

QUANDO LA GRAVITÀ DISTORCE LA GRAVITÀ: CI SONO OSSERVAZIONI DI LIGO-VIRGO NEL PERIODO O3A CHE INDICANO LA PRESENZA DI LENTI GRAVITAZIONALI?

Immaginate una lente di ingrandimento grande come una galassia e quello che può fare alla luce o alle onde gravitazionali che viaggiano attraverso il cosmo. La gravità può piegare la luce, e oggetti astrofisici massicci si possono comportare come lenti gigantesche. In questo studio abbiamo cercato di identificare la presenza di lenti gravitazionali mediante i segnali di onda gravitazionale rivelati durante la prima metà del terzo periodo osservativo di LIGO-Virgo, indicato brevemente con il nome O3a.

LE LENTI GRAVITAZIONALI – PREDETTE DA EINSTEIN E RICCHE DI APPLICAZIONI IN ASTRONOMIA

Nella [teoria della relatività generale](#) si assume che oggetti astronomici massicci curvino lo spazio-tempo intorno a loro, piegando il cammino dei raggi di luce. In altre parole si comportano come lenti gravitazionali. Questo effetto può ingrandire oggetti distanti, può replicare più volte la loro immagine o deformarla in lunghi archi detti [Anelli di Einstein](#) (si veda la Figura 1). In astronomia, le osservazioni di lenti gravitazionali coprono tutto lo [spettro elettromagnetico](#). Storicamente questo fenomeno è stato alla base del primo test della teoria di Einstein durante l'[eclisse solare del 1919](#). Recentemente alcune osservazioni di [lenti gravitazionali deboli](#) sono state utilizzate per ricostruire la distribuzione di massa dell'universo, e producendo così un argomento convincente a favore dell'esistenza della [materia oscura](#). Le lenti gravitazionali permettono anche lo studio dei [pianeti extrasolari](#) che, passando davanti alla stella attorno a cui orbitano, ne causano una temporanea e periodica diminuzione della luminosità. Inoltre le lenti gravitazionali ci permettono di scoprire oggetti massicci e strutture nel cosmo che altrimenti sarebbero troppo deboli per poterle rivelare. Di certo possiamo dire che le lenti gravitazionali sono diventate uno strumento standard in astronomia, astrofisica e cosmologia.

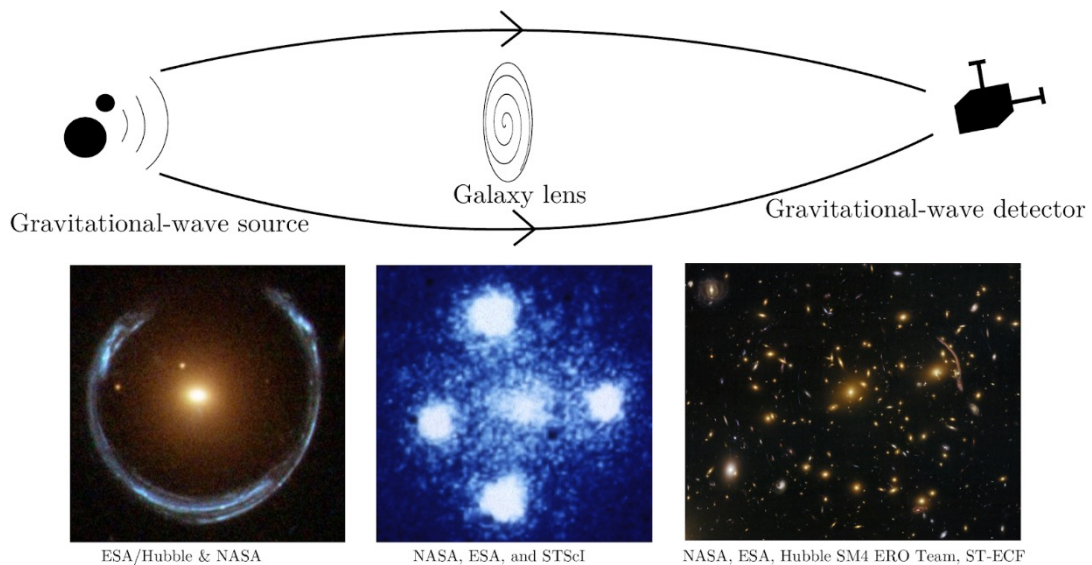


Figura 1: Quando la luce passa accanto ad oggetti astrofisici massicci il suo cammino si curva a causa della gravità, e si crea una lente gravitazionale. Un fenomeno di questo tipo può produrre anelli e croci di Einstein, distorsioni statistiche nella luce del fondo delle galassie, e molte altre intriganti osservazioni. Proprio come accade alla luce anche le onde gravitazionali possono subire questo effetto. Però i metodi per rivelare e utilizzare le lenti gravitazionali con le onde gravitazionali sono completamente diversi. Invece di osservare distorsioni di forma delle immagini o cambiamenti transitori della luminosità delle stelle, noi poniamo la nostra attenzione su rivelazioni ripetute nel tempo di onde gravitazionali e su distorsioni dipendenti dalla frequenza delle forme delle onde gravitazionali.

