

TEST DELLA RELATIVITÀ GENERALE CON ONDE GRAVITAZIONALI NELLA PRIMA METÀ DEL TERZO PERIODO OSSERVATIVO DI LIGO-VIRGO

Prima dell'osservazione delle onde gravitazionali provenienti dalla [fusione di buchi neri](#), la centenaria teoria della [Relatività Generale](#) di Einstein non aveva ancora affrontato le sue prove più difficili, quelle che non erano possibili né in laboratorio né nel sistema solare. Le fusioni di buchi neri creano alcuni tra i campi gravitazionali più intensi e dinamici consentiti dalla relatività generale. Le osservazioni di fusioni di buchi neri hanno verificato due predizioni della teoria – le onde gravitazionali possono venire osservate direttamente e le fusioni di buchi neri esistono – ma erano davvero le onde gravitazionali e buchi neri previsti da Einstein o qualcosa di simile ma tuttavia diverso? Cosa possiamo imparare dalle onde gravitazionali che portano l'impronta del violento cataclisma che le ha prodotte?

LIGO e Virgo hanno realizzato dei nuovi test della relatività generale in tutte le precedenti osservazioni, come descritto nel catalogo [GWTC-1](#), e per gli eventi speciali [GW190425](#), [GW190412](#), [GW190814](#), e [GW190521](#). Fino ad ora, Einstein è stato promosso! Adesso però abbiamo parecchie altre fusioni tra buchi neri da studiare usando il nuovo catalogo dei transienti gravitazionali (Gravitational-Wave Transient Catalog 2, [GWTC-2](#)). Da una parte eseguiamo gli stessi test di GWTC-1, ma abbiamo più di due volte gli eventi di quel catalogo ed eseguiamo alcuni nuovi test.

Per cercare le differenze rispetto la relatività generale, assumiamo che ci siano alcune variazioni, come dei termini aggiuntivi in un'equazione o parametri che possono avere valori diversi da quelli che hanno nella relatività generale, e vediamo se le modifiche migliorano la nostra descrizione dei dati. Usiamo i metodi della [teoria dei segnali](#) e [analisi statistiche](#). Alla fine troviamo delle misure statistiche che ci permettono un confronto con la relatività generale. Eventuali differenze possono avere tre diverse cause: (1) I dati contengono [rumore](#), misuriamo sempre il segnale di onda gravitazionale più il rumore. (2) Nella maggioranza dei casi usiamo alcune approssimazioni nella descrizione del segnale, e queste approssimazioni potrebbero essere insufficienti a descrivere il comportamento reale di alcuni eventi. (3) La teoria della Relatività Generale potrebbe essere incompleta e richiedere delle correzioni in casi estremi come i buchi neri binari. In pratica, questo significa che non possiamo concludere facilmente che una discrepanza sia attribuibile alla relatività generale, perché rumore ed errori di approssimazione offuscano il quadro generale. Possiamo però stimare il grado di compatibilità di quello che osserviamo con la relatività generale. E questo è ciò che abbiamo fatto.

Come [precedentemente descritto](#), certi eventi non si adattano bene ad alcuni test – ma adesso abbiamo un maggior numero di eventi tra cui scegliere. L'osservazione di una fusione di buchi neri dipende da come le sue frequenze si adattano a quelle a cui i rivelatori sono sensibili. I buchi neri più pesanti si fondono a frequenze orbitali più basse con onde gravitazionali di frequenza corrispondentemente minore. Queste frequenze si abbassano ancora durante il loro viaggio verso la Terra a causa dell'espansione dell'Universo. Infine la frequenza determina se un evento può essere adatto o meno a tutti i test.

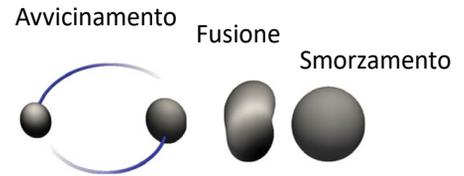


Figura 1: Rappresentazione dei tre stadi della fusione di un buco nero binario. La nomenclatura originale inglese è *Inspiral* (Avvicinamento secondo un'orbita a spirale), *Merger* (Fusione) e *Ringdown* (Smorzamento, come quello di una campana che smette di suonare). Adattamento della Fig. 2 dell'articolo di annuncio della scoperta di GW150914.

