

GW241011 E GW241110: DUE FUSIONI DI BUCHI NERI DI MASSA DIVERSA E IN RAPIDA ROTAZIONE OSSERVATE CON LE ONDE GRAVITAZIONALI

Verso la fine del 2024, la [Collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA \(LVK\)](#) ha osservato per mezzo delle [onde gravitazionali](#) due eventi molto simili, chiamati GW241011 e GW241110. Il primo, GW241011, è stato osservato l'11 ottobre 2024 alle 23:38:34 UTC. GW241110 è stato osservato quasi esattamente un mese dopo, il 10 novembre alle 12:41:23 UTC. In entrambi i casi si tratta di [sistemi binari di buchi neri](#) aventi masse considerevolmente diverse e che [ruotano velocemente attorno al proprio asse](#). Queste proprietà ci servono a capire i meccanismi di formazione ed evoluzione dei sistemi binari di buchi neri e diversi aspetti di fisica fondamentale.

L'OSSERVAZIONE DEI SEGNALE

I rivelatori LIGO e Virgo hanno identificato entrambi gli eventi durante la seconda parte del quarto [periodo osservativo](#) di LIGO-Virgo-KAGRA (O4b). La **Figura 1** mostra l'entità della deformazione provocata dal passaggio dell'onda gravitazionale misurata in unità di ampiezza RMS del [rumore](#) (il valore RMS esprime una specie di media dell'ampiezza).

GW241011 si è distinto immediatamente, superando di gran lunga il rumore tipico di entrambi i rivelatori. In [LIGO Hanford](#), il segnale era circa 35 volte più intenso del rumore di fondo, mentre [Virgo](#) lo ha rivelato con un'intensità circa 9 volte superiore al rumore di fondo. [LIGO Livingston](#) non era operativo nel momento dell'osservazione. Utilizzando algoritmi di ricerca avanzati e tecniche statistiche, abbiamo scoperto che la probabilità che il rumore casuale imiti questo segnale è inferiore a una volta su 10^{26} anni, molto più dell'[età dell'universo](#).

GW241110 è stato rivelato un mese dopo, e questa volta è stato osservato da tutti e tre i rivelatori. Sebbene il segnale fosse meno intenso di GW241011 è stato chiaramente visibile in entrambi gli strumenti LIGO, mentre Virgo ha contribuito con un segnale più debole. Il movimento del suolo presso l'osservatorio LIGO Livingston era piuttosto elevato e contribuiva al rumore a bassa frequenza; tuttavia, ciò non ha avuto un impatto significativo sull'osservazione. Dopo un'attenta analisi, abbiamo stimato che la possibilità che questo segnale sia causato da rumore casuale è inferiore a una volta ogni 1500 anni.

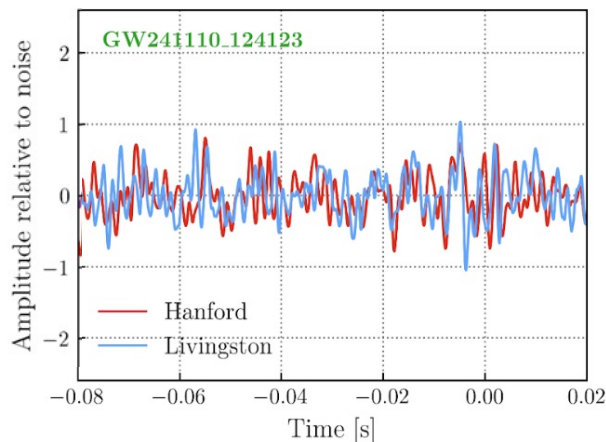
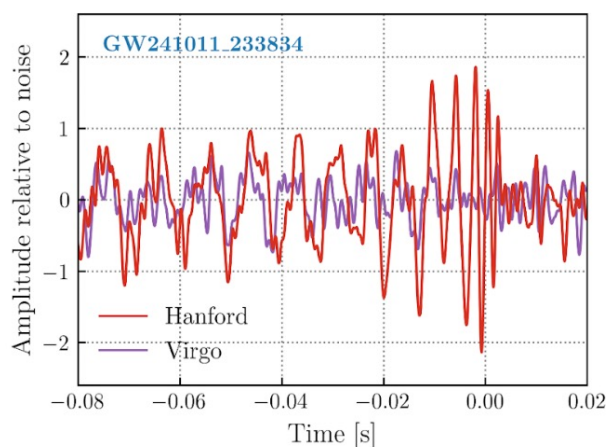


Figura 1: I grafici mostrano l'ampiezza dei dati nel tempo combinando insieme i rivelatori LIGO Hanford, LIGO Livingston e Virgo per GW241011 (grafico in alto) e GW241110 (grafico in basso). Le unità di ampiezza sono relative ad una specie di valore medio del rumore di fondo, il cosiddetto valore RMS. La fusione tra buchi neri avviene al tempo corrispondente allo zero della scala.