QUAL È L'AZIONE DI UNALENTE GRAVITAZIONALE SULLE ONDE GRAVITAZIONALI?

Come le onde elettromagnetiche, anche le [onde gravitazionali](#) possono venire deformate da oggetti che si trovano sul loro percorso, come le stelle, i [buchi neri](#), le galassie e gli ammassi di galassie (si veda la Figura 1). Tuttavia, anche se la teoria alla base dell'effetto per le onde gravitazionali è simile a quella per la luce, i metodi di rivelazione sono completamente diversi perché le sorgenti e i rivelatori sono completamente diversi. In particolare, potremmo rivelare l'esistenza di una lente a causa di un'amplificazione globale delle onde. Questo effetto di ingrandimento farebbe apparire i segnali di [fusione di sistemi binari](#) più vicini e contenenti oggetti di massa più grande di quanto accada in realtà. Immagini ripetute apparirebbero sotto forma di eventi ripetuti: eventi quasi identici separati da distanze di tempo che vanno da minuti a mesi (e talvolta anni). Dal momento che le immagini prodotte dalla lente hanno una separazione che normalmente è troppo piccola e non riescono ad essere risolte dai rivelatori attuali, gli eventi sembrano provenire dalla stessa direzione nel cielo. D'altra parte, il *microlensing* (così si indica un effetto molto piccolo di lente gravitazionale) causa ritardi temporali ridottissimi, così da far sovrapporre segnali multipli nei rivelatori e produrre un fenomeno di battimento delle forme d'onda.

COSA POTREMMO IMPARARE SE RIVELASSIMO LENTI GRAVITAZIONALI CON LE ONDE GRAVITAZIONALI?

Dopo essere state identificate, le onde gravitazionali che sono passate attraverso una lente potrebbero permettere diverse interessanti ricerche scientifiche. Quando la lente gravitazionale è abbastanza ben identificata si possono trovare le posizioni di buchi neri che si fondono, anche se sono invisibili con i telescopi convenzionali, combinando le osservazioni delle lenti effettuate con onde gravitazionali ed elettromagnetiche. Nel caso in cui le onde gravitazionali che hanno attraversato una lente fossero accompagnate da una controparte elettromagnetica, allora potremmo effettuare studi cosmologici di precisione grazie alle misure di ritardo effettuate con precisione inferiore al millisecondo. Confrontando i ritardi tra onde gravitazionali e i corrispondenti transienti elettromagnetici si potrebbe misurare la velocità della gravità rispetto a quella della luce. Dal momento che le onde gravitazionali che attraversano una lente ci permettono di osservare lo stesso evento più volte e con diversi orientamenti del rivelatore, esse possono anche venire utilizzate per studiare a fondo la [polarizzazione](#) delle onde, realizzando così un test della relatività generale e delle teorie alternative ad essa. D'altra parte il microlensing potrebbe aiutarci a studiare le popolazioni di oggetti come i buchi neri primordiali e quelli di massa intermedia. Le osservazioni del passaggio di onde gravitazionali attraverso lenti gravitazionali ci consentiranno di realizzare nuovi studi scientifici di fisica fondamentale, astrofisica e cosmologia.

COSA ABBIAMO CERCATO NEI DATI DI O3A E COSA ABBIAMO TROVATO

In questo studio abbiamo cercato di identificare la presenza di lenti gravitazionali nei segnali di onde gravitazionali prodotte dalle fusioni di [sistemi binari compatti](#) rivelati da [Advanced LIGO](#) e [Advanced Virgo](#) durante il periodo osservativo O3a. Abbiamo calcolato quanto spesso si possa osservare il fenomeno della lente gravitazionale con le attuali sensibilità dei rivelatori e abbiamo determinato come anche solo l'assenza di forti segnali di lente rivelabili ponga dei limiti alla frequenza delle fusioni di sistemi binari compatti nell'[universo distante](#) (si veda la Figura 2).

