

# UNO SGUARDO DA VICINO ALL'UNIVERSO DELLE ONDE GRAVITAZIONALI: LA RICERCA DI LENTI GRAVITAZIONALI NEL PIÙ RECENTE CATALOGO DI LIGO/VIRGO/KAGRA

Oggetti binari compatti come buchi neri e stelle di neutroni che si sono fusi miliardi di anni fa emettono onde gravitazionali che possono essere rilevate con i rivelatori delle collaborazioni scientifiche LIGO–Virgo–KAGRA. Einstein ci ha insegnato che la gravità curva lo spazio e il tempo, influenzando tutto ciò che trasporta massa o energia, e le onde gravitazionali non fanno eccezione. Pertanto, ci aspettiamo che mentre percorrono distanze cosmologiche, le onde gravitazionali incontrino inevitabilmente enormi oggetti astrofisici che si comportano come lenti, piegando le loro traiettorie e persino distorcendo le forme dei loro segnali. In questo studio, abbiamo cercato indicazioni della presenza di lenti ancora non rilevate nei segnali di onde gravitazionali riportati nel nostro ultimo catalogo LIGO–Virgo–KAGRA, che include gli eventi del terzo periodo osservativo (O3). Questo lavoro estende la nostra precedente analisi fatta considerando solo la prima metà di O3.

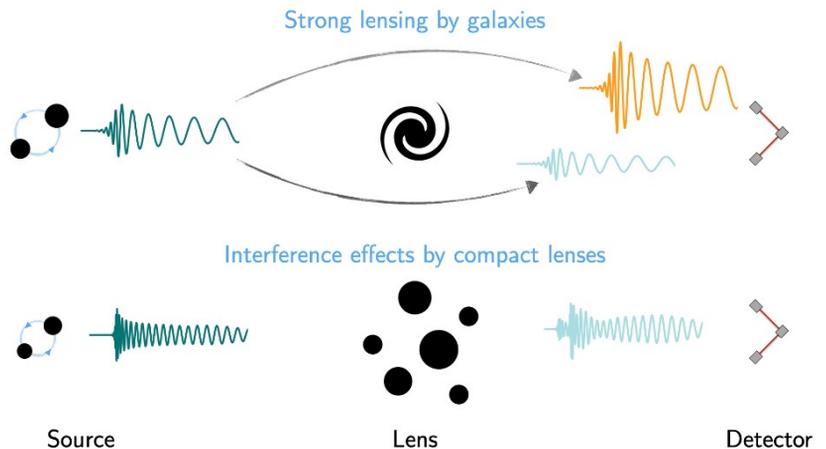


Figura 1: Rappresentazione schematica dell'effetto di lente gravitazionale sulle onde gravitazionali. In alto, un dato segnale è fortemente deviato da una lente galattica che produce immagini multiple caratterizzate da ampiezza, tempo di arrivo e fase diversi. In basso, piccole lenti compatte producono effetti di interferenza che distorcono la forma d'onda rilevata.

## CHE TIPO DI INDICAZIONI DELLA PRESENZA DI LENTI GRAVITAZIONALI STIAMO CERCANDO NEI NOSTRI SEGNALI DI ONDE GRAVITAZIONALI?

Le lenti gravitazionali sono molto diverse dalle solite lenti e la loro azione sulle onde gravitazionali ha un'ampia e ricca fenomenologia. Quando un segnale di onda gravitazionale viaggia abbastanza vicino ad una galassia o ad un ammasso di galassie, può essere fortemente deformato da una lente gravitazionale, producendo più immagini del segnale originale, come nella Fig. 1. In questo regime detto in inglese "strong lensing" ogni immagine viaggia lungo una traiettoria diversa, risentendo di un diverso potenziale gravitazionale, e quindi arrivando al rivelatore in tempi diversi e con un diverso ingrandimento. Poiché la forma del segnale non viene modificata significativamente dallo "strong lensing" andiamo alla caccia di eventi ripetuti nel nostro catalogo, cercando segnali che coincidono nelle stime di masse e altri parametri intrinseci. Eseguiamo questa ricerca in diverse fasi, utilizzando prima algoritmi rapidi che cercano somiglianze nei parametri ottenuti nei diversi eventi al fine di selezionare un elenco dei candidati. Eseguiamo quindi sofisticate analisi statistiche per determinare la significatività statistica dell'ipotesi di "strong lensing" rispetto all'ipotesi che non ci sia un effetto di questo tipo. Poiché alcune delle immagini potrebbero essere rimpicciolite scendendo così al di sotto delle nostre soglie di rilevamento, eseguiamo anche ricerche mirate di immagini sotto soglia. Si noti che quando un segnale di onda gravitazionale viaggia non troppo vicino ad una lente galattica, l'effetto è solo un debole ingrandimento o rimpicciolimento del segnale emesso. Pertanto, al momento non stiamo cercando questo regime di "weak lensing", anche se sarà importante in futuro quando verranno rilevati sistemi binari più distanti da noi.

