

COME SI CONFRONTA LA TEORIA DELLA GRAVITÀ DI EINSTEIN CON LE ULTIME OSSERVAZIONI DI LIGO/VIRGO/KAGRA?

INTRODUZIONE

Le onde gravitazionali sono prodotte da distribuzioni di masse in accelerazione non uniforme, portano informazioni sulle sorgenti che le hanno prodotte, e vengono spesso immaginate come increspature dello spazio-tempo. Secondo la teoria della [Relatività Generale di Einstein](#) (in inglese *General Relativity* – da cui l'acronimo GR) le onde gravitazionali possiedono proprietà che possono venire misurate. La GR predice che queste onde viaggino alla [velocità della luce](#), e che la velocità di propagazione sia indipendente dalla loro frequenza. La teoria predice anche l'esistenza di due diverse [polarizzazioni](#) indipendenti, indicate con "+" e "x". Inoltre, la GR predice la dinamica dello spazio-tempo che porta alla generazione delle onde gravitazionali, per esempio nel caso di collisioni di buchi neri e/o stelle di neutroni. Le osservazioni di onde gravitazionali provenienti da fusioni di sistemi binari composti da buchi neri e stelle di neutroni realizzate dalla rete di rivelatori avanzati di LIGO/Virgo forniscono quindi un'opportunità unica per la verifica delle predizioni della GR e per la ricerca di qualunque tipo di fisica che vada oltre la GR. Dopo la prima osservazione di onde gravitazionali nel 2015, ne abbiamo osservato molte altre.

Con l'uscita del più recente catalogo di onde gravitazionali transienti GWTC-3, i rivelatori LIGO/Virgo hanno raggiunto il traguardo di 90 osservazioni di fusioni sistemi binari compatti, che includono buchi neri binari, stelle di neutroni binarie e coppie di stelle di neutroni e buchi neri. Di questi 90 eventi, 35 fusioni di sistemi binari compatti [sono state riportate per la prima volta in GWTC-3. In questo articolo](#), combiniamo i nuovi dati osservativi con i dati più vecchi per cercare possibili violazioni delle previsioni della GR.

Tutti gli esperimenti sono disturbati dal rumore di misura e i rivelatori di onde gravitazionali non fanno eccezione. Quando cerchiamo piccole violazioni delle previsioni della GR, troviamo che esse possono venire simulate da alcuni tipi di rumore presenti nel rivelatore, e perciò rischiamo di rivelare una violazione della teoria anche quando non ce n'è nessuna. Per tal motivo restringiamo la nostra analisi agli eventi meglio distinti dal rumore, quelli i cui segnali potrebbero venire simulati dal rumore non più frequentemente di una volta ogni 1000 anni. In O3b ci restano così 15 eventi, che analizziamo con nove diversi metodi di ricerca di violazioni della GR. Nel seguito riassumiamo i risultati di questi test.

TEST DI CONSISTENZA

Consistenza globale del segnale con i dati: il test dei residui

Le forme d'onda previste dalla GR vengono utilizzate per rivelare le onde gravitazionali ed interpretare ciò che osserviamo. Il test più semplice della GR che possiamo realizzare consiste nel sottrarre dai dati la [forma d'onda GR](#) che meglio si adatta ai dati stessi. Se la GR è corretta, il residuo di questa procedura dovrebbe corrispondere al rumore di fondo. Per tutti gli eventi studiati, troviamo che il residuo è consistente con il rumore del rivelatore, fornendo così una prova della consistenza dei dati con le predizioni della GR.

Autoconsistenza della forma d'onda: il test di consistenza IMR

Le onde gravitazionali provenienti da fusioni di stelle di neutroni e buchi neri hanno tre fasi di evoluzione: il lento avvicinamento dei due oggetti che seguono traiettorie a spirale (questa fase è indicata in inglese con il termine *inspiral*, nel seguito indicata con la lettera I), la fusione di due corpi in un solo oggetto (in inglese *merger*, nel seguito indicata con la lettera M), e la fase in cui l'oggetto compatto residuo mostra oscillazioni che si smorzano rapidamente (in inglese *ringdown*, indicata con la lettera R).

