

## IL CURIOSO CASO DI GW190814: LA COALESCENZA DI UN BUCO NERO DI MASSA STELLARE E DI UN OGGETTO COMPATTO MISTERIOSO

Il 14 agosto 2019, ad esattamente due anni di distanza dal giorno in cui è stata fatta la prima osservazione di un segnale di onda gravitazionale con tre rivelatori ([GW170814](#)), i due rivelatori [Advanced LIGO](#) negli Stati Uniti, ad [Hanford](#), Washington e [Livingston](#), Louisiana, e il rivelatore [Advanced Virgo](#) a Cascina in Italia, hanno osservato un altro segnale di onda gravitazionale proveniente da una sorgente che è forse ancora più intrigante. I rivelatori LIGO-Virgo erano a metà del loro [terzo periodo osservativo, O3](#), quando hanno osservato questo evento estremamente forte, prodotto dalla fusione di due [oggetti compatti](#) – uno, un [buco nero](#), e l'altro di natura indeterminata.

Ci sono due caratteristiche speciali che rendono unico GW190814. La prima è che l'oggetto compatto più pesante è nove volte più massiccio del compagno, cosa che rende questo sistema il più asimmetrico osservato finora con onde gravitazionali. La seconda è che l'oggetto compatto più leggero ha una massa misurata che potrebbe corrispondere al più leggero buco nero o alla più pesante stella di neutroni mai scoperta in un sistema di due oggetti compatti – ma non possiamo sapere quale dei due casi sia quello giusto. Insieme, queste due caratteristiche sfidano la nostra comprensione delle masse che gli oggetti compatti possono avere e il modo in cui vanno a finire in sistemi che si legano assieme.

### IL SEGNALE DI ONDA GRAVITAZIONALE

La ricerca di segnali di onde gravitazionali nei dati registrati dai rivelatori utilizza le tecniche dei [filtri adattati](#) che confrontano i dati osservati con i segnali predetti dalla teoria della [Relatività Generale di Einstein](#). L'analisi fatta in questo modo ha meno di una possibilità in 10000 anni che GW190814 sia dovuto al rumore casuale dei rivelatori. GW190814 è il terzo evento osservato ad oggi (dopo [GW170817](#) e [GW150914](#)) in ordine di intensità di segnale. È abbastanza forte da essere visibile ad occhio nudo nello spettrogramma di Figura 1, che mostra come la frequenza del segnale cambi nel tempo.

Durante tutto O3 la collaborazione LIGO-Virgo ha diffuso in tempo reale [avvisi pubblici](#) riguardanti potenziali rivelazioni di onde gravitazionali. Questi avvisi pubblici contengono informazioni preliminari sulla probabile sorgente del segnale, sotto forma di una [classificazione della sorgente](#). GW190814 è stato annunciato al pubblico entro 20 minuti dalla sua rivelazione con la classificazione "[Mass Gap](#)", che significa che almeno uno dei suoi oggetti compatti aveva una massa stimata tra 3 e 5 **masse solari,  $M_{\odot}$** . Questa definizione di "Mass Gap" trae ispirazione dalla scarsità di osservazioni di buchi neri con masse sotto circa  $5 M_{\odot}$ . Questa parte della distribuzione di massa dei buchi neri è nota come [mass gap inferiore](#).

Un'ulteriore analisi del segnale ha permesso di stimare le masse con maggior precisione, e un aggiornamento fatto circolare 11 ore più tardi ha modificato la classificazione della sorgente come NSBH, con cui si intende che uno dei due oggetti compatti ha una massa stimata sotto  $3 M_{\odot}$ , che è approssimativamente la massa di una stella di neutroni. Inoltre, la sorgente è stata localizzata in una piccola area di cielo di circa 20 gradi quadrati (si veda la Figura 2). Usando questa informazione, sono state eseguite ricerche in tutto lo spettro elettromagnetico e con neutrini, come nel caso di [GW170817](#), ma non si è trovata alcuna controparte della sorgente di onde gravitazionali. Questo non è del tutto inatteso, comunque, dal momento che GW190814 è molto più lontana di GW170817 e dato che le proprietà misurate della sorgente (si veda sotto) non favoriscono elevate emissioni elettromagnetiche.

