

VERIFICHE DELLA RELATIVITÀ GENERALE REALIZZATE CON LE ULTIME OSSERVAZIONI DI FUSIONI DI SISTEMI BINARI COMPATTI

La [teoria della Relatività Generale](#) di Einstein è attualmente la teoria della gravità più accreditata. Durante gli ultimi 110 anni, da quando Einstein ha introdotto la Relatività Generale, essa è stata sottoposta a molte accurate verifiche che ha superato sempre a pieni voti. Eppure, la teoria resta costantemente sotto esame. Le [onde gravitazionali](#) sono una predizione diretta della Relatività Generale, confermata dalla [prima osservazione diretta della fusione di due buchi neri nel settembre 2015](#). Le osservazioni dell'avvicinamento (*inspiral* in inglese) e della fusione (*merger* in inglese) di [buchi neri](#) di massa stellare forniscono un'opportunità unica per verificare se la Relatività Generale sia ancora valida nel regime di gravità forte e altamente dinamica.

Nell'ultimo decennio, la [Collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) ha utilizzato le osservazioni elencate nei suoi cataloghi di onde gravitazionali per verificare la validità della relatività generale. Questi test hanno confermato che se esistono deviazioni dalla Relatività Generale esse devono essere molto piccole, al di sotto delle capacità di misura dei rivelatori. Tuttavia, man mano che si osservano sempre più onde gravitazionali, i nostri test diventano sempre più rigorosi. Le 42 nuove fusioni di buchi neri statisticamente significative che sono state rivelate durante la prima parte dell'attuale [periodo osservativo](#) (O4a), consentono di riesaminare la validità della Relatività Generale con un insieme di dati più ampio.

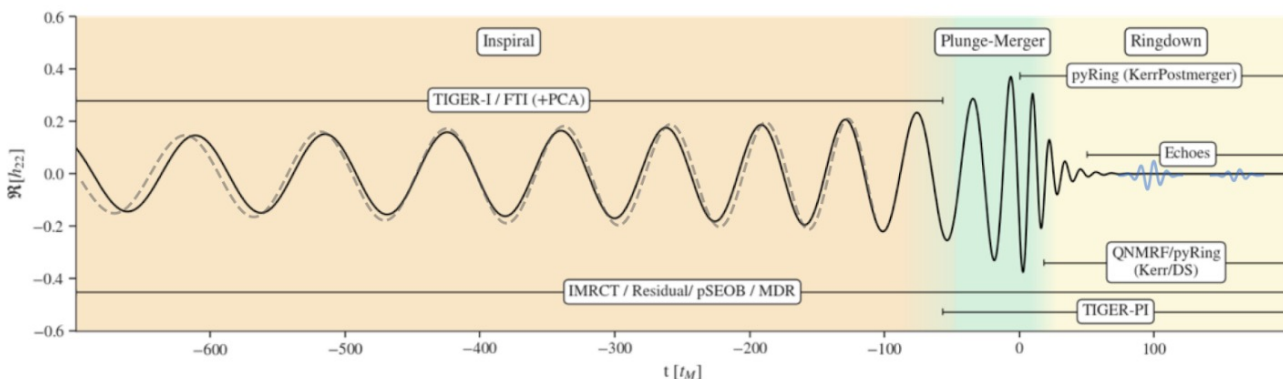


Figura 1: Il segnale gravitazionale proveniente dalla fusione di un sistema binario di buchi neri. La figura evidenzia nel segnale le fasi di avvicinamento (*inspiral*), fusione (*plunge-merger*) e del transiente finale (*ringdown*) che vengono utilizzate per i diversi test della Relatività Generale. Sono inoltre indicati il nome dei test e l'intervallo di tempo in cui ciascun test viene applicato. Un ipotetico segnale distorto, tale da deviare dalla previsione della Relatività Generale, viene indicato da una linea tratteggiata. I possibili echi, che si potrebbero osservare se il residuo della fusione non fosse un buco nero, sono indicati in blu.

