

NUOVI VINCOLI SULL'ESPANSIONE COSMICA E SULLA RELATIVITÀ GENERALE CON LE ONDE GRAVITAZIONALI

In una recente pubblicazione la [Collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) ha presentato nuove misurazioni della [costante di Hubble](#) (H_0) e nuovi vincoli sulle possibili deviazioni dalla teoria della [relatività generale](#) di Einstein su scale cosmologiche. Utilizziamo i dati di 76 nuovi segnali gravitazionali osservati durante la prima parte del quarto periodo osservativo di LVK e pubblicati nel nuovo [Catalogo dei transienti gravitazionali GWTC-4.0](#), che si aggiungono a quelli resi pubblici nelle precedenti versioni del catalogo. Analizzando i segnali provenienti dalla [coalescenza](#) di 142 sistemi binari compatti, misuriamo direttamente la [distanza di luminosità](#) di ciascun sistema binario e le masse dei due oggetti compatti nel sistema di riferimento terrestre. Utilizzando le caratteristiche nella distribuzione di massa dei buchi neri e delle stelle di neutroni e la distribuzione delle potenziali galassie ospiti elencate nel catalogo di galassie [GLADE+](#) all'interno del volume di localizzazione di ciascuna onda gravitazionale osservata, otteniamo informazioni statistiche sul [redshift](#) della sorgente. Combinando queste stime di distanza e di redshift si ottengono vincoli indipendenti sulla costante di Hubble, liberi dalla tradizionale [scala delle distanze cosmiche](#). Inoltre, otteniamo nuovi limiti alle modifiche della propagazione delle onde gravitazionali che potrebbero segnalare la presenza di nuova fisica oltre la relatività generale. Questi risultati dimostrano la crescente importanza delle onde gravitazionali in cosmologia, con la loro capacità di misurare indipendentemente il tasso di espansione dell'universo e di mettere alla prova le leggi fondamentali che lo governano.

SIRENE STANDARD, ESPANSIONE COSMICA E L'ENERGIA OSCURA

Negli anni Venti, Georges Lemaître ed Edwin Hubble fecero la scoperta rivoluzionaria che l'universo si sta espandendo (vedi [Figura 1](#)). Da allora lo studio dell'universo, noto come cosmologia, è cresciuto fino a diventare una disciplina ricca e indipendente che mira a spiegare come l'universo si sia formato ed evoluto utilizzando un modello definito da solo pochi parametri fondamentali. Oggi, questo modello è noto con il nome di [modello Lambda CDM](#) ed è considerato il 'Modello Standard' della cosmologia. Si basa sulla teoria della [relatività generale](#) di Albert Einstein.

Eppure, ancora oggi, la cosmologia moderna si trova di fronte a grandi questioni aperte. Uno dei più grandi enigmi riguarda uno dei parametri chiave del Modello Standard della cosmologia: la costante di Hubble, indicata con H_0 . Questo numero (espresso in chilometri al secondo per [megaparsec](#) (Mpc), $\text{km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$) descrive la velocità con cui l'universo locale si sta espandendo. In termini semplici, misura la rapidità con cui gli oggetti distanti si allontanano l'uno dall'altro. Tuttavia, le misurazioni ottenute con metodi diversi e indipendenti forniscono valori diversi di H_0 . Se consideriamo la radiazione residua del Big Bang — il fondo cosmico di microonde, o [CMB](#), troviamo un valore di circa $68 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Quando invece misuriamo le distanze utilizzando le esplosioni di [supernova di tipo Ia](#) nell'universo vicino e le [stelle variabili Cefeidi](#), otteniamo un valore di circa $74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Ad oggi, il divario tra questi due valori non può essere spiegato solo con gli errori di misura. Questa cosiddetta '[tensione di Hubble](#)' è diventata uno degli enigmi più pressanti della cosmologia moderna.

