

SPETTROSCOPIA DEI BUCHI NERI E TEST DI RELATIVITÀ GENERALE CON GW250114

L'OSSERVAZIONE DEL SEGNALE GW250114

Il 14 gennaio 2025, la collaborazione [LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) ha osservato un [segnale gravitazionale](#) eccezionalmente forte, chiamato GW250114. Il segnale è stato registrato dai rivelatori LIGO a Hanford, Washington, e Livingston, Louisiana, durante la seconda parte del [quarto periodo osservativo](#) di LVK (O4b).

GW250114 è il segnale gravitazionale più intenso osservato ad oggi, circa tre volte più forte di [quello misurato nel 2015 in occasione della prima rivelazione](#). Qui, "più intenso" indica un maggiore [rapporto segnale/rumore](#), una quantità che misura quanto il segnale gravitazionale superi il [rumore di fondo](#) degli strumenti. Il segnale corrisponde a ciò che ci si aspetta quando [due buchi neri](#) di massa quasi uguale e a basso [spin](#) si muovono a spirale uno intorno all'altro fino a scontrarsi ed infine a fondersi in un unico buco nero più grande.

Un altro articolo recentemente pubblicato su *Physical Review Letters* [descrive l'osservazione di GW250114](#), presentando le proprietà dei buchi neri iniziali e una serie selezionata di test di fisica fondamentale. Questo articolo si focalizza invece sulla *spettroscopia dei buchi neri* e sui test di precisione della relatività generale.

IL CONFRONTO CON LA TEORIA DI EINSTEIN

Grazie all'eccezionale intensità del segnale, GW250114 offre un'opportunità senza precedenti per verificare se la teoria della [relatività generale](#) di Albert Einstein sia ancora valida nelle condizioni più estreme che si conoscano: i campi gravitazionali intensi e in rapida evoluzione vicino a buchi neri prossimi alla fusione. Con questi test vogliamo verificare se il segnale gravitazionale osservato sia pienamente coerente con le previsioni di Einstein, o se qualche deviazione possa suggerire l'esistenza di nuova fisica al di là della relatività generale.

La *spettroscopia dei buchi neri* è lo strumento chiave per questi test. Questa tecnica si concentra sul [ringdown](#) – la fase subito dopo la fusione in cui il buco nero appena formato raggiunge uno stato stabile – studiando le note distinte che emette. Proprio come una campana che suona con note distinte, un buco nero appena formato emette onde gravitazionali in una serie caratteristica di [modi quasi normali](#).

Secondo il [teorema no-hair](#), nella relatività generale un buco nero è descritto in modo completo da massa, spin e carica elettromagnetica. Tuttavia ci si aspetta che qualsiasi carica significativa venga neutralizzata molto rapidamente dall'ambiente astrofisico che circonda il buco nero, lasciando la massa e lo spin come uniche quantità rilevanti. Ciò significa che le frequenze dei modi quasi normali e le velocità con cui ciascuno di essi decade sono determinate in modo univoco da questi due soli numeri.

La misura delle note di [ringdown](#) e l'accordo delle frequenze e dei tempi di decadimento misurati con le previsioni fornisce una verifica stringente della relatività generale. Tali misurazioni non solo mettono alla prova il teorema no-hair, ma consentono anche di cercare altre deviazioni dalle previsioni di Einstein, sia che derivino da caratteristiche esotiche dei buchi neri o da modifiche più fondamentali alla teoria della gravità.

Nella relatività generale, un buco nero rotante è descritto perfettamente dalla [metrica di Kerr](#). Le nostre misure spettroscopiche quindi verificano se il buco nero finale di GW250114 sia compatibile con un buco nero di Kerr: con la precisione attuale le sue proprietà misurate risultano in linea con quanto ci si aspetta.