Come si fa a verificare la Relatività Generale? La Relatività Generale fornisce un quadro ben consolidato che descrive la gravità, e negli ultimi decenni sono stati fatti grandi progressi, sia analitici che numerici, nella costruzione di modelli accurati delle onde gravitazionali provenienti da fusioni (comunemente dette *coalescenze*) di sistemi binari di oggetti compatti. I test della Relatività Generale si basano su (i) la valutazione della coerenza interna della teoria in tutti i diversi stadi della coalescenza, o (ii) la ricerca di specifiche "distorsioni" dei segnali delle onde gravitazionali motivate da violazioni plausibili della Relatività Generale.

Possibili deviazioni dalla Relatività Generale potrebbero verificarsi durante la generazione o la propagazione delle onde gravitazionali, o perché gli oggetti che si fondono non sono buchi neri come ci si aspetta dalla Relatività Generale. Tuttavia, questi test devono essere interpretati con cura: le fluttuazioni del rumore strumentale e le limitazioni derivanti dall'uso di forme d'onda gravitazionali computazionalmente efficienti (ma leggermente meno accurate) possono imitare vere deviazioni dalla Relatività Generale e devono essere accuratamente separate dai veri effetti fisici.

UNA MIRIADE DI PROVE

Il gran numero e l'alta qualità delle osservazioni delle onde gravitazionali disponibili consentono agli scienziati della collaborazione LVK di eseguire un'ampia gamma di verifiche della Relatività Generale. Oltre ai test descritti più dettagliatamente in seguito, i nostri articoli presentano diversi altri test che esplorano la coerenza delle caratteristiche più deboli (note come **modi subdominanti**) dei segnali delle onde gravitazionali o verificano se i buchi neri siano deformati dal loro [spin](#) come previsto. Inoltre, esaminiamo se il centro di massa della binaria mostri segni di accelerazione, un effetto astrofisico che, se non adeguatamente considerato, potrebbe essere interpretato erroneamente come una deviazione dalla Relatività Generale.

La prima serie di test cerca di evidenziare eventuali scostamenti dalle previsioni di Einstein nell'evoluzione dei sistemi binari di buchi neri, così come nell'emissione e nella propagazione delle onde gravitazionali. Ad esempio, la Relatività Generale prevede che le onde gravitazionali 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 l'[energia oscura](#)) suggeriscono che le onde gravitazionali possano propagarsi a velocità diverse e mostrare dispersione, il che significa che frequenze diverse arrivano in tempi leggermente diversi, in modo simile a quello delle onde radio che si disperdono quando viaggiano attraverso un [plasma](#). Ciò si può verificare introducendo parametri aggiuntivi che imitano gli effetti di teorie alternative nel modello del segnale. Se i dati suggeriscono che questi parametri non si discostano significativamente dallo zero, la teoria di Einstein supera il test. In caso contrario, il risultato potrebbe suggerire l'esistenza di nuova fisica oltre la Relatività Generale.

Un'altra classe di test è progettata per verificare la coerenza complessiva dei segnali delle onde gravitazionali osservate con le previsioni della Relatività Generale, o la coerenza interna di diverse parti del segnale.

La coerenza complessiva può essere verificata sottraendo la forma d'onda della Relatività Generale che meglio si adatta ai dati e confrontando i residui con il rumore strumentale atteso. Poiché le osservazioni che prendiamo in considerazione per questi test sono fatte con almeno due e talvolta tre rivelatori, la coerenza dei residui tra i rivelatori, tenendo conto del tempo impiegato dalla luce a percorrere la distanza tra i siti, fornisce un ulteriore strumento di controllo: mentre un vero segnale di onde gravitazionali deve essere correlato tra i rivelatori, il rumore strumentale in ciascun rivelatore non è correlato.

La coerenza interna può essere verificata dividendo il segnale in segmenti distinti e analizzando ogni parte separatamente. Se la Relatività Generale è corretta, i parametri dell'onda gravitazionale dedotti da diverse parti del segnale dovrebbero concordare. Ad esempio, i segnali delle onde gravitazionali rivelati dagli strumenti della collaborazione LVK tipicamente codificano le informazioni provenienti da tutte e tre le fasi di una coalescenza di un sistema binario di buchi neri: l'["inspiral"](#) dei due buchi neri, il merger ed il [ringdown](#) del buco nero residuo. Il test di coerenza "inspiral-merger-ringdown" confronta la massa e lo spin del buco nero residuo dedotti dalla fase inspiral a bassa frequenza con i valori dedotti dalla fase post-fusione ad alta frequenza.