### PROPRIETÀ DELLA SORGENTE

L'oggetto compatto più pesante nel sistema ha una massa di circa  $23 M_{\odot}$ , in linea con la popolazione di buchi neri osservata finora da LIGO e Virgo (si veda la Figura 3). La massa dell'oggetto compatto più leggero sta tra 2.5 e 3

$M_{\odot}$ , che la mette sopra quella che è al momento la più pesante stella di neutroni, [MSP J0740+6620](#), e sotto le masse tipiche dei buchi neri rivelati indirettamente per mezzo di osservazioni elettromagnetiche. Comunque, la massa è simile a quella dell'oggetto compatto (probabilmente un buco nero) prodotto dalla fusione di due stelle di neutroni osservata in [GW170817](#).

La asimmetria tra la massa più grande e quella più piccola ci aiuta a misurare con maggior precisione le proprietà della sorgente. Quanto maggiore è l'asimmetria, tanto più forte è la firma delle armoniche superiori della frequenza fondamentale nel segnale di onda gravitazionale, che sono simili ai toni di una corda di chitarra quando viene pizzicata. Come nel caso della fusione di buchi neri [GW190412](#), l'ambiguità tra la distanza e l'inclinazione del sistema viene parzialmente risolta dall'informazione extra contenuta nelle armoniche superiori. Di conseguenza riusciamo a determinare che le onde gravitazionali provenienti da GW190814 hanno avuto origine a una distanza di circa 800 milioni di **anni luce**.

Ci si aspetta che oggetti compatti come le stelle di neutroni e [i buchi neri ruotino attorno al loro asse](#). Benché questa rotazione non influenzi il segnale di onda gravitazione tanto quanto le loro masse, e quindi sia più difficile da misurare, GW190814 è stato un segnale che è durato nei nostri rivelatori per circa 10 secondi. Insieme alla grande intensità del segnale, ciò ci permette di produrre la misura più precisa fatta finora della rotazione di un buco nero per mezzo di onde gravitazionali: la frequenza di rotazione è inferiore di meno del 7% rispetto al valore massimo permesso dalla Relatività Generale. Siamo riusciti anche a dimostrare che il sistema probabilmente non mostrava il fenomeno della [precessione](#).

## **METTENDO ALLA PROVA EINSTEIN E HUBBLE**

GW190814 fornisce un ricchissimo ambiente per fare scienza. Poiché GW190814 è decisamente più asimmetrico di [GW190412](#), troviamo prove molto più forti della presenza di **armoniche superiori** o **multipoli superiori** nel segnale. Questa è una meravigliosa conferma della Relatività Generale che predice la struttura multipolare della radiazione gravitazionale.

Noi facciamo diversi altri test della Relatività Generale su GW190814 e scopriamo che il segnale (Figura 4) si potrebbe ben descrivere come la fusione di due buchi neri. È significativo che non ci siano prove che suggeriscano che l'oggetto più leggero fosse qualcosa di diverso da un buco nero, come una stella di neutroni o qualcosa di ancora più [esotico](#).

Con GW190814, riusciamo anche a fare una nuova misura con onde gravitazionali della [costante di Hubble  \$H\_0\$](#) , l'attuale velocità di espansione dell'Universo. Al momento, GW190814 è la sorgente di onde gravitazionali meglio localizzata nel cielo senza che sia stata osservata una controparte nello spettro elettromagnetico o con i neutrini. In principio, per misurare  $H_0$  abbiamo bisogno del **redshift** della galassia che ospita la sorgente. Ma senza una controparte che identifica la galassia ospite in modo univoco noi possiamo considerare invece come possibile ospite *tutte* le galassie note nella ben localizzata regione di origine di GW190814. Per determinare la costante di Hubble combiniamo tutti i loro redshift, pesati con la probabilità che una data galassia *sia* l'ospite, con la misura di distanza ottenuta con onde gravitazionali. Con questo calcolo troviamo che  $H_0$ , con un po' di incertezza, vale circa 75 km al secondo per **Megaparsec**, meglio di quanto fosse possibile con qualunque altra sorgente di onde gravitazionali senza una controparte..