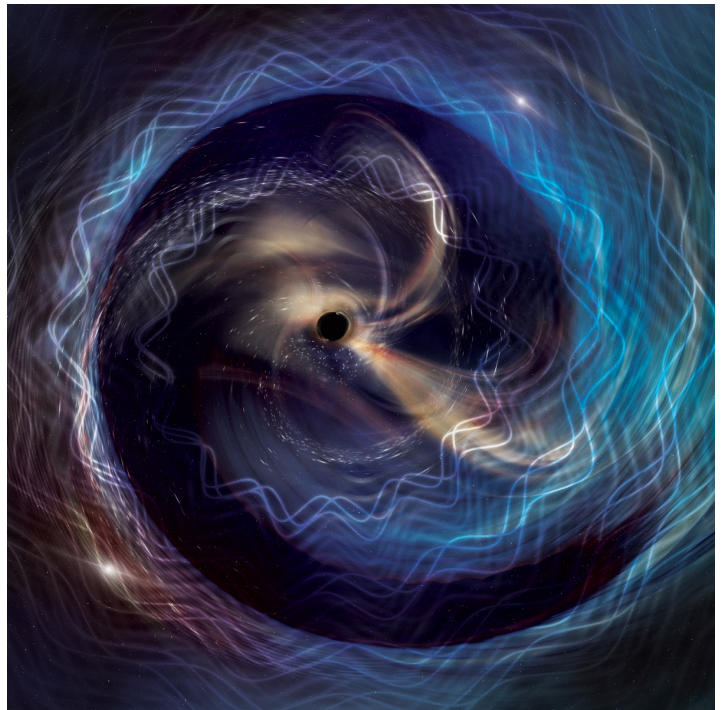


Figura 1. Visualizzazione del buco nero finale di GW250114, che mostra una rappresentazione artistica delle onde gravitazionali prodotte durante la fase di ringdown: mentre il buco nero appena formato raggiunge uno stato stabile, esso emette onde gravitazionali con delle frequenze specifiche, in modo simile a quello che accade ad una campana che suona. [Credito immagine: LIGO Scientific Collaboration/Sonoma State University/A. Simmonet]