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web: www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



CHE COSA HA PRODOTTO QUESTI SEGNALI?

Ogni evento è stato il risultato di una violenta fusione di due [buchi neri](#). GW241011 era un segnale di onde gravitazionali proveniente dalla fusione di due buchi neri con masse circa 20 e 6 volte la [massa del nostro Sole](#), mentre le masse dei buchi neri in GW241110 erano circa 17 e 8 volte la massa del Sole: numeri sorprendentemente simili! (Si veda la **Figura 2**, grafico in basso.) I buchi neri di entrambi i sistemi binari giravano rapidamente, e nel caso di GW241011 lo [spin](#) è stato misurato con grande precisione. (Si veda la **Figura 2**, grafico in alto.)

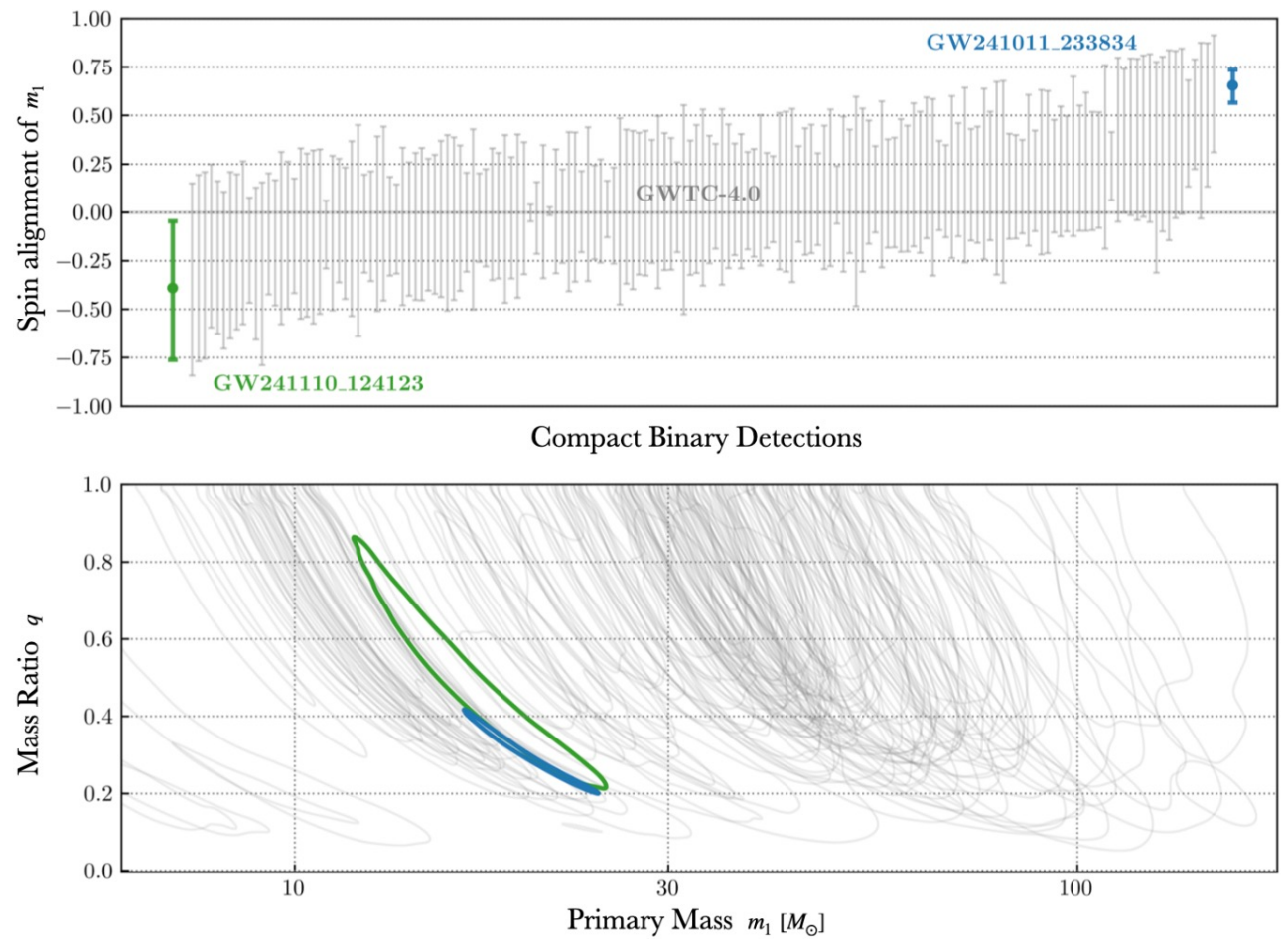


Figura 2: (Adattata dalla Figura 1 della nostra pubblicazione) Il grafico in alto mostra tutti gli eventi elencati nel catalogo più recente di transienti gravitazionali pubblicato dalla Collaborazione LVK, GWTC-4, e i nostri due nuovi eventi GW241011 e GW241110 ordinati in base allo spin del buco nero più grande proiettato nella direzione del momento angolare orbitale - una misura di quanto è allineata la direzione dello spin del buco nero più grande con la direzione del momento angolare orbitale del sistema binario. Valori maggiori di zero indicano che il buco nero è allineato con la rotazione del momento angolare orbitale, mentre valori negativi indicano che il sistema è anti-allineato. Il grafico inferiore mostra la distribuzione della massa primaria (la massa del buco nero più grande) misurata in unità di massa solare e il rapporto di massa della coppia di buchi neri per tutti gli eventi del catalogo GWTC-4, inclusi i due nuovi eventi discussi qui.

