

GW190425: il più massiccio sistema binario di stelle di neutroni mai osservato?

COSA ABBIAMO TROVATO?

La [LIGO Scientific Collaboration](#) e la [Virgo Collaboration](#) hanno osservato il 25 Aprile 2019 onde gravitazionali dalla fusione di due oggetti compatti. Il segnale viene denominato **GW190425**. L'osservatorio [LIGO](#) è formato da due rivelatori di onde gravitazionali, uno a Hanford (Washington, US), l'altro a Livingston (Louisiana, US). Quando GW190425 è arrivato sulla Terra, il rivelatore [LIGO-Hanford](#) non era al momento in presa dati, mentre un forte segnale è stato rivelato da [LIGO-Livingston](#). Anche il [rivelatore Virgo](#), ospitato dall'[European Gravitational Observatory \(EGO\)](#) a Cascina (Pisa, IT), era in acquisizione dati; tuttavia, per la combinazione tra una minore sensibilità e il fatto che GW190425 proveniva probabilmente da una regione di cielo dove Virgo al momento era meno sensibile, il segnale è stato sopra soglia solo a LIGO-Livingston. In ogni caso i dati di Virgo sono stati utilizzati per determinare i parametri della sorgente di GW190425. Abbiamo trovato che la massa totale di questo sistema binario era compresa fra 3.3 e 3.7 volte la massa del Sole. In questo intervallo di massa la spiegazione più plausibile è che due [stelle di neutroni](#) si siano fuse a circa 520 milioni di [anni luce](#) di distanza da noi. La massa di questo sistema binario è significativamente maggiore di ogni altro sistema binario di stelle di neutroni finora conosciuto.



Figura 1: Rappresentazione artistica della fusione del sistema binario di stelle di neutroni che potrebbe aver prodotto GW190425. Credit: National Science Foundation/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet.

UNA BREVE RETROSPETTIVA

GW190425 è stato rivelato durante il terzo periodo di osservazioni di Advanced LIGO e Virgo, denominato O3, che è cominciato il 1 Aprile 2019, e finirà il 30 Aprile 2020. Prima di questo periodo di osservazioni, ce ne sono stati altri due che hanno visto protagonisti i rivelatori 'Advanced': O1 (Settembre 2015 - Gennaio 2016) e O2 (Novembre 2016 - Agosto 2017) - vedere [qui](#) per maggiori dettagli. Fra un periodo di osservazioni e l'altro i rivelatori sono stati migliorati con nuove tecnologie che ne hanno migliorato la sensibilità. Durante O2, LIGO e Virgo hanno fatto la prima rivelazione di onde gravitazionali dallo spiraleggiamento e fusione di due stelle di neutroni, il segnale noto come [GW170817](#). Quella fusione di stelle di neutroni ha prodotto anche una [emissione elettromagnetica associata visibile su tutto lo spettro](#). GW190425 è probabilmente la nostra seconda osservazione di onde gravitazionali emesse da una fusione di stelle di neutroni. Fino a questo momento non abbiamo identificato nessuna emissione elettromagnetica o di neutrini associata a GW190425. Questo non è particolarmente sorprendente dato che la sorgente di GW190425 è più lontana di quella di GW170817 ed il segnale elettromagnetico previsto dovrebbe essere più debole. Forse però la ragione principale è che GW190425 non è stato ben localizzato. Infatti, abbiamo localizzato la sorgente di GW190425 entro una regione che copre il 16% dell'intera volta celeste, un'area enorme per essere esplorata dai telescopi convenzionali!

COME SAPPIAMO CHE GW190425 È DI ORIGINE ASTROFISICA?

Abbiamo diversi metodi per cercare segnali di onde gravitazionali causate da fusioni di oggetti compatti. Questi metodi di ricerca confrontano i dati osservati con i segnali predetti teoricamente dalla [Relatività Generale](#) usando una tecnica chiamata del [filtro adattato](#). Le nostre analisi hanno identificato il segnale GW190425 dai dati raccolti da LIGO-Livingston. Il passo successivo è stato di stimarne la [significatività statistica](#), cioè misurare la probabilità che un segnale di questo tipo possa essere generato casualmente dal rumore

di fondo caratteristico del rivelatore. Questa quantità si chiama probabilità di falso allarme. Per stimarla dobbiamo confrontare l'intensità del segnale GW190425 con la distribuzione del rumore di fondo. La distribuzione del rumore di fondo è costruita ripetendo la ricerca sui 169.5 giorni di dati di O1 e O2 e 50 giorni di O3, acquisiti separatamente da LIGO-Livingston, LIGO-Hanford e Virgo. Abbiamo trovato che la probabilità di falso allarme per GW190425 è di una volta in 69000 anni. La figura 2 mostra che nei complessivi 219.5 giorni di dati di rumore di fondo, GW190425 si staglia chiaramente fuori dal rumore, in aggiunta all'altra rivelazione confermata di GW170817.

