

GW250114: CARILLON COSMICO DEL CAOS

In occasione del decimo anniversario della prima osservazione diretta delle onde gravitazionali, le [collaborazioni LIGO, Virgo e KAGRA \(LVK\)](#) annunciano un nuovo segnale proveniente dalla fusione di due buchi neri: GW250114. La coppia di buchi neri era sorprendentemente simile, per massa e distanza, a quella osservata per la prima volta da LIGO nel 2015: [GW150914](#). Ma, dopo 10 anni di miglioramenti della rete globale di osservatori di onde gravitazionali e dei metodi per analizzarne i dati, i ricercatori di LVK sono stati in grado di "sentire" GW250114 tre volte più chiaramente di quella prima pionieristica osservazione. Con questa eccezionale osservazione, i ricercatori hanno confermato che in seguito alla fusione la dimensione dei buchi neri può solo aumentare e che, quando vengono disturbati, suonano come una campana con il "suono" previsto da Einstein.

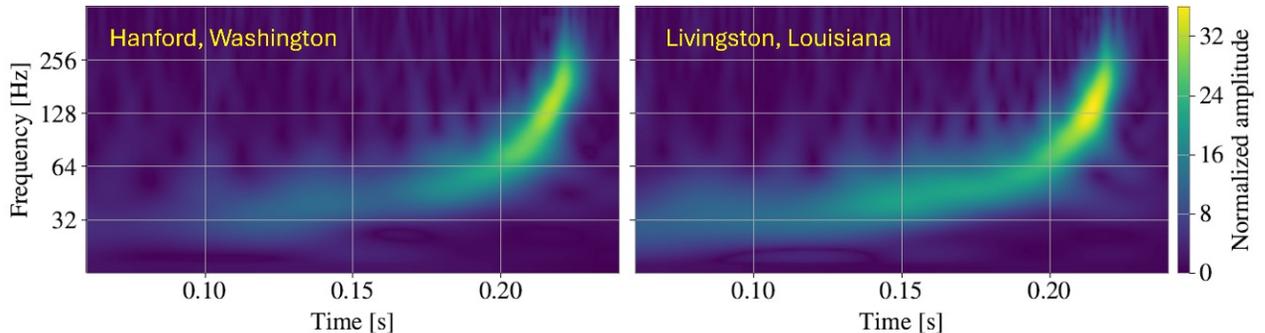


Figura 1: (Adattata dalla Figura 1 della nostra [pubblicazione](#).) Il segnale gravitazionale GW250114 osservato dai rivelatori LIGO Hanford (immagine a sinistra) e LIGO Livingston (immagine a destra). I due grafici mostrano la dipendenza rispetto al tempo (in secondi) e alla frequenza (in Hertz, o numero di periodi al secondo) della [deformazione gravitazionale](#) prodotta dall'onda gravitazionale in ciascun rivelatore LIGO. Entrambi i grafici mostrano che la frequenza dei GW250114 si sposta bruscamente verso l'alto, così come accade in nel [cinguettio](#) di un uccello, approssimativamente da 30 Hz a 250 Hz in due decimi di secondo.

Più di 50 anni fa, Stephen Hawking e Jacob Bekenstein [ipotizzarono che l'area dell'orizzonte degli eventi di un buco nero codifichi la sua entropia](#). L'[entropia](#) è una misura del caos¹ di un sistema. Si tratta di una quantità che può solo aumentare nel tempo, come è noto fin dai tempi delle macchine a vapore. Ciò significa che se la corrispondenza è vera le aree dei buchi neri possono solo crescere. Questo ha affascinato i fisici perché secondo la teoria della gravità di Einstein, la [Relatività Generale](#), i buchi neri dovrebbero essere oggetti estremamente semplici che sono descritti solo da due numeri²: la loro massa e lo [spin](#). Eppure le scoperte di Hawking e Bekenstein suggeriscono che i buchi neri siano allo stesso tempo semplici e codifichino un'enorme caoticità. Questa dualità è alla base di una profonda connessione tra lo spazio-tempo e la [meccanica quantistica](#).

