

LISA: un osservatorio per le onde gravitazionali nello spazio

Philippe Jetzer Department of Physics, University of Zürich (Switzerland)

Introduzione

La missione LISA (Laser Interferometry Space Antenna) è stata proposta originariamente all'ESA (European Space Agency) da un *team* di ricercatori internazionali, sotto la guida di Karsten Danzmann, nel maggio del 1993 in risposta ad un bando di chiamata per proposte di missioni spaziali nell'ambito del programma scientifico Horizon 2000. Gli studi preliminari indicarono che i costi per una simile missione sarebbero stati di parecchio superiori a quelli previsti per una missione di medie dimensioni così come menzionati nel bando di chiamata. Si decise pertanto di raccomandare la missione come un *cornerstone project* nell'ambito del programma Horizon 2000 Plus, con un *budget* più grande e quindi più realistico [1].

La configurazione prevedeva già allora un'orbita eliocentrica con una formazione triangolare, ottenuta ponendo ognuno dei satelliti con il piano orbitale inclinato, ciascuno con un angolo diverso, rispetto al piano dell'eclittica (vedi Fig. 1). Originariamente, si pensava di mettere due satelliti ad ogni vertice del triangolo equilatero, in seguito però si arrivò alla conclusione che si poteva fare un solo satellite, ma con due telescopi per spedire i raggi LASER e per riceverli, semplificando così la missione.

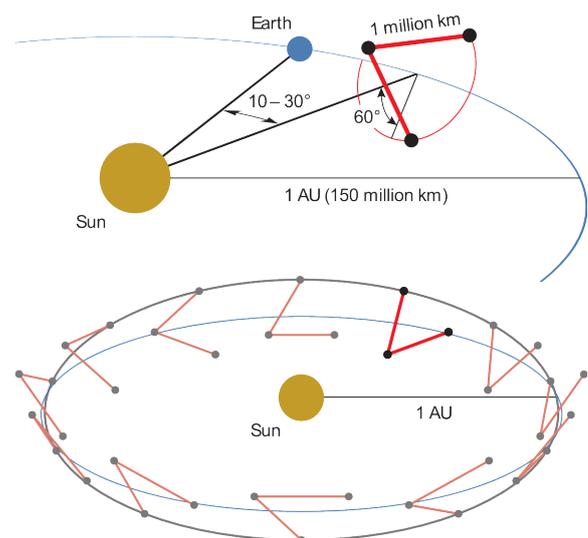


Figura 1: Schema dell'orbita di LISA attorno al Sole ad una distanza di 1 AU. I tre satelliti sono ciascuno su un piano orbitale con un'inclinazione differente rispetto al piano dell'eclittica [2].

Fin dall'inizio degli studi su LISA è parso chiara la necessità di effettuare prima una missione per dimostrare la fattibilità tecnologica di buona parte della strumentazione prevista per LISA. I primi studi per una simile missione sono iniziati nel 1998, e si sono evoluti per poi arrivare alla proposta della missione LISA Pathfinder [3], che è stata approvata dal Science Programme Com-

mittee dell'ESA nel novembre del 2000. Dopo alcune modifiche si è poi arrivati a quella che è stata ridenominata missione LISA Pathfinder (LPF).

La missione LISA Pathfinder

LPF è stato lanciato con successo il 3 dicembre 2015 dalla base di lancio europea di Kourou (Guiana francese) con un razzo Vega (Fig. 2). Dopo sei manovre, che comportavano l'accensio-



Figura 2: Lancio di LISA Pathfinder avvenuto il 2 dicembre 2015 con un razzo Vega dalla base di Kourou (Foto ESA).

ne del razzo ausiliario, LPF ha finalmente raggiunto il suo obiettivo il 22 gennaio 2016, il punto di Lagrange L1, che si trova sulla congiungente Sole-Terra, a circa 1.5 milioni di chilometri dalla Terra (Fig. 3). In tale punto le forze gravitazionali della Terra e del Sole si annullano. L'obiettivo