Nel frattempo, si profila un altro mistero: l'[espansione dell'universo sta accelerando](#) secondo un'analisi dei dati delle supernove di tipo Ia fatta per la prima volta nel 1998. Questa accelerazione del tasso di espansione cosmica può essere spiegata solo aggiungendo un nuovo componente all'universo, chiamato [energia oscura](#), e la comprensione della vera natura dell'energia oscura è uno dei grandi interrogativi della cosmologia moderna. Le osservazioni di galassie eseguite con grandi telescopi terrestri o spaziali, ad esempio [DESI](#) ed [Euclid](#), ci permettono di studiare la distribuzione delle galassie nel cosmo con una precisione eccezionale. Questo ci consentirà di capire se la distribuzione delle galassie possa essere spiegata in modo completo dalla teoria di Einstein o se qualcosa di nuovo entri in gioco alle scale più grandi dell'universo.

In questo contesto, le onde gravitazionali (GW) si sono recentemente imposte come una nuova potente sonda cosmologica. Previste per la prima volta da Einstein un secolo fa, le GW sono increspature dello spazio-tempo che si propagano nell'universo e sono prodotte da eventi catastrofici come coppie di [buchi neri](#) o [stelle di neutroni](#) che si fondono. Secondo la Relatività Generale le GW viaggiano liberamente attraverso l'universo alla velocità della luce e sono rivelabili sulla Terra grazie ai piccoli spostamenti che producono nelle distanze relative tra coppie di masse, un [effetto osservato per la prima volta nel 2015](#) dalla [collaborazione LIGO-Virgo](#). A differenza di altri metodi di misura di distanze cosmiche, le GW offrono un modo diretto di misura, senza fare affidamento sulla complessa "scala di distanze cosmiche" usata per supernove e Cefeidi. Le nostre misure delle distanze fatte utilizzando le GW si basano su calcoli accurati della forma attesa del segnale osservato dai rivelatori di GW sulla Terra secondo la relatività generale. Confrontando l'ampiezza e la fase osservate del segnale con le previsioni, possiamo determinare direttamente la distanza di ciascuna sorgente. Le sorgenti di GW vengono quindi chiamate "[sirene standard](#)", un riferimento alle "candele standard" (oggetti con luminosità intrinseca nota, come le supernove di tipo Ia) che gli astronomi utilizzano da decenni. Combinando la distanza misurata da una sirena standard con le informazioni su quanto velocemente la galassia ospite si sta allontanando da noi, possiamo effettuare una misura indipendente della costante di Hubble.

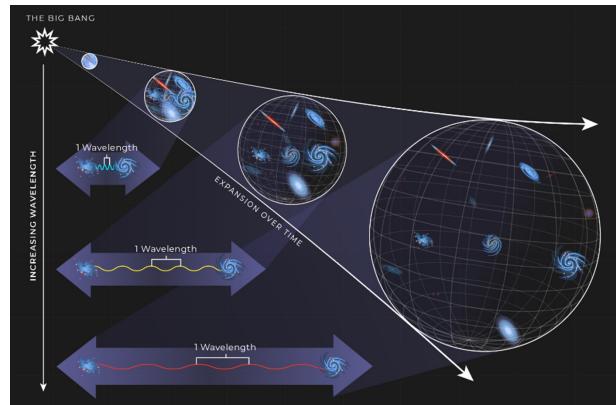


Figura 1. Schema che illustra l'espansione cosmica e il redshift cosmologico. Man mano che l'universo si espande, le galassie si allontanano l'una dall'altra, analogamente ai punti sulla superficie di un pallone che si gonfia, così come aumenta la lunghezza d'onda della luce delle galassie lontane che appare quindi spostata verso il rosso. Questo redshift influenza anche sulle onde gravitazionali emesse da sorgenti lontane. [Credito: NASA Scientific Visualization Studio]

Ma c'è di più: le GW possono anche aiutare a validare la teoria della gravità di Einstein alle scale cosmologiche più grandi. Se una nuova fisica, come un campo di energia oscura sconosciuto, fosse all'origine dell'espansione accelerata dell'universo, potrebbe cambiare il modo in cui le GW percorrono grandi distanze cosmiche, e in particolare la loro ampiezza potrebbe variare diversamente durante la propagazione. Questo effetto implicherebbe una distanza dedotta dalle GW diversa da quella dedotta dalla luce emessa dalla stessa sorgente, se la gravità si comportasse diversamente da quanto previsto dalla relatività generale di Einstein. È importante osservare che i parametri che descrivono questo fenomeno possono essere determinati usando gli stessi metodi impiegati per determinare la costante di Hubble. Questo significa che le GW possono essere usate per affrontare contemporaneamente due grandi questioni aperte in cosmologia, con un approccio che è indipendente da metodi usati in passato per misurare l'espansione cosmica.

