezzo musicale. L'onda gravitazionale GW200115 ha un'origine astrofisica con un altissimo grado di affidabilità, un segnale di questo tipo potrebbe venire prodotto in modo casuale **meno di una volta in 100000 anni**. La natura astrofisica di GW200105 è più difficile da stabilire statisticamente, ma è chiaro che si tratta di qualcosa di diverso da qualunque segnale casuale osservato finora, e abbiamo stabilito che la frequenza con cui potremmo osservare un effetto casuale è **inferiore a 1 in un periodo di 2.8 anni**.

Visita i nostri siti web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



Le fusioni NSBH possono, in linea di principio, produrre luce a tutte le lunghezze d'onda dello [spettro elettromagnetico](#). Sfortunatamente, non siamo stati in grado di misurare con precisione la posizione celeste delle sorgenti, collocandole in un'area compresa tra 2400 e 29000 volte la dimensione della luna piena. Insieme alla grande distanza dalle sorgenti (discussa più in dettaglio nel seguito) ciò ha reso improbabile l'osservazione di radiazione elettromagnetica, che non è stata osservata. Osservazioni future di NSBH potrebbero produrre luce osservabile che potrebbe forse rivelare la "distruzione mareale" della stella di neutroni causata dal buco nero. Ciò potrebbe fornire informazioni riguardo la forma estrema di materia che costituisce le stelle di neutroni.

PROPRIETÀ DELLE SORGENTI

Le onde gravitazionali sono ricche di informazioni riguardanti la loro origine, per esempio le masse del buco nero e della stella di neutroni. Il buco nero e la stella di neutroni che hanno creato GW200105 sono circa 8.9 e 1.9 volte più massicce del Sole (la cui massa è indicata da M_{\odot}) rispettivamente. L'evento GW200105 è accaduto circa 800 milioni di anni fa, centinaia di milioni di anni prima che i primi dinosauri comparissero sulla Terra. Nel caso dell'evento GW200115 stimiamo che il buco nero e la stella di neutroni avessero massa $5.7 M_{\odot}$ e $1.5 M_{\odot}$ rispettivamente e che la loro fusione sia avvenuta circa un miliardo di anni fa. Le masse sono riassunte nella **Figura 2**.

Abbiamo scoperto che lo spin del buco nero in GW200105 potrebbe avere un valore compreso tra 0 e il 30% della massima velocità di rotazione dei buchi neri, mentre nel caso di GW200115, lo spin ha un valore compreso tra 0 e l'80% della velocità massima. Non possiamo dire molto sullo spin della stella di neutroni, perché le nostre misure sono scarsamente sensibili ad essa (si veda la **Figura 3**).

Cosa ci fa pensare di avere osservato NSBH? Per produrre le onde gravitazionali osservate gli oggetti devono essere molto compatti e densi rispetto alle stelle tipiche, altrimenti si sarebbero frammentati prima di fondersi. Poiché le masse degli oggetti più densi nei due sistemi binari sono $8.9 M_{\odot}$ e $5.7 M_{\odot}$, non possono essere altro che buchi neri, per quanto ne sappiamo. Le masse degli oggetti più leggeri sono intorno $1.9 M_{\odot}$ e $1.5 M_{\odot}$, molto inferiori a quelle di qualsiasi buco nero conosciuto. Queste masse sono consistenti con quelle delle stelle di neutroni conosciute, come quelle osservate nella Via Lattea, o per mezzo delle onde gravitazionali (ad esempio, [GW170817](#)). Le masse dei buchi neri sono compatibili con quelle predette dai modelli di formazione ed evoluzione stellare.