CONFRONTO DEL SEGNALE DI ONDA GRAVITAZIONALE CON LA RELATIVITÀ GENERALE

La relatività generale definisce chiaramente la natura dei buchi neri – un buco nero è caratterizzato da massa e spin. Qualunque altra cosa si possa dire dei buchi neri è determinata da massa e spin. Se ci sono due buchi neri in orbita uno attorno all'altro, ciascuno di essi ha la propria massa e spin. Inoltre contano anche le direzioni degli assi di spin e la loro distanza reciproca. Questi valori fissano tutto il resto.

La configurazione iniziale evolve perdendo energia a causa dell'emissione di onde gravitazionali, e l'orbita si restringe gradualmente mentre la velocità orbitale aumenta. Questa è la fase di avvicinamento (*inspiral*). Poi i due buchi neri si fondono formando uno solo con una sua massa e spin. Tuttavia questo buco nero ha una forma distorta. La relatività generale dice che questa distorsione sparisce producendo onde gravitazionali e che tutto ciò che resta alla fine sono massa e spin. Possiamo mettere alla prova questo scenario perché le condizioni iniziali determinano il buco nero finale. Inoltre i dettagli del processo di sparizione della distorsione (chiamato *ringdown*) sono anch'essi fissati dalla relatività generale.

Se le parti di *inspiral* e *ringdown* del segnale dell'onda gravitazionale hanno un'intensità simile così che possiamo analizzarle separatamente, ci possiamo chiedere se una determina l'altra. Secondo la relatività generale dalla conoscenza dell'*inspiral* si dovrebbe poter dedurre il *ringdown*. C'è accordo? Anche se il rumore e i limiti delle approssimazioni rendono il confronto impreciso, troviamo compatibilità con la relatività generale. I risultati sono mostrati in **Figura 2**. Il buco nero distorto si comporta come una campana che suona. Se si colpisce una campana si sente una combinazione di note pure – le frequenze di risonanza della campana. Ma in un breve tempo che è tipico della campana, le note si attenuano. In modo simile la relatività generale richiede che

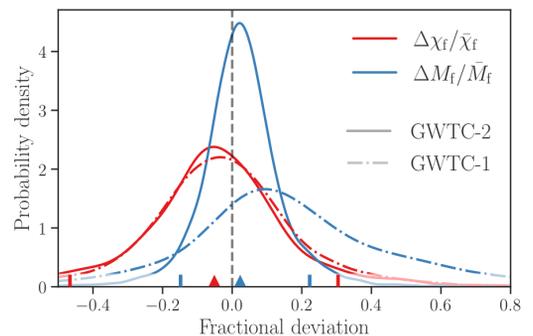


Figura 2: Differenza tra le misure di massa del buco nero finale M_f (blu) e spin χ_f (rosso) prima della fusione e dopo la fusione. Le linee continue mostrano il confronto in GWTC-2 e quelle a tratti e punti il confronto in GWTC-1. La linea tratteggiata verticale è il valore atteso dalla relatività generale. Notiamo che il nuovo confronto di massa è significativamente migliorato e si è avvicinato alla relatività generale mentre il confronto di spin non è cambiato molto. (Fig. 4 del nostro [articolo](#).)

il ringdown del buco nero mostri certe particolari frequenze e tempi di smorzamento. Possiamo quindi confrontare le proprietà osservate del ringdown del buco nero distorto con quelle predette dall'inspiral dell'evento. Benché l'accuratezza non sia ancora molto buona (noi speriamo che migliori con le future osservazioni) i risultati sono compatibili con la relatività generale.

PUÒ ESSERE CHE ALCUNI BUCHI NERI SIANO DEGLI IMITATORI?

