

GW230814: UN INTENSO SEGNALE GRAVITAZIONALE RIVELATO DA LIGO LIVINGSTON

Le collaborazioni [LIGO-Virgo-KAGRA](#) hanno osservato un'onda gravitazionale che ha prodotto un segnale particolarmente forte nel rivelatore [LIGO Livingston](#), che è stato chiamato GW230814 visto che è stato rivelato il 14 agosto 2023, alle 23:09:01 UTC. È probabile che il segnale gravitazionale abbia avuto origine dalla [fusione di due buchi neri](#).

L'OSSERVAZIONE DEL SEGNALE

GW230814 è stato osservato durante la prima parte del quarto [periodo osservativo](#) (O4a). Al momento dell'osservazione, solo il rivelatore [Advanced LIGO che si trova a Livingston](#) (Louisiana) stava raccogliendo dati. Nonostante sia stato visto da un solo rivelatore, il segnale è particolarmente intenso. La **Figura 1** mostra due diverse rappresentazioni del segnale GW230814.

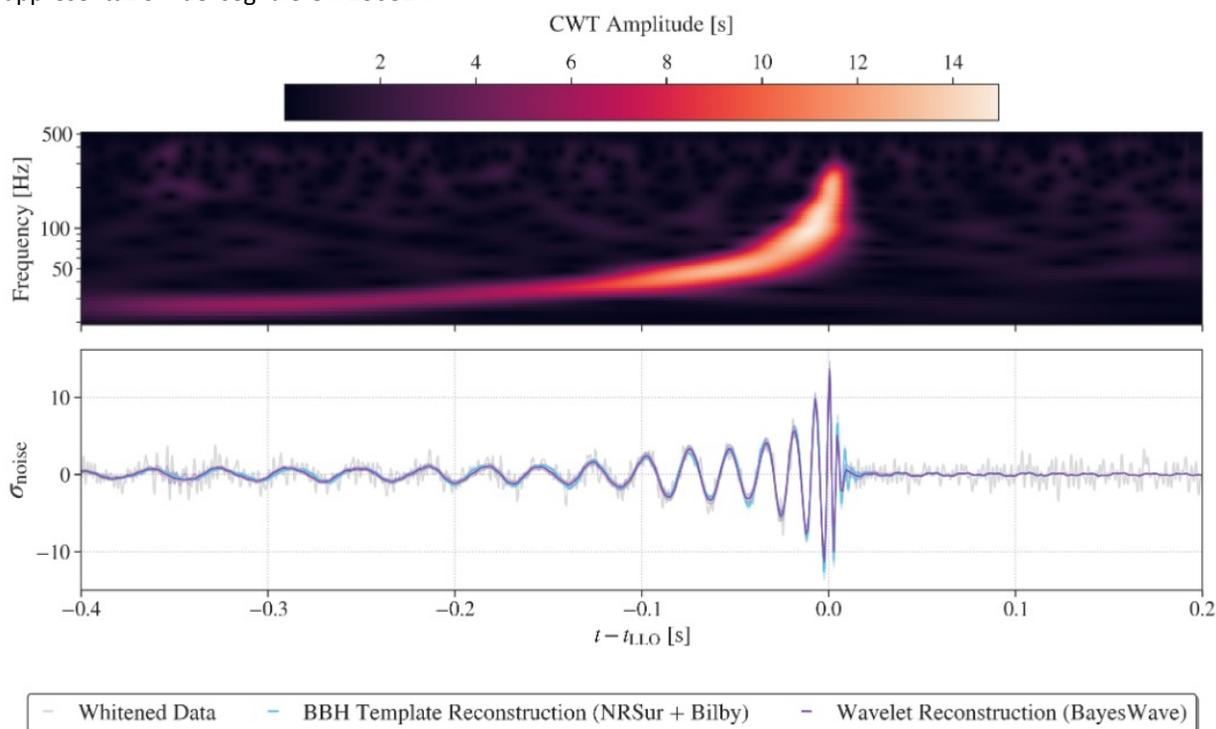


Figura 1: Il segnale gravitazionale GW230814. Il pannello superiore mostra una [rappresentazione tempo-frequenza](#) del segnale in cui le regioni più chiare indicano un'ampiezza maggiore (l'abbreviazione CWT indica il metodo utilizzato, la Continuous Wavelet Transform). Il pannello inferiore mostra [l'andamento del segnale nel tempo](#). Le linee blu e viola si riferiscono a due diversi metodi per ricostruire la forma d'onda gravitazionale. È chiaro che si tratta della fusione di un sistema di oggetti compatti e i dati sono in buon accordo con le ricostruzioni fino alla parte di ringdown (come discusso nel testo principale).

COSA INTENDIAMO QUANDO DICIAMO CHE IL SEGNALE È INTENSO?

