

GW190412: LA PRIMA OSSERVAZIONE DELLA FUSIONE DI DUE BUCHI NERI DI MASSA SIGNIFICATIVAMENTE DIVERSA

COSA ABBIAMO SCOPERTO?

Il 12 aprile 2019, la [Collaborazione Scientifica LIGO](#) e la [Collaborazione Virgo](#) hanno osservato onde gravitazionali prodotte dalle orbite sempre più strette e dalla fusione finale di due buchi neri. Questo evento, chiamato GW190412, è stato osservato dall'insieme dei tre rivelatori: entrambi i rivelatori di [LIGO](#) (uno ad [Hanford, Washington](#) e uno a [Livingston, Louisiana](#)) così come il [rivelatore Virgo](#) (presso Cascina). GW190412 è stato osservato all'inizio del terzo periodo osservativo di Advanced LIGO e Virgo, altrimenti detto O3, che è iniziato il primo aprile 2019 ed è stato sospeso il 27 marzo 2020.

Benché le masse dei due buchi neri siano compatibili con quelle di altri buchi neri osservati in precedenza, GW190412 è unico nel senso che si tratta della prima fusione di buchi neri in cui le masse dei due buchi neri sono decisamente diverse tra loro – uno dei due è più di tre volte più pesante dell'altro. Questa asimmetria tra le masse modifica il segnale gravitazionale in modo tale che si possono misurare meglio altri parametri, quali la distanza e l'inclinazione orbitale del sistema, la velocità di rotazione del buco nero più pesante, e la precessione angolare del sistema. Inoltre la diversità di massa di GW190412 ci permette di verificare una predizione fondamentale della teoria della relatività generale di Albert Einstein: che le onde gravita-

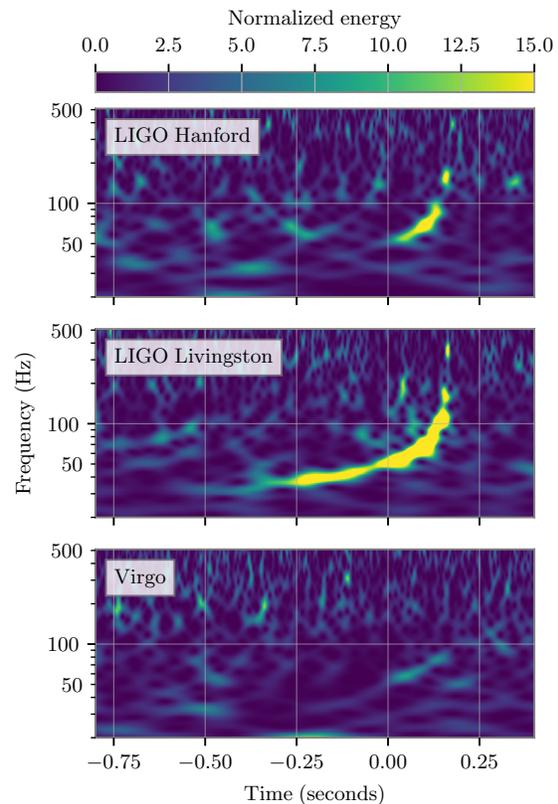


Figura 1: Lo spettrogramma di GW190412 nei tre rivelatori di onde gravitazionali. L'asse orizzontale rappresenta il tempo, l'asse verticale mostra la frequenza del segnale. Il colore rappresenta la quantità di energia in una certa frequenza ad un certo tempo. In questo segnale si può osservare il familiare “chirp” sotto forma di una crescita di frequenza ed energia nel tempo, che produce un'aumentata potenza dell'emissione di onde gravitazionali mentre i due buchi neri orbitano sempre più vicini e alla fine si fondono.

zionali risuonano a più di una frequenza, grazie ai cosiddetti *multipoli di ordine superiore*.

COME FACCIAMO A SAPERE CHE GW190412 È UN SEGNALE GRAVITAZIONALE VERO?

GW190412 è un evento ben visibile, che è stato osservato da tutti e tre i rivelatori. Poiché i tre rivelatori si trovano a migliaia di chilometri di distanza uno dall'altro, vedere questo segnale in tutti e tre simultaneamente è una buona indicazione della sua origine astrofisica e del fatto che non è dovuto al rumore.