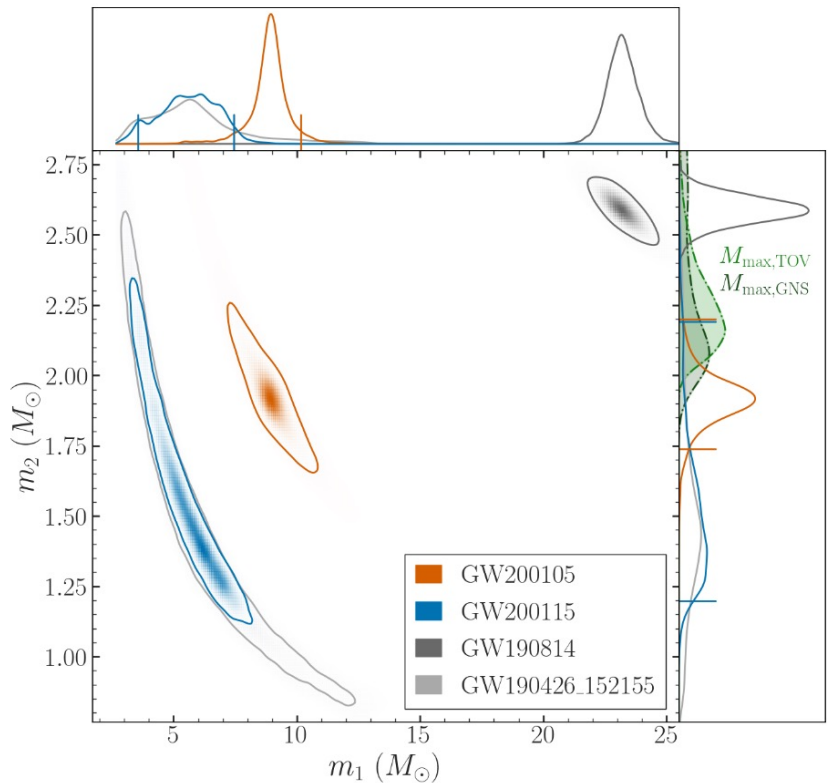


Figura 2: Questa figura riassume la nostra conoscenza delle masse che compongono gli oggetti che hanno prodotto GW200105 e GW200115. L'asse orizzontale rappresenta la massa dell'oggetto più pesante (il buco nero), mentre l'asse verticale rappresenta la massa dell'oggetto più leggero (la stella di neutroni). Le regioni colorate indicano le combinazioni di massa che sono compatibili con i dati, in arancione per il primo evento e blu per il secondo. Il colore più scuro indica un migliore accordo, vale a dire una probabilità più alta della combinazione di masse. Il pannello superiore riassume l'informazione relativa alla massa del buco nero, con – per esempio – la curva blu che mostra che il buco nero in GW200115 aveva una massa compresa tra $\sim 3.5 M_{\odot}$ e $\sim 7.5 M_{\odot}$. Il pannello a destra riassume l'informazione relativa alla stella di neutroni – per esempio, la curva arancione in questo pannello indica che la stella di neutroni in GW200105 aveva una massa compresa tra $1.75 M_{\odot}$ e $2.2 M_{\odot}$. La regione verde nel pannello a destra riassume la conoscenza astronomica attuale sulla distribuzione di massa delle stelle di neutroni, e mostra che gli oggetti che osserviamo hanno masse abbastanza piccole da essere stelle di neutroni. La figura contiene anche informazioni su due precedenti scoperte di onde gravitazionali: GW190814 che è probabilmente la fusione di un buco nero con massa $23 M_{\odot}$ e di un buco nero con massa $2.5 M_{\odot}$ (il più leggero mai osservato); e GW190426_152155, un segnale che sembra un sistema NS-BH, che però è tanto debole da rendere dubbia l'origine astrofisica.

COME SI FORMANO QUESTI SISTEMI, E QUANTO SONO FREQUENTI?

Ma come si formano questi sistemi NSBH? Ci sono due possibili spiegazioni. Secondo la prima, si parte da due stelle già in orbita una intorno all'altra. Le stelle hanno masse tali che quando invecchiano esplodono come supernove, diventando una stella di neutroni e l'altra un buco nero. Questa spiegazione è chiamata "evoluzione del sistema binario isolato". L'altra possibilità è che le stelle di neutroni e i buchi neri si formino separatamente in esplosioni di supernova scorrelate tra loro e che si incontrino solo successivamente. Questa spiegazione è chiamata "interazione dinamica" e può avere luogo in ambienti stellari densi come gli [ammassi globulari](#). Le orientazioni degli spin dei buchi neri forniscono degli indizi importanti per distinguere tra queste due possibilità. Nell'evoluzione del sistema binario isolato la direzione di spin dei buchi neri tende ad allinearsi con il momento angolare orbitale, o, in altre parole, ci aspettiamo che la stella di neutroni orbiti nel piano equatoriale del buco nero. Per contro, nello scenario di interazione dinamica non c'è una direzione preferenziale dello spin e quindi l'orbita della stella di neutroni potrebbe avere un'orientazione qualunque rispetto il piano equatoriale del buco nero.

La direzione di spin che misuriamo nel caso del buco nero in GW200105 non ci permette di distinguere lo scenario di formazione più probabile. Però, nel caso di GW200115 troviamo che la direzione di spin del buco nero è opposta alla direzione dell'orbita del sistema binario. Ciò significa, per esempio, che se la stella di neutroni orbita in senso orario intorno al buco nero, allora il buco nero ruota intorno a se stesso in senso antiorario. Ciò indica che la sorgente di GW200115 potrebbe essersi formata in un ambiente denso, proprio come un ammasso globulare.

Quanti NSBH si fondono nell'Universo in un dato periodo di tempo? L'osservazione di due sistemi NSBH ci dice che ci sono da 5 a 15 fusioni del genere entro una distanza di un miliardo di anni luce. Questa frequenza stimata delle fusioni potrebbe venire spiegata da entrambi gli scenari di formazione, al momento non possiamo dire nulla di più.