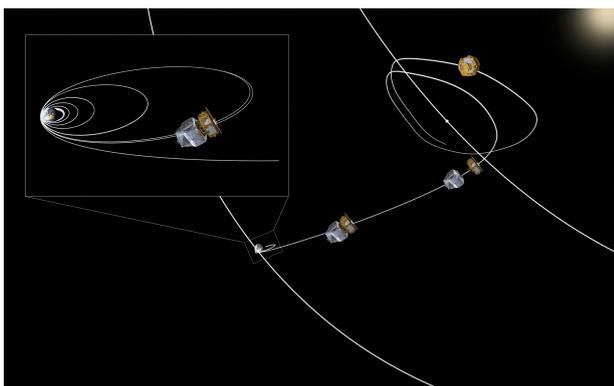


Figura 3: Traiettoria seguita da LPF per raggiungere il punto di Lagrange L1 (credit ESA).

di LPF era di guidare il movimento relativo di due masse in caduta libera quasi perfetta con una precisione senza precedenti necessaria per la missione LISA. Questo obiettivo è stato raggiunto

grazie a tecnologie innovative che utilizzano sensori inerziali. Queste nuove tecnologie non sono solo di importanza cruciale per LISA, ma anche per futuri satelliti dedicati ai test della teoria della Relatività Generale di Einstein, in particolare del principio di equivalenza che sta alla base della teoria. Spesso gli esperimenti di fisica gravitazionale richiedono la misura dell'accelerazione relativa tra masse in caduta libera che si muovono su orbite geodetiche. Nel caso di misure delle onde gravitazionali con rivelatori terrestri gli specchi sospesi con dei pendoli svolgono il ruolo delle masse di prova in un interferometro di Michelson. Lo strumento principale a bordo dell'LPF era il LISA Technology Package (LTP), sviluppato congiuntamente da diversi istituti universitari e industrie europee, comprendente due sensori inerziali attorno a ciascuna massa di prova. Le due masse di prova erano identiche, a forma di cubo, con un lato di 46 mm, composte da una lega di oro e platino con un peso di circa 2 kg ciascuna. Tra i due sensori inerziali vi era un banco ottico così da poter utilizzare l'interferometria LASER per misurare la distanza relativa fra i due cubi, separati da soli 38 cm, con una precisione del picometro (Fig. 4).

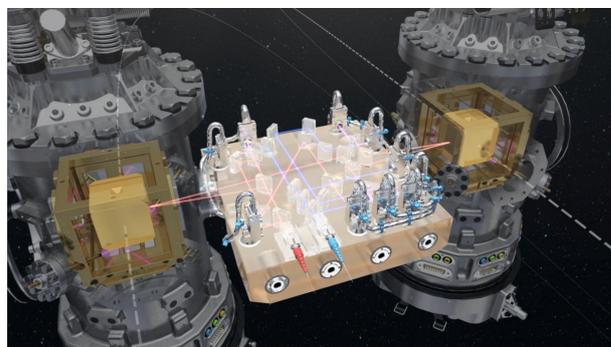


Figura 4: Schema che mostra nell'LPF le due masse di test e in mezzo il banco ottico con il sistema LASER per determinarne la posizione relativa (credit ESA).

Il raggio LASER era riflesso dalla superficie altamente riflettente dei cubi. In tal modo è stato possibile determinare la posizione delle masse di prova rispetto al loro contenitore e, per evitare eventuali collisioni delle masse con le pareti dello stesso, la posizione del satellite veniva leggermente modificata utilizzando dei propulsori che