Come accade nel caso delle onde elettromagnetiche, la Relatività Generale consente solo due [polarizzazioni](#) trasverse, indicate con + e x. I test di polarizzazione verificano se le onde gravitazionali possiedono solo i due stati di polarizzazione previsti dalla Relatività Generale o se il campo gravitazionale dell'onda può oscillare in modo più generale. Le teorie alternative della gravità possono avere fino a sei modalità di polarizzazione indipendenti. La presenza di modalità di polarizzazione aggiuntive può essere verificata utilizzando osservazioni da più rivelatori. (Si veda la Fig. 5 di [questo sommario scientifico](#) per ulteriori dettagli.)

Il buco nero formatosi in una fusione binaria è inizialmente distorto dalle violente dinamiche della coalescenza. Come una campana che quando viene percossa produce un suono caratteristico, il buco nero emette onde gravitazionali. Queste onde vengono irradiate a frequenze specifiche e decadono con scale temporali caratteristiche, entrambe determinate dalla massa finale e dalla rotazione

del buco nero residuo. Ciò ci permette di utilizzare il "teorema no hair": tutte le distorsioni del buco nero – i dettagli della fusione o "peli" ("hair" in inglese) – spariscono nel processo, lasciando dietro di sé uno stato finale descritto esclusivamente da due parametri. E 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 fonte. Pertanto, gli scienziati possono conoscere la massa e lo spin di un buco nero analizzando lo spettro di frequenza nella fase di ringdown e il corrispondente tempo di decadimento. L'osservazione di una singola armonica, come di solito accade, consente di verificare la coerenza con i parametri dedotti prima e durante la fusione.

La caratteristica chiave di un buco nero è il suo orizzonte degli eventi, al di sotto del quale nessun segnale può sfuggire, a differenza di una superficie dura che potrebbe fungere da "specchio" riflettente e produrre i cosiddetti "segnali di eco" nella post-fusione, e anche questi sono oggetto della nostra ricerca.

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i
nostri siti
web:



DUNQUE EINSTEIN HA RAGIONE?

In tutti i casi considerati troviamo che i residui sono compatibili con il rumore e ciò indica che i segnali gravitazionali sono ben descritti dalla Relatività Generale. Le masse e gli spin finali, come si deduce dalle parti a bassa e alta frequenza delle forme d'onda, sono anch'esse compatibili tra loro.

Inoltre nei segnali osservati non troviamo indicazioni di deviazioni dalle previsioni della Relatività Generale né nella generazione né nella propagazione delle onde gravitazionali. Allo stesso modo, non c'è alcuna indicazione che esistano altri tipi di polarizzazione oltre a quelle previste dalla Relatività Generale. Inoltre l'analisi attuale pone limiti significativamente più stringenti alle possibili deviazioni dalla Relatività Generale, come illustrato nella Figura 2.