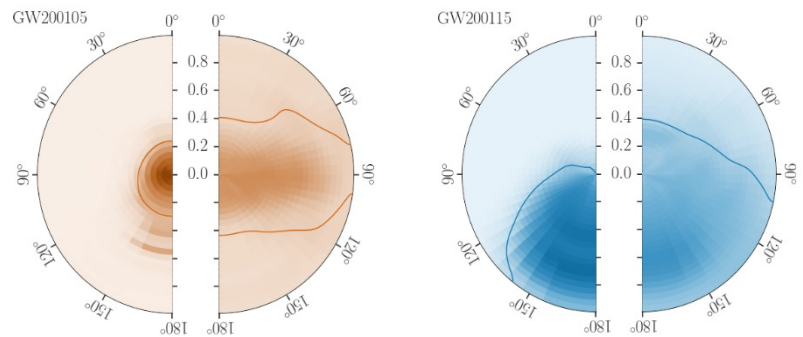


Figura 3: Le distribuzioni di intensità e direzione di spin dei buchi neri (semicerchi a sinistra) e stelle di neutroni (semicerchi a destra) che abbiamo dedotto per GW200105 e GW200115. La distanza dal centro indica l'intensità dello spin e va da 0 ad 1 (massima velocità di rotazione possibile per i buchi neri). La direzione di spin è indicata dall'angolo, che va da 0° (per oggetti che ruotano nella direzione orbitale del sistema binario) a 180° (per oggetti che ruotano in direzione opposta a quella orbitale del sistema). Un colore più intenso indica una più alta probabilità per i corrispondenti valori di intensità e direzione dello spin. Il semicerchio più a sinistra ha un picco di probabilità al centro, e ciò indica che il buco nero di GW200105 ha molto probabilmente un piccolo spin. Nel caso di GW200115, si vede che il colore nel semicerchio a sinistra è più intenso verso il basso, e ciò indica che il buco nero ha uno spin che punta probabilmente in direzione opposta a quella del moto orbitale.

SCOPRI DI PIÙ:

Visita i nostri siti web:

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

Leggi [qui](#) una versione gratuita dell'articolo scientifico completo.

GLOSSARIO

Inspirale: Il moto orbitale di oggetti in un sistema binario come quello formato da una stella di neutroni e un buco nero. Poiché il sistema perde energia emettendo onde gravitazionali, la stella di neutroni e il buco nero orbitano sempre più veloci e si avvicinano sempre più, fino ad arrivare alla fusione.

Stella di neutroni: Ciò che resta di una stella massiccia che ha raggiunto la fine della sua vita. Quando una stella massiccia esaurisce il suo combustibile nucleare muore in modo catastrofico – come supernova – così da formare spesso una stella di neutroni, un oggetto così massiccio e denso che gli atomi non riescono a mantenere la struttura che conosciamo sulla Terra. Queste stelle hanno circa la stessa massa del nostro sole, ma un diametro di poche decine di chilometri.

Buco nero: Una regione dello spazio-tempo con una gravità così intensa da impedire a tutto, inclusa la luce, di sfuggire. I [buchi neri](#) hanno diverse taglie: i [buchi neri stellari](#) vengono dai collassi stellari e le loro masse vanno da poche masse solari a circa 65 masse solari. I [buchi neri di massa intermedia](#) vanno da circa 100 a 10⁵ masse solari. Infine i [buchi neri supermassicci](#) vanno da più di 10⁵ masse solari a più di 10⁹ masse solari.

Sistema binario compatto: Un sistema costituito da due residui stellari compatti, per esempio stelle di neutroni o buchi neri, in orbita ravvicinata.

Filtraggio ottimale: Una tecnica per rivelare segnali sepolti in mezzo a dati rumorosi. Forme d'onda predefinite, calcolate per mezzo della relatività generale vengono confrontate con il segnale e il filtro ottimale segnala quando una di queste combacia con i dati.

Relatività generale: La teoria della gravità proposta da Albert Einstein nel 1915. In questa teoria lo spazio e il tempo sono come un tessuto elastico che si piega in presenza di materia ed energia e gli oggetti seguono traiettorie attraverso questo spazio curvo.

Ammasso globulare: Un gruppo molto denso di stelle legate assieme dalla gravità.

Spettro elettromagnetico: La luce visibile va dal rosso al viola, ma al di fuori della regione visibile ai nostri occhi, questo spettro continua. Oltre la luce rossa c'è l'infrarosso, e oltre il viola ci sono l'ultravioletto, i raggi X e i raggi gamma. Questo è lo spettro della radiazione elettromagnetica e gli astronomi usano ogni parte dello spettro per imparare qualcosa di più sull'Universo. Tutta la radiazione elettromagnetica è una specie di ondulatione dei campi elettrici e magnetici, con diverse frequenze e lunghezze d'onda (la lunghezza di una singola onda).

Anno luce: Un'unità di distanza equivalente alla distanza attraversata dalla luce in un anno. Un anno luce vale approssimativamente 9460 miliardi di chilometri.

Mo (massa solare): La massa del Sole (circa 2x10³⁰ kg). La massa solare è un'unità di uso comune per rappresentare le masse in astronomia.

Intervallo di massa: Un intervallo nella popolazione di buchi neri suggerito dalla scarsità di osservazioni di oggetti compatti con masse tra 2.5M_o e 5M_o.