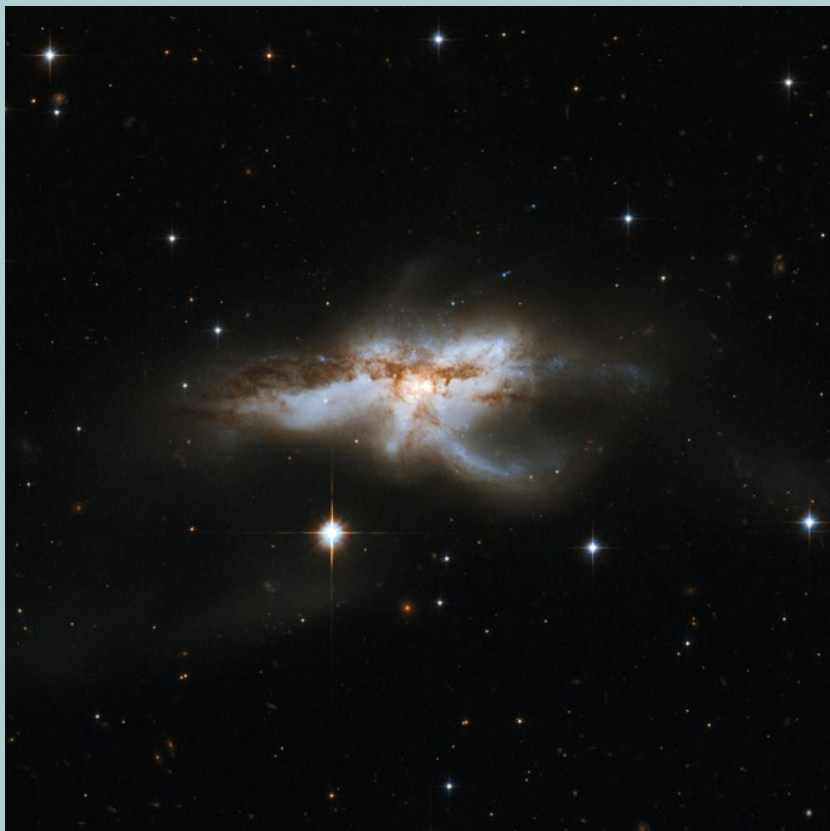


Sinfonia cosmica

L'universo gravitazionale in tutte le sue frequenze

di Monica Colpi e Alberto Sesana



a.
Immagine ottica di NGC6240, una delle più note fusioni tra due galassie. La geometria irregolare indica che il sistema è composto da due galassie in interazione. Osservazioni a raggi X hanno evidenziato la presenza di due buchi neri supermassicci in accrescimento, separati da poche migliaia di anni luce – meno della distanza tra il nostro Sole e il centro della Via Lattea.

Con la missione Lisa (Laser Interferometer Space Antenna) dell’Agenzia Spaziale Europea (Esa), nello spazio, e l’esperimento Pulsar Timing Array (Pta), da terra, studieremo l’universo attraverso le onde gravitazionali emesse da una varietà di sorgenti, al fine di comprendere da una nuova prospettiva l’origine ed evoluzione delle strutture cosmiche, la natura geometrica della gravità e l’espansione dell’universo. Negli ultimi decenni, con i più grandi telescopi da terra e dallo spazio, abbiamo scoperto che l’universo ospita centinaia di miliardi di galassie, elementi di una ragnatela cosmica complessa (il cosiddetto *cosmic web*), composta da filamenti di gas e materia oscura e da immensi vuoti. Una struttura in evoluzione, dove galassie, luoghi di intensa formazione stellare all’interno di aloni di materia oscura, crescono in massa attraverso l’accrescimento di materia, convogliata

lungo i filamenti della rete cosmica da reciproche collisioni, che avvengono nei punti di intersezione fra i filamenti. Oggi sappiamo che in ogni galassia dell’universo sono presenti milioni di buchi neri, esito del collasso gravitazionale di stelle massicce e che al suo centro si trova un “*massive dark object*” (“un oggetto oscuro e massiccio”) di milioni o miliardi di masse solari. Con la scoperta delle onde gravitazionali da parte di Ligo e Virgo, l’esistenza dei buchi neri di origine stellare ha trovato conferma osservativa. In modo analogo, l’esplorazione dell’universo gravitazionale con Lisa e Pta, rispettivamente intorno al milliHz e al nanoHz, ci permetterà di rivelare segnali di *inspiral* (vd. p. 11, ndr) e coalescenza per confermare la natura di questi *massive dark objects*. Sono buchi neri supermassicci?