## **L'OGGETTO PIÙ LEGGERO È UNA STELLA DI NEUTRONI O UN BUCO NERO?**

La massa dell'oggetto più compatto lo rende una stella a neutroni eccezionalmente pesante oppure un buco nero insolitamente leggero. Normalmente noi saremmo capaci di inferire la presenza di una stella di neutroni dalla

caratteristica impronta delle maree nel segnale di onda gravitazionale: se il sistema che si fonde assieme contiene una stella di neutroni, la forza gravitazionale esercitata dal compagno solleva una marea sulla stella di neutroni, simile alle maree oceaniche sollevate sulla Terra dalla Luna. Ma in un sistema massiccio e asimmetrico come GW190814, questo [segnale mareale](#) è troppo piccolo per poterlo misurare. In questo caso il nostro tentativo di misurare le maree non ci dice se GW190814 sia stata causata dalla fusione di un buco nero e una stella di neutroni oppure da due buchi neri.

D'altra parte, i modelli teorici delle stelle di neutroni, così come le osservazioni della popolazione di stelle di neutroni per mezzo dell'astronomia elettromagnetica, ci permettono di stimare la massima massa che una stella di neutroni può raggiungere. Tali predizioni suggeriscono che l'oggetto compatto più leggero è probabilmente troppo pesante per essere una stella di neutroni e quindi è probabile che sia un buco nero. Però non possiamo eliminare la possibilità che GW190814 contenga una stella di neutroni particolarmente pesante, uno scenario che ci costringerebbe a rivedere drammaticamente le nostre stime della massima massa possibile per una stella di neutroni.

## LA STORIA DELLE ORIGINI: COME SI È FORMATO IL SISTEMA?

Poiché la massa dell'oggetto più leggero si trova tra i valori tipici per una stella di neutroni ed un buco nero ed è circa nove volte inferiore a quella del compagno, GW190814 non assomiglia a nessuna delle fusioni osservate finora da LIGO e Virgo (si veda la figura 5). È anche diversa dalla maggior parte dei sistemi prodotti in simulazioni della popolazione di fusioni di oggetti compatti nell'Universo. Noi ci aspettiamo che fusioni di questo tipo abbiano luogo molto meno frequentemente di quelli più tipici tra due stelle di neutroni o due buchi neri. Per tali ragioni, spiegare la formazione di questo sistema è una grossa sfida per tutti gli attuali modelli teorici.

Confrontando le proprietà e la frequenza di fusione dedotta per GW190814 con le predizioni basate sui modelli teorici dell'evoluzione stellare sviluppati dagli astronomi, troviamo che i giovani [ammassi stellari](#) densi e i dischi intorno ai [nuclei galattici attivi](#) sono gli ambienti più probabili per eventi, mentre gli [ammassi globulari](#) lo sono meno. Questo evento potrebbe avere avuto luogo in seguito all'evoluzione di un sistema binario isolato, benché le predizioni basate su questo scenario teorico dipendano in modo cruciale dalle ipotesi adottate e dai modelli di formazione degli oggetti compatti. È pure possibile che l'oggetto più leggero nel sistema possa essersi formato a sua volta a partire da una fusione precedente, che sia un residuo di seconda generazione. Un residuo di questo genere potrebbe poi trovare come compagno un buco nero tramite interazioni gravitazionali in ambienti stellari densamente affollati come gli ammassi globulari. Però è improbabile che sia questo il meccanismo principale tramite cui si formano questi sistemi binari.

GW190814 solleva affascinanti domande sulle masse degli oggetti compatti e i processi che portano alle loro fusioni. Le future osservazioni di onde gravitazionali saranno cruciali per gettare nuova luce (o onde gravitazionali!) sulla più vasta popolazione di fusioni asimmetriche, di cui GW190814 è solo il primo esempio.

## GLOSSARIO

**Ammasso globulare:** un insieme sferico di stelle densamente raccolte in orbita intorno ad una galassia. Un ammasso globulare può contenere fino ad un milione di stelle

**Anno luce:** unità di distanza definita come la distanza percorsa dalla luce in un anno

**Armoniche superiori/Multipoli:** l'emissione di onde gravitazionali può venire descritta tramite un'espansione in "armoniche sferiche". Le armoniche superiori sono termini di questa espansione oltre il termine dominante.