### PER SAPERNE DI PIÙ:

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



Ma le galassie e gli ammassi di galassie non sono gli unici oggetti che potrebbero fare da lenti per le onde gravitazionali. Oggetti astrofisici molto più piccoli come i [buchi neri](#) isolati potrebbero anche portare ad effetti di lente rilevabili. Poiché il ritardo in tempo d'arrivo tra le immagini multiple è proporzionale alla massa dell'oggetto che fa da lente, oggetti più leggeri porterebbero a ritardi più brevi. In particolare, quando il ritardo è inferiore alla durata del segnale, le immagini possono sovrapporsi producendo effetti di interferenza visibili come battimenti nelle forme d'onda, come mostrato in Fig. 1. Per masse anche più piccole, gli effetti di diffrazione possono diventare importanti e l'effetto della lente può essere compreso solo nell'ambito dell'[ottica ondulatoria](#). Tuttavia, se la lente è molto più piccola della lunghezza d'onda gravitazionale, non è possibile misurare alcun effetto significativo. In ogni caso, ciò significa che le sorgenti osservate da LIGO–Virgo–KAGRA permettono di andare alla ricerca di lenti con masse da centinaia a decine di migliaia di masse solari, poiché queste possono indurre distorsioni rilevabili della forma d'onda. Proseguendo con gli studi precedenti, cerchiamo questi battimenti nei dati.

