

COME CALIBRARE DEI RIVELATORI UTILIZZANDO COLLISIONI COSMICHE

Una calibrazione astrofisica che utilizza due eccezionali fusioni di buchi neri

La [collaborazione LIGO, Virgo e KAGRA](#) (LVK) ha rivelato più di [300 segnali dovuti ad onde gravitazionali](#) provenienti dalle fusioni di sistemi binari composti da oggetti compatti come [buchi neri](#) e [stelle di neutroni](#). Ogni segnale contiene informazioni sulla sorgente e sulle condizioni fisiche estreme che caratterizzano queste collisioni. Estrarre queste informazioni richiede che gli osservatori di onde gravitazionali misurino con grande precisione i segnali gravitazionali e tengano conto delle incertezze sperimentali. La Collaborazione LVK annuncia ora l'osservazione di due nuovi [intensi](#) segnali gravitazionali, GW240925 e GW250207, che vengono utilizzati per effettuare i primi test significativi di [calibrazione astrofisica](#).

Sorprendentemente, si tratta di ottimo tempismo sbagliato: abbiamo osservato due forti segnali gravitazionali (si veda la **Figura 1**) mentre il rivelatore LIGO Hanford era, per così dire, fuori sintonia, e quindi non sappiamo esattamente come interpretarne i dati. Ma grazie alla potenza dei segnali, possiamo analizzarli e calibrare LIGO Hanford misurando contemporaneamente lo stato del rivelatore. Questo è particolarmente importante nel caso di GW250207, per il quale l'incertezza sulla calibrazione del rivelatore è in gran parte sconosciuta e cambia nel tempo.

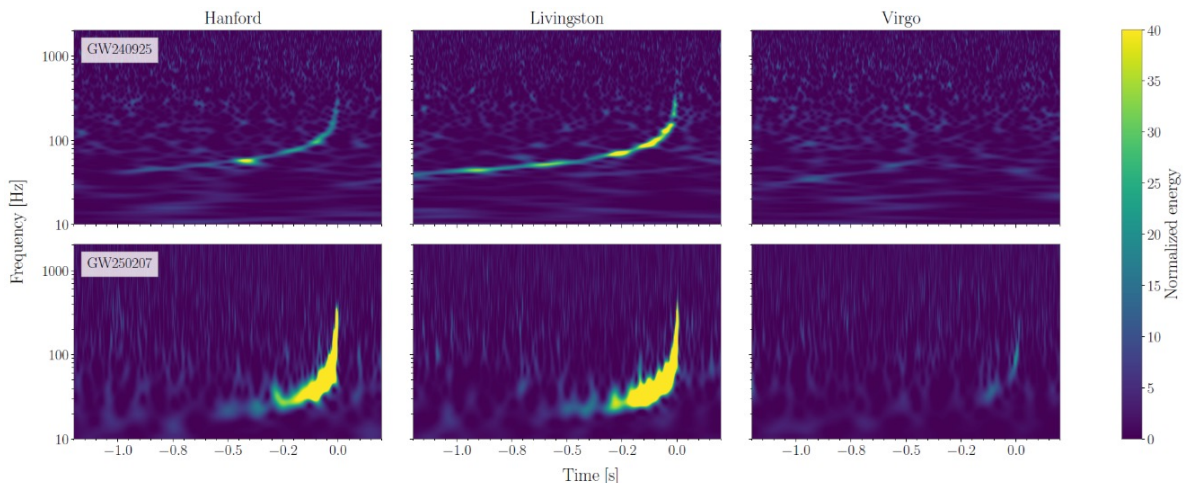


Figura 1: Gli eventi GW240924 (fila superiore) e GW250207 (riga inferiore) così come sono stati osservati dagli osservatori LIGO Hanford (colonna a sinistra), LIGO Livingston (colonna centrale) e Virgo (colonna a destra). I grafici, chiamati [spettrogrammi](#), mostrano lo spettro di potenza (energia a diverse frequenze) in funzione del tempo. I segnali possono essere visti come l'aumento dell'energia nel tempo (in secondi) e a frequenze specifiche (in hertz), rappresentato da bande verdi e gialle. La loro forma segue il caratteristico schema (detto [chirp](#)) delle onde gravitazionali prodotte dalla fusione di oggetti compatti. L'intensità del segnale GW250207 è resa evidente dalla vasta regione in colore chiaro.