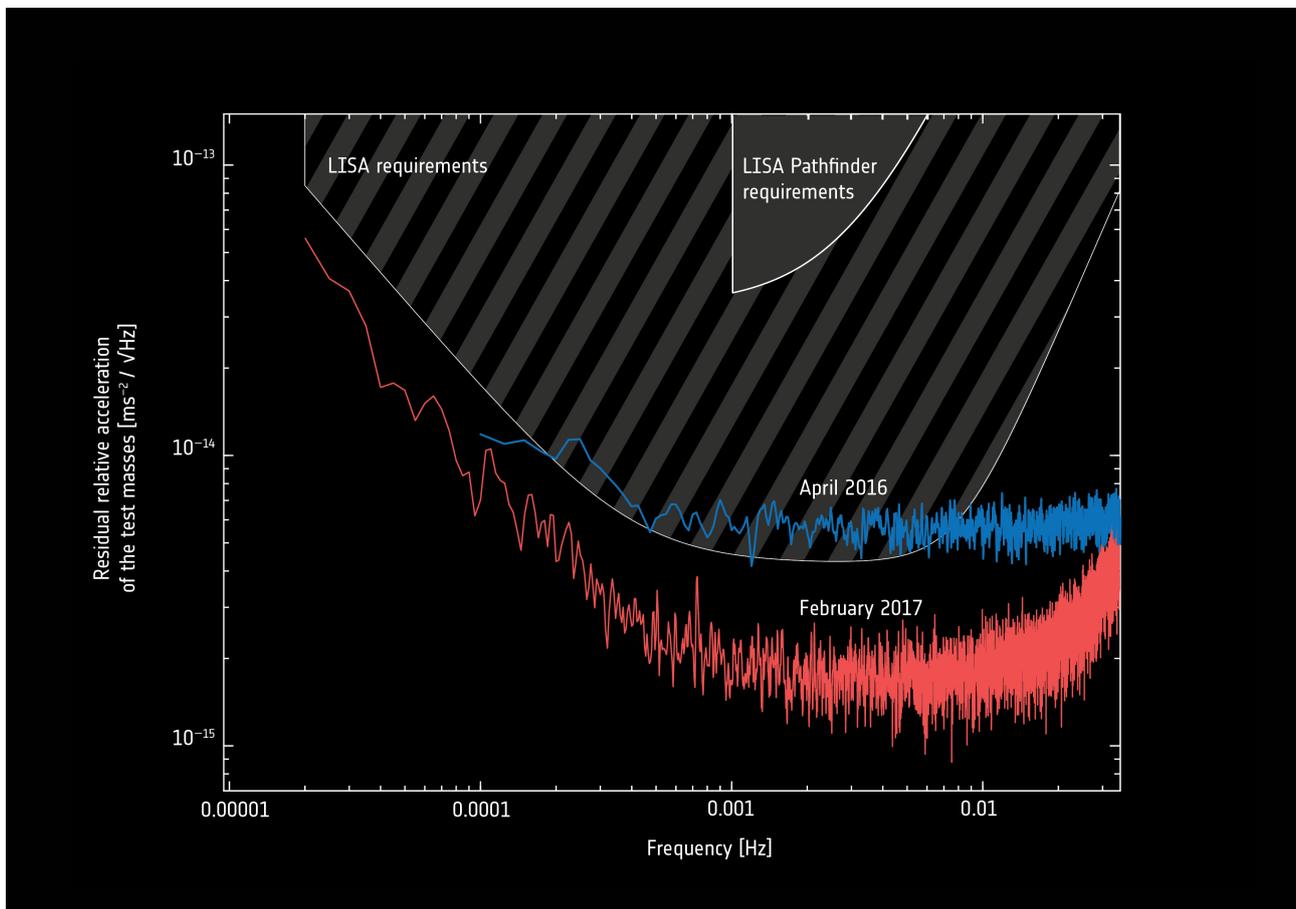


Figura 5: La figura mostra l'accelerazione residua in funzione della frequenza. Questi dati sono stati pubblicati già nell'aprile del 2016 dalla collaborazione LPF [5].