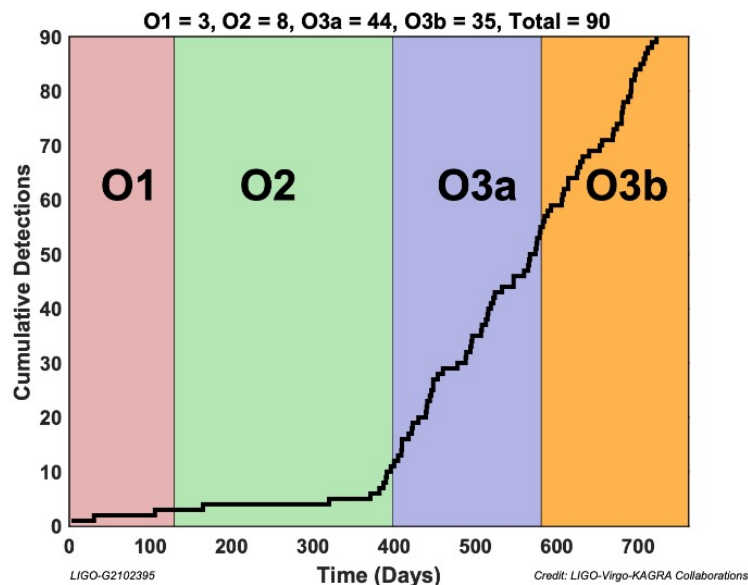


Figura 1: Durate dei primi tre periodi osservativi dei rivelatori advanced LIGO e advanced Virgo ed il numero di complessivo di osservazioni effettuate. Come menzionato nel testo, non tutti questi sistemi binari sono stati analizzati nei test della GR di questo studio.

Un importante controllo di consistenza può venire effettuato chiedendosi se la forma d'onda dell'inspiral è consistente con la forma d'onda delle fasi che seguono. La massa finale e lo spin del buco nero residuo possono venire dedotte da entrambe le parti della forma d'onda adattando in modo empirico le simulazioni numeriche di queste binarie realizzate secondo la GR. La nostra analisi ha trovato che le forme d'onda di inspiral e delle fasi successive sono in buon accordo per tutti gli eventi che analizzati (si veda la [figura 2](#)).

TEST PARAMETRICI DELLA RELATIVITÀ GENERALE

La fisica complessa e altamente non-lineare negli istanti che precedono e seguono la fusione del sistema binario conduce a vari effetti fisici che vengono codificati nella forma d'onda gravitazionale. Una teoria modificata della gravità potrebbe portare a previsioni diverse per uno o più di questi effetti. Perciò cerchiamo indizi di nuova fisica nelle fasi di inspiral e di merger/ringdown

Test basati sull'inspiral

La fase di inspiral del sistema binario viene descritta da un'approssimazione che funziona nel caso di moto lento e campo debole, detta [approssimazione post-Newtoniana](#) della GR. I diversi coefficienti post-Newtoniani descrivono uno o più effetti fisici nella dinamica del sistema binario e il confronto di questi effetti con le previsioni della GR costituisce un test molto utile. La nostra analisi, combinata con i risultati ottenuti dai precedenti cataloghi, fornisce limiti aggiornati sui coefficienti di violazione; tuttavia non troviamo nessuna discrepanza statisticamente significativa con la GR.

La fase di inspiral del sistema binario ci permette anche di capire se il segnale descrive la fusione di due [buchi neri di Kerr](#) secondo la GR. La rotazione di uno degli oggetti compatti può produrre una deformazione, proprio come la rotazione della Terra comporta un appiattimento ai poli e un rigonfiamento all'equatore. Ciò contribuisce in modo osservabile all'evoluzione del sistema binario ed è diversa per un buco nero di Kerr in confronto ad altri oggetti compatti. Abbiamo studiato anche questo effetto e non troviamo alcuna evidenza di [oggetti esotici compatti](#).

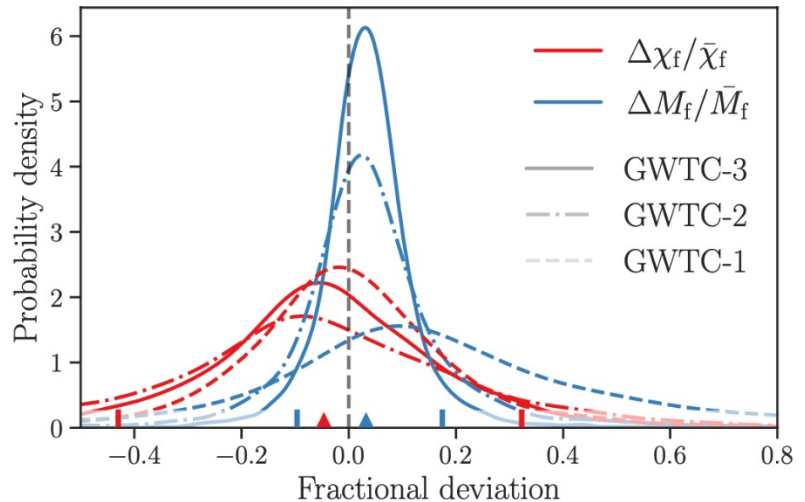


Figura 2: Differenze relative tra le stime di massa (blu) e di spin (rosso) per la parte di inspiral e la fase successiva all'inspiral ottenute dalle forme d'onda stimate da GWTC-3, confrontate con i risultati ottenuti nelle precedenti analisi (GWTC-1 e GWTC-2). La linea verticale grigia indica il valore 0 previsto dalla GR, e i risultati sono in eccellente accordo con la GR (Fig. 4 dal [nostro articolo](#)).