In questo studio, la [Collaborazione LVK](#) ha utilizzato le osservazioni di GW non solo per affinare le misurazioni della costante di Hubble, ma anche per porre dei limiti al modo in cui le GW potrebbero comportarsi diversamente dalle previsioni di Einstein.

METODI

Diversamente dalla semplice misura di distanza, le GW non forniscono direttamente il [redshift](#) della loro sorgente. Così come la luce di una galassia che si allontana viene spostata il rosso (la lunghezza d'onda aumenta), le masse dei buchi neri che si fondono appaiono più grandi di quanto siano effettivamente a causa dell'espansione dell'universo. Questo significa che dal solo segnale prodotto da un'onda gravitazionale non possiamo distinguere tra un oggetto davvero più pesante e un oggetto che si allontana da noi più velocemente.

Tuttavia, ci si aspetta che alcune sorgenti emettano un lampo di luce coincidente con l'onda gravitazionale, in particolare le fusioni contenenti almeno una stella di neutroni. In tal caso gli astronomi possono individuare la galassia ospite e misurarne direttamente lo spostamento verso il rosso. Queste sorgenti sono quindi chiamate **sirene luminose**. Ciò è successo con la prima fusione di un sistema binario di stelle di neutroni rivelata dagli osservatori di onde gravitazionali, [GW170817](#), che ha prodotto anche un intenso segnale eletromagnetico. Quel segnale ha portato all'identificazione rapida della galassia ospite ([NGC 4993](#)) e, combinando il redshift con la distanza con le onde gravitazionali è stata realizzata [la prima misura della costante di Hubble utilizzando una sirena standard](#).

Purtroppo nella prima parte del quarto periodo osservativo non sono state trovate nuove fusioni di stelle di neutroni con segnali eletromagnetici coincidenti. Per tutte le altre sorgenti, principalmente sistemi binari di buchi neri, ci affidiamo a metodi statistici per stimare il redshift. Questi metodi utilizzano ciò che conosciamo a priori relativamente alla popolazione complessiva di sorgenti di un dato tipo. Un aspetto critico del metodo è dato dal fatto che la distribuzione osservata delle sorgenti differisce quella vera. Questo accade in parte a causa della natura dei nostri rivelatori, che sono più propensi a rilevare alcune sorgenti (come quelle più massicce o vicine) rispetto ad altre (più leggere o più lontane). Inoltre, se la storia dell'espansione dell'universo o le leggi della gravità fossero diverse, ad esempio, se l'energia oscura avesse proprietà inaspettate, ciò cambierebbe la relazione tra la popolazione vera e quella osservata. Confrontando le proprietà attese della popolazione di sorgenti con quelle osservate, e tenendo conto della diversa probabilità di osservazione, si possono quindi porre dei vincoli sulle proprietà dell'universo come la storia della sua espansione.

Per tale scopo utilizziamo un approccio statistico che sfrutta contemporaneamente due fonti complementari di informazione sulle proprietà della popolazione reale, e che è noto come **metodo della sirena oscura**.

La prima fonte di informazione riguarda la distribuzione di massa dei sistemi binari di buchi neri, detta anche "metodo della sirena spettrale". Supponiamo che i buchi neri nell'universo si formino preferenzialmente attorno a una massa specifica, a causa di processi astrofisici intrinseci. Ad esempio, la teoria prevede che i buchi neri di massa stellare debbano avere una massa massima perché stelle estremamente massicce esplodono così violentemente (attraverso quella che è nota come [supernova a instabilità di coppia](#)) da non lasciare alcun buco nero dietro di sé. Confrontando la scala massima di massa attesa con ciò che osserviamo, e sapendo come l'effetto dell'espansione cosmica modifica queste masse, possiamo dedurre il tasso di espansione. In particolare, e per la prima volta in un nostro articolo sulla cosmologia, utilizziamo un modello che copre l'intera gamma di masse delle sorgenti, comprendendo così diversi tipi di fusioni, cioè sistemi binari di buchi neri, di stelle di neutroni, e quelli composti da un buco nero e una stella di neutroni.