Oltre ai metodi di ricerca, abbiamo applicato a GW190425 procedure di controllo [come già fatto per eventi precedenti](#). Questi controlli sono fatti per assicurarsi che un raro transiente di rumore di LIGO-Livingston non possa spiegare GW190425. Non abbiamo trovato alcun disturbo ambientale o strumentale che possa spiegare GW190425.

PERCHÈ GW190425 È COSÌ INTERESSANTE?

Abbiamo trovato che la massa del più pesante dei due oggetti compatti è fra 1.61 e 2.52 volte la massa del Sole, mentre la massa del secondo oggetto è fra 1.12 e 1.68 volte la massa del Sole. Queste masse sono compatibili con quelle misurate per altre stelle di neutroni e con quelle che ci si aspetta da simulazioni di esplosioni di [supernova](#). La più pesante stella di neutroni mai trovata con osservazioni elettromagnetiche ([PSR J0740+6620](#)) misura fra 2.05 e 2.24 volte la massa del Sole. Dal segnale gravitazionale GW190425 non possiamo escludere che uno, o magari entrambi gli oggetti siano buchi neri. Comunque, la spiegazione più semplice è che questi due oggetti siano realmente due stelle di neutroni. In questo caso, cosa si può dedurre da GW190425?

In un modo o nell'altro il sistema che ha dato origine a GW190425 è diverso dagli altri sistemi binari di stelle di neutroni nella nostra Galassia. Mentre la massa di ciascuna stella di neutroni è simile ad altre già conosciute, la massa finale è sostanzialmente differente. La figura 3 mostra le masse totali dei dieci sistemi binari noti di stelle di neutroni nella nostra galassia che ci si aspetta che si fonderanno entro la durata di vita dell'Universo.

La [distribuzione normale](#) che interpola meglio questi 10 sistemi mostra che in media la massa di una sistema binario galattico è di circa 2.69 volte la massa del Sole, mentre la massa della binaria di GW190425 è di circa 3.4 volte la massa del Sole. Si trova cioè a 5 [deviazioni standard](#) dalla media galattica. Questo suggerisce che il sistema di GW190425 si sia formato in modo diverso rispetto ai sistemi binari noti nella nostra galassia.

Ci sono due modi in cui pensiamo si possa formare una coppia di stelle di neutroni. Uno è detto "canale di evoluzione di una binaria isolata in una fascia comune" (in inglese [common envelope](#)), in cui due stelle di neutroni si formano quando ciascuna delle due stelle di un sistema binario evolve fino all'esplosione di supernova, ma restando isolate da altri oggetti compatti. Il secondo modo è chiamato "canale di formazione dinamica". In questo scenario, un sistema binario già esiste: una stelle di neutroni può essere accoppiata ad esempio a un'altra stella di neutroni, o a una [stella nella sequenza principale](#). In seguito un'altra stella di neutroni entra nel sistema orbitale della coppia ed espelle quella di massa minore, lasciando un sistema formato da due stelle di neutroni. Un'origine "dinamica" è improbabile per GW190425 perchè non si pensa che questo canale contribuisca significativamente alla probabilità di fusione di binarie di stelle di neutroni. Se la binaria di GW190425 si è formata isolatamente, potrebbe significare che le due stelle di neutroni siano nate da stelle a bassa [metallicità](#). Oppure potrebbe significare che quando la prima esplosione di supernova ha formato la prima stella di neutroni, un po' di massa della seconda stella (che non è ancora arrivata allo stadio di supernova) si sia trasferita alla prima stella di neutroni, rendendola così più pesante. In ogni caso la scoperta di GW190425 potrebbe suggerire l'esistenza di una popolazione di sistemi binari di stelle di neutroni con periodi orbitali inferiori a un'ora che non sono rilevabili con gli attuali metodi di ricerca basati sul segnale elettromagnetico.

Abbiamo anche cercato di stimare la velocità di rotazione delle stelle di neutroni. Sfortunatamente i nostri risultati non danno indicazione su quale fossero le velocità di rotazione rispetto al proprio asse (in inglese spin) delle due stelle di neutroni. Sono consistenti con la velocità di rotazione delle

due più veloci binarie di stelle di neutroni galattiche che si pensa possano fondersi entro la durata di vita dell'Universo, PSR J0737-3039A/B e PSR J1946+2052. Quest'ultimo sistema binario contiene una pulsar che ruota ogni 0.017s.

Se assumiamo che GW190425 sia originato da un sistema binario di stelle di neutroni e combiniamo questo risultato con l'altro sistema binario di stelle di neutroni che abbiamo osservato fondersi (GW170817), possiamo stimare il numero di stelle di neutroni che collidono ogni anno in un dato volume dell'Universo. Troviamo che il tasso di fusione è compreso tra 250 e 2810 per gigaparsec cubo per anno.

GW190425 è probabilmente la seconda osservazione di una fusione di un sistema binario di stelle di neutroni, e ci ha già dato straordinarie informazioni su questi strani oggetti.