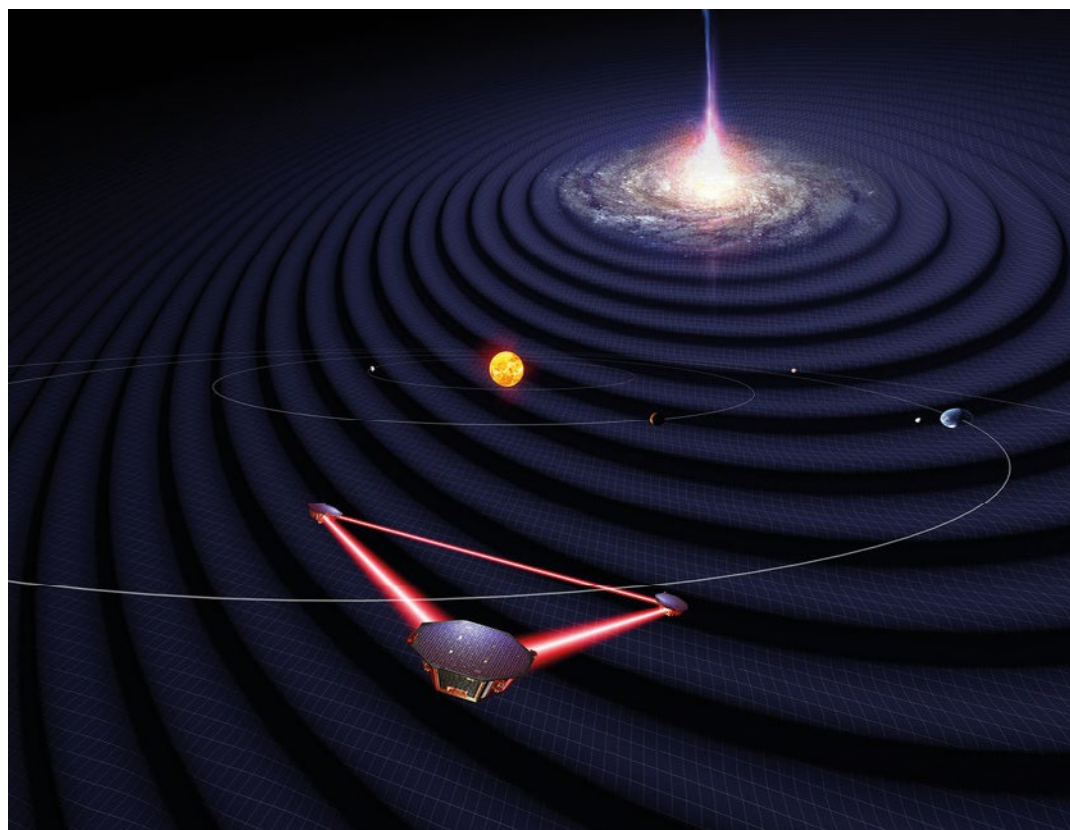
Lisa trasferisce nello spazio il principio dell’interferometria per la rivelazione delle onde gravitazionali sviluppato da Ligo e