La rappresentazione tempo-frequenza di GW190412, nota come *spettrogramma*, viene mostrata nella Figura 1. Nonostante GW190412 sia abbastanza intenso da poterlo vedere “ad occhio” nei dati dei rivelatori di Hanford e Livingston, noi usiamo diversi algoritmi per cercare i segnali di onde gravitazionali nei dati e determinare la loro significatività statistica. La maggior parte delle tecniche è basata sui *filtri ottimali*, che confrontano i dati osservati con segnali simulati predetti dalla relatività generale. Noi quantifichiamo la possibilità che un segnale possa avere origine nel rumore dei rivelatori per mezzo della *False Alarm Rate* (frequenza dei falsi allarmi). Usando dati presi tra l'8 e il 18 aprile, abbiamo trovato che la frequenza dei falsi allarmi corrisponde ad un solo evento casuale di questo tipo ogni 30000 anni! Questa frequenza dei falsi allarmi diverrà ancora più significativa con l'analisi di ulteriori dati di O3. Abbiamo anche controllato altri tipi di sorgenti di rumore strumentale e ambientale, e non abbiamo trovato nulla che possa aver influenzato in modo significativo la rivelazione o l'analisi di GW190412.

LE PROPRIETÀ DI GW190412

Le singole masse dei due buchi neri in GW190412 sono in accordo con quelle osservate in precedenti periodi osservativi – un buco nero aveva 30 volte la massa del Sole e l'altro 8 volte la massa del Sole. Ma il *rapporto di massa* di GW190412, definito come il rapporto tra la massa del buco nero più leggero e quello più pesante, è diverso da tutti quelli rivelati prima. Mentre le 10 precedenti fusioni di buchi neri osservate nei primi due periodi osservativi indicavano coppie di buchi neri di massa simile, il buco nero più grande in GW190412 ha più di tre volte la massa del buco nero più piccolo.

Le diverse masse di GW190412 hanno portato ad un'asimmetria nell'emissione delle onde gravitazionali che ci aiuta a dedurre alcuni parametri del sistema. Troviamo che lo spin efficace è positivo, e questo ci dice che almeno uno dei due buchi neri ruotava in una direzione prossima a quella del moto orbitale. Inoltre, a causa della diversità di massa, per la prima volta è possibile mettere dei

forti vincoli sullo spin del buco nero più grande, la cui frequenza di rotazione risulta essere circa il 40% di quella massima permessa dalla relatività generale. Lo spin efficace e il rapporto di masse ricavati per GW190412 sono mostrati in Figura 2. Ci sono anche indicazioni che il sistema avesse un moto di precessione, anche se gli effetti dovuti alla precessione non sono abbastanza chiari da poter arrivare ad una conclusione certa. Inoltre, le masse diverse ci aiutano anche a risolvere l'ambiguità nella relazione tra distanza e inclinazione orbitale del sistema, e ciò ci permette di misurare meglio entrambi i parametri. GW190412 ha avuto luogo a quasi due miliardi e mezzo di anni luce dalla Terra!

UDIRE IL MORMORIO DELLE ARMONICHE SUPERIORI

Le singolari proprietà di GW190412 consentono anche l'osservazione di una proprietà fondamentale delle onde gravitazionali. A cominciare con il lavoro di Einstein, raffinato più tardi da Newman, Penrose, Thorne e molti altri, è stato dimostrato che la radiazione gravitazionale da binarie compatte è prevalentemente *quadrupolare*. Si può pensare a questa radiazione quadrupolare come al suono principale che si sente quando si pizzica una corda di chitarra. Però, proprio come negli strumenti musicali, la radiazione gravitazionale contiene anche tonalità più alte. Queste *armoniche superiori* o *multipoli di ordine superiore* sono eccezionalmente difficili da distinguere in un segnale quando i buchi neri hanno masse approssimativamente uguali. L'asimmetria di massa di GW190412 permette di "udire" meglio questi sottili segnali nell'emissione di onde gravitazionali. Troviamo che i dati danno sostegno, per un fattore maggiore di 1000 a 1, all'ipotesi che ci siano armoniche superiori nel segnale. In futuro l'intensità relativa di multipoli di ordine superiore potrà permettere di distinguere meglio le proprietà dei buchi neri che si fondono tra loro.

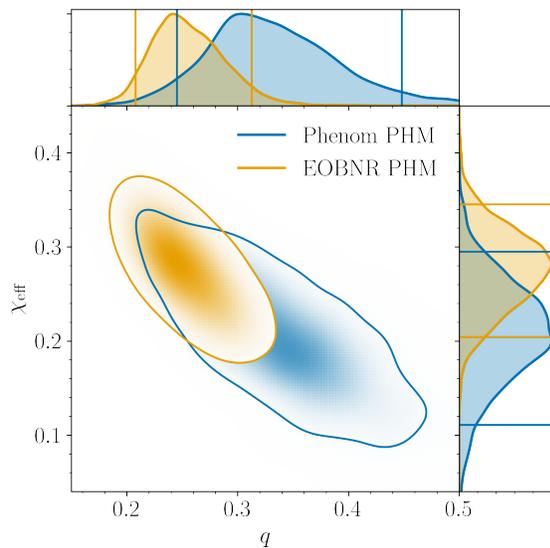


Figura 2: Il rapporto di massa (q) e lo spin effettivo (χ_{eff}) di GW190412 che sono stati dedotti dai dati. I contorni arancione e blu mostrano le distribuzioni dei parametri ottenute da due diversi modelli di forma d'onda che fanno approssimazioni leggermente diverse per descrivere il vero segnale che si otterrebbe dalla relatività generale.

