

GWTC-4.0: RICERCA DI EFFETTI DI LENTE GRAVITAZIONALE SULLE ONDE GRAVITAZIONALI

Le [onde gravitazionali](#), increspature nello spazio-tempo prodotte dalle [fusioni di sistemi binari compatti](#) come quelle rilevate dalla [Collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA \(LVK\)](#), sono previste dalla teoria della [relatività generale](#) di Einstein. La teoria di Einstein ci dice anche che la materia curva lo spazio e il tempo intorno a sé stessa, in modo che qualsiasi segnale che attraversi quella regione risenta di tale curvatura. L'effetto (spesso chiamato "[lensing gravitazionale](#)", dall'inglese "lens", lente) è matematicamente simile a quello prodotto da una lente sulla luce; per questo la massa/energia che causa la curvatura è nota con il nome di lente gravitazionale. Il [lensing gravitazionale della luce](#) da parte di oggetti massicci nello spazio è [osservato da oltre cento anni](#) ed è diventato uno strumento di routine per gli astronomi, ma non è stato ancora misurato alcun effetto del genere sulle onde gravitazionali.

In [questo studio](#), abbiamo cercato i caratteristici segni del [lensing](#) sulle onde gravitazionali prodotte dalle fusioni dei [sistemi binari di buchi neri](#) elencati nel nostro ultimo catalogo LIGO-Virgo-KAGRA ([GWTC-4.0](#)), che include le osservazioni effettuate durante la prima parte del quarto [periodo osservativo](#) della Collaborazione LVK (O4a).

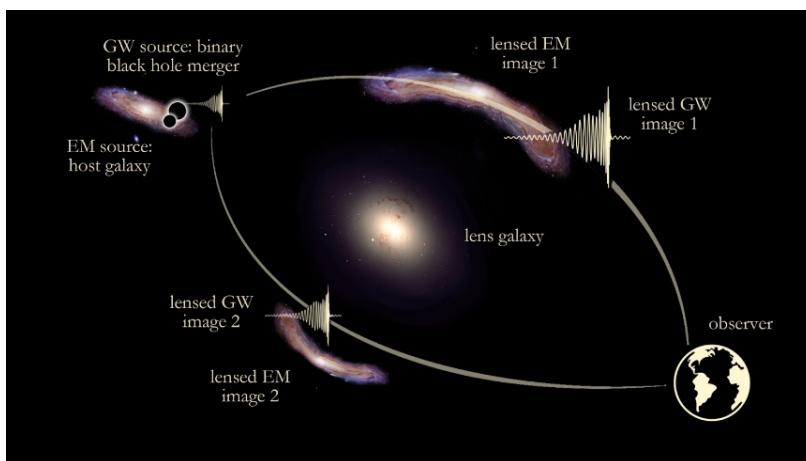


Figura 1: Schema che illustra il [lensing gravitazionale forte](#). Questo tipo di [lensing](#) si verifica quando un'onda gravitazionale passa vicino ad un oggetto che fa lente. Spesso vengono prodotte più "copie" di quel segnale, ciascuna con il proprio percorso e un ingrandimento diverso. Queste copie multiple arrivano poi all'osservatore sulla Terra in momenti diversi, come segnali distinti. Lo schema mostra il [lensing gravitazionale forte](#) su una sorgente di onde gravitazionali (GW) e sulla luce: i telescopi ottici osserverebbero immagini distorte della galassia ospite della sorgente GW. [Image credit: Laura Uronen, CUHK.]

CHE SEGNI LASCIA UNA LENTE GRAVITAZIONALE SULLE ONDE GRAVITAZIONALI?

Poiché la materia causa sempre una curvatura dello spazio e del tempo, esiste una grande varietà di oggetti diversi (corrispondenti a una vasta gamma di *masse* differenti) che possono produrre effetti di [lensing gravitazionale](#) sui segnali gravitazionali che arrivano sulla Terra. Si va da singole stelle, a campi stellari, fino a galassie e ammassi di galassie, e non sorprende che con tante possibilità, i segni che le lenti gravitazionali imprimevano sulle onde gravitazionali siano anch'essi variabili.