La fusione di buchi neri produce un'enorme quantità di radiazione gravitazionale, che in molti casi può essere più brillante del resto dell'Universo. E se questa radiazione venisse da qualcosa che assomiglia ad un buco nero della relatività generale ma che in realtà è qualcosa di diverso – un imitatore dei buchi neri? Sono stati proposti parecchi tipi di imitatori. Hanno grande massa in un piccolo volume come i veri buchi neri, ma qualcosa in loro è diverso. Gli imitatori non hanno la precisa dipendenza di tutte le proprietà rispetto massa e spin, come accade per i buchi neri della relatività generale. Ad esempio, la nota unidirezionalità dell'orizzonte degli eventi di un buco nero potrebbe essere diversa in un imitatore. In alcuni modelli, c'è superficie speculare invece dell'orizzonte degli eventi. Le onde gravitazionali che verrebbero normalmente inghiottite dal buco nero finiscono all'indietro e creano degli echi del segnale originale (si veda la **Figura 3** che mostra come potrebbe apparire il segnale). Noi non troviamo alcun indizio della presenza di questi echi.

Ma la relatività generale potrebbe avere problemi a causa di un diverso tipo di imitatore. In questo caso l'orizzonte degli eventi esiste, ma la forma dell'oggetto simile ad un buco nero è sbagliata. Sappiamo che gli oggetti che ruotano hanno una forma schiacciata. Questo è vero per la Terra ed è evidente nel caso del pianeta Giove quando lo si guarda con un telescopio, anche piccolo. Questo schiacciamento dipende dalla gravità anche quando la relatività generale non è importante. Quando l'oggetto che ruota è un buco nero, la forma schiacciata dipende in modo preciso da massa e spin. Questo non è necessariamente vero per un imitatore che può avere una forma diversa. Noi abbiamo cercato questa differenza in molte fusioni di buchi neri. Non abbiamo trovato nulla di significativo.

LE ONDE GRAVITAZIONALI IMPIEGANO UN LUNGO TEMPO PER RAGGIUNGERCI DOPO LA FUSIONE

I colori dell'arcobaleno si nascondono nella luce del sole e si rivelano quando una goccia di pioggia disperde la luce. Può accadere che lo spazio-tempo riveli i "colori" (vale a dire le frequenze) delle onde gravitazionali? La relatività generale dice di no. Ma in altre teorie ci sono **gravitoni** pesanti che possono portare alla dispersione delle onde gravitazionali. Noi osserviamo onde gravitazionali che hanno viaggiato per miliardi di anni. Se i gravitoni hanno una massa, allora ci sono molte opportunità perché ci siano fenomeni dispersivi. Questo significa che possiamo osservare l'effetto della massa del gravitone anche quando ha un valore molto piccolo. Possiamo anche cercare di amplificare qualunque effetto presente nei dati e dovuto a questa massa combinando le informazioni di tutti gli eventi. Utilizzando i nostri dati più recenti concludiamo che se la massa fosse più grande di $1.76 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2$, allora dovremmo trovarla. Questo non succede, quindi la massa del gravitone non può essere maggiore di questo valore. In questo modo abbiamo migliorato il nostro limite precedente di un fattore 2.7. Per confronto, notiamo che certi tipi di neutrino, che hanno le più piccole masse note con un valore diverso da zero, hanno masse più grandi di $0.009 \text{ eV}/c^2$. Notiamo anche che il nostro limite sulla massa del gravitone riduce ulteriormente lo spazio a disposizione per teorie alternative della gravità che contengono gravitoni di questo tipo.

CONCLUSIONI

Dunque, qual è la risposta? Einstein aveva ragione? La relatività generale è davvero la teoria della gravitazione? Noi abbiamo messo alla prova la teoria con le nostre misure ottenute dalle nuove osservazioni di fusioni di buchi neri, combinando i nuovi e i vecchi tipi di test e utilizzando anche gli eventi già noti in precedenza. Nella maggioranza dei casi riusciamo a combinare i risultati dei diversi eventi e a rinforzare le nostre conclusioni. Il problema è che quando teniamo conto del rumore e dell'accuratezza delle approssimazioni, troviamo che tutto è compatibile con la relatività generale. Come mostriamo nelle figure, alcuni dei nostri test non sono molto potenti. Nel futuro ci aspettiamo di trovare molte altre fusioni di buchi neri che ci aiuteranno ad ottenere una risposta più definitiva.