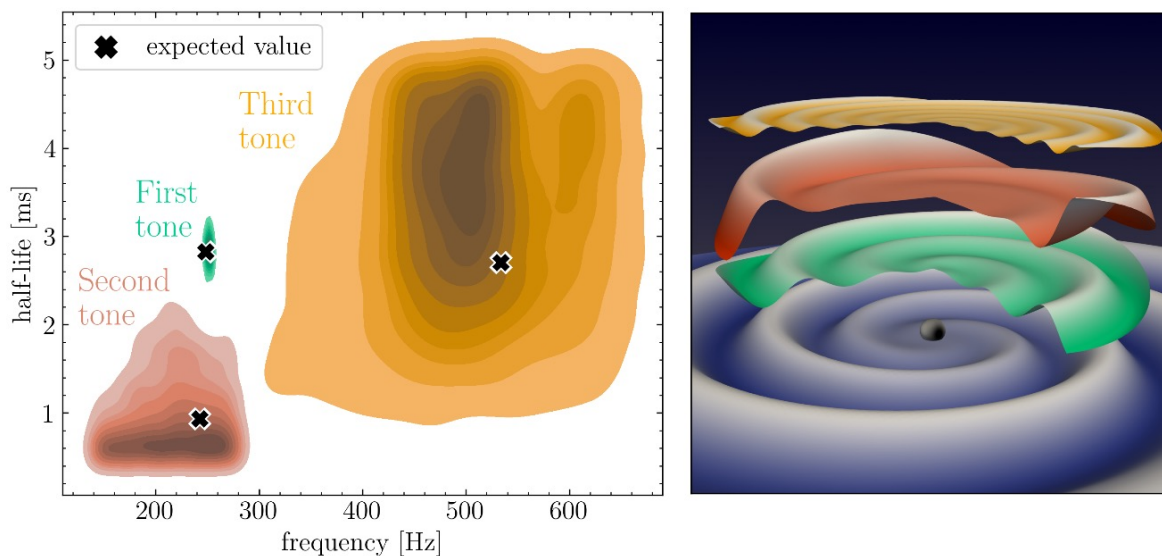


Figura 2. A sinistra: frequenza e tempo di dimezzamento (in inglese *half-life*) delle diverse note che abbiamo potuto identificare e limitare in una certa regione di valori, nella fase di ringdown di GW250114. Le regioni colorate mostrano le parti del piano frequenza-tempo di dimezzamento in cui localizziamo i modi quasi normali. La regione rossa corrisponde al secondo tono (*second tone* in inglese) ottenuta dall'analisi della sola fase di ringdown, mentre le regioni verde e gialla corrispondono alla nota fondamentale (*first tone* in inglese) e ad un tono secondario a frequenza più alta (*third tone* in inglese) ottenuti dall'analisi del segnale completo. I simboli grafici neri indicano i valori previsti per un buco nero di Kerr, con la massa e lo spin dedotti dall'analisi del segnale completo, assumendo valida la relatività generale. La sfumatura di colore indica diverse fasce di probabilità di contenere il valore vero, dal 90% (più chiaro) al 10% (più scuro). A destra: Scomposizione del segnale gravitazionale (spirale inferiore, in blu) emesso dal buco nero finale (la sfera in basso) nei diversi toni, così come ottenuta da una simulazione numerica che corrisponde ai parametri misurati di GW250114. Le superfici verde, rossa e gialla corrispondono rispettivamente al primo, al secondo e al terzo tono.

IL SUONO DEL RINGDOWN: LA NOTA FONDAMENTALE, IL SECONDO E TERZO TONO

Nella nostra analisi, consideriamo inizialmente solo la fase di **ringdown**, vale a dire la parte del segnale dopo la fusione, e individuiamo le note senza utilizzare alcuna informazione proveniente dalla precedente fase di **inspiral** (la fase in cui i buchi neri iniziali si avvicinano). Troviamo che i dati vengono descritti bene da una combinazione che contiene il tono fondamentale e il *secondo tono*, che è una versione della stessa vibrazione con un decadimento più veloce. Il secondo tono può essere tracciato per circa tre millisecondi dopo la fusione, dopodiché si confonde con il rumore del rivelatore. L'ampiezza e la fase misurate concordano con le simulazioni in **relatività numerica** delle fusioni di buchi neri ricavate dalla relatività generale. Le frequenze e i tempi di decadimento dei toni risultano compatibili con le previsioni teoriche entro le incertezze di misura. Il risultato è mostrato nella Figura 2 (regione colorata rossa), con il simbolo grafico nero che indica il valore atteso per un buco nero di Kerr con la massa e lo spin stimati da un'analisi basata sulla relatività generale del segnale completo.

Analizziamo anche l'intero segnale, inclusi l'**inspiral**, la fusione e il **ringdown**, con modelli calibrati su simulazioni numeriche, ma che consentono alle frequenze dei toni e ai tempi di decadimento di variare liberamente, piuttosto che fissarli alla previsione per buco nero di Kerr. Incorporando le informazioni dell'intero segnale, possiamo misurare le proprietà del **ringdown** in modo ancora più preciso. Con questo metodo, la frequenza del tono fondamentale viene misurata con una precisione di circa il 2% e il suo tempo di decadimento con una precisione di circa il 9%, entrambi in eccellente accordo con la relatività generale. Questa analisi limita anche i valori possibili per un tono secondario a frequenza più alta, circa doppia della frequenza della fondamentale, ancora una volta in linea con le previsioni teoriche. Entrambi questi risultati sono mostrati in **Figura 2**, dove i toni fondamentali e secondari appaiono rispettivamente in verde e giallo.

Insieme, l'analisi basata sul solo **ringdown** e quella del segnale completo offrono test complementari, confermando con misure diverse che le proprietà del buco nero finale sono coerenti con quelle attese per un buco nero di Kerr.

LA COERENZA TRA LE DIVERSE FASI DEL SEGNALE

Mettiamo alla prova le previsioni della relatività generale anche rispetto altre parti del segnale, oltre al **ringdown**. Nella fase iniziale del segnale, in cui i buchi neri orbitano l'uno intorno all'altro più lentamente di quanto accada vicino all'istante della fusione, non troviamo segni di deviazioni dalle previsioni di Einstein. Anche il confronto tra la massa e lo spin del buco nero finale stimati dalla prima parte del segnale con i valori dedotti dalla successiva fusione e **ringdown** risulta in un buon accordo.

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](https://arxiv.org/abs/1706.01828) o su [arxiv](https://arxiv.org/abs/1706.01828).