espellevano del gas freddo in modo da generare delle forze dell'ordine dei micro-newton. Questa tecnologia di controllo senza trascinamento (*drag free control*) è stata verificata con successo da LPF e sarà utilizzata in LISA. In tal modo le masse di prova restano su una traiettoria geodetica, che viene modificata unicamente (nel caso ideale), qualora un'onda gravitazionale passa fra le masse di prova, che nel caso di LISA saranno ad una distanza di ca 2.5 milioni di chilometri, mentre nel caso di di LPF era di soli 38 cm. Questa tecnologia chiave per il funzionamento di LISA ha funzionato meglio del previsto in LPF [4, 5] (Fig. 5): le due masse di prova erano in caduta libera sotto l'influenza della gravità con un'accelerazione residua relativa (dovuta a forze esterne non-gravitazionali residue) inferiore a $10^{-14} g$, dove g indica il valore dell'accelerazione gravitazionale alla superficie della Terra (9.81 m/s^2).

Le forze rimanenti, all'origine dell'accelerazione residua che agisce sulle masse di prova, hanno potuto essere per lo più identificate [5] La mis-

sione LPF si è conclusa il 18 luglio 2017, e visto il successo e la scoperta nel frattempo delle onde gravitazionali con i rivelatori terrestri, l'ESA, con la rinnovata partecipazione della NASA, ha preso la decisione di far avanzare rapidamente la missione LISA.

LISA

Nel novembre 2013, l'ESA ha selezionato L'universo gravitazionale [2] come tema scientifico per la missione L3 (dove L sta per *Large Class Missions*). Il 20 giugno 2017, l'ESA ha scelto LISA [6] come missione specifica per la realizzazione della missione L3. Nel frattempo il progetto LISA ha già raggiunto importanti traguardi: alla fine del 2021 è terminata la fase A del progetto durante la quale si studia la sua fattibilità.

The Gravitational Wave Spectrum

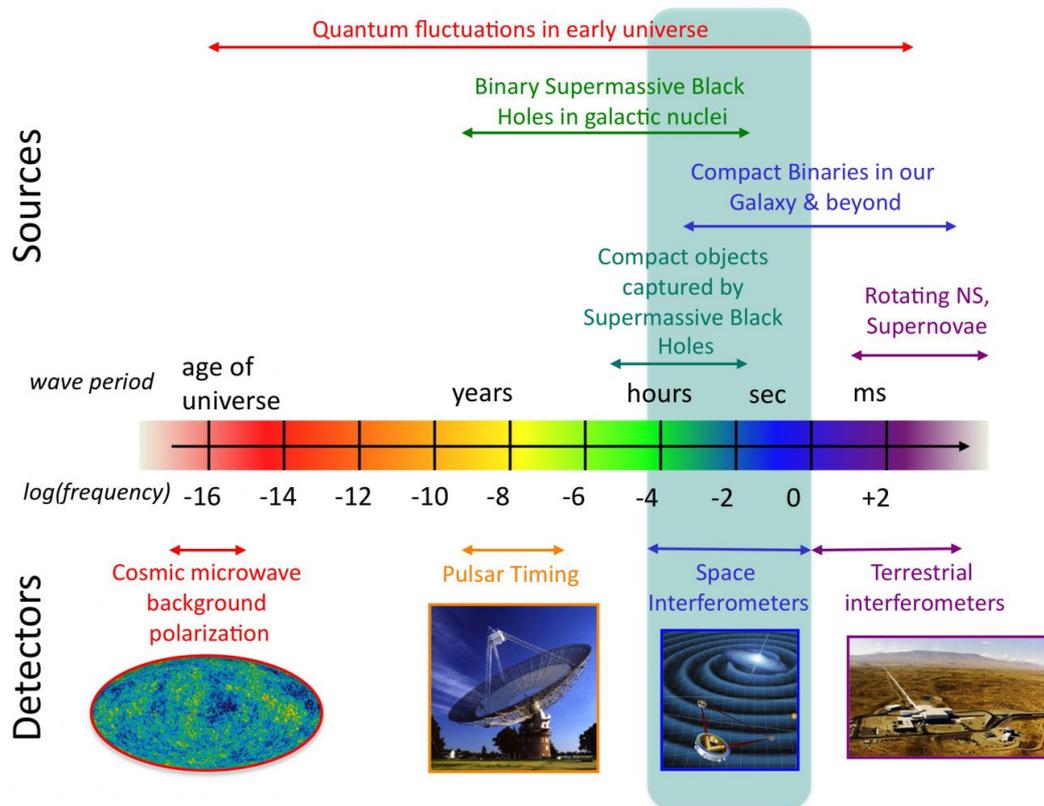


Figura 6: Schema che illustra a dipendenza della frequenza con quale strumentazione potranno essere osservate le onde gravitazionali e la loro sorgente (credit NASA).