FIGURE TRATTE DALL'ARTICOLO

Per ulteriori informazioni su queste figure e su come sono state prodotte, leggete il [preprint](#) che è liberamente disponibile.

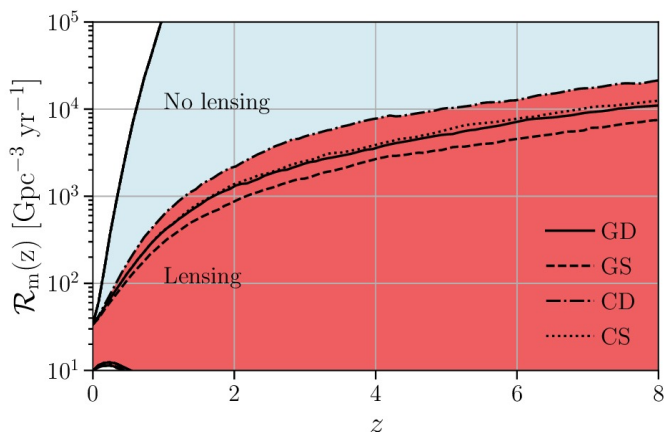


Figura 2: Questo diagramma mostra come la presenza o assenza di onde rivelabili e che siano passate attraverso una lente gravitazionale migliori la nostra conoscenza della frequenza di fusioni di sistemi binari compatti durante la storia dell'universo (la frequenza è mostrata sull'asse verticale), rappresentata sull'asse verticale dal parametro z dello spostamento cosmico verso il rosso (redshift in inglese; il valore oggi è $z=0$). Grazie al nostro catalogo di osservazioni, menzionato anche in questo sommario, abbiamo già un'idea generale della frequenza delle fusioni, come indicato dalla regione blu del diagramma. Il fatto di sapere se nei dati ci sono effetti di lente oppure no permette di vincolare la frequenza delle fusioni ad alta redshift (corrispondente a epoche primordiali dell'universo), come indicato dalla regione rossa del diagramma. Il motivo è che le lenti possono ingrandire i segnali e permetterci di rivelarli quando provengono da una maggiore distanza. In questo grafico la quantità mostrata sull'asse verticale è più precisamente la densità di frequenza di fusioni, vale a dire il numero di eventi di fusione per anno e per un'unità di volume di un Gigaparsec (Gpc) cubico. Le diverse linee corrispondono a differenti situazioni: quella relativa a lenti con dimensioni di una galassia (G) o di un cluster di galassie (C), con onde gravitazionali che vengono messe a fuoco singolarmente (S) o doppiamente (D).



Visitate i nostri siti web:

<http://www.ligo.org>

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

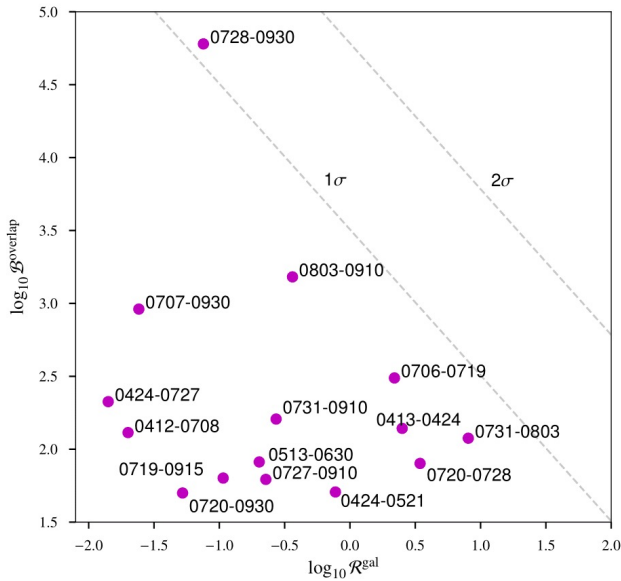


Figura 3: Le coppie più promettenti di eventi di O3a contenute nel catalogo [GWTC-2](#) che potrebbero avere risentito di un fenomeno di lente gravitazionale, nel senso che esiste un'elevata sovrapposizione delle loro proprietà stimate, incluse ad esempio le masse e gli *spin* degli oggetti che si fondono assieme. Il grado di sovrapposizione è mostrato sull'asse verticale. L'asse orizzontale ci dice se la distanza temporale tra gli eventi nella coppia (o ritardo) è maggiormente coerente con l'effetto di lente (assumendo che una galassia faccia da lente, così che ritardi più brevi portano ad un grado più alto) oppure con due eventi scorrelati (con ritardi medi più lunghi e grado più basso). La linea tratteggiata ci dice che combinando le due misure nessuna delle coppie mostra un'evidenza significativa che ci sia l'effetto di lente (misurato in termini dei convenzionali livelli "*sigma*"). Tuttavia, per indagare più a fondo abbiamo realizzato anche altre analisi includendo anche modelli di popolazione e effetti di selezione; alla fine tutte le coppie candidate sembrano corrispondere a fusioni indipendenti che per caso hanno proprietà simili, senza che ci sia l'effetto di lente.