Nelle osservazioni di onde gravitazionali i dati contengono una miscela di segnale (proveniente dal cosmo) e rumore (proveniente dal rivelatore e dal suo ambiente). Per descrivere l'intensità di un segnale gravitazionale utilizziamo il [rapporto segnale/rumore](#) (SNR). Nel caso di GW230814 il rapporto segnale/rumore, ottenuto utilizzando un solo rivelatore, è di circa 42. Per confronto, possiamo considerare la prima osservazione di onde gravitazionali, [GW150914](#), che era ritenuta forte con un SNR di 24.

LA FUSIONE DI BUCHI NERI BINARI CHE HA PRODOTTO GW230814

La forma di GW230814 corrisponde a quella di un segnale proveniente dalla fusione di un [sistema binario di buchi neri](#). Per trovare le proprietà del sistema binario che ha prodotto il segnale, come le masse e gli spin dei buchi neri, abbiamo confrontato i dati con segnali simulati basati sulla [teoria della relatività generale](#) (GR) di Einstein. Da questo abbiamo scoperto che GW230814 probabilmente proveniva dalla fusione di due buchi neri con massa 34 e 28 volte la massa del Sole, fatto che lo rende sorprendentemente simile alla prima rivelazione, [GW150914](#).

Questo evento cosmico ha avuto luogo a circa 300 [megaparsec](#) dalla Terra, vale a dire a circa un miliardo di anni luce di distanza. Però con un solo rivelatore, non è possibile individuare da quale direzione del cielo provenga un certo segnale, a meno che non sia molto lungo. Normalmente, l'osservazione congiunta dello stesso segnale da parte di almeno tre strumenti è necessaria (anche se non sempre sufficiente) per localizzare con precisione nel cielo una sorgente di onde gravitazionali di breve durata come GW230814, come accadde nel caso di [GW170817](#) circa 8 anni fa.

UN SEGNALE INSOLITO CHE METTE ALLA PROVA LA RELATIVITÀ GENERALE

I segnali gravitazionali possono essere utilizzati per mettere alla prova la teoria della relatività generale di Einstein. Le collaborazioni LIGO-Virgo-KAGRA eseguono una lunga serie di test per verificare se un particolare segnale di onde gravitazionali sia coerente o meno con ciò che ci si aspetterebbe dalla relatività generale. Vi starete chiedendo perché mettiamo ancora alla prova questa teoria nonostante la lunga serie di test positivi effettuati nell'ultimo secolo. Proprio come qualsiasi altra teoria fisica, la relatività generale può essere solo un'approssimazione di una teoria più completa ancora da scoprire. Questo è proprio ciò che accadde un secolo fa, quando la teoria della relatività generale di Einstein estese la [teoria Newtoniana della gravitazione](#) potendo spiegare fenomeni inspiegabili secondo le leggi di Newton.

Quando si effettuano questi test con le onde gravitazionali, in genere si utilizzano solo segnali forti osservati da due o più rivelatori. Tuttavia, grazie al fatto di essere particolarmente intenso, GW230814 è un caso piuttosto interessante. Per capire perché, dobbiamo pensare alle diverse fasi di un segnale gravitazionale proveniente dalla fusione di un sistema di buchi neri.

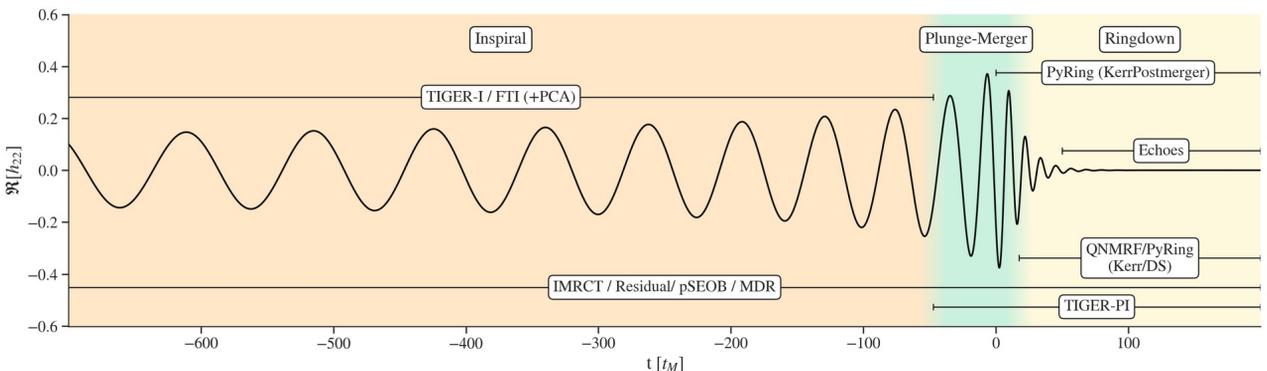


Figura 2: L'evoluzione tipica di un segnale gravitazionale prodotto dalla fusione di un sistema binario compatto. Questo grafico illustrativo mostra l'ampiezza del segnale (asse verticale) in funzione del tempo (asse orizzontale). Le diverse fasi del segnale sono l'*inspiral* (arancione), il *merger* (verde chiaro) e il *ringdown* (giallo). Sono mostrati anche i nomi tecnici dei diversi test di relatività generale eseguiti e le parti del segnale su cui vengono effettuati, si veda l'[articolo scientifico](#) per maggiori dettagli.