Questa fase è terminata con la *Mission Formulation Review* che il progetto ha brillantemente superato confermando dunque la maturità tecnologica della missione. Inoltre, non è stata individuata nessuna problematica in grado di mettere in dubbio il progetto nel suo insieme. A partire dal 2022 la missione è quindi entrata nella fase denominata B1 nel corso della quale sarà fatta una progettazione dettagliata e ulteriormente verificata la fattibilità. Alla fine del 2023 la fase B1 dovrebbe culminare nella cosiddetta *Mission Adoption*, dopodichè nelle successive tappe, denominate B2, C e D, LISA entrerà nelle varie fasi di costruzione e presumibilmente a metà degli anni 2030 avverrà il lancio. Ci vorrà poi circa un anno affinché i 3 satelliti possano raggiungere la loro posizione finale nell'orbita attorno al Sole ad una distanza di circa una Unità Astronomica (AU) dallo stesso per poi poter cominciare con le osservazioni, dopo un'altro periodo di alcuni mesi necessario per la calibrazione della

strumentazione.

La configurazione triangolare dei tre satelliti di LISA a una distanza di circa 2.5 milioni di km l'una dall'altra è ottenuta immettendo ogni satellite su un'orbita attorno al Sole con il piano dell'orbita inclinato rispetto all'eclittica. L'inclinazione sarà diversa per ogni satellite. Questi si troveranno ad una distanza di circa 50 a 65 milioni di km dalla Terra. Per LISA le masse di prova sono costituite da cubi simili a quelli usati per LISA Pathfinder con un peso di 2 kg.

Lo scopo di LISA è il rilevamento e l'indagine di onde gravitazionali con una frequenza inferiore a quella che può essere misurata con gli interferometri terrestri a causa dei disturbi gravitazionali dell'ambiente terrestre (Fig. 6), nell'intervallo da circa 0.1 mHz a circa 1 Hz (Fig. 6). LISA apre così possibilità completamente nuove per studi astrofisici, come ad esempio l'osservazione della fusione di buchi neri supermassicci (nell'intervallo di massa: $10^5 - 10^7 M_{\odot}$) situati

a distanze cosmologiche (Fig. 7).

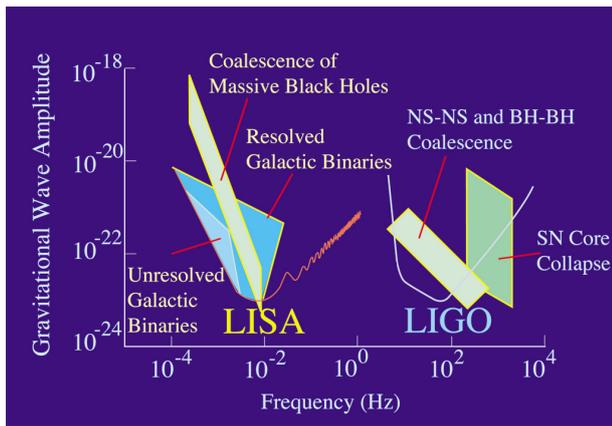


Figura 7: La figura riassume schematicamente le varie sorgenti di onde gravitazionali osservabili con LISA (credit NASA).

La fusione dei buchi neri supermassicci consentirà, tra l'altro, di testare con alta precisione la teoria della Relatività Generale. Si potranno così misurare eventuali deviazioni o stabilirne dei limiti molto forti, ciò che consentirà di verificare o rigettare le teorie alternative della gravità finora proposte.