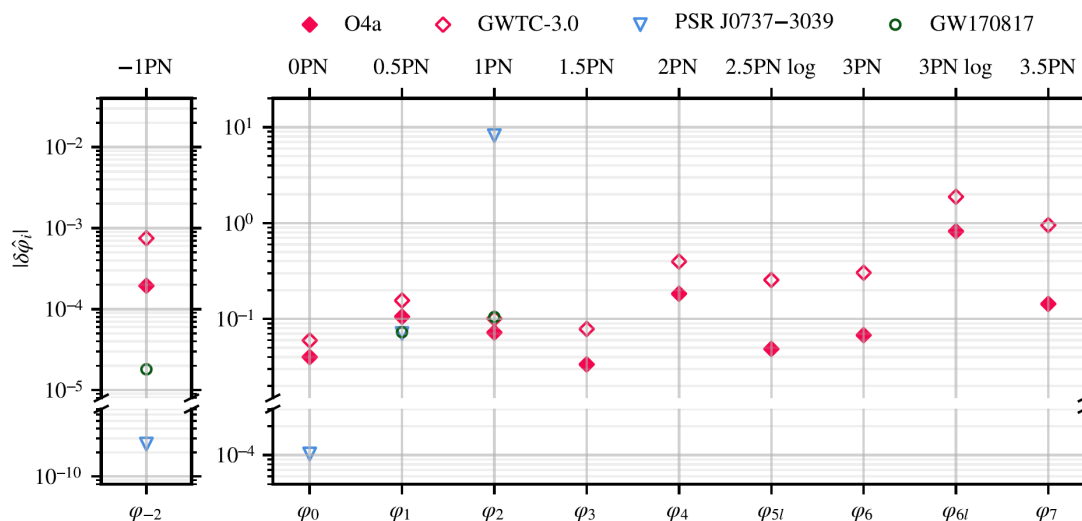


Figura 2: Qui vengono mostrati i vincoli sui cosiddetti [coefficienti post-Newtoniani](#), che governano la fase del segnale gravitazionale. Questi coefficienti descrivono le possibili deviazioni dalla Relatività Generale in diversi stadi dell'evoluzione del sistema binario (da quando le componenti sono distanti tra loro, a sinistra nella figura, fino a poco prima della fusione, a destra nella figura). L'analisi attuale produce limiti significativamente più stringenti (vale a dire valori più bassi) su tali deviazioni rispetto ai quanto ottenuto in precedenza.

Allo stesso modo, l'analisi della fase di ringdown produce risultati compatibili con le masse e gli spin del buco nero residuo stimati utilizzando la Relatività Generale. Inoltre, non troviamo segni di echi successivi alla fusione, come ci si aspetterebbe se il residuo non fosse un buco nero.

La collaborazione LVK ha recentemente condotto altre verifiche della Relatività Generale utilizzando due eventi eccezionalmente forti non inclusi in questo lavoro: [GW230814](#), in precedenza l'evento con il segnale più potente mai rivelato (osservato solo da LIGO Livingston) e [GW250114](#), il nuovo detentore del record di potenza del segnale. Sebbene inizialmente [GW230814](#) sembrasse promettente per verificare la Relatività Generale, l'assenza di dati coincidenti da altri rivelatori ha impedito controlli incrociati sul rumore strumentale, evidenziando l'importanza delle osservazioni multi-rivelatore. Al contrario, [GW250114](#) – che è stato rivelato da entrambi gli osservatori LIGO – ha permesso di effettuare test ad alta precisione della Relatività Generale, inclusa una verifica diretta del ["teorema dell'area" di Hawking](#) e di mettere i vincoli più stringenti sulle [deviazioni post-Newtoniane](#) e su quelle nella fase di ringdown. Tuttavia, questo evento si è verificato più avanti nel quarto periodo osservativo e quindi non fa parte dell'insieme di dati considerato in questo lavoro.

Nel complesso questi risultati confermano che la Relatività Generale continua ad essere compatibile con le osservazioni delle onde gravitazionali, senza richiedere modifiche o nuova fisica. Inoltre, combinando i 42 eventi appena studiati con le rivelazioni precedenti, abbiamo potuto mettere vincoli ancora più stringenti sulle possibili deviazioni dalla Relatività Generale.

PER SAPERNE DI PIÙ:

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

Questo sommario scientifico è basato su tre nuovi articoli della Collaborazione LVK. Leggete un preprint gratuito degli articoli scientifici completi:

GTWC-4.0: Tests of General Relativity I. Overview and General Tests. Leggete [qui](#) o su [arxiv](#).

GWTC-4.0: Tests of General Relativity II. Parametrized Tests. Leggete [qui](#) o su [arxiv](#).

GWTC-4.0: Tests of General Relativity III. Tests of the Remnants. Leggete [qui](#) o su [arxiv](#).

Dati messi a disposizione dal Gravitational-Wave Open Science Centre:

Dati per GW230814: <https://doi.org/10.7935/amj3-kd70>

Dati per GW250114: <https://doi.org/10.7935/1g4j-2028>