

TEST DELLA RELATIVITÀ GENERALE CON LE PIÙ RECENTI OSSERVAZIONI DI ONDE GRAVITAZIONALI PROVENIENTI DA FUSIONI DI SISTEMI BINARI COMPATTI

Nel luglio 2026, la [collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) ha pubblicato i suoi più recenti risultati sui test della [Relatività Generale](#) realizzati utilizzando segnali da [onde gravitazionali](#) (GW) provenienti dalla fusione di coppie di oggetti compatti come [stelle di neutroni](#) e [buchi neri](#). Per questi test abbiamo combinato 91 eventi osservati in passato con 77 nuovi segnali aventi un'elevata significatività statistica e osservati durante il quarto periodo osservativo (O4) — di cui 72 nella seconda parte (O4b) e 5 nella prima parte (O4a). Questo insieme di dati è il più ampio e migliore utilizzato finora per convalidare la teoria di Einstein. In ciascuno dei test effettuati, la Relatività Generale supera ancora una volta la prova, e i limiti sulle possibili deviazioni sono ora significativamente più stringenti rispetto a prima.

(per le definizioni di alcuni termini tecnici si veda il nostro glossario, in inglese, a questo link: <https://ligo.org/glossary/>)

La teoria della Relatività Generale di Einstein è attualmente quella considerata valida per descrivere la gravità. Nei 111 anni trascorsi da quando Einstein l'ha introdotta, la teoria è stata sottoposta a molte prove, che ha sempre superato a pieni voti. Eppure, rimane costantemente sotto esame: qualsiasi deviazione osservata dalle sue previsioni, per quanto piccola, potrebbe fornire indizi su nuovi fenomeni fisici descritti invece da altre teorie come una [teoria quantistica della gravità](#) o una teoria che include l'[energia oscura](#). Le onde gravitazionali (GW) sono un'importante predizione della Relatività Generale, confermata dalla [prima osservazione diretta della fusione di due buchi neri, avvenuta nel settembre 2015](#). L'osservazione della fase di avvicinamento ([inspiral](#)) e della fusione ([merger](#)) di una coppia di buchi neri di massa stellare è un'opportunità unica per verificare se la Relatività Generale sia ancora valida dove la gravità è più forte e cambia velocemente.

Negli ultimi dieci anni, la collaborazione LVK ha continuato ad utilizzare le osservazioni di onde gravitazionali per mettere alla prova la Relatività Generale. I test hanno confermato che qualsiasi deviazione dalla Relatività Generale, se esiste, deve essere molto piccola — al di sotto delle capacità di misura dei rivelatori. Al crescere del numero di eventi, i nostri test diventano sempre più stringenti. Ora riportiamo i risultati ottenuti con 72 nuovi segnali statisticamente significativi e derivanti dalla fusione di buchi neri osservati nella seconda parte dell'ultimo [periodo osservativo](#) (O4b), più 5 segnali osservati nella prima parte dello stesso periodo osservativo (O4a) che non erano stati analizzati prima. Aggiungendo anche i 91 eventi appartenenti ai precedenti periodi osservativi, otteniamo il più grande insieme di dati utilizzabile per questi test. I dati sono eccezionali anche per qualità: essi includono un gran numero di segnali con un elevato [rapporto segnale-rumore](#), e quindi con forme d'onda molto chiare che rendono possibili nuovi test e affinano quelli già esistenti. L'evento più notevole è [GW250114](#), il segnale più intenso finora osservato. La Relatività Generale supera ancora una volta tutti i test, e i limiti sulle possibili deviazioni sono ora significativamente più stretti, si veda anche [il precedente sommario scientifico](#) per i risultati fino a O4a.

Come possiamo essere sicuri della validità della Relatività Generale? La teoria di Einstein fornisce un quadro ben consolidato per descrivere la gravità; negli ultimi decenni le forme d'onda prodotte da fusioni di sistemi binari compatti sono state calcolate con sempre maggiore precisione. I test della Relatività Generale si basano su (i) la valutazione della coerenza interna della teoria tra le diverse fasi della coalescenza (si veda la Figura 1), oppure (ii) la ricerca di specifiche "distorsioni" dei segnali causate da violazioni plausibili della Relatività Generale.