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

<http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>

Leggete l'articolo completo gratis online [qui](#).

Leggete l'articolo sulle proprietà della popolazione di fusioni di buchi neri in O1, O2 e O3a gratuitamente online [qui](#).

Esplorate i dati del catalogo [qui](#) e presso il [Gravitational Wave Open Science Center](#).

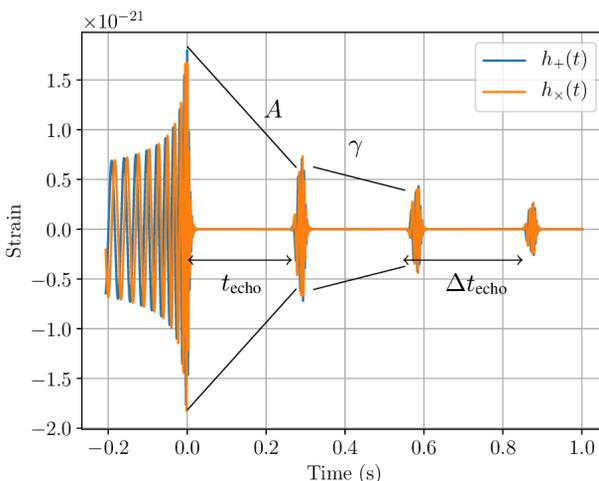


Figura 3: Un possibile scenario per gli echi di un imitatore di buchi neri. Mentre il tempo cresce andando verso destra nella figura, vediamo il segnale originale di onda gravitazionale insieme ad una serie di copie distorte che corrispondono alle onde che rimbalzano verso di noi sulla superficie speculare dell'imitatore. (Immagine prodotta da R.K.L. Lo.)

mentre il tempo cresce andando verso destra nella figura, vediamo il segnale originale di onda gravitazionale insieme ad una serie di copie distorte che corrispondono alle onde che rimbalzano verso di noi sulla superficie speculare dell'imitatore. (Immagine prodotta da R.K.L. Lo.)

GLOSSARIO

Buco nero: Una regione di spazio-tempo prodotta da una massa estremamente compatta dove la gravità è così elevata che impedisce di sfuggire a qualunque cosa, compresa la luce.

Eco: Descrive una copia di un segnale di onda gravitazionale causata da un riflesso da parte della superficie di un imitatore di buchi neri che è simile al normale eco che sentiamo quando il suono viene riflesso da una parete.

eV/c²: un'unità di massa: L'electronvolt (eV) è un'unità di energia usata comunemente per misurare, ad esempio, quanta energia serve a rimuovere un elettrone da un atomo. Poiché, come dice Einstein, $E = mc^2$ (dove E è l'energia, m è la massa, e c è la velocità della luce), dividere un'energia misurata in eV per c al quadrato ci dà una massa.

Gravitone: La particella che compone le onde gravitazionali proprio come i fotoni compongono le onde di luce. La relatività generale prevede che i gravitoni siano senza massa, proprio come i fotoni.

Imitatore di buchi neri: Una regione di spazio-tempo simile ad un buco nero che gli assomiglia abbastanza da poter essere rivelata per mezzo delle onde gravitazionali che emette in una fusione ma che, ad un esame attento, non ha tutte le proprietà richieste dalla relatività generale.

Ringdown: La fase della fusione di un buco nero durante la quale il buco nero distorto che si forma durante la fusione emette onde gravitazionali che fanno sparire la distorsione.

Rumore: Fluttuazione nella misura del segnale di onda gravitazionale dovuta a vari effetti strumentali e ambientali. La sensibilità di un rivelatore di onde gravitazionali è limitata dal rumore.

Spin: Momento angolare di un oggetto che ruota intorno a sé stesso.



Visitate i nostri siti web:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>