GW250114 mette alla prova questi due aspetti dei buchi neri: che sono oggetti semplici e che la loro entropia aumenta sempre. La chiarezza e l'intensità del segnale proveniente da GW250114 consente inoltre la caratterizzazione più precisa del "suono" dei buchi neri.

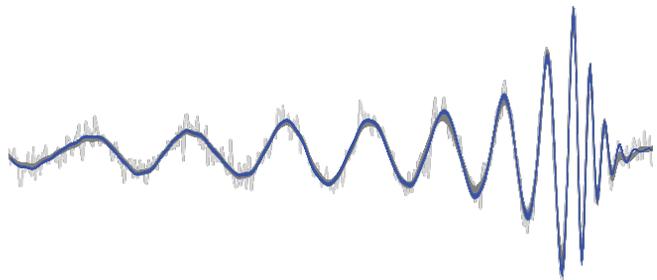


Figura 2: Schema che illustra l'ottima concordanza tra i dati (mostrati in grigio chiaro) osservati dal rivelatore LIGO Livingston al momento della rivelazione di GW250114 e il nostro miglior modello per le onde gravitazionali prodotte dalla collisione dei due buchi neri (linea blu scuro). È inclusa anche una banda in grigio scuro che mostra una ricostruzione della forma d'onda senza assumere che il segnale sia stato prodotto da due buchi neri. Il fatto che la banda grigio scuro e la banda blu siano quasi perfettamente sovrapposte è un'indicazione del fatto che il nostro modello sta descrivendo accuratamente il segnale.

PER SAPERNE DI PIÙ:

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

1. A rigor di termini, in matematica il caos si riferisce a un concetto distinto dalla nozione di disordine, ma i termini sono spesso usati in modo intercambiabile nelle descrizioni informali - si veda ad esempio [qui](#).

2. Tecnicamente i buchi neri possono anche avere una carica elettrica netta, ma ci si aspetta che i buchi neri prodotti dal collasso stellare abbiano una carica elettrica netta trascurabile.



Quando un buco nero rotante non è in equilibrio (come accade al buco nero che risulta dalla fusione di due buchi neri subito dopo la sua formazione) esso vibra come una campana o un tamburo, emettendo un "suono" gravitazionale specifico che svanisce rapidamente. Ci aspettiamo che le vibrazioni si comportino come previsto per i [buchi neri rotanti](#), descritti per la prima volta da Roy Kerr. Per mettere alla prova questa ipotesi, i ricercatori di LVC hanno utilizzato il segnale GW250114 per estrarre il "suono" del buco nero risultante dalla collisione – con ciò intendiamo la sua emissione di onde gravitazionali – e sono stati in grado di determinare che corrispondeva ai "suoni" di un buco nero di Kerr.

Per capire il suono di un buco nero, immaginate gli strumenti musicali. Ogni strumento ha un suono specifico che è determinato dalla sua forma e dalle proprietà del materiale: una campana suona in modo diverso da un tamburo o da una chitarra. Ma il suono dipende anche da come lo strumento viene perturbato: colpire un tamburo con una bacchetta produce un suono diverso rispetto a colpirlo con una spazzola. I buchi neri di Kerr possono emettere solo suoni di specifiche frequenze e durate, determinate in modo univoco dalla loro massa e velocità di rotazione. Una perturbazione provoca l'emissione di alcuni, ma di solito non tutti, questi suoni. Se ne viene misurato più di uno, possono essere confrontati tra loro: corrispondono allo stesso buco nero di Kerr? I ricercatori di LVC sono stati in grado di determinare per la prima volta che almeno due dei suoni previsti per i buchi neri sono stati emessi dal buco nero finale e con frequenze e tempi di decadimento in ottimo accordo con quanto atteso per un buco nero di Kerr. Il buco nero finale di GW250114 è chiaramente descritto solo dalla sua massa e dal suo spin.