Consideriamo innanzi tutto i sistemi più pesanti, cioè le galassie e gli e gli ammassi galattici (che hanno una massa dell'ordine di centinaia di milioni di [masse solari](#) o più). Se un'onda gravitazionale passa abbastanza vicina a un oggetto così massiccio, subisce quello che chiamiamo [lensing gravitazionale forte](#), in cui vengono prodotte più copie del segnale gravitazionale. Questo fenomeno è mostrato nella [Figura 1](#), che illustra l'effetto del [lensing forte](#) sia per un segnale luminoso (proveniente dalla galassia in cui si trova la sorgente di onde gravitazionali) che per un segnale gravitazionale. Queste copie del segnale viaggiano ciascuna lungo la propria traiettoria e sono influenzate da regioni diverse del campo gravitazionale della lente, quindi le osserviamo in momenti diversi con ingrandimenti differenti; ciò modifica l'ampiezza dell'onda gravitazionale, facendo apparire la sorgente più vicina o più lontana da noi. Tuttavia, ciò non cambia la forma dei segnali nel tempo, a parte uno sfasamento globale, similmente a quel che succede alle riflessioni della luce dall'interno di un pezzo di vetro.

Questo significa che possiamo cercare segnali di questo tipo individuando eventi di onde gravitazionali che hanno [parametri misurati](#) simili. Ad esempio, potremmo osservare molteplici eventi che sembrano provenire da sistemi binari con masse simili, o da una direzione simile nel cielo, ma che a prima vista appaiono provenire da distanze diverse. Ovviamente c'è la possibilità che ciò accada per coincidenza, quindi dobbiamo essere scrupolosi nei nostri studi e cercare di eliminare (o almeno ridurre) i casi di [falsi positivi](#). Questo si fa tramite un processo a più stadi.

Innanzitutto, utilizziamo algoritmi veloci che esaminano i diversi eventi di onde gravitazionali cercando somiglianze nei parametri dedotti per ciascuno di essi e valutano quanto possano essere compatibili diverse combinazioni di segnali nell'ipotesi che siano prodotti da una lente (in questo caso si parla di "ipotesi di lente").

PER SAPERNE DI PIÙ:

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



Questo primo passo riduce il numero delle coppie di segnali che potrebbero essere associate ad una lente gravitazionale: queste vengono quindi analizzate con metodi più sofisticati, ma più pesanti dal punto di vista computazionale, che cercano di determinare quanto gli eventuali candidati siano significativi dal punto di vista statistico.

Dobbiamo anche notare che a causa dei diversi ingrandimenti alcuni segnali potrebbero essere "sotto soglia": così "silenziosi" da non venir individuati dai metodi standard di LVK. Tuttavia effettuiamo ricerche mirate per verificare la loro eventuale presenza nei dati.

Benché le ricerche di lensing forte vengano fatte spesso su larga scala cercando più copie dello stesso segnale, in condizioni specifiche può essere che sia identificabile solo un singolo segnale. Ciò accade nel caso chiamato "di Tipo II"¹, e in queste circostanze la lente gravitazionale provoca alcune piccole differenze nelle diverse componenti di frequenza del segnale che possono essere rilevate.

Infine consideriamo lenti gravitazionali più piccole e meno massicce: anche in questo caso vengono prodotte più immagini quando l'onda gravitazionale passa abbastanza vicino all'oggetto, ma poiché la lente è molto più piccola lo sono anche le deviazioni e i ritardi temporali prodotti dalla lente. Ciò significa che invece di più segnali distinti, osserviamo un solo segnale che presenta dei caratteristici [battimenti](#), un fenomeno dovuto a segnali di frequenze leggermente diverse che interferiscono tra loro. In teoria i battimenti sono identificabili nei nostri dati e quindi li cerchiamo in questo studio.

COSA ABBIAMO TROVATO?