CALIBRAZIONE ASTROFISICA

Al loro passaggio, le [onde gravitazionali](#) deformano lo spazio, allungandolo e comprimendolo alternativamente. I rivelatori LVK misurano questa deformazione utilizzando luce laser che corre lungo i due bracci perpendicolari di ciascun interferometro e cercando [piccole differenze nel tempo di percorrenza della luce](#), a dimostrazione che le lunghezze dei bracci sono cambiate. Normalmente le onde gravitazionali che riceviamo cambiano la lunghezza del braccio di circa 10^{-19} m, molto meno del [raggio di un protone](#)! Per mantenere la sensibilità a questo livello utilizziamo accurati sistemi di [controllo con retroazione](#). Ciò significa che non ci basta misurare i tempi di percorrenza della luce ma dobbiamo anche tenere conto di quanto i sistemi di controllo li abbiano modificati. A tale scopo utilizziamo un'accurata procedura di calibrazione che tiene conto di come il rivelatore cambi man mano che le onde si muovono, inclusi gli effetti dei sistemi di controllo! In generale, non ci si può basare su un modello matematico perfetto e quindi dobbiamo apportare delle correzioni considerando la discrepanza tra il modello e le misure. Quantifichiamo la discrepanza utilizzando laser e sensori ausiliari e la nostra conoscenza dettagliata dello strumento. Ma come fare quando questa informazione aggiuntiva non è disponibile e non si può effettuare una calibrazione adeguata?

Se la calibrazione è imprecisa, le stime delle caratteristiche delle sorgenti potrebbero contenere errori sistematici, e potremmo trarre conclusioni fisiche errate. Fortunatamente, se un segnale gravitazionale è abbastanza forte l'errore di calibrazione può essere stimato separatamente. Se assumiamo che la teoria della relatività generale di Einstein preveda correttamente la forma del segnale, possiamo ridurre l'effetto di potenziali errori sistematici. In questo modo effettuiamo una calibrazione astrofisica. Per le osservazioni GW240925 e GW250207, possiamo impiegare i soliti metodi per stimare gli errori di calibrazione per i rivelatori LIGO Livingston e Virgo, ma non per il rivelatore LIGO Hanford. Fortunatamente, entrambi i segnali sono sufficientemente intensi da poter effettuare i primissimi test di calibrazione astrofisica. Le stime degli errori di calibrazione che troviamo sono mostrate nella **Figura 2**. Una sintesi del contesto osservativo di entrambi gli eventi è fornito della **Tabella 1**.