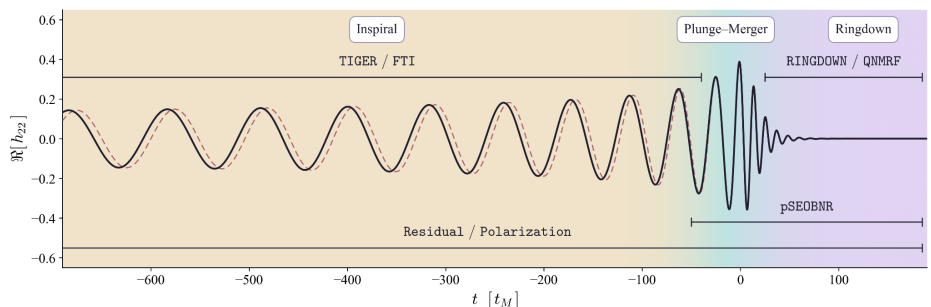


Figura 1: Forma d'onda gravitazionale prodotta da una fusione binaria di buchi neri. L'asse orizzontale rappresenta il tempo, mentre l'asse verticale rappresenta l'ampiezza del segnale. La forma d'onda è suddivisa in tre parti: *inspiral*, *merger* e *ringdown* (termini inglesi che indicano l'orbita che si restringe sempre più tracciando una spirale, la fusione tra componenti, e le vibrazioni in rapido decadimento dell'oggetto risultante dalla fusione), studiata con diversi metodi. Le scritte su fondo bianco indicano le diverse parti del segnale sondate da ciascun metodo, mentre le altre indicano i nomi dei test o dei metodi utilizzati. La linea tratteggiata indica un ipotetico segnale che si discosta dalla previsione della Relatività Generale.

Possibili deviazioni dalla Relatività Generale potrebbero essere dovute al meccanismo di generazione delle onde gravitazionali, oppure alla loro propagazione, o ancora alla natura degli oggetti che si fondono, che potrebbero non essere i buchi neri descritti dalla Relatività Generale. Tuttavia, questi test devono essere interpretati con attenzione: le fluttuazioni del rumore strumentale, così come le limitazioni nell'accuratezza dei modelli di segnale utilizzati nell'analisi, possono mimare gli effetti dovuti a violazioni della Relatività Generale e devono essere accuratamente separate dagli effetti fisici reali.

UNA MOLTITUDINE DI TEST

Il gran numero e l'alta qualità delle osservazioni disponibili permettono agli scienziati della collaborazione LVK di effettuare una vasta gamma di test della Relatività Generale.

Il controllo più semplice consiste nel verificare la coerenza complessiva dei segnali osservati con le previsioni della Relatività Generale. Questo può essere fatto sottraendo dai dati la forma d'onda che li descrive meglio e analizzando le differenze tra segnale osservato e forma d'onda, i cosiddetti *residui*, e confrontandole con il rumore strumentale atteso. Poiché le osservazioni che consideriamo sono eseguite da almeno due e talvolta tre rivelatori la coerenza dei residui tra i rivelatori fornisce un ulteriore controllo, tenendo conto del tempo di viaggio delle onde da un rivelatore all'altro: un segnale reale dovrebbe essere correlato tra i rivelatori, mentre i processi di rumore strumentale nei diversi rivelatori non lo sono.

Una seconda classe di test esamina il grado di polarizzazione del segnale. Come le onde luminose, le onde gravitazionali nella Relatività Generale hanno solo due [polarizzazioni](#) trasversali, chiamate "più" e "per". Le teorie alternative della gravità, tuttavia, possono avere fino a sei tipi di polarizzazione indipendenti. I test di polarizzazione verificano se i dati sono compatibili con i soli due modi previsti dalla Relatività Generale, o se il campo gravitazionale oscilla in modo più generale. La presenza di ulteriori modi di polarizzazione può essere trovata utilizzando osservazioni da più rivelatori, per saperne di più si veda la figura 5 di [questo sommario scientifico](#).