Allo stesso tempo, i ricercatori LVC hanno confermato che l'area del buco nero finale è *maggiore* della somma delle aree dei due buchi neri iniziali (si veda la [Figura 3](#)). Le vibrazioni del buco nero finale contengono tutte le informazioni necessarie per misurarne le dimensioni. I buchi neri iniziali, sebbene non risuonino, emettono un segnale gravitazionale. Mentre orbitano l'uno intorno all'altro, perdono energia a causa delle onde gravitazionali e "cadono" l'uno verso l'altro. I ricercatori LVC hanno utilizzato il segnale GW250114 prima della collisione dei buchi neri per misurare le dimensioni dei buchi neri iniziali. Queste misurazioni completamente indipendenti confermano che il segnale GW250114 ha effettivamente aumentato l'entropia dell'Universo!

L'osservazione di GW250114 è stata resa possibile dal lavoro pluridecennale di migliaia di scienziati per migliorare i rilevatori di onde gravitazionali, capire come dovrebbero risuonare i buchi neri e escogitare modi ingegnosi per "sentire" quel suono a partire dai dati. Al suo decimo compleanno, la scienza delle onde gravitazionali è fiorente e continua a offrire un modo completamente nuovo di esplorare il nostro universo, con probabilmente molte altre sorprese in arrivo.

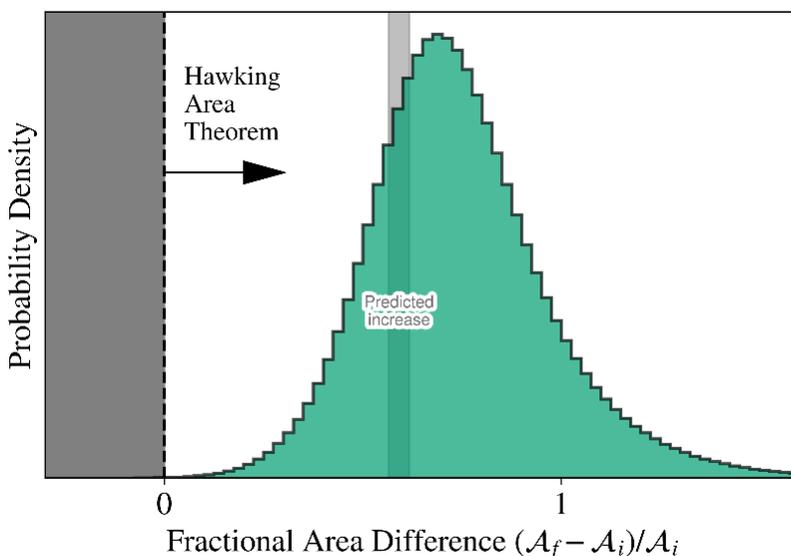


Figura 3: (Adattato dalla Figura 5 della nostra [pubblicazione](#).) Distribuzione di probabilità della differenza di area frazionaria di GW250114, definita dal rapporto $(A_f - A_i)/A_i$, dove A_f è l'area del buco nero finale e A_i è l'area totale dei buchi neri iniziali. Secondo il teorema di Hawking, la differenza di area frazionaria deve stare a destra della linea verticale tratteggiata che corrisponde a una differenza di area frazionaria pari a zero, vale a dire a $A_f = A_i$. Si nota che la distribuzione di probabilità sperimentale sfavorisce fortemente i valori della differenza di area frazionaria che sono inferiori a zero; questo è coerente con il teorema di Hawking. Il picco della distribuzione di probabilità è anche in buon accordo con la banda verticale grigio chiaro, etichettata come "predicted increase" (aumento previsto), che indica l'intervallo di valori per la differenza di area frazionaria che sono previsti dalla Relatività Generale e che corrispondono ad un aumento dell'area di circa il 65%.

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 relativi a GW250114 sono pubblicati dal Gravitational-Wave Open Science Centre e sono disponibili [qui](#).