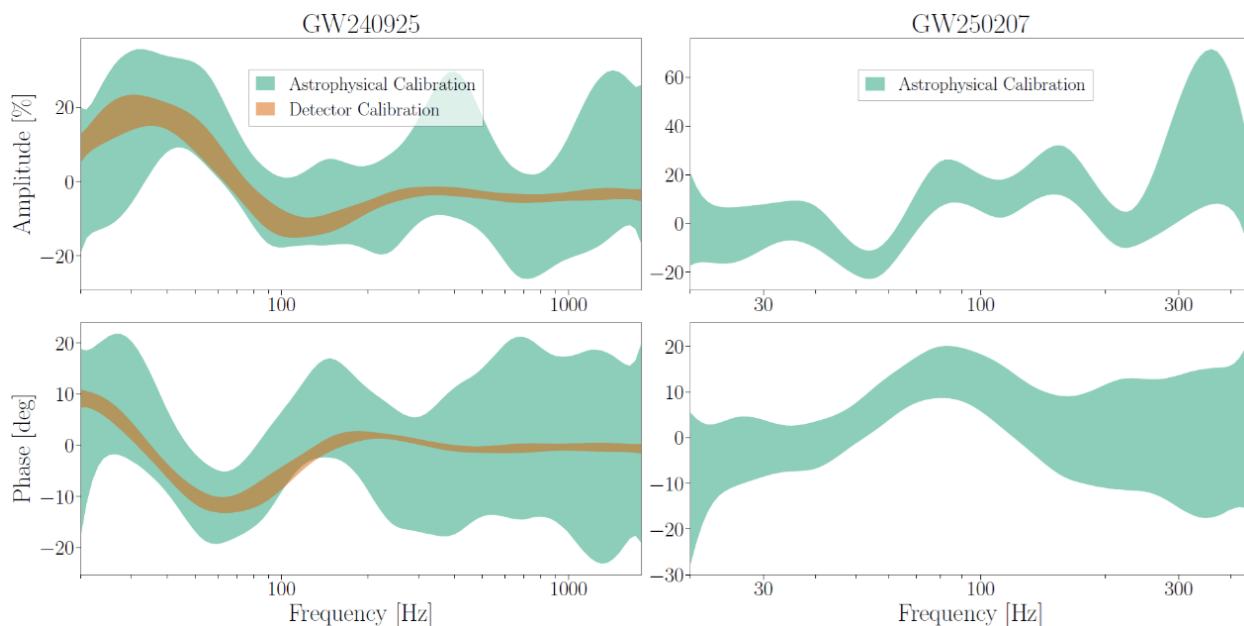


Figura 2: [Stima](#) dell'errore di calibrazione di Hanford in termini di [ampiezza](#) e [fase](#), in funzione della [frequenza](#). Tanto più grande è la regione ombreggiata per una certa frequenza, tanto maggiore è la nostra incertezza su quale sia esattamente l'errore di calibrazione. I grafici per GW240925 a sinistra mostrano in verde i risultati della calibrazione astrofisica dei dati iniziali, e in arancione l'errore quantificato usando informazioni extra misurate nel rivelatore (la cosiddetta 'calibrazione del rivelatore'). Possiamo vedere che la regione colorata di verde racchiude la regione arancione, il che significa che stiamo stimando correttamente la forma dell'errore di calibrazione anche se in modo meno preciso. A destra, mostriamo i risultati per GW250207 la sola regione colorata di verde, poiché non c'erano informazioni aggiuntive sul rivelatore per ottenere anche gli altri risultati.

PERCHÉ È IMPORTANTE LA CALIBRAZIONE ASTROFISICA?

Con dati accurati sulle onde gravitazionali possiamo stimare le proprietà (o parametri) dei buchi neri che hanno generato il segnale gravitazionale, proprietà come le masse dei buchi neri, [se sono in rotazione o meno](#), e dove si trovano nel cielo (localizzazione nel cielo). Scopriamo così che GW240925 è stato generato da buchi neri di 9 e 7 volte la [massa del Sole](#) a una distanza di ~350 [megaparsec](#) dalla Terra, e GW250207 da due buchi neri con massa di 35 e 30 volte quella del Sole a una distanza di ~200 megaparsec dalla Terra. Sembra che in nessuno dei due eventi i buchi neri stessero ruotando rapidamente. Senza tenere adeguatamente conto delle incertezze di calibrazione, queste stime potrebbero essere sbilanciate verso un valore non vero, quindi ci servono incertezze di calibrazione accurate per garantire l'affidabilità delle nostre stime.

Possiamo utilizzare i dati delle onde gravitazionali e le stime dei parametri della sorgente anche per eseguire analisi entusiasmanti come test della [relatività generale](#) e per determinare la [costante di Hubble](#). La [relatività generale](#) è la teoria della gravità di Einstein; studiandola in situazioni estreme, come quelle che si verificano nella fusione di due buchi neri, possiamo vedere se ci sono discrepanze tra ciò che la teoria prevede e ciò che osserviamo. Sebbene non si sia ancora trovata una discrepanza tra la relatività generale e le osservazioni, nuove osservazioni potrebbero mostrare la necessità di modifiche o estensioni della teoria. Anche se gli errori di calibrazione non possono imitare i segnali delle onde gravitazionali, potrebbero assomigliare a deviazioni dalla relatività generale. La realtà di qualunque deviazione osservata potrebbe quindi venire messa in dubbio da errori di calibrazione ed inficiare la nostra interpretazione dei dati.

PER SAPERNE DI PIÙ

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



In casi come GW250207, dove i metodi tipici di calibrazione non erano disponibili, possiamo utilizzare la calibrazione astrofisica, così da poterci comunque fidare dei dati. Nel caso di questo evento, utilizzando dati calibrati astrofisicamente, non è stata rivelata alcuna discrepanza tra la teoria di Einstein e le osservazioni.

Usare la calibrazione astrofisica, così da poterci fidare dei dati del rivelatore LIGO Hanford, significa anche restringere l'area da cui crediamo provengano le onde gravitazionali. Questa localizzazione nel cielo funziona in modo simile alla triangolazione, e tanto maggiore è il numero di rivelatori coinvolti in una osservazione, tanto più possiamo restringere l'area della probabile origine del segnale. Nella Figura 3, l'area probabile si sposta e si riduce significativamente quando si utilizzano dati di LIGO Hanford correttamente calibrati.