Altri test si concentrano direttamente sulla possibilità che l'evoluzione dei sistemi binari di buchi neri, così come l'emissione e la propagazione delle onde gravitazionali, si discosti dalle previsioni di Einstein. Nei test di propagazione ci si chiede se le onde arrivino invariate ai nostri rivelatori dopo il loro lungo viaggio attraverso l'universo. La Relatività Generale prevede che le GW viaggino alla [velocità della luce](#) e interagiscano molto debolmente con la materia. Al contrario, alcune teorie alternative della gravità (come quelle che coinvolgono un [gravitone massiccio](#) o [energia oscura](#)) suggeriscono che le onde gravitazionali possano propagarsi a velocità diverse e che subiscano [dispersione](#). Questo implicherebbe tempi di arrivo diversi per onde gravitazionali di frequenze diverse, come nel caso delle onde radio che si disperdono quando viaggiano attraverso un [plasma](#). I test di generazione delle onde gravitazionali verificano se l'evoluzione dalla fase di inspiral alla fusione dei sistemi binari compatti sia in accordo con quanto previsto dalla Relatività Generale. Ciò si può fare introducendo parametri aggiuntivi nel modello del segnale che imitano gli effetti di teorie alternative. Se i dati indicano che i parametri non sono statisticamente diversi da zero, la teoria di Einstein supera il test. Altrimenti il risultato potrebbe suggerire che ci sono effetti fisici che la teoria della Relatività Generale non descrive.