Obiettivi scientifici di LISA

Attualmente le osservazioni astronomiche indicano che tutte le galassie contengono al loro centro un buco nero massiccio con masse dell'ordine di alcuni milioni a miliardi di masse solari. Anche la nostra galassia contiene un buco nero di circa 4 milioni di masse solari. Recentemente grazie a osservazioni con radiotelescopi distribuiti su tutta la Terra è stato possibile ricostruire una fotografia del buco nero della nostra galassia [7] così come fatto nel caso del buco nero al centro della galassia M87 dell'ammasso della Vergine [8]. Quest'ultimo ha una massa dell'ordine di alcuni miliardi di masse solari. Alcuni di questi buchi neri centrali accrescono della materia che, avvicinandosi all'orizzonte del buco nero, emette radiazione in varie lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico. Denominati con la sigla QSO (per *Quasi Stellar Objects*) sono stati osservati a grande distanza con valori di *red-shift* fino a $z \sim 7$ e oltre, e ciò mette in evidenza che i buchi neri massicci si sono formati meno di un miliardo di anni dopo il big bang. LISA sarà in grado di osservare le collisioni di questi bu-

chi neri a grandissima distanza corrispondente a grandi valori di z (Fig. 8). Si spera così di poter comprendere meglio come questi buchi neri si sono formati e il loro influsso sulla formazione delle galassie, nonché di capire come si sono evoluti nel tempo. Si pensa che attorno ai buchi neri

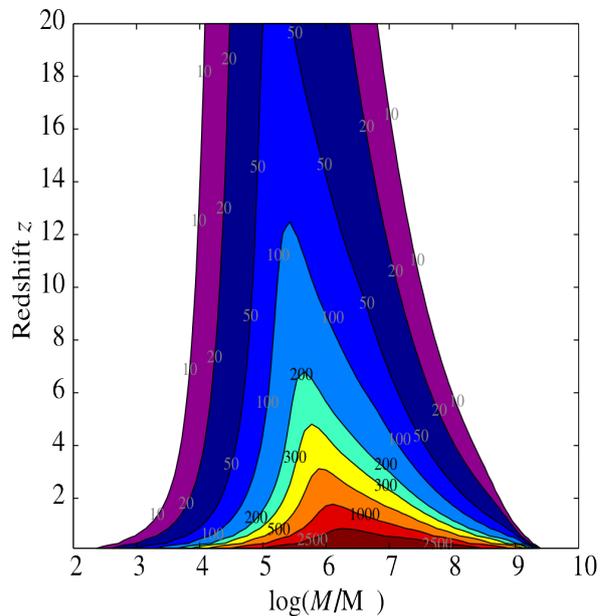


Figura 8: La figura mostra la distanza (espressa in termini di *phase-shift* z) alla quale sono osservabili da LISA le fusioni di buchi neri massicci in dipendenza della loro massa. I diversi contorni corrispondono ad un valore diverso di segnale su rumore [6].

massicci che si trovano al centro delle galassie si possano essere formati anche dei buchi neri o stelle di neutroni in seguito all'evoluzione stellare nelle regioni centrali delle galassie. Le masse di questi oggetti sono dell'ordine di alcune masse solari. Essi sono in orbita attorno al buco nero centrale e la loro distanza decresce per via della radiazione gravitazionale emessa, che potrà essere osservata da LISA. Queste configurazioni sono denominate EMRI (*Extreme Mass Ratio Inspirals*) dato che il rapporto tra la massa dell'oggetto compatto in orbita attorno al buco nero centrale e quest'ultimo è estremamente piccolo. Man mano che l'oggetto compatto si avvicina al buco nero centrale si trova a distanza sempre minore dall'orizzonte del buco nero centrale (oltre il quale ogni segnale non potrà più lasciare il buco nero centrale e quindi non sarà più osservabile). L'osservazione degli EMRI permetterà di verificare con precisione la teoria della Relatività Generale e in particolare di testare se il buco ne-

ro centrale è descritto dalla metrica di Kerr, che descrive buchi neri con rotazione.