Delle quasi 3500 coppie di segnali provenienti dalle combinazioni delle sorgenti di onde gravitazionali osservate in O4a dalle nostre analisi veloci, solo poche decine sono state oggetto di uno studio più approfondito. Tuttavia in nessun caso l'analisi di lensing forte di tipo II ha fornito un supporto significativo per l'ipotesi di lente. Però questi risultati sono comunque utili: abbiamo utilizzato la mancata rivelazione del lensing forte per porre dei limiti sulla frequenza delle fusioni di sistemi binari di buchi neri ad alto [redshift](#), come mostrato in [Figura 2](#).

Nella nostra ricerca di distorsioni in singoli segnali, causati da lenti meno massicce, la stragrande maggioranza dei segnali non ha dato nessuna indicazione a supporto dell'ipotesi di lente, non essendoci distorsioni oltre a quelle attese, dovute a fluttuazioni casuali. L'unica eccezione è l'evento [GW231123](#), la cui osservazione è stata [annunciata separatamente come un "evento eccezionale"](#) prima della pubblicazione dell'intero [catalogo O4a](#). La nostra analisi indica che l'ipotesi che GW231123 abbia effetti di lente è molto più supportata rispetto all'ipotesi che non ne abbia. Ad esempio, come mostrato nella [Figura 3](#), dopo aver simulato poco più di 250 eventi di onde gravitazionali senza effetti di lensing, abbiamo riscontrato che nessuno di questi eventi simulati supporta l'ipotesi di lensing meglio o allo stesso livello di GW231123.

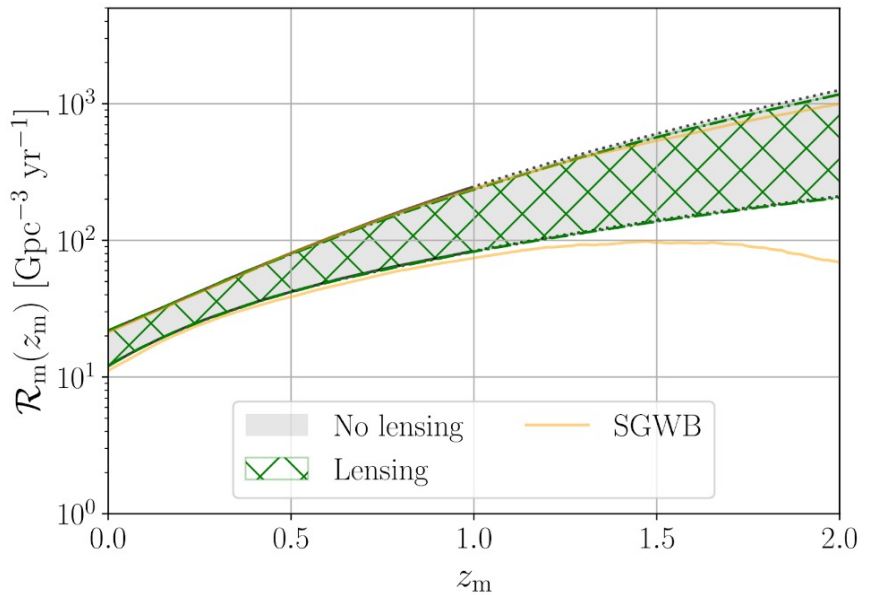


Figura 2: (Figura 11 del [nostro articolo](#).) Il tasso stimato di fusioni di sistemi binari di buchi neri in funzione del redshift. La nostra analisi indica che il valore del tasso di fusioni è ristretto alla regione tratteggiata in verde. Il risultato è stato ottenuto tenendo conto della mancata osservazione del lensing forte in questo studio ed è confrontabile con quello ottenuto direttamente dalle proprietà dei [sistemi binari di buchi neri elencati nel nostro nuovo catalogo](#) (regione grigia) e con i limiti sul tasso di fusioni dedotti dalla non osservazione di un fondo stocastico di onde gravitazionali (regione limitata dalle curve arancioni).