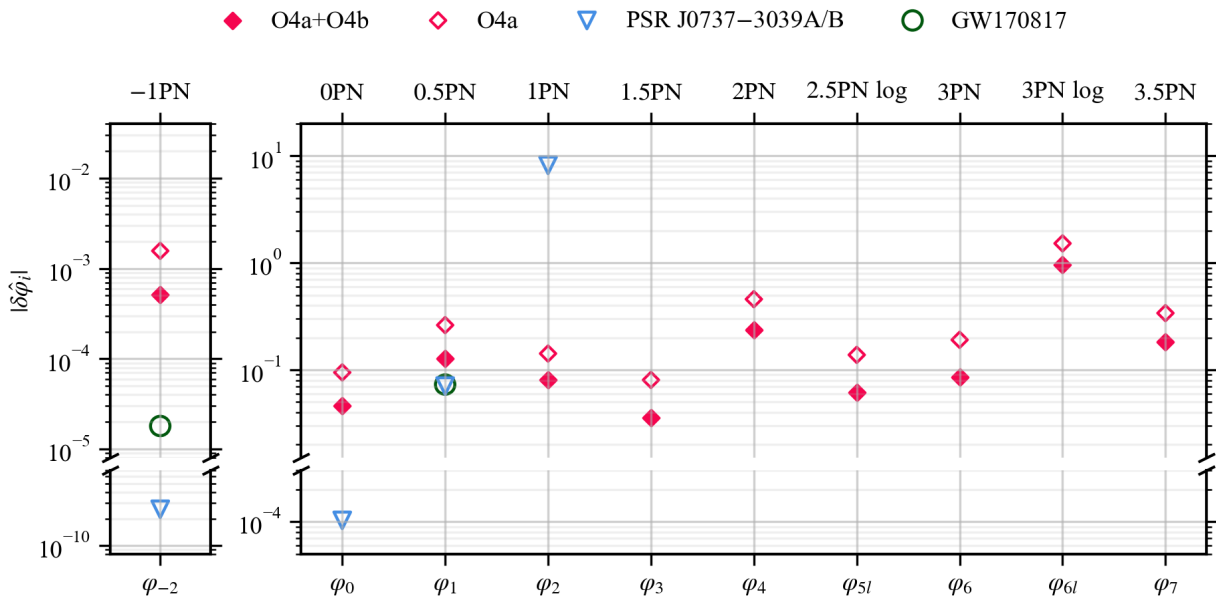


Figura 2: Valori massimi ammissibili sui cosiddetti coefficienti [post-Newtoniani](#), che governano la fase del segnale gravitazionale. L'asse orizzontale elenca i coefficienti, ordinati in base allo stadio dell'evoluzione del sistema binario in cui influenzano il segnale, a partire da un'ampia separazione tra le componenti (a sinistra) fino agli istanti immediatamente precedenti la fusione (a destra). L'asse verticale rappresenta l'ampiezza della deviazione compatibile con i risultati, con i marcatori più bassi (simboli rossi pieni) che indicano i vincoli più stringenti rispetto a quelli precedenti (simboli rossi vuoti). Per i coefficienti di ordine più basso, vengono mostrati per confronto i limiti ottenuti dalla pulsar doppia [PSR J0737-3039A/B](#) (triangoli blu) e dal segnale gravitazionale [GW170817](#) relativo alla fusione di un sistema binario composto da due stelle di neutroni (cerchi verdi).

Infine, una serie di test si concentra sul buco nero finale. Inizialmente questo buco nero è distorto dalla violenta dinamica della fusione, ed emette onde gravitazionali che si spengono nel tempo come accade ad una campana in vibrazione; questa fase è nota come "ringdown". Queste onde vengono irradiate a frequenze specifiche e si attenuano con scale temporali caratteristiche, entrambe determinate dalla massa finale e dallo [spin del buco nero](#) residuo. Questa è la base del "teorema no-hair", tutte le distorsioni del buco nero, dette scherzosamente "peli", vengono cancellate nel processo di radiazione: il buco nero finale viene descritto completamente da due sole quantità fisiche, la massa e lo spin. Proprio come un coro che svanisce alla fine di una canzone, le singole "voci" del buco nero, le componenti [armoniche](#) del ringdown, portano informazioni dettagliate sulla loro origine. Gli scienziati possono quindi misurare la massa e lo spin di un buco nero analizzando il suo spettro di frequenza di ringdown e il tempo di decadimento. L'osservazione di una singola frequenza, come accade di solito, permette controlli di coerenza con i parametri inferiti prima e durante la fusione, mentre in presenza di più componenti armoniche è possibile controllare la coerenza dei parametri del buco nero dedotti da ciascuna armonica e fornisce un test diretto del teorema no-hair.

EINSTEIN HA RAGIONE ALLORA?

Per ogni evento considerato, troviamo che i residui sono coerenti con il rumore: ciò indica che i segnali GW sono ben descritti dalla Relatività Generale.

Non troviamo alcuna indicazione di ulteriori modalità di polarizzazione oltre le due previste dalla teoria di Einstein, né prove di deviazioni dalla Relatività Generale nella generazione delle GW. Tuttavia, la presente analisi pone limiti significativamente più stretti alle possibili deviazioni rispetto a quanto fatto in precedenza, come illustrato in **Figura 2**.

Abbiamo inoltre effettuato analisi dedicate al ringdown, le vibrazioni finali del buco nero appena formato. In tutti i casi le frequenze misurate e i tempi di decadimento restano compatibili con quelli previsti per i buchi neri nella Relatività Generale, e le masse e gli spin residui dedotti dal ringdown concordano con quelli stimati dal resto del segnale.