COME SI SONO FORMATI QUESTI SISTEMI BINARI?

Questi due eventi condividono alcune caratteristiche interessanti: in entrambi i sistemi binari, siamo riusciti a misurare bene il momento angolare (associato alla rotazione attorno a proprio asse e indicato con lo [spin](#)) del buco nero più massiccio. In ciascun caso, gli spin dei buchi neri più massicci non erano perfettamente allineati con i momenti angolari orbitali del sistema binario. I due sistemi sono anche accomunati dal fatto che il buco nero più massiccio ha una massa circa doppia di quella del buco nero più leggero. Questi indizi suggeriscono che il buco nero più massiccio possa provenire da una precedente fusione di buchi neri, rendendolo quello che chiamiamo un buco nero di "seconda generazione" (vedi **Figura 3**). Questo scenario è chiamato **fusione gerarchica** e indica la possibilità che questi sistemi si siano formati in ambienti densi, in regioni come gli [ammassi stellari](#), dove è più probabile che il processo di fusione si ripeta più volte. Tuttavia, non possiamo escludere lo scenario alternativo secondo cui entrambi questi sistemi derivano da coppie di stelle che si sono evolute in un ambiente isolato.

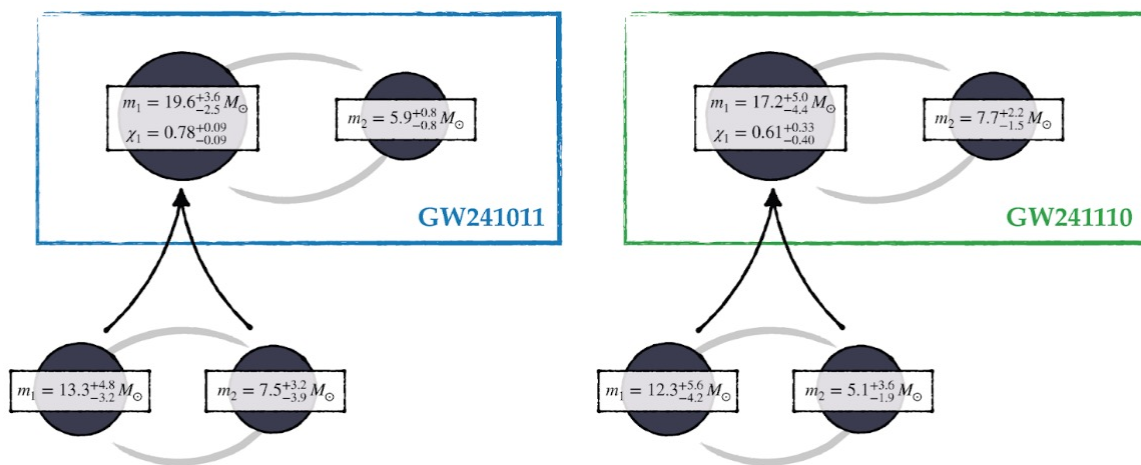


Figure 3: (Adattata dalla Figura 7 della nostra pubblicazione.) Viene mostrata la coppia di buchi neri in ciascuno degli eventi GW241011 e GW241110, insieme ai possibili precursori del buco nero più grande in ciascuna coppia. La massa stimata, in unità di massa solare, e la sua incertezza sono indicate per ciascun buco nero. Viene mostrato anche lo spin misurato, χ , del buco nero più grande di ciascuna coppia.