**Buco nero:** un oggetto compatto così denso che la luce non riesce a sfuggire alla sua attrazione gravitazionale

**Stella di neutroni:** un oggetto compatto estremamente denso che è il residuo del collasso di una stella massiccia

**M<sub>☉</sub>:** massa del Sole e unità di misura standard in astronomia, corrispondente a circa  $2 \times 10^{30}$  kg

**Mass-gap:** un divario nella popolazione di buchi neri suggerito dalla mancanza di osservazioni di oggetti compatti con masse tra  $2.5$  e  $5 M_{\odot}$

**Megaparsec (Mpc):** unità di distanza equivalente a circa 3.26 milioni di anni luce

**Nuclei galattici attivi:** regioni molto compatte e luminose che si trovano al centro di un certo numero di galassie. Sono tra le sorgenti di energia più potenti e costanti dell'Universo.

**Oggetto compatto:** oggetto molto compatto, come una nana bianca, una stella di neutroni o un buco nero, che di solito segna il punto finale della vita di una stella

**Precessione:** a causa della conservazione del momento angolare, quando i buchi neri ruotano su sé stessi in una direzione diversa da quella della rotazione orbitale, il piano dell'orbita ruota ("precede") intorno alla direzione del momento angolare totale.

**Redshift:** aumento della lunghezza d'onda (del suono, della luce o delle onde gravitazionali) dovuta al moto della sorgente rispetto all'osservatore. A causa dell'espansione cosmologica dell'Universo, oggetti come le galassie si allontanano da noi e la luce e altra radiazione elettromagnetica che proviene da essi ha una lunghezza d'onda maggiore

**FIGURE**

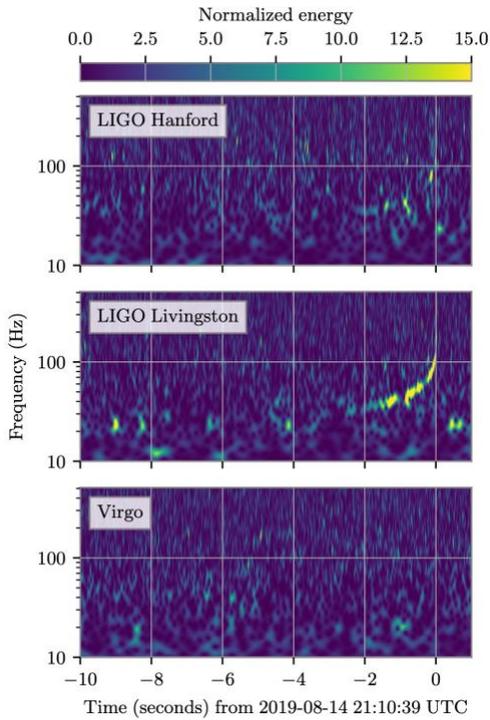


Figura 1: Rappresentazione tempo-frequenza dei dati relativi a GW190814, osservati da LIGO Hanford (alto), LIGO Livingston (centro), and Virgo (basso). I tempi sono marcati relativamente all'evento di fusione. Il valore di energia è rappresentato dalla scala colorata. Il segnale a forma di "chirp" è chiaramente visibile nel pannello centrale (dati di LIGO Livingston), dove si è registrato il segnale più forte.

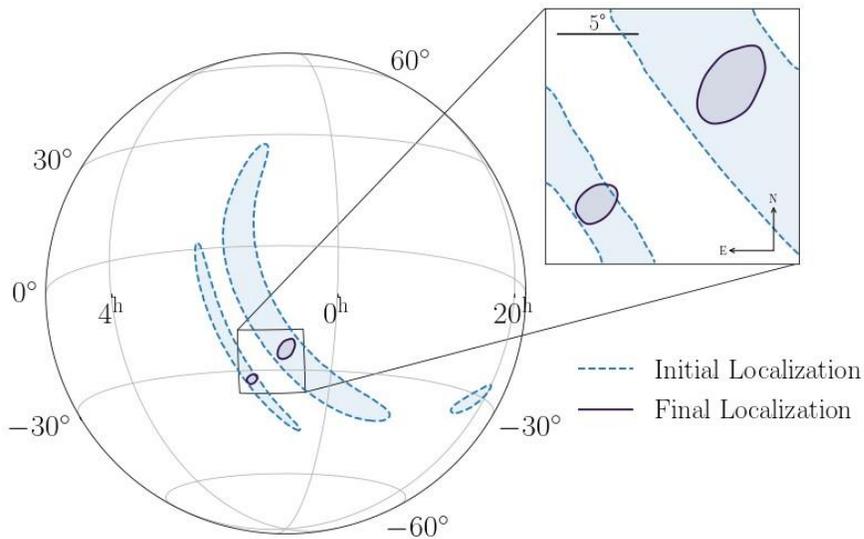


Figura 2: L'area nel cielo da cui ha probabilmente avuto origine il segnale GW190814. Le macchie blu corrispondono all'analisi dati iniziale, mentre le macchie viola rappresentano la localizzazione finale nel cielo.