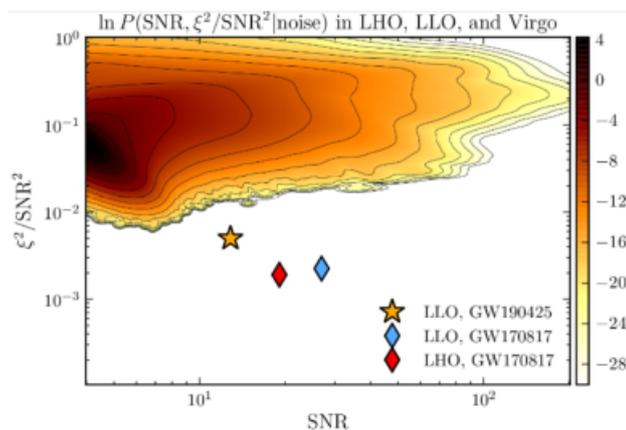


Figura 2: Questa figura mostra il rapporto segnale/rumore (SNR, dall'inglese Signal-to-Noise Ratio) e la funzione χ^2 di probabilità del rumore combinati per LIGO-Hanford (LHO), LIGO-Livingston (LLO) e Virgo. L'SNR quantifica quanto il segnale sia più forte del rumore mentre χ^2 indica quanto l'evoluzione temporale dell'SNR corrisponda a quella del segnale di una vera binaria di oggetti compatti. La misura mostra il fondo per segnali da binarie di stelle di neutroni. Questo fondo è formato usando 169.5 giorni di dati da O1 e O2 e 50 giorni da O3. Non c'è fondo presente nella posizione di GW190425 (stella gialla): il segnale si staglia completamente fuori dal fondo. Per confronto, il segnale GW170817 registrato nei rivelatori LIGO-Hanford e LIGO-Livingston è mostrato come rombi blu e rossi.

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

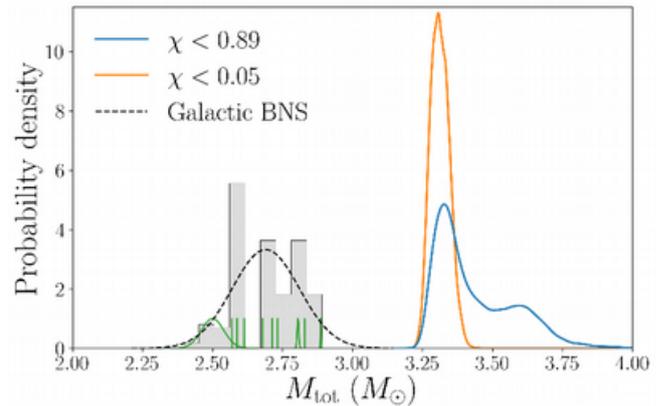


Figura 3: Questa figura mostra la distribuzione delle possibili masse totali della binaria di GW190425 sotto ipotesi diverse sulla velocità di rotazione (spin) di ciascuno dei due oggetti compatti (curve blu e arancione). La figura mostra anche le masse totali per i 10 sistemi binari di stelle di neutroni galattici che ci aspetta che fonderanno entro la vita dell'Universo. La distribuzione delle masse totali delle binarie galattiche è interpolata (in inglese fit) da una distribuzione normale mostrata dalla curva nera tratteggiata. Le curve verdi sono per ciascuna binaria di stelle di neutroni galattica riscalata alla stessa altezza unitaria sull'asse verticale.

Le figure 2 e 3 sono tratte dall'articolo scientifico

GLOSSARIO

Oggetto compatto: Un'espressione generica per indicare oggetti stellari molto densi e piccoli come stelle di neutroni e buchi neri. Quando si dice piccoli, si intende ovviamente in senso astronomico! Tutti questi oggetti hanno almeno la massa del Sole, concentrato entro un diametro di pochi, o poche decine di, chilometri.

Binaria: Un sistema formato da due oggetti in orbita l'uno attorno all'altro.

Stella di Neutroni: Un oggetto estremamente denso risultante dal collasso di una stella massiccia.

Buco nero: Una regione dello spazio-tempo determinata da una massa estremamente compatta, in cui la gravità è così intensa che impedisce a tutto, inclusa la luce, di uscire.

Rotazione (spin in inglese): Quantità che misura quanto un oggetto ruota intorno a sé stesso. Per esempio, la Terra ruota una volta ogni 24 ore.

Pulsar: Stella di neutroni osservata per mezzo degli impulsi di radiazione elettromagnetica (generalmente nella banda radio) che essa emette. Una grande parte delle stelle di neutroni che crediamo esistano non possono essere osservate come pulsars, o perchè non emettono segnali elettromagnetici sufficientemente forti, oppure perchè non li emettono in direzione della Terra.

Il preprint dell'articolo è disponibile liberamente su:

<https://arxiv.org/abs/2001.01761>

Leggi il comunicato stampa di LIGO su questa scoperta:

<https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20200106>

Leggi il comunicato stampa di Virgo su questa scoperta:

<https://tds.virgo-gw.eu/ql/?c=15114>