La seconda fonte di informazione deriva dalla distribuzione delle galassie, chiamata anche "metodo del catalogo delle galassie". Assumendo che i buchi neri si formino nelle galassie, confrontiamo la distribuzione delle galassie nella regione dove probabilmente si è verificata ogni fusione con grandi cataloghi di galassie per identificare possibili galassie ospiti. Poiché le mappe del cielo fornite dalle GW sono imprecise, questa associazione con la galassia ospite è probabilistica: possono esserci centinaia o migliaia di potenziali galassie ospiti, ognuna con una diversa probabilità di essere quella vera. La probabilità dipende dalla costante di Hubble e dalle proprietà dell'energia oscura, che collegano distanza e redshift, ma può anche dipendere dalle proprietà intrinseche della galassia, come la loro massa o [luminosità](#). Assumiamo che la probabilità che una galassia ospiti una fusione che produce onde gravitazionali sia proporzionale alla sua luminosità in [luce infrarossa](#). Controlliamo poi che questa ipotesi non influisca in modo significativo sui nostri risultati finali. È importante anche tenere conto del fatto che i cataloghi di galassie sono incompleti, alcune galassie deboli o lontane potrebbero mancare del tutto.

Infine, poiché i nostri rivelatori sono più sensibili a certe masse e distanze di buchi neri, dobbiamo correggere con attenzione questi effetti di selezione per evitare errori sistematici. Questo significa che dobbiamo stimare *contemporaneamente* le proprietà della popolazione dei buchi neri e la storia dell'espansione cosmica, tenendo conto anche delle informazioni sul redshift ottenute dai cataloghi delle galassie.

In questo lavoro, facciamo un grande passo avanti rispetto alle precedenti analisi della Collaborazione LVK, dove queste informazioni venivano combinate in fasi separate per raggiungere un compromesso tra accuratezza e costo computazionale. Grazie ai miglioramenti nei nostri metodi di analisi dei dati, ora eseguiamo una misura completa e simultanea, il modo statisticamente corretto per ottenere i risultati più accurati.

PER SAPERNE DI PIÙ:

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



RISULTATI

La **Figura 2** mostra la nostra stima della costante di Hubble (H_0). Il risultato migliore si ottiene combinando l'analisi della sirena oscura con quella della sirena luminosa GW170817. Dalla posizione e dalla larghezza del picco della curva, otteniamo $H_0 = 76,6^{+13,0}_{-9,5} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Qui i numeri sovrascritti e sottoscritti mostrano [l'intervallo di credibilità](#) al livello del 68%. Le nostre analisi precedenti che utilizzavano cataloghi galattici assumevano un modello fisso della popolazione di oggetti compatti, rendendo i vincoli su H_0 irrealisticamente rigidi. Il metodo utilizzato in questo lavoro raggiunge una precisione simile ma è più robusto dal punto di vista statistico perché i parametri che descrivono la popolazione di oggetti compatti, come la posizione delle scale preferenziali nella distribuzione di massa, sono ora misurati insieme a quelli cosmologici.

Nel caso di utilizzo del metodo delle sirene oscure, i nostri risultati indicano che l'uso di un modello completo della distribuzione di massa delle fusioni di sistemi binari compatti porta a una riduzione del 50% nell'indeterminazione della misura di H_0 rispetto a quando si considerano modelli che utilizzano solo fusioni di buchi neri, nonostante l'inclusione di soli cinque eventi aggiuntivi contenenti almeno una stella di neutroni. La stima basata solo sulle sirene oscure è ancora leggermente più incerta rispetto al risultato ottenuto dalla singola sirena luminosa GW170817, il che sottolinea l'importanza di osservare un maggior numero di [sorgenti multi-messaggere](#); tuttavia la misura della costante di Hubble ottenuta con sirene spettrali costituisce un miglioramento del 60% rispetto ai precedenti risultati della Collaborazione LVK.