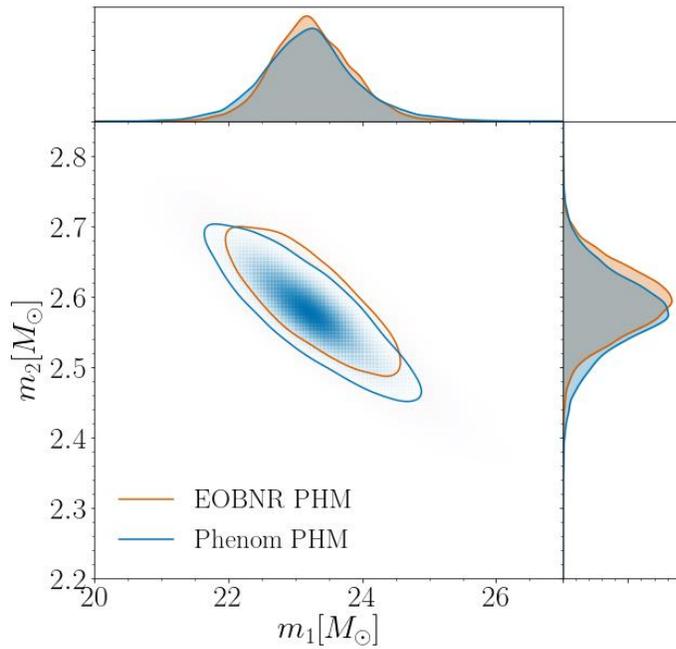


Figura 3: Le masse stimate dei due oggetti compatti che hanno prodotto GW190814. L'asse orizzontale rappresenta la massa dell'oggetto più pesante, mentre l'asse verticale rappresenta la massa dell'oggetto più leggero (che potrebbe essere una stella di neutroni o un buco nero). Le linee di livello e le regioni ombreggiate mostrano le possibili combinazioni di masse compatibili con i dati. Le curve nei pannelli aggiuntivi in alto e a destra mostrano le corrispondenti distribuzioni dei valori di ciascuna delle due masse. I due colori rappresentano previsioni ottenute dalla Relatività Generale in modo leggermente diverso.

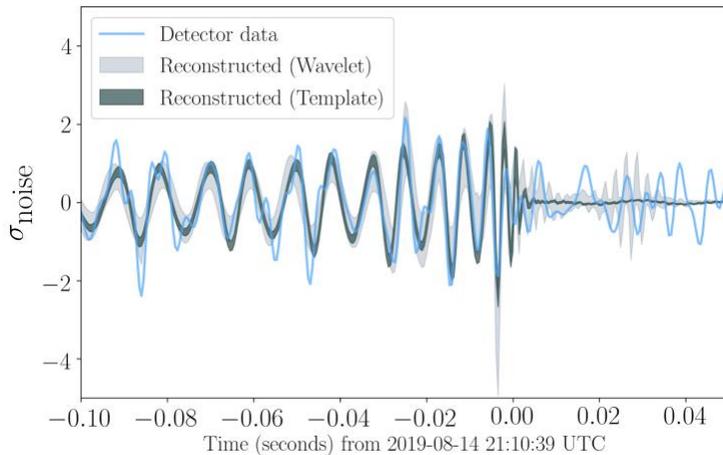


Figura 4: Rappresentazione dei dati registrati (curva blue) in prossimità del tempo dell'evento (segnato sull'asse orizzontale), insieme alle ricostruzioni della forma del segnale sottostante. La banda di colore grigio scuro rappresenta il modello del segnale predetto dalla Relatività Generale, mentre la banda di colore grigio chiaro rappresenta una ricostruzione del segnale usando ipotesi minimali rispetto ad una specifica teoria della gravità. L'asse verticale è scalato in modo che il valore 1 corrisponda al livello tipico delle fluttuazioni osservate nei dati.