Tabella 1: Breve sintesi del contesto osservativo per GW240925 e GW250207

GW240925	GW250207
<p>Un problema tecnico nel rivelatore di Hanford ha indotto un errore nella calibrazione dei dati in tempo reale, che sono stati successivamente corretti consentendo la produzione di dati correttamente calibrati offline. Questo significa che possiamo effettuare una calibrazione astrofisica sui dati iniziali e confrontare i risultati dell'analisi tra questi e i dati finali correttamente calibrati.</p>	<p>Durante questo segnale, LIGO Hanford era appena stato acceso ed era in uno stato instabile. Diversi sensori ausiliari non raccoglievano dati, rendendo impossibile calcolare l'errore di calibrazione. Questo è il secondo evento più rumoroso che abbiamo mai osservato e offre una panoramica unica su una fisica entusiasmante. L'accesso a queste informazioni è possibile solo grazie alla calibrazione astrofisica.</p>

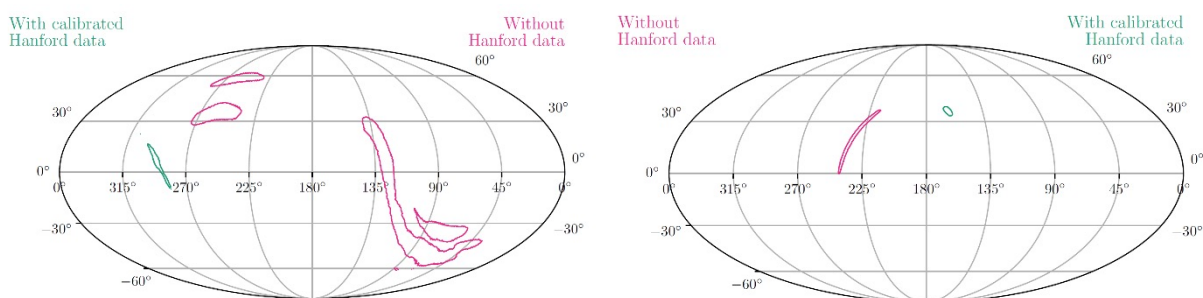


Figura 3: Localizzazione del cielo di GW240925 (sinistra) e GW250207 (destra). Le aree rosa sono ottenute utilizzando i dati dei rivelatori LIGO Livingston e Virgo. Utilizzando i dati LIGO Hanford calibrati astrofisicamente, la posizione probabile della sorgente si sposta e si riduce come mostrato dall'area verde.

La localizzazione del cielo è un ingrediente chiave nella misurazione della costante di Hubble, una quantità che indica il tasso di espansione dell'Universo. Per determinare la costante di Hubble, dobbiamo misurare le distanze cosmiche. I due metodi principali per farlo sono misurare la luminosità delle [candele standard](#) come le [supernovae](#) e misurare le fluttuazioni della [radiazione di fondo cosmico di microonde](#) prodotta dal Big Bang. Tuttavia, questi metodi non concordano sul valore della costante, un effetto noto come [tensione di Hubble](#). L'utilizzo delle onde gravitazionali per misurare la costante di Hubble può aiutare a risolvere questa tensione. A causa della sua posizione nel cielo e dell'intensità del segnale, GW250207 è considerato uno dei segnali migliori tra quelli provenienti dalla fusione di due buchi neri per misurare la costante di Hubble, ma da solo non è in grado di risolvere la tensione, poiché sarebbero necessarie molte altre [sirene oscure](#) di questo tipo per produrre una misura accurata della costante di Hubble. L'analisi di tutte le sirene oscure rilevate durante la prima parte del quarto periodo osservativo è trattata in questo precedente [sommario](#).

Utilizzando GW240925 e GW250207 siamo riusciti ad eseguire i primi test di calibrazione astrofisica, un nuovo metodo di calibrazione per segnali intensi che ci potrebbe aiutare a fidarci dei nostri dati anche quando i rivelatori di onde gravitazionali sono in uno stato instabile, a migliorare la nostra capacità di misurare le proprietà delle sorgenti, a validare la teoria della gravità di Einstein e a determinare la velocità di espansione dell'Universo usando onde gravitazionali.

PER SAPERNE DI PIÙ

Visitate i nostri siti web:

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/ (KAGRA)

Leggete un preprint gratuito dell'articolo scientifico completo qui oppure su arxiv.

GWOSC links.