La **Figura 3** presenta i nostri limiti sulle possibili deviazioni dalla relatività generale di Einstein relativamente alla propagazione delle GW in un universo in espansione. In particolare, esaminiamo il rapporto tra la distanza misurata dall'ampiezza dell'onde gravitazionali (etichettata come D_{GW}^{L}) e la distanza che si otterebbe da una controparte elettrromagnetica (etichettata D_{EM}^{L}). Se la relatività generale è corretta, queste due distanze dovrebbero coincidere, quindi il rapporto dovrebbe essere uno per tutti gli spostamenti verso il rosso (linea tratteggiata nera). Mettiamo alla prova questa previsione usando due diverse parametrizzazioni dell'effetto e stimiamo i limiti sui parametri corrispondenti. I riquadri superiore e inferiore della figura mostrano i risultati per ciascun modello, che sono ben compatibili tra loro. Le bande colorate indicano gli intervalli di credibilità del 90%. Non troviamo indicazioni di deviazioni dalla relatività generale, e la nostra migliore misurazione limita tali deviazioni entro il 60% (assumendo un intervallo di credibilità del 68,3%), migliorando i limiti esistenti di circa il 40%. La sirena brillante GW170817 non contribuisce in modo significativo in questo caso, perché questo effetto dipende dalla distanza di propagazione e solo le sorgenti che si trovano a redshift non trascurabile sono informative: GW170817, con il suo redshift $z \approx 0,01$, è semplicemente troppo vicina.

Infine, i dati contenuti in GWTC-4.0 non impongono vincoli né sul contenuto di materia oscura dell'universo né sull'[equazione di stato dell'energia oscura](#). L'effetto più significativo dell'energia oscura si manifesta invece attraverso la propagazione modificata delle onde gravitazionali.

SOMMARIO E PROSPETTIVE FUTURE

Gli ultimi risultati della Collaborazione LIGO-Virgo-KAGRA forniscono una nuova stima indipendente della costante di Hubble e vincoli più stringenti sulle possibili deviazioni dalla relatività generale di Einstein su scale cosmologiche. La migliore stima della costante di Hubble, combinando dati statistici sulle "sirene oscure" con la singola sirena luminosa GW170817, è $76,6^{+13,0}_{-9,5} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, coerente con precedenti misurazioni basate su onde gravitazionali ma ottenuta con una trattazione statistica migliorata. L'analisi mostra che includendo una gamma più completa di tipi di sorgenti si ottengono vincoli significativamente più stringenti rispetto all'uso dei soli sistemi binari di buchi neri, anche se durante questo periodo osservativo non sono state trovate nuove sirene luminose.

La presenza di caratteristiche distinte nella distribuzione di massa dei buchi neri, scale di massa preferenziali dove tendono a formarsi i buchi neri, è attualmente la principale fonte di informazioni cosmologiche per eventi privi di un corrispettivo elettromagnetico. Le informazioni aggiuntive ottenute dai cataloghi delle galassie ospiti migliorano la misurazione di solo circa l'8,6%, principalmente a causa della limitata completezza del catalogo GLADE+ qui utilizzato e della relativamente scarsa localizzazione nel cielo degli eventi rilevati nella prima parte del quarto periodo osservativo. Entrambi questi fattori potrebbero migliorare: la maggiore sensibilità del rivelatore Virgo nella parte restante quarto periodo osservativo dovrebbe portare a eventi meglio localizzati, e un catalogo più completo, UpGLADE, è in preparazione.

Il nostro studio verifica anche se le onde gravitazionali si possano propagare su distanze cosmiche in modo diverso rispetto alla previsione della relatività generale, una verifica importante di idee legate all'energia oscura. Non si riscontra alcuna deviazione dalla relatività generale, con vincoli ora circa il 40% più stretti rispetto ai limiti precedenti.

Questi risultati mostrano che, con l'arrivo di nuovi dati e l'adozione di metodi statistici robusti, la cosmologia basata su GW è pronta per affrontare alcune delle più grandi questioni aperte della fisica moderna.