Test che utilizzano merger e ringdown

In modo simile, controlliamo anche se le onde gravitazionali emesse durante merger e ringdown seguono le predizioni della GR. La durata di merger e ringdown è molto più breve di quella dell'inspiral, eccetto nel caso di sistemi binari di grande massa, portando così ad un [rapporto segnale-rumore](#) più ridotto in questa parte dell'evoluzione del sistema binario. Restringiamo la nostra analisi agli eventi per cui viene accumulato un rapporto segnale-rumore sufficientemente alto durante merger e ringdown per ottenere dei risultati significativi. Il test è stato realizzato con tre metodi complementari tra di loro sia in termini dei dettagli delle forme d'onda che della metodologia e della parametrizzazione. Troviamo che i risultati del test sono consistenti con la GR entro le incertezze sperimentali.

Test di propagazione delle onde gravitazionali

Le onde gravitazionali si propagano senza dispersione secondo la GR, ma per contro modifiche della GR possono comportare la presenza di [dispersione](#). Ciò comporta che componenti di frequenza diversa delle onde viaggino con diversa velocità, producendo così differenze nei tempi d'arrivo al rivelatore. Per esempio, se le onde di frequenza più alta emessa durante il merger viaggiassero più veloci delle onde di bassa frequenza della fase di inspiral, allora le onde emesse durante il merger potrebbero venire rivelate prima del previsto. Abbiamo cercato evidenza di dispersione delle onde gravitazionali, ma non l'abbiamo trovata. Modelli specifici ed interessanti che potremmo definire con queste misure sono quelli che riguardano i gravitoni dotati di massa. Si tratta di una classe di teorie in cui particelle ipotetiche – i gravitoni – sono dotati di una massa piccola ma ignota. Ciò comporta un tipo specifico di dispersione che permette di migliorare il limite superiore della massa dei gravitoni. Sulla base degli eventi analizzati in tutti e tre i periodi osservativi, troviamo che la massa dei gravitoni dovrebbe essere inferiore a 1.3 volte $10^{-23} \text{ eV}/c^2$.

Test di polarizzazione delle onde gravitazionali

Nella GR, le onde gravitazionali hanno solo due stati di polarizzazione: + e x. D'altra parte una teoria della gravità più estesa può avere fino a sei diversi modi di polarizzazione (si veda la **figura 3**). Usando tre rivelatori (i due LIGO e Virgo), possiamo porre un limite superiore almeno parziale sulla presenza di polarizzazioni non previste dalla GR nei segnali che osserviamo. Il metodo si basa sulla costruzione di un flusso di dati dal rivelatore solo con segnali che violano la GR. Qualunque segnale residuo in questo flusso di dati indicherebbe la presenza di modi di polarizzazione aggiuntivi. La nostra analisi non ha individuato alcun residuo di questo tipo e i dati si conformano alle predizioni della GR.

Ricerca di echi successivi al merger

Ci sono alternative teoriche ai buchi neri, oggetti chiamati 'imitatori di buchi neri' che imitano i buchi neri copiandone le proprietà. Una delle proprietà più distintive dei buchi neri è la presenza di un **orizzonte degli eventi**, che è una superficie da cui nulla riesce ad emergere, vale a dire una superficie perfettamente assorbente. Negli imitatori di buchi neri l'equivalente superficie potrebbe essere, per esempio, parzialmente o completamente riflettente. Una possibilità che è stata proposta è che la forma d'onda successiva alla fusione possa contenere echi ripetuti del segnale di ringdown. Abbiamo cercato echi di questo tipo nei dati senza trovarne nessuno, consistentemente con la previsione della GR che i residui della fusione siano buchi neri in rotazione.

SOMMARIO

Abbiamo cercato le prove di una possibile violazione della GR in nove modi diversi. Abbiamo scoperto che, entro le incertezze statistiche dovute al rumore e a possibili effetti sistematici non noti associati ad imprecisioni dei modelli di forme d'onda, le predizioni della GR sono completamente consistenti con gli eventi osservati. Data l'importanza di un'osservazione di possibili violazioni della GR, noi continueremo a spingere al limite questi test negli anni a venire. Nuovi test potrebbero indagare aspetti completamente nuovi della gravità che non sono stati esplorati finora, usando i rivelatori più sensibili che saranno operativi nei prossimi anni.