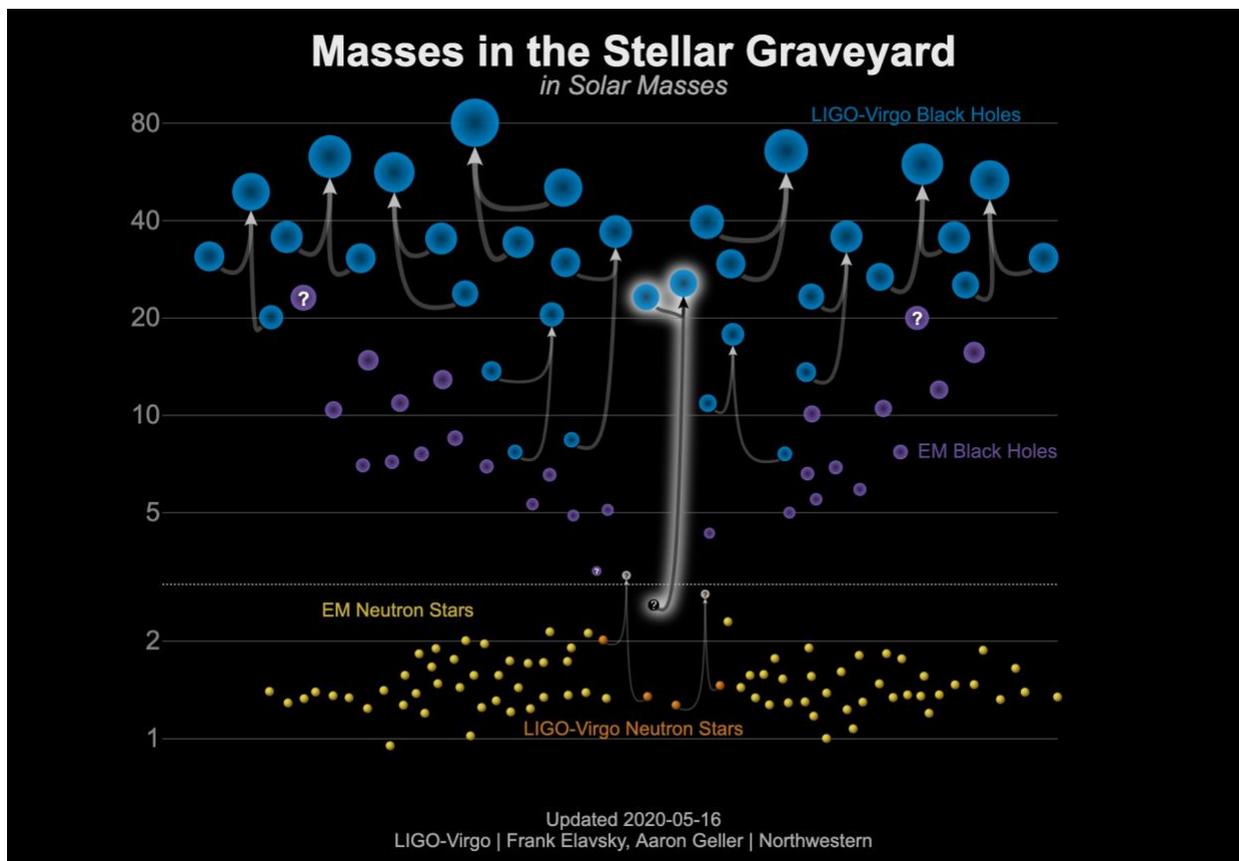


Figura 5: Le masse delle stelle a neutroni e dei buchi neri misurate per mezzo delle onde gravitazionali e di osservazioni elettromagnetiche. I simboli gialli e viola rappresentano rispettivamente le misure elettromagnetiche di stelle di neutroni e buchi neri, mentre i simboli arancio e blu corrispondono alle misure fatte con onde gravitazionali. Il nostro segnale, GW190814, è indicato nella zona centrale del grafico come la fusione di un buco nero e di un oggetto misterioso di massa circa 2.6 volte la massa del Sole, un evento che ha prodotto un altro buco nero.