Le ultime osservazioni sono più di un semplice aumento quantitativo dei dati: alcune rendono possibili nuovi test qualitativamente nuovi. Il più sorprendente è [GW250114](#), l'evento GW più intenso osservato fino ad oggi, che ha permesso di ottenere i vincoli più precisi sulle deviazioni nel ringdown (vedi anche questi precedenti riassunti scientifici [1] [2]). Sia nel caso di GW250114 che di GW240621, l'analisi del ringdown ha identificato un'armonica sottodominante accanto a quella dominante, come illustrato nella **Figura 3** qui accanto, coerentemente con quanto previsto dalla Relatività Generale. Il caso di [GW241011](#), originato da un sistema in cui i buchi neri hanno masse molto diverse e sono in rapida rotazione, è diverso dalla maggior parte di ciò che abbiamo osservato finora e fornisce forti vincoli sulle potenziali modifiche della fase di avvicinamento (inspiral). [GW240925](#), uno degli eventi più intensi, è stato osservato mentre il rivelatore risentiva di un problema di calibrazione, e lo si è potuto includere solo ricavando la calibrazione strumentale insieme alle proprietà della sorgente. Si tratta di una verifica importante, poiché gli errori di calibrazione avrebbero potuto altrimenti essere scambiati per deviazioni dalla Relatività Generale.

Nel complesso, questi risultati confermano che le osservazioni di onde gravitazionali non richiedono modifiche della Relatività Generale o nuova fisica. Inoltre, combinando i 77 nuovi eventi con le osservazioni precedenti, abbiamo imposto vincoli ancora più stringenti sulle possibili deviazioni dalla Relatività Generale. Man mano che i rivelatori LIGO-Virgo-KAGRA continuano a migliorare, si prevede che i prossimi periodi osservativi forniranno segnali ancora più intensi e test ancora più precisi della teoria di Einstein.

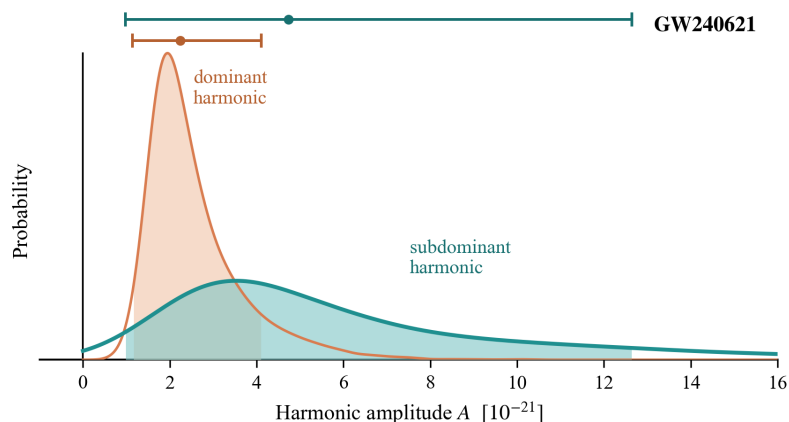


Figura 3: Distribuzioni di probabilità delle ampiezze dell'armonica dominante (arancione) e di quella subdominante (turchese) durante la fase di ringdown di GW240621, misurate insieme poco dopo la fusione (circa 1,5 millisecondi, ovvero circa il doppio del tempo che impiega la luce a percorrere una distanza paragonabile alla dimensione finale del buco nero). L'asse orizzontale è l'ampiezza in unità di 10^{-21} , la scala tipica delle onde gravitazionali osservate con i nostri rivelatori. Le bande colorate l'intervallo di credibilità del 90% di ciascuna armonica, definito come l'intervallo più stretto contenente il 90% della probabilità. I marcatori sopra le curve indicano lo stesso intervallo insieme all'ampiezza mediana (il piccolo cerchio pieno) per ciascuna armonica. Entrambe le regioni escludono lo zero, indicando che l'armonica sottodominante viene misurata in modo affidabile. L'armonica sottodominante decade molto più rapidamente di quella dominante, e sebbene la sua ampiezza possa brevemente eguagliare o superare quella dell'armonica dominante all'inizio del ringdown, poi svanisce rapidamente mentre l'armonica dominante persiste.

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:

"Tests of General Relativity with the signals from the GWTC-5"
<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500781/public/> oppure su Arxiv: <http://arxiv.org/abs/2606.nnnnn>

Link ai dati pubblici forniti dal Gravitational-Wave Open Science Centre: <https://gwosc.org/GWTC-5.0/>.