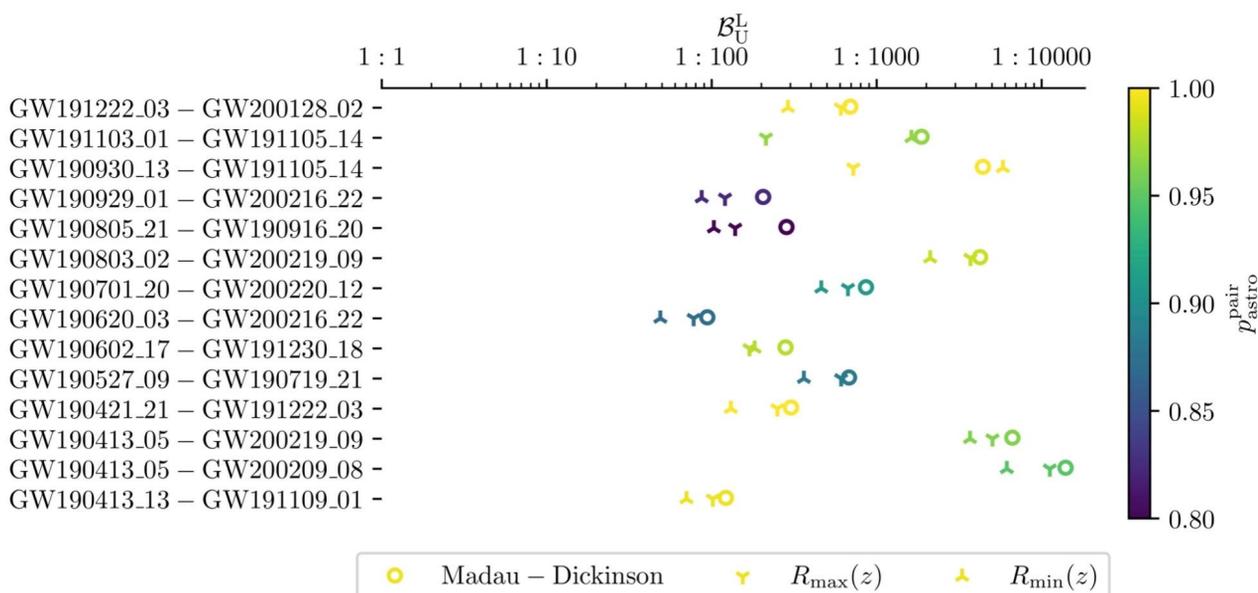
## LE NOSTRE NUOVE ANALISI

In questo studio abbiamo aggiornato e migliorato il nostro lavoro precedente, ma abbiamo anche introdotto nuove analisi. In particolare, è stato introdotto un nuovo metodo di analisi rapido per identificare coppie di eventi che possono essere associati allo "strong lensing". Invece di esaminare la sovrapposizione statistica dei valori dei parametri, questa nuova linea di analisi utilizza tecniche di Machine Learning (ovvero di apprendimento automatico) per confrontare direttamente la somiglianza degli spettrogrammi tempo-frequenza. Poiché lo "strong lensing" lascia per lo più invariata la forma delle immagini, gli spettrogrammi dovrebbero rimanere simili per tutte le immagini. In questo studio abbiamo utilizzato questa tecnica di Machine Learning in combinazione con le sovrapposizioni statistiche osservate per selezionare i candidati più interessanti. Per questi ultimi eseguiamo una stima congiunta dei parametri che è più costosa dal punto di vista computazionale ma che non porta a nessuna evidenza di "strong lensing" (vedi Fig. 2).

Come accennato in precedenza, lo "strong lensing" lascia per lo più invariate tutte le forme dell'immagine. Per alcune di esse, note come immagini di tipo II, potrebbero esserci alcune piccole distorsioni quando sono rilevanti modi in frequenza diversi. In questo studio cerchiamo queste indicazioni di "strong lensing" nei singoli eventi. Sebbene alcuni candidati mostrino la possibile presenza di questo effetto, un'analisi dettagliata fatta successivamente non fornisce la prova conclusiva della presenza di "strong lensing".

## FIGURE TRATTE DALLA PUBBLICAZIONE

Per ulteriori informazioni su queste figure e su come sono state prodotte, si veda il [preprint disponibile gratuitamente](#).



**Figura 2:** Grafico riassuntivo della nostra ricerca di onde gravitazionali associate a "strong lensing". Per ogni coppia di eventi candidati elencati nella colonna di sinistra, calcoliamo l'evidenza statistica dell'ipotesi di "strong lensing" rispetto al caso in cui esso sia assente ( $B_U^L$ ). Un  $B_U^L$  maggiore di 1 indica la preferenza per l'ipotesi della lente. L'asse orizzontale indica questa evidenza a partire da 1, con probabilità decrescente a destra. Calcoliamo questa evidenza per diverse modelli dell'evoluzione del tasso di fusione dei buchi neri binari, riassunti dai tre diversi simboli che comprendono anzitutto un tasso di fusione che segue il tasso di formazione stellare ("Madau-Dickinson"), e poi il minimo e il massimo ottenuti in diverse simulazioni astrofisiche. La barra colorata associa il colore alla probabilità che questa coppia abbia un'origine astrofisica indipendente dallo scenario di lente gravitazionale. Nessuna delle coppie mostra preferenza per l'ipotesi della lente.

## COSA IMPLICA IL FATTO CHE NON ABBIAMO TROVATO NULLA?

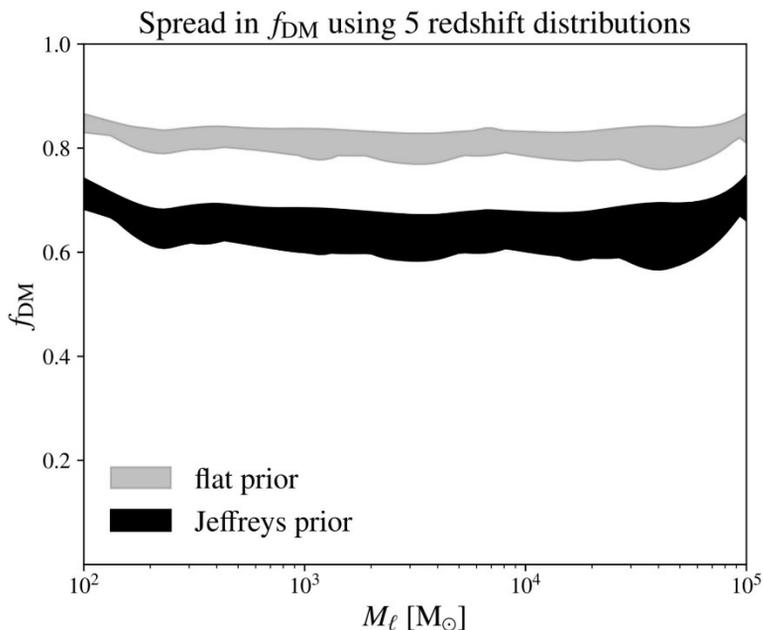
Il fatto che non troviamo indicazioni della presenza di lenti gravitazionali ci permette di trarre implicazioni astrofisiche sulla popolazione di lenti e di sorgenti di onde gravitazionali. I risultati sulle immagini multiple limitano la distribuzione di lenti di grandi dimensioni come le galassie, mentre quelli sugli effetti di interferenza pongono limiti alla quantità di oggetti compatti che agiscono come [materia oscura](#). Per questi ultimi, supponendo che tutti gli oggetti compatti di materia oscura abbiano la stessa massa, possiamo porre limiti alla loro abbondanza per masse diverse, si veda la Fig. 3. Ciò a sua volta ha implicazioni per i primi modelli dell'Universo che prevedono l'esistenza di [buchi neri primordiali](#). Come si può vedere nella figura, troviamo che oggetti compatti con masse comprese tra 100 e 10.000 solari non possono rappresentare la totalità della materia oscura. Inoltre, la mancata osservazione di "strong lensing" implica che il tasso di fusione dei buchi neri binari nel lontano passato (più di 10 miliardi di anni fa) non poteva essere più di due ordini di grandezza maggiore del tasso di fusione al momento attuale, altrimenti avremmo dovuto osservare eventi multipli. Questo risultato è coerente con i limiti superiori derivati dalla mancata osservazione di un [fondo stocastico di onde gravitazionali](#).