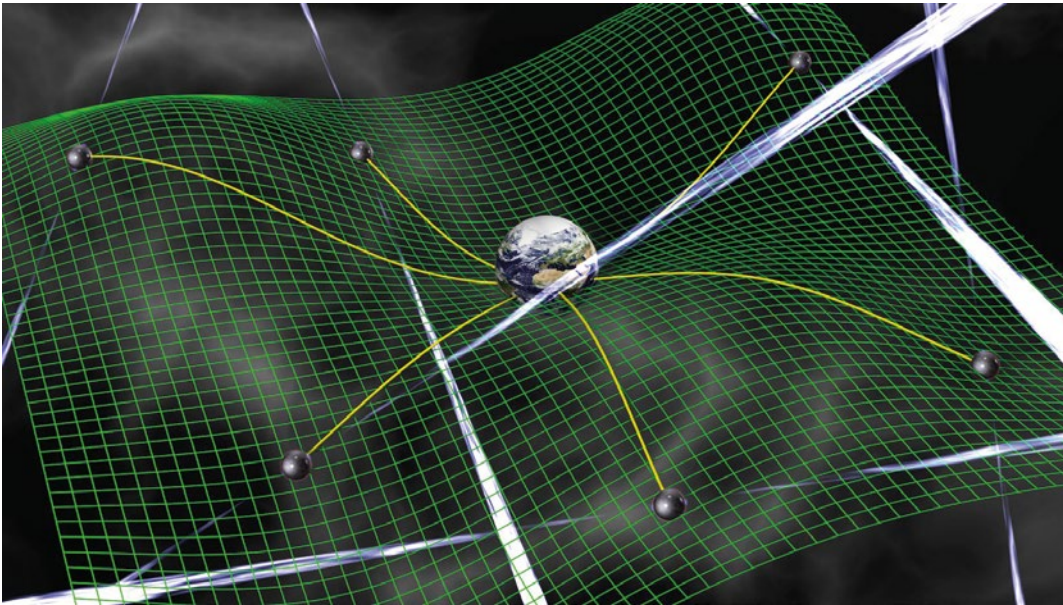
Virgo. L'esperimento è costituito da tre satelliti artificiali in orbita eliocentrica, posti ai vertici di un triangolo equilatero e posizionati a una distanza reciproca di 2,5 milioni di chilometri. Ciascun veicolo spaziale ospita due masse di prova in caduta libera (cioè soggette all'effetto della sola gravità) rivelatrici dell'onda, due telescopi e due laser. Grazie alla quiete dello spazio, in assenza di disturbi ambientali di origine terrestre, come il rumore sismico e quello dovuto alle attività umane, Lisa consentirà la rivelazione di onde di frequenza compresa fra 10^{-4} Hz e 0,1 Hz, misurando oscillazioni della distanza relativa fra le masse di prova dell'ordine del picometro (10^{-12} m). La missione spaziale Esa Lisa Pathfinder (il precursore tecnologico di Lisa che ha fornito dati dal 2015 al 2017) ha verificato con successo le tecnologie necessarie per la costruzione di Lisa, ricreando condizioni di quiete estrema, ovvero riducendo l'ampiezza di accelerazioni spurie fra due masse di prova a livello di frazioni di milionesimo di miliardesimo se confrontate con l'accelerazione

gravitazionale sulla Terra. Lisa potrà rivelare il segnale gravitazionale emesso nella coalescenza di oggetti compatti di milioni di masse solari: ne misurerà masse e spin, confermando l'esistenza dei buchi neri supermassicci al centro delle galassie. Potrà rivelare anche il segnale emesso da buchi neri stellari di decine di masse solari in orbita relativistica attorno a buchi neri supermassicci. Andrà alla ricerca di possibili deviazioni dalla teoria di Einstein o deviazioni legate alla presenza di particelle di materia oscura. Cercherà di scoprire, impressi nella forma dell'onda, segni di fenomeni quantistici che si possono manifestare al bordo degli orizzonti in formazione, per aprire nuove strade verso una teoria di unificazione fra gravità e mondo dei quanti (vd. p. 25 e p. 28, ndr). Una delle domande inevase in astrofisica riguarda l'origine dei buchi neri supermassicci, invocati per spiegare i quasar, sorgenti fra le più brillanti del cielo elettromagnetico. Ci sono evidenze che la crescita ed evoluzione, attraverso

accrescimento di gas e coalescenze, sia avvenuta a partire da "buchi neri seme" di massa intermedia formati nei primi 100-500 milioni di anni dalla nascita dell'universo, di cui non abbiamo evidenza osservativa. Insieme all'Einstein Telescope (vd. p. 31, ndr), Lisa potrà ricostruire la storia di formazione di tutti i buchi neri presenti nell'universo. Lisa è un osservatorio a tutto cielo che non permette localizzazioni accurate delle sue sorgenti, né di creare la loro immagine. Risalire all'ambiente cosmico in cui vivono le sorgenti è possibile solo se il segnale gravitazionale è accompagnato da un segnale elettromagnetico. Nel caso di buchi neri in coalescenza, l'identificazione di una controparte permetterà di scoprire la galassia ospite e il suo *redshift* cosmologico (lo spostamento verso il rosso della luce a causa dell'espansione dell'universo) e di misurare la velocità di propagazione dell'onda gravitazionale con una straordinaria accuratezza. Rivelando molteplici segnali di coalescenza accompagnati da segnali elettromagnetici

b.
Rappresentazione artistica dell'osservazione di onde gravitazionali dallo spazio con l'antenna gravitazionale Lisa, in orbita attorno al Sole. Nell'immagine si vede una galassia lontana, sede di una violenta collisione fra due buchi neri supermassicci, accompagnata da un'intensa emissione di onde gravitazionali che si propagano indisturbate attraverso il cosmo. Dopo un viaggio di miliardi di anni luce le onde, propagandosi alla velocità della luce, raggiungono il sistema solare. Lisa sarà pronta a captarle grazie alle minuscole differenze di fase prodotte nei fasci di luce laser che i tre satelliti si scambiano reciprocamente.