I segnali gravitazionali provenienti da fusioni di sistemi binari compatti sono composti da tre stadi (indicati con termini inglesi), come illustrato in Figura 2:

- L'[inspiral](#) corrisponde al movimento che avvicina gradualmente i due buchi neri. In questa fase, il segnale gravitazionale aumenta in [frequenza e ampiezza](#).
- Il *plunge-merger* o semplicemente *merger* si verifica quando i due buchi neri si fondono e l'ampiezza dell'onda gravitazionale è massima.
- Il [ringdown](#) ha luogo dopo la fusione, quando il buco nero appena nato si stabilizza emettendo onde gravitazionali aventi ampiezza sempre minore. Il ringdown assomiglia a ciò che accade quando si colpisce una campana: il colpo corrisponde alla fusione e successivamente la campana continua a emettere un suono che infine svanisce nel nulla.

I test di relatività generale utilizzati dalle collaborazioni LIGO-Virgo-KAGRA studiano le diverse parti del segnale. I test incentrati sulla parte inspiral di GW230814 mostrano che il segnale è coerente con la relatività generale. Tuttavia, i test che si concentrano sulla parte merger-ringdown del segnale dipingono un quadro sconcertante. Il ringdown di GW230814 svanisce più rapidamente di quanto ci si aspetterebbe dalla relatività generale. Questo è mostrato nella Figura 3, dove il picco immediatamente dopo la fusione è inferiore alla previsione della relatività generale.

Cosa causa questa differenza tra i dati e la previsione della relatività generale? Sono state esplorate diverse possibilità. In un caso abbiamo esaminato se le oscillazioni di ringdown subdominanti potessero essere la causa. Si tratta di oscillazioni simili alle [armoniche](#) più alte nelle onde sonore. Un'altra indagine ha studiato la possibilità di una distorsione del segnale dovuta ad una [lente gravitazionale](#). Né il ringdown con oscillazioni subdominanti né la lente gravitazionale forniscono una spiegazione convincente.