### IL FUTURO

Sebbene non si siano trovate prove convincenti di effetti di lente gravitazionale, è entusiasmante pensare che l'aumentata sensibilità nel periodo osservativo che sta per iniziare potrebbe portare alla loro prima osservazione.

### PER SAPERNE DI PIÙ:

Leggete un preprint gratuito dell'articolo scientifico completo: <https://dcc.ligo.org/P2200031/public> oppure: <https://arxiv.org/abs/2304.08393>



**Figura 3:** Vincoli sull'abbondanza di oggetti compatti derivati dalla mancata osservazione delle distorsioni dovute alle lenti nell'ultimo catalogo delle onde gravitazionali. L'abbondanza di oggetti compatti sull'asse verticale è calcolata come frazione dell'abbondanza totale di materia oscura. La massa degli oggetti compatti sull'asse orizzontale è presentata in termini di massa della lente. Per la popolazione di lenti e sorgenti abbiamo considerato diverse ipotesi, in parte riassunte dall'ipotesi di distribuzione a priori uniforme (flat) e dall'ipotesi di distribuzione a priori di Jeffreys. Troviamo che gli oggetti compatti tra 100 e 10.000 masse solari non possono rappresentare il totale della materia oscura.

### GLOSSARIO

**Einstein:** Nel 1915 Albert Einstein descrisse la teoria generale della gravitazione. In questa teoria, la gravità è il risultato della curvatura dello spazio-tempo causata da concentrazioni di massa o energia. La teoria prevede sia le onde gravitazionali che le lenti gravitazionali.

**Distanze cosmologiche:** si riferiscono a distanze molto più grandi delle dimensioni della nostra galassia e del gruppo locale. Tipicamente le distanze cosmologiche sono espresse in termini di Gigaparsec. Un Gigaparsec (spesso abbreviato in Gpc) corrisponde a circa tre miliardi di anni luce o  $3 \times 10^{22}$  km. Ciò corrisponde ad un milione di volte le dimensioni della nostra galassia

**Galassie:** sono sistemi legati gravitazionalmente composti principalmente da stelle, gas e materia oscura.

**Ammassi di galassie:** le galassie possono formare sistemi gravitazionali più grandi noti come ammassi.

**Buchi neri:** un buco nero è un oggetto massiccio e denso, la cui attrazione gravitazionale è così forte che la luce non può sfuggire.

**Regime dell'ottica ondulatoria:** è il caso in cui le proprietà ondulatorie di un'onda gravitazionale o della radiazione elettromagnetica diventano importanti e gli effetti di interferenza e diffrazione devono essere presi in considerazione.

**Materia oscura:** un'ipotetica forma di materia che rappresenta circa l'85% della materia nell'universo. La materia oscura è chiamata "oscura" perché non sembra assorbire, riflettere o emettere luce ed è, quindi, difficile da rilevare. La composizione della materia oscura è sconosciuta, ci sono diversi possibili candidati, tra cui le particelle fondamentali e i buchi neri.

**Buchi neri primordiali:** un tipo teorico di buco nero formatosi nell'Universo primordiale. Le fluttuazioni nella densità di energia dell'Universo potrebbero aver portato a regioni dello spazio così dense da collassare spontaneamente per formare buchi neri. Dal momento che non si formano attraverso il collasso di stelle massicce, i buchi neri primordiali potrebbero plausibilmente esistere al di sotto di una massa solare o fondersi a redshift più alti di quelli a cui si formano le prime stelle.