Un'altra classe di oggetti che sarà possibile osservare con LISA è costituita dai sistemi binari stellari ultracompatti, in particolare di nane bianche, presenti nella nostra galassia. Attualmente, più di 50 di questi sistemi sono conosciuti nella galassia e alcuni di questi hanno periodi orbitali inferiori ad una decina di minuti. Questi sistemi emettono onde gravitazionali con frequenze attorno al mHz, e quindi sono osservabili con LISA. Si pensa che nella nostra galassia vi siano moltissimi sistemi binari stellari ultracompatti, probabilmente dell'ordine di qualche milione. Poter determinare una stima precisa del loro numero permetterà di comprendere meglio la loro distribuzione spaziale nella galassia nonché dettagli sull'evoluzione stellare e sulla struttura della galassia stessa.

Durante le fasi iniziali del Big Bang sono state prodotte onde gravitazionali denominate primordiali. La loro forma, frequenza ecc. dipendono dai dettagli del Big Bang e non è quindi possibile fare delle previsioni dettagliate per sapere se LISA sarà o meno in grado di rivellarle. Tuttavia, è possibile che con LISA, se non proprio osservarle, si potrà porre dei limiti, ciò che permetterà in ogni caso di fare progressi nella comprensione delle leggi della fisica che vigevano e hanno regolato il Big Bang. In effetti, grazie alle osservazioni di LISA si spera di poter comprendere meglio molti aspetti delle leggi fondamentali della natura: si potrà ad esempio avere informazioni più precise sulla velocità di propagazione delle onde gravitazionali, che si pensa sia pari a quella della luce. Già oggi le osservazioni della coalescenza di due stelle di neutroni nell'agosto del 2017 fatte da LIGO/Virgo [9, 10] hanno permesso di mettere dei limiti molto stringenti ad eventuali deviazioni rispetto alla velocità della luce, tuttavia si vorrebbe migliorare sensibilmente questo limite. Vi è inoltre la questione se il gravitone, la particella associata alle onde gravitazionali, esista o meno e se abbia una massa. Il limite attuale per la sua massa è $m_g < 4 \times 10^{-22} eV$. Con LISA si pensa di poter arrivare ad un limite $m_g < 4 \times 10^{-30} eV$, quindi molto più preciso o addirittura riuscire a determinarne la massa qualora questa fosse diversa da zero e con un valore superiore al limite di LISA. Trovare, ad esempio,

che il gravitone ha una massa piccolissima, ma diversa da zero, sarebbe una chiara indicazione del fatto che la teoria della Relatività Generale di Einstein andrebbe modificata in alcuni suoi aspetti.

Oltre a questi esempi descritti sopra vi è poi sempre la possibilità di scoprire cose nuove che attualmente neppure contempliamo. LISA apre quindi delle possibilità enormi per ampliare le nostre conoscenze su molti aspetti dell'Universo e sulle leggi fondamentali della natura. Naturalmente, quando LISA sarà funzionante in orbita vi saranno altri strumenti, sia a Terra che nello spazio, che potranno eventualmente fornire ulteriori informazioni su alcuni eventi osservati da LISA. In particolare eventi di collisione fra buchi neri supermassicci. Se di alcuni di questi eventi si potesse, ad esempio con un satellite per l'osservazione delle sorgenti nell' X , avere anche dati in bande elettromagnetiche (nell' X e altro), combinando le misure, così come è stato il caso per l'osservazione nell'Agosto del 2017 della collisione di due stelle di neutroni, si potrebbero compiere progressi notevoli nella comprensione dei buchi neri stessi, dell'ambiente in cui si trovano, e si potrebbe determinare con grande precisione la costante di Hubble [11]. Il valore di quest'ultima è ancora oggi oggetto di dibattito in quanto in base al metodo utilizzato per misurarla si ottengono valori leggermente diversi. Ciò che potrebbe essere dovuto a errori sistematici nei metodi utilizzati o indicare nuovi aspetti dell'espansione dell'Universo finora non conosciuti. Poter determinare la costante di Hubble in modo preciso con un metodo totalmente diverso da quelli finora utilizzati potrebbe chiarire la situazione.