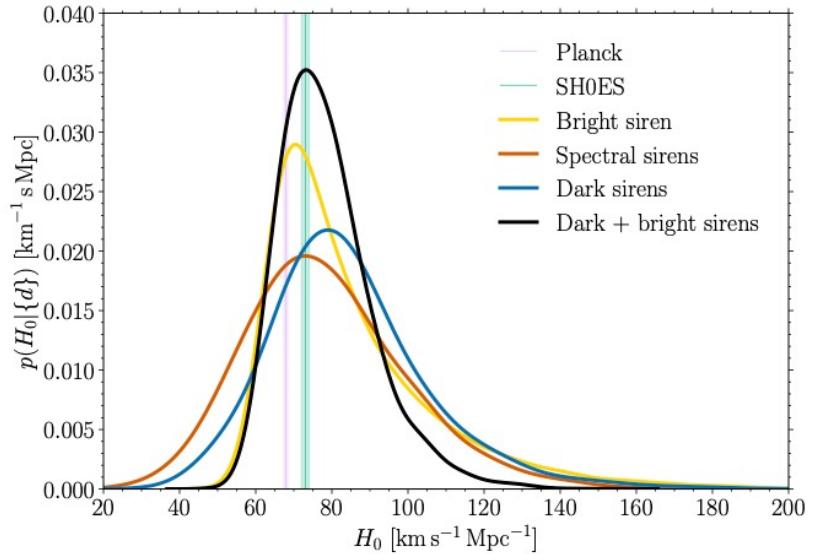


Figura 2. (Figura 5 dalla nostra pubblicazione). Distribuzioni di probabilità a posteriori per i valori della costante di Hubble (H_0) ottenuta da diverse combinazioni dell'intero dataset GWTC-4.0. Il miglior risultato è dato dalla curva nera, che è una combinazione delle "sirene oscure" di GWTC-4.0 con la "sirena luminosa" GW170817. Per confronto, vengono mostrati anche risultati con solo sirene oscure (blu), sirene spettrali (arancioni) e la singola sirena luminosa (gialla). Per confronto, le bande verticali mostrano i risultati ottenuti dalla [missione Planck](#) e dalla [Collaborazione SH0ES](#).

La **Figura 3** presenta i nostri limiti sulle possibili deviazioni dalla relatività generale di Einstein relativamente alla propagazione delle GW in un universo in espansione. In particolare, esaminiamo il rapporto tra la distanza misurata dall'ampiezza dell'onde gravitazionali (etichettata come D_{GW}^{L}) e la distanza che si otterebbe da una controparte elettrromagnetica (etichettata D_{EM}^{L}). Se la relatività generale è corretta, queste due distanze dovrebbero coincidere, quindi il rapporto dovrebbe essere uno per tutti gli spostamenti verso il rosso (linea tratteggiata nera). Mettiamo alla prova questa previsione usando due diverse parametrizzazioni dell'effetto e stimiamo i limiti sui parametri corrispondenti. I riquadri superiore e inferiore della figura mostrano i risultati per ciascun modello, che sono ben compatibili tra loro. Le bande colorate indicano gli intervalli di credibilità del 90%. Non troviamo indicazioni di deviazioni dalla relatività generale, e la nostra migliore misurazione limita tali deviazioni entro il 60% (assumendo un intervallo di credibilità del 68,3%), migliorando i limiti esistenti di circa il 40%. La sirena brillante GW170817 non contribuisce in modo significativo in questo caso, perché questo effetto dipende dalla distanza di propagazione e solo le sorgenti che si trovano a redshift non trascurabile sono informative: GW170817, con il suo redshift $z \approx 0,01$, è semplicemente troppo vicina.

Infine, i dati contenuti in GWTC-4.0 non impongono vincoli né sul contenuto di materia oscura dell'universo né sull'[equazione di stato dell'energia oscura](#). L'effetto più significativo dell'energia oscura si manifesta invece attraverso la propagazione modificata delle onde gravitazionali.