Abbiamo anche dimostrato come la [mancata osservazione di un fondo stocastico di onde gravitazionali](#) migliori la nostra conoscenza della frequenza di lensing. Inoltre abbiamo studiato l'idea che l'ingrandimento prodotto da lenti gravitazionali possa spiegare le masse eccezionalmente alte che vediamo in alcuni degli eventi che abbiamo rivelato (come [GW190425](#) o [GW190521](#)). E ancora, abbiamo cercato nei dati effetti di lente ripetuti, stimando la probabilità che due segnali siano copie della stessa sorgente oppure siano prodotti da sorgenti scorrelate. Abbiamo trovato parecchie coppie di segnali che si assomigliano molto (si veda la Figura 3), proprio come accadrebbe nel caso di un singolo segnale gravitazionale che subisce l'effetto di lente; tuttavia non possiamo sostenere che si tratti di questo, dopo avere considerato ipotesi più realistiche sulla popolazione delle sorgenti, gli [effetti di selezione](#) delle nostre ricerche e la frequenza attesa di questo fenomeno con l'attuale livello di sensibilità. Infine abbiamo cercato il caratteristico effetto di battimento dovuto al microlensing sulle [forme d'onda](#) degli eventi rivelati, senza trovarne alcuna evidenza nei 36 eventi verificati (si veda la Figura 4). In conclusione, nel nostro esteso studio dei dati di O3a non abbiamo trovato alcuna evidenza stringente di ingrandimento, immagini multiple e microlensing dovuto a lenti gravitazionali.