c. Raffigurazione artistica di Pta. Il tessuto dello spaziotempo (rappresentato dal reticolo verde), reso oscillante da un fondo cosmico di onde gravitazionali, modifica le traiettorie (in giallo) percorse dai fasci radio inviati a Terra dalle pulsar. La specifica curvatura delle traiettorie induce correlazioni precise tra i ritardi nei tempi di arrivo del segnale pulsante delle diverse pulsar.

si potrà misurare anche la costante di Hubble (vd. p. 17, ndr). Infine, Lisa potrà scoprire se esiste un fondo cosmologico di onde gravitazionali prodotti nei primissimi istanti di vita dell'universo su scale di energia superiori al TeV.

Se il futuro delle onde gravitazionali a bassa frequenza appartiene a Lisa (la data di lancio è prevista per il 2034), il presente vede i riflettori puntati su Pta. La natura ha infatti creato nello spazio condizioni per permetterci di rivelare onde gravitazionali di bassissima frequenza, comprese fra 10^{-7} e 10^{-9} Hz, disseminando nello spazio interstellare degli orologi cosmici: le pulsar a millisecondo. Si tratta di stelle di neutroni in rapidissima rotazione, i cui impulsi, regolari come la luce emessa da un faro, arrivano all'incirca ogni millisecondo e sono misurati dai più grandi radiotelescopi con precisione confrontabile con quella degli orologi atomici. L'idea di rivelazione è semplice. In assenza dell'onda gravitazionale, i segnali radio di ogni singola pulsar giungono a terra in modo indipendente e non correlato fra loro. Ma se lo spaziotempo è percorso da un'onda gravitazionale, le pulsar e la Terra oscillano all'unisono. Questa oscillazione è impressa nei tempi di arrivo dei segnali radio e più pulsar si osservano (una vera e propria schiera di sorgenti), più elevata diventa la sensibilità del sistema. Pta monitora gli impulsi di alcune decine di pulsar da diversi anni per rivelare onde gravitazionali molto lunghe che si estendono su distanze di alcuni anni luce. Esistono tre progetti che storicamente perseguono questo obiettivo: lo European Pta in Europa, il Parkes Pta in Australia e il NanoGrav in Nord America, che studiano i dati ottenuti da diversi radiotelescopi localizzati nelle varie aree geografiche. Gli sforzi di queste collaborazioni convergono nel progetto denominato International Pta, a cui si sono aggiunti recentemente i due consorzi di Cina e India.

I modelli di formazione delle galassie prevedono che il cielo che può essere investigato con Pta alle bassissime frequenze (dell'ordine del nanohertz) sia dominato da una popolazione cosmica di binarie di buchi neri supermassicci con masse di

miliardi di soli, lontani dalla coalescenza, esito di fusioni fra galassie. È attesa la rivelazione non di un segnale gravitazionale isolato, ma di un fondo cosmico dato dalla sovrapposizione di segnali di onde gravitazionali provenienti da sorgenti lontane. Il fatto più interessante è che la rivelazione di questo segnale è vicino alla portata delle attuali infrastrutture Pta. Recentemente, infatti, NanoGrav ha identificato nei propri dati un segnale comune a tutte le pulsar monitorate, consistente con il segnale gravitazionale previsto dalla teoria. L'osservazione è tuttavia parziale, perché vera discriminante per decretarne l'origine è l'identificazione delle proprietà di correlazione del segnale comune. Nei prossimi anni, ulteriori osservazioni, facilitate dall'utilizzo di nuovi potenti radiotelescopi attualmente in costruzione, come lo Square Kilometer Array, chiariranno la natura di questo segnale che, se confermato, rappresenterebbe una scoperta epocale.

Con Lisa e Pta, e in sinergia con l'Einstein Telescope, esploreremo l'universo gravitazionale nelle diverse frequenze. Osserveremo l'universo ripercorrendo la sua storia, dal Big Bang in poi, comprenderemo la natura degli orizzonti che circondano i buchi neri, la loro origine e, come sempre accade quando si apre una nuova finestra di osservazione, scopriremo sorgenti inaspettate.

Biografia

Monica Colpi e **Alberto Sesana**, fisici dell'Università di Milano Bicocca e membri del Lisa Consortium in ruoli di coordinamento scientifico, dedicano i loro studi alla comprensione dei buchi neri come sorgenti astrofisiche alla loro fenomenologia. Monica Colpi fa parte della collaborazione Virgo, Alberto Sesana del consorzio Pta.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.30.9