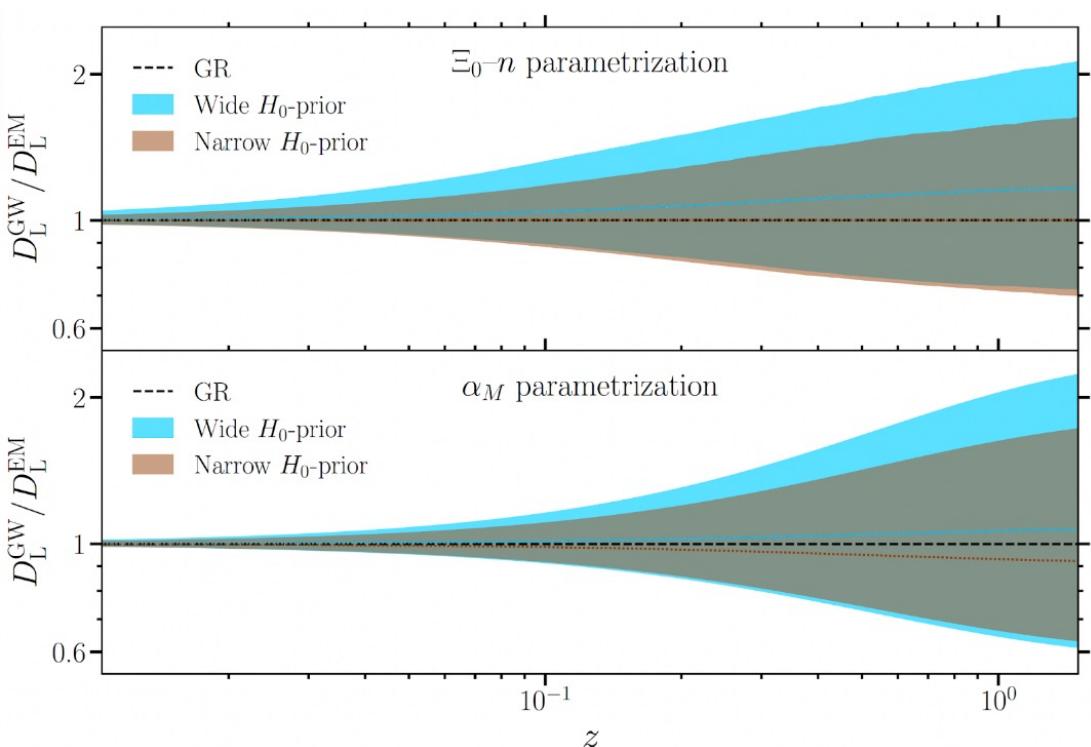


Figura 3. (Figura 10 nella nostra pubblicazione). Rapporto tra la distanza misurata dalle sorgenti GW e la distanza che verrebbe misurata da un'emissione elettromagnetica dalla stessa sorgente, in funzione dello spostamento verso il rosso della sorgente. Se la teoria della relatività generale è corretta, ci si aspetta che le due coincidano, e il rapporto dovrebbe essere identicamente uguale a 1 per tutti gli spostamenti verso il rosso. Le bande colorate mostrano il limite ottenuto con i dati di GWTC-4.0 al al livello di credibilità del 90%. Non troviamo indicazioni di deviazioni dalla relatività generale. Il riquadro superiore e quello inferiore si riferiscono a due diverse forme parametriche adottate per descrivere questo effetto, che riteniamo fornire risultati coerenti fra loro.

GLOSSARIO

GLADE-4: nuova compilazione estesa di cataloghi di galassie, contenente dati relativi a circa 22 milioni di galassie, utilizzata per fornire informazioni sul redshift di potenziali galassie ospiti dei nostri eventi GW. Un articolo scientifico a accesso gratuito che descrive il catalogo originale di GLADE è disponibile [qui](#).

Megaparsec: unità di distanza comunemente usata in cosmologia. Un megaparsec equivale a un milione di [parsec](#), dove un parsec corrisponde a circa tre anni luce e un quarto o $3,086 \times 10^{16}$ metri.

Costante di Hubble: parametro usato per misurare il tasso di espansione dell'universo. Il suo valore misurato è indicato dal simbolo H_0 e vale circa $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

Teoria del Big Bang: spiegazione dell'origine ed evoluzione dell'universo osservabile in cui l'universo è nato circa 14 miliardi di anni fa e si è espanso da uno stato inizialmente molto caldo e denso. La teoria del Big Bang è ampiamente accettata come spiegazione di molte delle proprietà osservate dell'universo, inclusa l'[abbondanza degli elementi chimici più leggeri](#) e l'esistenza della [radiazione cosmica di fondo](#).