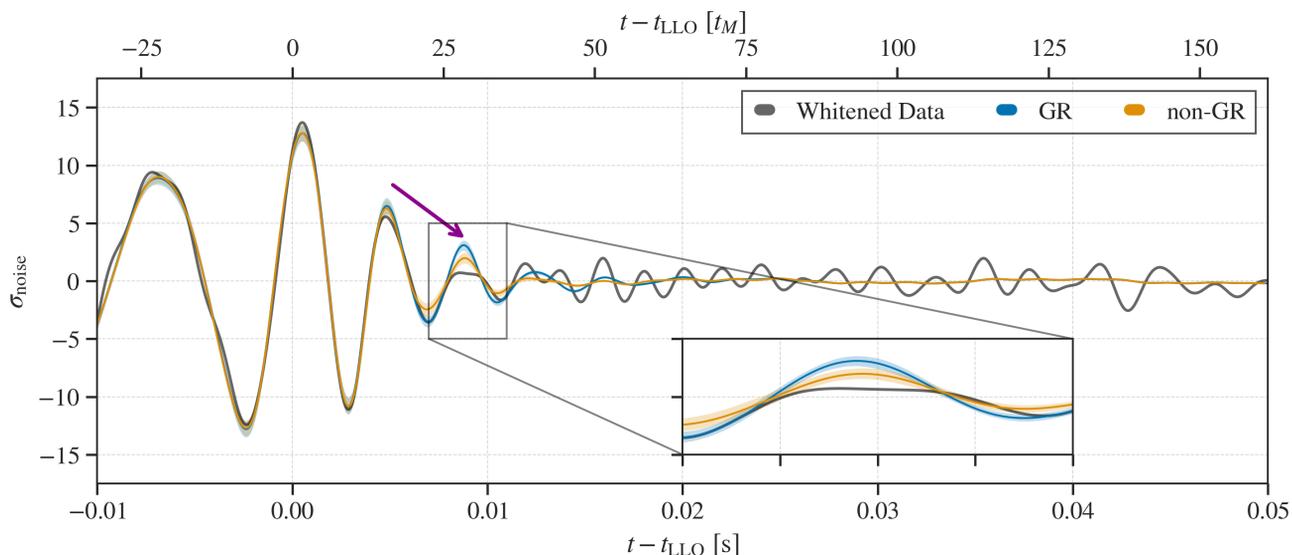


Figura 3: Confronto dei dati di GW230814 (mostrati in grigio) con le forme d'onda ricostruite corrispondenti a un modello GR (blu) e a un modello non GR (arancione). La freccia viola evidenzia la parte del segnale (mostrata ingrandita nel riquadro) in cui l'ampiezza osservata dei dati è inferiore a quella prevista dalla relatività generale. Si può notare che l'asse orizzontale, in cui $t=0$ corrisponde all'istante del merger, copre solo sei centesimi di secondo: gli studi sulle onde gravitazionali sono davvero entrati nell'era della precisione!

Image credit: Rossella Gamba/Koustav Chandra/LIGO-Virgo-KAGRA.

Una terza possibilità è che l'apparente inconsistenza sia dovuta a limitazioni nell'accuratezza dei nostri modelli di [forme d'onda gravitazionali](#) ricavate dalla relatività generale, piuttosto che a una deviazione effettiva dalla relatività generale. Un'eventualità di questo genere è più probabile con un segnale forte come GW230814 grazie alla migliore visibilità dei dettagli dell'onda gravitazionale. I nostri test indicano che i limiti di accuratezza della forma d'onda teorica potrebbero effettivamente essere una spiegazione credibile per l'apparente incoerenza.

Un'altra possibile spiegazione è che l'inconsistenza sia dovuta a fluttuazioni casuali del [rumore](#) nei dati. Una fluttuazione casuale del rumore durante il ringdown potrebbe produrre un'apparente inconsistenza con la relatività generale. Per investigare questa ipotesi abbiamo fatto delle simulazioni, proprio come possiamo verificare se dei dadi sono truccati lanciandoli molte volte. Qui non possiamo far fondere dei buchi neri a richiesta e quindi i computer creano le fusioni per noi, affidandosi alla relatività generale per generare le onde gravitazionali. Pertanto, possiamo creare molti segnali di onde gravitazionali simulate come GW230814 e aggiungerli ad un fondo di rumore realistico (ma fluttuante in modo casuale). Quindi rifacciamo i nostri test di GR con ciascun segnale simulato. I risultati indicano che è possibile che una fluttuazione del rumore possa essere la causa dell'apparente inconsistenza con la relatività generale.

L'IMPORTANZA DI UNA RETE DI RIVELATORI

I rivelatori di onde gravitazionali funzionano meglio se formano una rete di strumenti. Un segnale gravitazionale rivelato da più rivelatori indipendenti consente la verifica dell'osservazione, una migliore stima delle proprietà della sorgente e la localizzazione nel cielo della sorgente del segnale.

Il caso di GW230814 evidenzia l'importanza di una rete di rivelatori (proprio come nel caso di un'altra fusione di buchi neri binari, [GW170814](#), che è stata rilevata esattamente sei anni prima ed è stato il primo segnale osservato da tre interferometri). Avere i dati di un solo rivelatore restringe l'insieme delle possibili analisi che possono essere effettuate e ne limita fortemente l'accuratezza. Mentre gli scienziati stanno lavorando molto duramente per raggiungere l'obiettivo di una rete globale di rivelatori, non possiamo aspettarci che tutte le sue parti siano attive e funzionanti 24 ore su 24, 7 giorni su 7. Pertanto, più grande è la rete, meglio è! Attualmente (2025), la rete LIGO-Virgo-KAGRA comprende quattro rivelatori: due di LIGO situati negli Stati Uniti, lo strumento europeo Virgo in Italia e KAGRA in Giappone. Le tre collaborazioni gestiscono la rete a livello globale, per massimizzare i risultati scientifici della ricerca delle onde gravitazionali.

UN FUTURO LUMINOSO (E AD ALTA INTENSITÀ)

Nel momento in cui pubblichiamo questo articolo le collaborazioni LIGO-Virgo-KAGRA celebrano il decimo anniversario della [prima osservazione diretta di un'onda gravitazionale](#), e possiamo aspettarci di ricevere molti altri segnali forti man mano che la sensibilità della nostra rete di rivelatori continua a migliorare. Tali eventi forniranno ulteriori opportunità per esplorare le proprietà dei buchi neri, oltre a continuare a mettere alla prova la relatività generale di Einstein.

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.

Inspiral: 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.

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.

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

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.

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 [qui](#).

Dati pubblici per GW230814 liberamente disponibili sul Gravitational-Wave Open Science Centre (GWOSC) [qui](#).

Dati pubblici per GWTC-4.0 disponibili [qui](#).