È stata eseguita anche una serie di test per determinare se GW190412 sia in accordo con la relatività generale. Non abbiamo trovato alcuna inconsistenza con la relatività generale, aggiungendo un altro

tassello a sostegno della teoria della gravità di Einstein.

LA FORMAZIONE DI UN SISTEMA DI BUCHI NERI DI MASSA DISEGUALE

Ciascun periodo osservativo della rete di Advanced LIGO e Virgo ha portato nuove ed eccitanti prospettive nella comprensione dello zoo delle binarie compatte. In qualità di primo sistema binario con masse decisamente diverse, GW190412 aggiunge un altro elemento importante nella nostra comprensione delle proprietà della popolazione di buchi neri binari. L'osservazione di questo singolo evento ci dice che i sistemi con masse distintamente diverse sono comuni e che ci dovremmo aspettare di osservarne molti altri in futuro.

Sulla base dei dettagli della fisica dell'evoluzione stellare, gli astronomi hanno costruito dei modelli della formazione di buchi neri binari nell'universo, e della distribuzione delle loro masse e di altre proprietà. Benché la maggior parte dei modelli predica che le binarie con masse approssimativamente uguali siano più comuni, molti prevedono anche un numero apprezzabile di sistemi come GW190412 con masse chiaramente diverse. Tipicamente, i modelli predicono che sistemi di questo tipo si formino con una frequenza dieci volte inferiore rispetto a quelli con masse uguali. Però l'osservazione di GW190412 con un rapporto di masse estremo non è inattesa, dato che abbiamo ormai osservato ben più di dieci eventi. Man mano che continuiamo ad aumentare la nostra sensibilità all'universo delle onde gravitazionali e facciamo crescere velocemente il nostro catalogo di eventi di fusione di buchi neri, ci aspettiamo di osservare molti altri sistemi che illuminano la nostra visione dell'evoluzione stellare, della formazione di binarie compatte, e della fisica fondamentale.

GLOSSARIO

- **Binaria compatta:** un sistema costituito da due residui stellari compatti, come ad esempio stelle di neutroni o buchi neri.
- **Buco nero:** un oggetto così compatto che neppure la luce riesce a sfuggire alla sua attrazione gravitazionale.
- **Filtro ottimale:** una tecnica per rivelare segnali sepolti nel rumore dei dati. Forme d'onda campione calcolate per mezzo della relatività generale vengono usate per scandagliare i dati e risuonano in corrispondenza al ritrovamento di una forma simile.
- **Forma d'onda:** un segnale teorico di onda gravitazionale prodotto usando approssimazioni della teoria della relatività generale di Einstein.
- **Inclinazione orbitale:** l'angolo del piano orbitale rispetto la Terra.

- **Multipoli di ordine superiore:** l'emissione di onde gravitazionali può venir descritta come un'espansione in [armoniche sferiche](#). I multipoli di ordine superiore sono i termini in questa espansione oltre il termine di quadrupolo che è quello dominante.
- **Precessione:** a causa della conservazione del momento angolare, quando i buchi neri ruotano in una direzione diversa da quella dell'orbita del sistema binario, il piano orbitale ruota ("precede") intorno alla direzione del momento angolare totale.
- **Quadrupolo:** il più intenso tra i multipoli che provengono dall'emissione gravitazionale di una binaria compatta. Se si pensa a queste onde come al "suono dello spaziotempo", l'emissione di quadrupolo è il tono fondamentale. Il nome si riferisce al modo in cui l'emissione si distribuisce nelle diverse direzioni: in confronto, l'emissione più intensa di una semplice antenna radio è dipolare.
- **Relatività Generale:** la teoria della gravità proposta da Albert Einstein nel 1915. In questa teoria, lo spazio è come un tessuto elastico che si piega in presenza di energia e materia, e gli oggetti seguono traiettorie curve attraverso questo spazio.
- **Spettrogramma:** una rappresentazione tempo-frequenza-energia di una serie temporale di dati. L'intensità che corrisponde a diverse frequenze è rappresentata dal colore.
- **Spin efficace:** il parametro meglio misurato che codifica l'informazione sulla velocità di rotazione in un segnale di onde gravitazionali. Formalmente, è la proiezione pesata per la massa degli spin dei singoli buchi neri nella direzione dello spin orbitale.