IMPLICAZIONI PER LA FISICA FONDAMENTALE

La misurazione dello spin del buco nero più massiccio di GW241011, straordinariamente precisa e accurata, ci ha permesso di mettere alla prova una previsione chiave della [teoria della relatività generale](#) di Einstein, nota come **momento di quadrupolo indotto dallo spin** del buco nero. Questo effetto descrive la distorsione della forma del buco nero dovuta alla sua rapida rotazione e il suo impatto sull'emissione delle onde gravitazionali. Analizzando attentamente il segnale di GW241011 (vedi [Figura 4](#)), abbiamo verificato la previsione di questo effetto fatta nell'ambito della teoria di Einstein con una precisione senza precedenti (sì, ancora una volta Einstein ha ragione!).

I buchi neri rotanti, così come i buchi neri più massicci nei due sistemi che hanno generato GW241011 e GW241110, ci permettono anche di mettere alla prova l'esistenza di nuove particelle non ancora scoperte. Alcune teorie prevedono che [bosoni](#) ultraleggeri (particelle che potrebbero costituire la ["materia oscura"](#), molto più leggere di qualsiasi cosa descritta nel [Modello Standard della fisica delle particelle](#)) potrebbero gradualmente "estrarre" lo spin dai buchi neri. Se tali particelle esistessero all'interno di un certo intervallo di massa e fossero state trovate nelle nubi attorno ai buchi neri più grandi di GW241011 e GW241110, avrebbero causato un rallentamento della velocità di rotazione dei buchi neri molto prima che si fondessero. Con entrambi i buchi neri più grandi osservati che ruotano ancora tanto rapidamente, questo esclude una vasta gamma di possibili masse per particelle bosoniche, rendendo questi eventi potenti sonde di "nuova fisica".

CONCLUSIONI

L'osservazione di GW241011 e GW241110 evidenzia i notevoli progressi dell'astrofisica delle onde gravitazionali nello scoprire le vite nascoste dei buchi neri che si fondono. Entrambi i sistemi suggeriscono la possibilità che buchi neri di "seconda generazione" si formino in ambienti densi dove le fusioni possono verificarsi ripetutamente. Inoltre, la misurazione senza precedenti degli spin e dei multipoli di ordine superiore di GW241011 ha permesso di mettere alla prova la relatività generale in condizioni estreme, senza che i nostri risultati mostrassero deviazioni dalle previsioni di Einstein. Le conoscenze che ricaviamo da ogni nuova osservazione ci aiutano a mettere insieme i pezzi del grande puzzle dell'universo, ricordandoci che ogni evento non è solo una scoperta astrofisica, ma anche un laboratorio per sondare le leggi fondamentali della fisica.

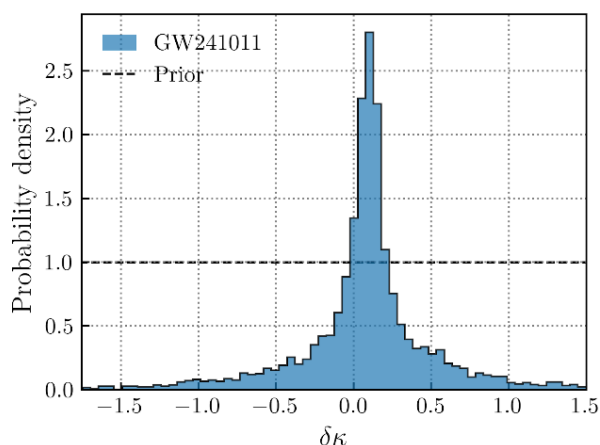


Figure 4: (Adattata dalla Figura 9 della nostra pubblicazione) La deviazione dalla previsione della Relatività Generale per il momento di quadrupolo indotto dallo spin del buco nero primario di GW241011. La deviazione è compatibile con lo zero, indicando che l'evento è compatibile con la teoria di Einstein.

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web: www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Leggete un preprint gratuito dell'articolo scientifico completo [qui](#) o su [arxiv](#).

I dati sono disponibili presso il Gravitational-Wave Open Science Centre:

Dati per GW241011: <https://doi.org/10.7935/3drz-8m81>

Dati per GW241110: <https://doi.org/10.7935/46xh-t016>