Fondo Cosmico di Microonde (CMB): Radiazione elettromagnetica proveniente da una fase iniziale dell'evoluzione dell'universo, quando aveva circa 380.000 anni. Il CMB è anche conosciuto come "radiazione residua" del Big Bang. Per maggiori informazioni vedi [qui](#).

Supernova di tipo Ia: meccanismo esplosivo caratteristico di una nana bianca, che raccogliendo materiale da una stella compagna raggiunge una massa superiore al [limite di Chandrasekhar](#) di 1,4 volte la massa solare. Le distanze delle supernove di tipo Ia possono essere stimate con affidabilità, poiché tutte esplodono con un picco di [luminosità](#) intrinseca piuttosto simile, rendendole utili come [candele standard](#).

Cefeide: tipo di stella variabile pulsante che subisce cambiamenti periodici di raggio e temperatura, portando a variazioni regolari e periodiche della sua [luminosità](#). Misurando il periodo di pulsazione, gli astronomi possono stimare in modo affidabile la distanza delle stelle variabili Cefeidi.

Scala della distanza cosmica: la combinazione di metodi con cui gli astronomi determinano la distanza degli oggetti nell'universo. Le distanze dagli oggetti remoti, che di solito si basano su relazioni empiriche tra le loro proprietà, si basano su misurazioni più dirette e geometriche delle distanze dagli oggetti vicini - di solito all'interno della galassia della Via Lattea. Per maggiori informazioni si veda [qui](#).

Buco nero: Una regione dello spazio-tempo causata da una massa estremamente compatta dove la gravità è così intensa da impedire a qualsiasi cosa, inclusa la luce, di uscire.

Stella di neutroni: residuo del processo di supernova subito da una stella con una massa compresa tra 10 e 25 volte quella del nostro Sole. Le stelle di neutroni tipiche hanno una massa di circa 1 – 2 masse solari e un raggio di 10 – 15 chilometri, e sono tra gli oggetti più compatti mai scoperti.

Supernova a instabilità di coppie (PISN): tipo di esplosione di supernova prevista per avvenire in una stella con una massa superiore a circa 130 masse solari. La [produzione di coppie elettrone-positrone](#) nel nucleo provoca un calo drammatico della pressione che sostiene la stella, portando a un'esplosione termonucleare incontrollata che non lascia alcun residuostellare.

Redshift: Aumento della lunghezza d'onda (del suono, della luce o delle onde gravitazionali) dovuto al moto della sorgente rispetto all'osservatore. A causa dell'[espansione cosmologica dell'universo](#), oggetti come le galassie si stanno allontanando da noi, e la luce e altre radiazioni elettromagnetiche provenienti da essi hanno una lunghezza d'onda più lunga.

Materia oscura: forma misteriosa di materia che costituisce circa l'85% della massa dell'Universo. È oscura perché non emette luce né interagisce elettromagneticamente. Molte teorie sulla materia oscura prevedono che si tratti di una sorta di particella fondamentale, ma è anche interessante considerare la possibilità che gli oggetti più oscuri che conosciamo (i buchi neri!) possano essere una componente della materia oscura.

Energia oscura: componente misteriosa, sconosciuta, del contenuto di materia ed energia del cosmo che domina il comportamento dell'Universo sulle sue scale più grandi e si ritiene stia causando l'[accelerazione dell'espansione dell'universo](#). Il modello più semplice per l'energia oscura è quello della cosiddetta costante cosmologica che esercita una pressione negativa, con conseguente espansione accelerata.

Distribuzione di probabilità a posteriori: distribuzione di probabilità che si ottiene dopo aver analizzato i dati tramite un processo noto come [inferenza Bayesiana](#).

PER SAPERNE DI PIÙ:

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

Leggete un preprint gratuito dell'articolo scientifico completo [qui](#) o su [arxiv](#).

I dati di GWTC-4.0 sono pubblicamente disponibili sul [sito del Gravitational-Wave Open Science Centre](#).