IL CURIOSO CASO DI GW231123

Il segnale GW231123 è di breve durata: sono stati osservati solo pochi cicli dell'onda gravitazionale, per un tempo totale di circa un decimo di secondo. Nelle nostre analisi standard di questo segnale, fatte senza tenere conto di effetti di lensing, GW231123 sembra essere originato da un sistema binario di buchi neri pesanti [ad alto spin](#) (cioè che ruotano velocemente ciascuno attorno al proprio asse), essendo in effetti [il sistema più massiccio osservato fino ad oggi con le onde gravitazionali](#). Sorprendentemente però i parametri stimati in queste analisi senza lensing variano significativamente a seconda del particolare modello di emissione delle onde gravitazionali (detto "[forma d'onda](#)") utilizzato. D'altra parte, quando GW231123 viene analizzato tenendo conto del lensing, queste differenze tra le forme d'onda diminuiscono e mentre una delle componenti del sistema binario appare ancora massiccia e alto spin, sebbene meno alto del caso senza lensing, l'altra componente appare più leggera e con uno spin più ridotto.

1. Nel lensing forte esistono tre classi di "immagini", dette di tipo I, II e III. Il tipo a cui appartiene un'immagine dipende dallo sfasamento che ha subito. Questo sfasamento può assumere uno dei seguenti tre valori: (I) 0, (II) $\pi/2$ o (III) π , ed è determinato dal percorso seguito dal segnale mentre viaggia verso di noi.

Nell'analisi di un segnale con lensing sappiamo già che se l'effetto di lente non viene considerato la stima della velocità di rotazione dei componenti può aumentare. Ciò sarebbe coerente con quanto riscontrato per GW231123 nel caso in cui questo evento avesse subito effettivamente un effetto di lensing. Tuttavia, dobbiamo essere cauti prima di trarre una conclusione di questo tipo e considerare attentamente altre possibili spiegazioni.

Una possibilità è che, data la brevità del segnale, la qualità dei dati possa essere influenzata dalle linee spettrali nello [spettro di rumore](#) dei nostri rivelatori. Tuttavia se esaminiamo le differenze tra i segnali teorici per questo evento con e senza lensing, non sembra che le linee spettrali siano rilevanti. In un [caso precedente](#) che sembrava anch'esso dare supporto all'ipotesi di lente, abbiamo scoperto che era influenzato dai dati di uno solo dei nostri rivelatori, il che suggeriva che la causa più probabile di quanto osservato fosse un transiente dovuto al rumore in quel rivelatore piuttosto che il lensing. Nel caso di GW231123, invece, quando esaminiamo singolarmente i dati di ciascuno dei rivelatori, troviamo che i dati forniscono *comunque* supporto all'ipotesi di lente, e cioè che la causa è la stessa in entrambi i rivelatori.

Quindi, se GW231123 mostra un effetto di lensing, è importante chiedersi "quanto è probabile che un sistema di lente del genere venga osservato?" Nel nostro studio abbiamo modellato l'oggetto che ha fatto da lente per GW231123 come una massa puntiforme isolata, e ci sono recenti rapporti secondo cui il satellite [Swift](#) potrebbe aver osservato il lensing gravitazionale di [lampi di raggi gamma](#) da parte di una lente di massa puntuale di questo tipo. Sebbene si tratti di ipotesi non confermate, se le consideriamo reali possono aiutarci a stimare

quanto sia probabile che venga osservato il lensing con un evento come GW231123. In questo modo, dopo avere tenuto conto di altre possibili masse come i [Nuclei Galattici Attivi](#), abbiamo scoperto che ci aspetteremmo di vedere un effetto di lensing con le onde gravitazionali dovuto ad una massa puntuale isolata come quella proposta per GW231123 con una frequenza compresa tra una ogni cento e una su diecimila osservazioni di segnali di onde gravitazionali. In altre parole, se GW231123 mostra *davvero* effetti di lensing, allora tenendo conto del numero totale delle nostre osservazioni si tratta di una scoperta piuttosto fortunata.