Leggete un preprint gratuito dell'articolo che descrive la scoperta di GW250114 [qui](https://arxiv.org/abs/1706.01828) o su [arxiv](https://arxiv.org/abs/1706.01828).

I dati resi pubblici dal Gravitational-Wave Open Science Center data per GW250114 sono disponibili [qui](https://arxiv.org/abs/1706.01828), mentre quelli per GWTC-4.0 sono disponibili [qui](https://arxiv.org/abs/1706.01828).

L'intensità del segnale GW250114 ci permette di porre vincoli su possibili deviazioni dalla relatività generale che non solo sono paragonabili, ma in alcuni casi da due a tre volte più rigorosi di quelli ottenuti combinando le informazioni provenienti da dozzine di altri segnali elencati nel [quarto Gravitational-Wave Transient Catalog](#) (GWTC-4.0), il nostro catalogo più recente che include tutti i segnali osservati fino al termine della prima parte del quarto periodo osservativo di LVK (O4a). Alcuni di questi miglioramenti sono illustrati nella **Figura 3**.

Infine, controlliamo se il risultato della sottrazione dai dati della migliore forma d'onda possibile ottenuta dalla relatività generale sia compatibile con il rumore di fondo, e troviamo che effettivamente esso si comporta come il normale rumore del rivelatore.

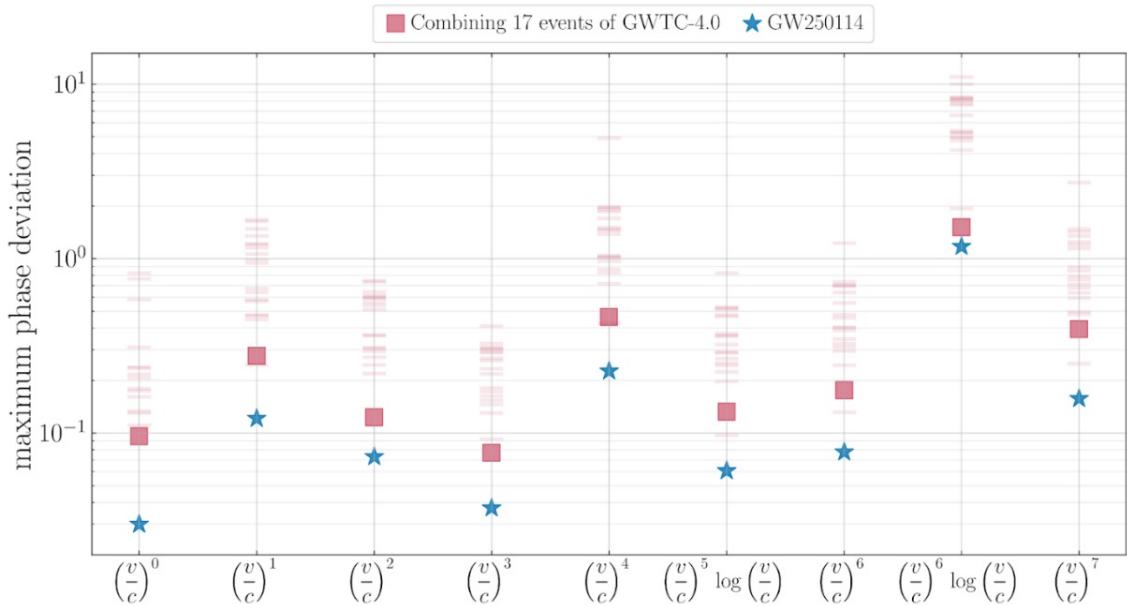


Figura 3. I limiti superiori sulle possibili deviazioni dalla relatività generale nell'espansione post-Newtoniana della fase di inspiral del segnale delle onde gravitazionali, con un livello di confidenza del 90%. Lo schema post-Newtoniano descrive la fase di inspiral per mezzo di una somma di termini proporzionali a potenze della velocità orbitale v del sistema binario, o meglio del rapporto (v/c) dove c è la velocità della luce, con coefficienti previsti in modo univoco dalla relatività generale. Per il termine $(v/c)^0$, la relatività generale prevede che il coefficiente sia esattamente zero, quindi il limite corrisponde a una deviazione assoluta; Per tutti gli altri ordini, i limiti rappresentano deviazioni frazionarie. Le stelle blu mostrano i limiti misurati utilizzando GW250114. Per confronto, le bande rosse chiare contrassegnano i risultati ottenuti a partire da 17 segnali selezionati tratti da GWTC-4.0, e i quadrati rossi indicano i limiti ottenuti dall'insieme combinato di questi 17 eventi. In tutti gli ordini post-Newtoniani, i risultati ottenuti con GW250114 pongono limiti superiori che sono da due a tre volte più stringenti di quelli ottenuti combinando più eventi.