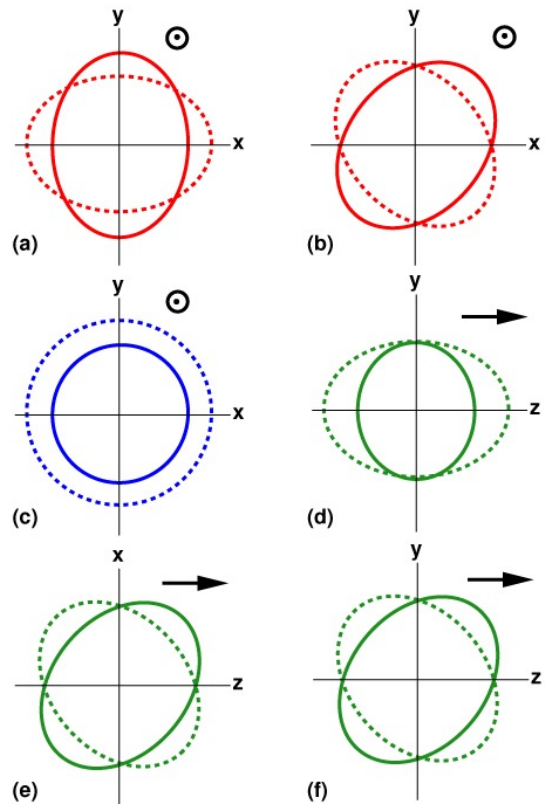


Figura 3: Rappresentazione dei sei modi di polarizzazione possibili in una teoria generale della gravità. I primi tre corrispondono alla situazione in cui la direzione di propagazione dell'onda è perpendicolare al piano della pagina (polarizzazione trasversa) e negli ultimi tre alla situazione in cui la freccia indica la direzione di propagazione dell'onda. I primi due, nella riga in alto, sono i soli permessi dalla GR, indicati con "+" e "x". (Crediti della figura: Clifford Will, Living Reviews in Relativity)

GLOSSARIO

Buchi neri di Kerr: Buchi neri della GR che vengono descritti completamente dalla loro massa e dallo spin (frequenza di rotazione).

Buco nero: regione dello spazio-tempo con una gravità così elevata che neppure la luce può sfuggire. Il confine di questa regione, una caratteristica unica dei buchi neri, è chiamata orizzonte degli eventi.

Dispersione di un'onda: fenomeno in cui le componenti di diversa frequenza di un'onda viaggiano con velocità differenti.

eV/c²: l'electron volt (eV) è un'unità di energia. Utilizzando la famosa equivalenza di Einstein tra massa ed energia $E=mc^2$, si vede che eV/c^2 è un'unità di massa. 1 eV/c^2 equivale approssimativamente a 1.8×10^{-36} kg. Quindi la massa del gravitone vale meno di 2.3×10^{-59} kg.

Forme d'onda previste dalla GR: Forme d'onda gravitazionali calcolate usando la GR che sono impiegate per la rivelazione così come per l'interpretazione del segnale di onda gravitazionale nei dati.

Oggetti esotici compatti: Si tratta di oggetti che imitano le proprietà dei buchi neri, ma che non sono buchi neri. Distinguerli dai buchi neri è una vera sfida.

Periodo osservativo O3: Il terzo periodo osservativo di Advanced LIGO e Virgo iniziato nell'aprile 2019. O3a, la prima parte di O3, ha coperto il periodo da 1 aprile 2019 a 1 ottobre 2019, mentre O3b, la seconda parte di O3, ha coperto il periodo da 1 novembre 2019 a 27 marzo 2020.

Polarizzazioni di un'onda: il numero di modi indipendenti in cui un'onda può oscillare. Per le onde gravitazionali in GR, ci sono due modi di polarizzazione indipendenti, indicati con "+" e "x". Questo significa che un'onda gravitazionale in transito estenderebbe e comprimerebbe un anello di particelle formando un + e un x.

Stella di neutroni: ciò che resta di una stella con massa compresa tra 10 e 25 volte quella del Sole dopo un'esplosione di supernova. Stelle di neutroni tipiche hanno una massa compresa tra 1 e 2 masse solari e un raggio di 10-15 km. Questi oggetti sono tra i più compatti mai scoperti.

PER SAPERNE DI PIÙ

Leggete un preprint gratuito dell'articolo completo [qui](#) oppure su [arXiv.org](#)

VISITATE I NOSTRI SITI WEB:

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