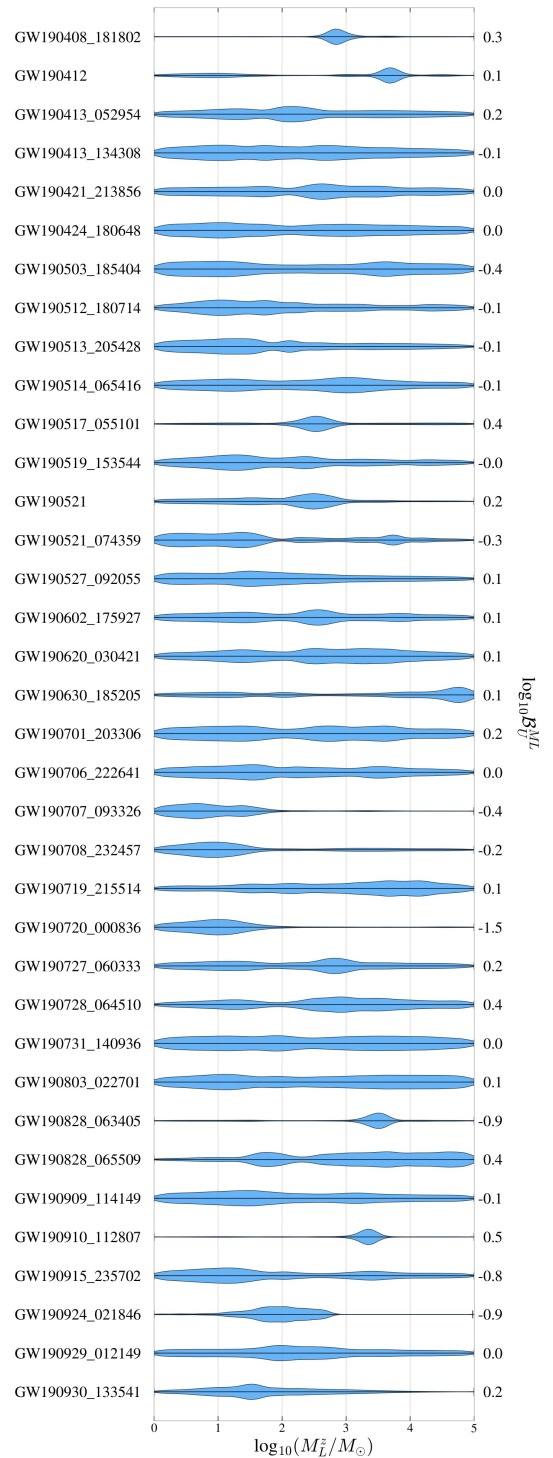


Figura 4: Risultati della ricerca di battimenti dovuti a microlensing ottenuti con 36 eventi di O3a. I contorni mostrano la distribuzione di probabilità della massa della lente assumendo che l'evento contenga gli effetti del microlensing. Sembra però che non ci sia alcuna evidenza di ciò negli eventi esaminati. I valori elencati a destra della figura sono i [fattori di Bayes](#), una statistica che ci dice se l'effetto di lente sia la spiegazione più probabile di ciò che si osserva nei dati oppure no. Dal momento che sono tutti negativi o vicini a zero, sappiamo che nessuno degli eventi richiede il microlensing per spiegare la forma del segnale di onda gravitazionale.

PROSPETTIVE FUTURE

In futuro sarà possibile approfondire lo studio degli effetti di lente sulle onde gravitazionali per mezzo di metodi di analisi più sensibili e tramite modelli più dettagliati delle lenti gravitazionali. Osservazioni elettromagnetiche associate a eventi di onda gravitazionale che potrebbero mostrare l'effetto di lenti, anche se non abbastanza significative se prese da sole, potrebbero essere un metodo promettente per identificare le possibili galassie ospiti e le lenti. Ulteriori miglioramenti dei rivelatori attuali e l'estensione della loro rete globale porteranno ad aumentare le possibilità di rivelare dei chiari effetti di lente. Non appena i rivelatori di terza generazione e quelli su satellite (per esempio [Einstein Telescope](#), [Cosmic Explorer](#) and [LISA](#)) entreranno in funzione negli anni che seguono il 2030, si apriranno interessanti nuove prospettive.

SCOPRI DI PIÙ:

Visita i nostri siti web:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

Leggi gratuitamente l'articolo scientifico completo [qui](#).

GLOSSARIO

Buco nero: Un oggetto denso e massiccio, con una forza di gravità così forte che neppure la luce riesce a sfuggire.

Sistema binario compatto: Un sistema formato da due corpi che sono ciascuno ciò che resta dal collasso di una stella, per esempio una stella di neutroni e un buco nero, che orbitano uno intorno all'altro a piccola distanza.

Universo distante: A causa della velocità finita della luce, più guardiamo lontano nell'universo distante e più guardiamo all'indietro nel tempo. Perciò le fusioni di sistemi binari osservate a grande distanza sono avvenute in realtà quando l'Universo era molto più giovane di oggi, e quindi possiamo porre dei vincoli su un'epoca storica dell'Universo diversa rispetto al caso di osservazioni di fusioni più vicine. Poiché [l'Universo si espande](#), distanze più grandi corrispondono anche a [redshift](#) più alti delle lunghezze d'onda del segnale osservato.

Relatività generale: La teoria della gravitazione attualmente accettata, descritta per la prima volta da Albert Einstein nel 1916. In questa teoria la gravità è il risultato della curvatura dello spazio-tempo, causata da concentrazioni di massa o energia. Questa teoria ha predetto l'esistenza sia delle onde gravitazionali, sia delle lenti gravitazionali.

Gigaparsec: Un'unità di distanza astronomica appropriata ad indicare le distanze cosmologiche più grandi, uguale ad un miliardo di [parsec](#). Un Gigaparsec (spesso abbreviato come Gpc) corrisponde a circa tre miliardi di anni luce o 3×10^{22} km.

Modello di forma d'onda gravitazionale: Un modello che predice come il disturbo causato da un'onda gravitazionale cambia nel tempo.

Polarizzazione di un'onda gravitazionale: La forma geometrica dell'allungamento e della compressione dello spaziotempo causata da un'onda gravitazionale durante il suo movimento. La relatività generale ne predice un solo tipo, la cosiddetta polarizzazione tensoriale, mentre alcune teorie alternative della gravità predicono anche polarizzazioni aggiuntive.

Redshift (o spostamento verso il rosso) : l'aumento della lunghezza d'onda della luce o delle onde gravitazionali che viaggiano attraverso l'Universo in espansione.

Effetti di selezione: È più probabile che i rivelatori di onde gravitazionali catturino eventi con certe proprietà intrinseche (ad esempio con masse comprese in un intervallo più favorevole) e che provengano da certe regioni del cielo. Ciò fa sì che si trovino più eventi di un certo tipo di quanti se ne aspettino.

Spin: Una quantità che misura la velocità di rotazione di un oggetto intorno al suo asse.