D'altra parte, sappiamo anche che il modello di massa puntuale isolata utilizzato per le ricerche condotte nel nostro studio non comprende altri scenari, forse più probabili, per la lente, ad esempio quando la lente è immersa in un oggetto più grande come una galassia. Se uno scenario del genere fosse vero, cambierebbe la nostra stima di quanto frequentemente verrebbe osservato un evento di lensing simile a GW231123 e sarebbero necessari studi più approfonditi per affinare quella stima.

In sintesi i risultati delle nostre analisi considerati nel loro insieme non ci permettono di giungere a una conclusione sicura sul fatto che GW231123 sia o meno un segnale genuinamente indicativo di lensing. Tuttavia in futuro, con un numero crescente di segnali, potremmo riuscire a raggiungere una conclusione più definitiva, quindi restate sintonizzati!

PROSPETTIVE FUTURE

La ricerca del lensing gravitazionale continua! Nell'ultimo catalogo, potremmo non aver ancora trovato alcun segno sicuro di lensing. Tuttavia in GW231123 abbiamo trovato il candidato più interessante e promettente ad oggi, per il quale l'ipotesi di lente non può essere scartata. Con l'aumento del numero di sorgenti di onde gravitazionali che ci prevediamo per i prossimi anni, ci aspettiamo di identificare tra di esse onde gravitazionali che mostrano effetti di lensing; diversi dei test effettuati in questo studio saranno fondamentali per effettuare tale identificazione.

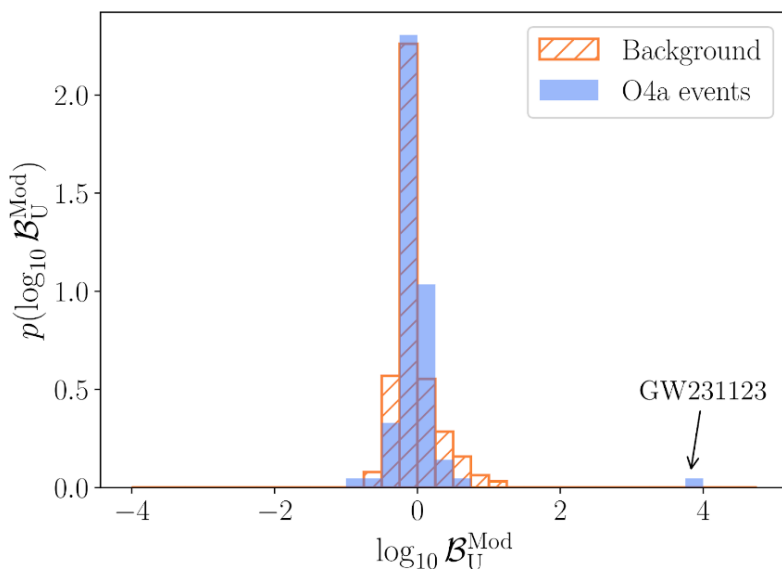


Figura 3: (Figura 6 del [nostro articolo](#).) La distribuzione dei fattori di Bayes, che indicano quanto un modello sia preferito rispetto a un altro, confrontando modelli con e senza lensing per gli eventi di O4a considerati nel nostro studio. In blu è mostrato l'istogramma del logaritmo (in base dieci) del fattore di Bayes, confrontando un modello con lensing (dove la lente è una massa puntuale isolata) con un modello senza lensing, per ciascuno dei nostri eventi. È inoltre mostrato in arancione l'istogramma dei logaritmi del fattore di Bayes per una distribuzione simulata di poco più di 250 eventi senza lensing. La maggior parte degli eventi O4a si trova all'interno della distribuzione simulata. Tuttavia, GW231123 si trova significativamente al di fuori di questa distribuzione.

PER SAPERNE DI PIÙ:

Visitate i nostri siti web:

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

L'articolo scientifico è disponibile gratuitamente [qui](#) oppure su [arxiv](#).

I dati relativi al catalogo GWTC-4.0 sono resi pubblicamente disponibili dal Gravitational-Wave Open Science Centre a questo [link](#).