ANCORA UNA CONFERMA PER LA TEORIA DI EINSTEIN

In ogni test, GW250114 conferma le previsioni della relatività generale, entro la precisione delle osservazioni attuali. L'intensità e la chiarezza di questo segnale consentono la conferma più precisa della teoria di Einstein per le fusioni di buchi neri, restringendo significativamente i limiti su quanto qualsiasi teoria alternativa della gravità possa differire da essa. Insieme all'[articolo sull'osservazione di GW250114](#), che illustra la verifica della [legge di Hawking](#) e fornisce risultati complementari sulla natura del buco nero finale, questo studio mostra la vastità della scienza resa possibile da GW250114.

Mentre la collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA celebra un decennio dalla prima osservazione di onde gravitazionali prodotte dalla fusione di buchi neri, i notevoli miglioramenti nella sensibilità dei rivelatori ci permettono ora di registrare segnali come GW250114 con una chiarezza senza precedenti. Ogni nuovo progresso è la premessa di segnali ancora più intensi in futuro. GW250114 è quindi un'anteprima della scienza trasformativa consentita dalle prossime osservazioni: segnali con un maggior rapporto segnale/rumore ci riveleranno le proprietà dei buchi neri in modo ancora più dettagliato e spingeranno la teoria di Einstein ai suoi limiti estremi.

GLOSSARIO

Buco nero: Una regione dello spazio-tempo con una gravità così intensa da impedire a qualsiasi cosa, compresa la luce, di sfuggire. I buchi neri sono di diverse dimensioni: i buchi neri di massa stellare hanno origine dal collasso stellare e le loro masse variano da poche masse solari a circa 65 masse solari. I buchi neri di massa intermedia hanno una massa compresa tra circa 100 masse solari e 10^5 masse solari. Infine, i buchi neri supermassicci vanno da più di 10^5 masse solari a più di 10^9 masse solari.

Buco nero binario: Un sistema costituito da due buchi neri in orbita ravvicinata l'uno attorno all'altro.

Inspirale: Il graduale restringimento dell'orbita di un sistema binario dovuto all'emissione di onde gravitazionali. È la prima e più lunga fase della coalescenza di un sistema binario.

Massa solare (M_{\odot}): Massa del Sole, usata come unità di misura standard in astronomia. È uguale all'incirca a 2×10^{30} kg.

Modi quasi normali: Si tratta delle oscillazioni del buco nero finale nella fase di ringdown, che si smorzano velocemente mentre il buco nero raggiunge uno stato stabile. Le frequenze di oscillazione non sono semplici armoniche, e anche i tempi di decadimento sono quantità complesse, legate alla massa e allo spin del buco nero finale.

Onde gravitazionali: Increspature nello spazio-tempo generate da alcuni dei processi più violenti dell'universo, come la fusione di stelle di neutroni o buchi neri.

Rapporto segnale/rumore (SNR): È una misura utilizzata nella scienza e nell'ingegneria che confronta il livello di un segnale con il livello del rumore di fondo.

Relatività numerica: L'insieme delle tecniche numeriche che permettono di risolvere le complesse equazioni della Relatività Generale di Einstein.

Ringdown: La fase successiva alla fusione di buchi neri in cui il buco nero che ne risulta non ha una forma stabile ed emette onde gravitazionali fino a raggiungere la sua forma finale.

Rumore: Fluttuazioni nel segnale gravitazionale dovute a vari effetti strumentali e ambientali. La sensibilità di un rivelatore di onde gravitazionali è limitata dal rumore.

Spin: Momento angolare di un buco nero in rotazione. È una delle proprietà che definiscono i buchi neri, insieme a massa e carica elettrica.