La scoperta delle onde gravitazionali nel 2015 [12], previste già nel 1916 da Einstein [13, 14], ha finalmente aperto una nuova finestra per esplorare l'Universo. Siamo solo all'inizio dell'astronomia a onde gravitazionali ma le prospettive sono estremamente promettenti per fare importanti progressi e nuove scoperte nei prossimi decenni sia utilizzando i rivelatori attuali di onde gravitazionali terrestri e la prossima generazione, quali ad esempio l'Einstein Telescope, progetto Europeo di rivelatore di terza generazione, o di LISA che aprirà un'ulteriore finestra per l'osservazione di onde gravitazionali in frequenze inaccessibili

da Terra.



- [1] *LISA, A Cornerstone Project in ESA's long term space science programme Horizon 2000 Plus*, Pre-Phase A Report (December 1995) (ESA).
- [2] P. Amaro-Seoane et al., eLISA Consortium, *The Gravitational Universe*, arXiv:1305.5720
- [3] S. Vitale et al. *LISA and its in-Flight Test Precursor on SMART-2*, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 110 (2002) 209.
- [4] M. Armano et al., the LISA Pathfinder collaboration, *Sub-Femto- g Free Fall for Space-Based Gravitational Wave Observatories: LISA Pathfinder Results*, Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 231101.
- [5] M. Armano et al., the LISA Pathfinder collaboration, *Beyond the Required LISA Free-Fall Performance: New LISA Pathfinder Results down to 20 μ Hz*, Phys.Rev.Lett. 120 (2018) 061101.
- [6] P. Amaro-Seoane et al., the LISA Collaboration, *Laser Interferometer Space Antenna*, arXiv:1702.00786
- [7] K. Akiyama, the Event Horizon Telescope Collaboration, *First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way*, Astrophys. J. Letters 930 (2022) L12.
- [8] K. Akiyama, The Event Horizon Telescope Collaboration, *First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole*, Astrophys. J. Letters 875 (2019) L1.
- [9] B. P. Abbott et al., LIGO Scientific and Virgo Collaborations, *GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral*, Phys. Rev. Lett. 119 (2017) 161101.
- [10] B. P. Abbott et al., LIGO Scientific and Virgo Collaborations, *Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger*, Astrophys. J. Letters 848 (2017) L12.
- [11] B. P. Abbott et al., LIGO Scientific and Virgo Collaborations, *A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant*, Nature 551 (2017) 85.
- [12] B.P. Abbott et al., LIGO Scientific and Virgo Collaborations, *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, Phys.Rev.Lett. 116 (2016) 061102.
- [13] A. Einstein *Naherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*, Sitzungsberichte der Koniglich Preussischen Akademie der Wissenschaften Berlin. part 1 (1916) 688.
- [14] A. Einstein *Uber Gravitationswellen*, Sitzungsberichte der Koniglich Preussischen Akademie der Wissenschaften Berlin. part 1 (1918) 154.



Philippe Jetzer: ha fatto gli studi di fisica e poi conseguito il dottorato all'ETH di Zurigo nel

1985. È stato poi post-doc all'Università di Ginevra, al Fermilab a Chicago e al CERN di Ginevra. Dal 1990 è attivo al dipartimento di fisica dell'Università di Zurigo dove è professore ordinario di fisica. Si è occupato di diverse tematiche in astrofisica, tra cui la natura della materia oscura e le lenti gravitazionali, nonché in Relatività Generale. A partire dal 2003 è nella collaborazione LISA Pathfinder (di cui è stato nel Science Team dell'ESA) e LISA (membro del *board* e del Science working team dell'ESA) e la sua attività di ricerca è focalizzata sulle onde gravitazionali.

