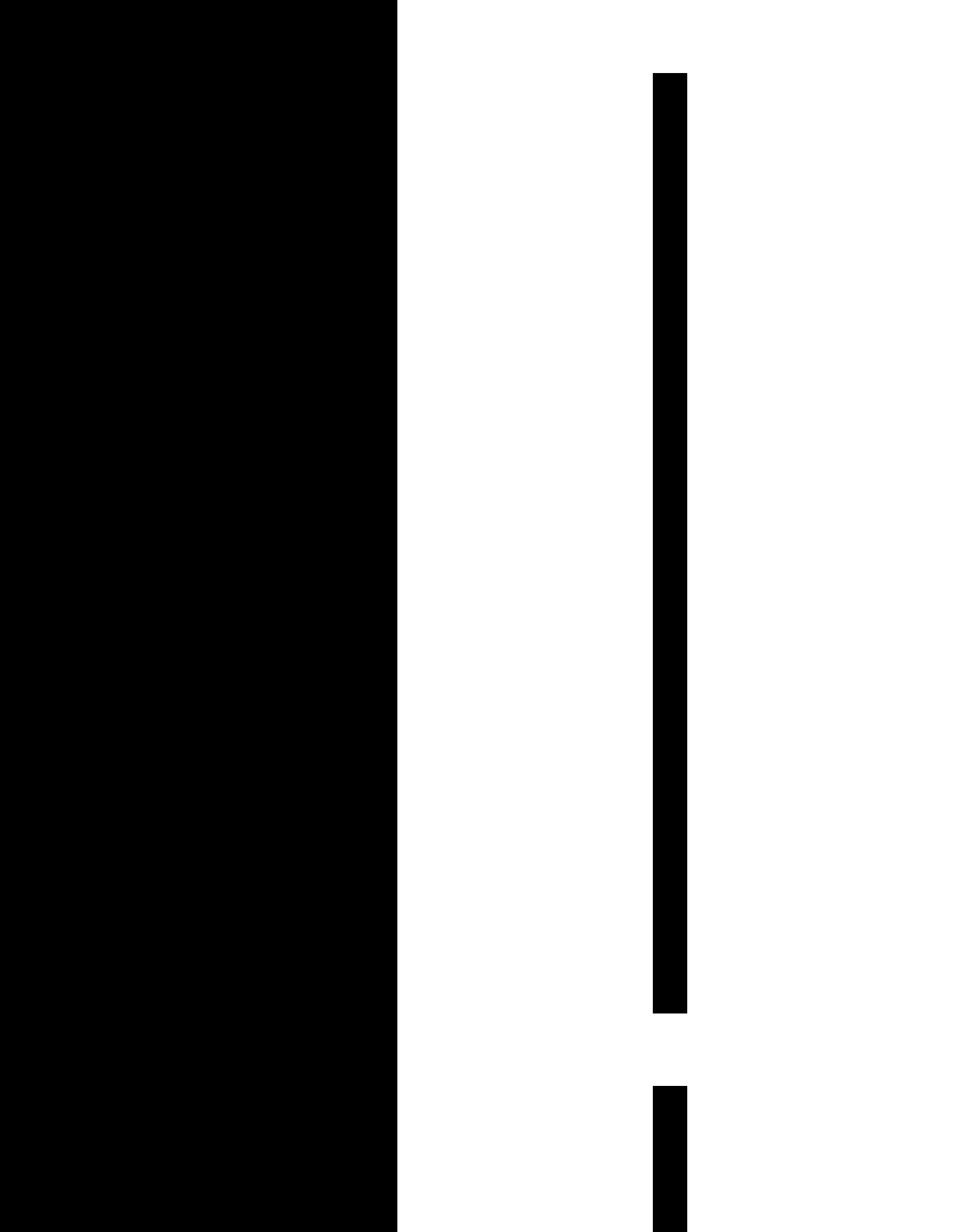


[spazio]

anno 18 numero **34** / 04.23

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Care lettrici e cari lettori,

La comprensione dell'universo e della sua evoluzione è strettamente correlata alla conoscenza delle leggi della fisica fondamentale. Spazio e fisica fondamentale sono infatti legati a doppio filo: se, come ha detto il premio Nobel Luis Álvarez, la moderna fisica delle particelle è iniziata con l'esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni, il muone da scoprire è stato gentilmente fornito dall'interazione con l'atmosfera dei raggi cosmici primari provenienti dallo spazio. Gli stessi raggi cosmici studiati nei primi anni '50 in quello che è stato forse il primo laboratorio dell'INFN, il laboratorio della Testa Grigia sul Plateau Rosa, e poi, pochi anni dopo, inviando le emulsioni nell'alta atmosfera su palloni, precursori degli odierni rivelatori nello spazio. Lo studio delle particelle elementari ha poi preso la strada degli acceleratori, che ha portato nell'arco di alcuni decenni al modello standard delle interazioni fondamentali: quello che, insieme alla relatività generale, costituisce la base teorica del modello cosmologico più accreditato, il modello Λ CDM.

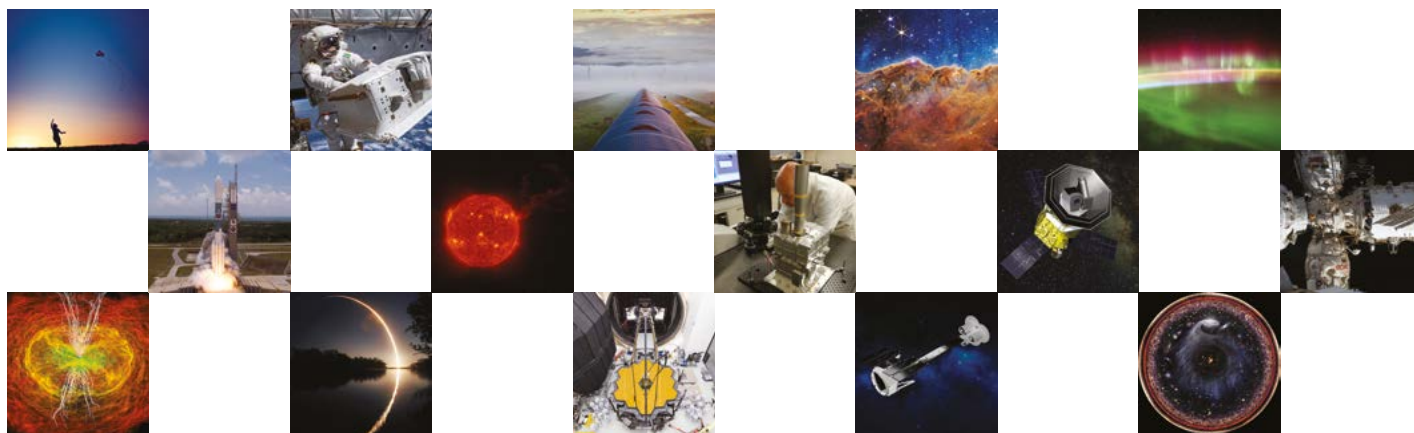
Dallo spazio, quindi, alle interazioni fondamentali, per tornare all'universo e alla cosmologia e probabilmente ancora indietro. Sì, perché il modello Λ CDM non si accontenta di ciò che il modello standard gli mette a disposizione: servono nuove particelle per la materia oscura, di cui si osservano gli effetti gravitazionali, nuovi meccanismi per la generazione dell'asimmetria osservata tra materia e antimateria, e non si sa bene cosa per ricoprire il ruolo dell'energia oscura responsabile dell'espansione accelerata dell'universo. In effetti la nuova fisica che si cerca agli odierni acceleratori di particelle è in buona parte motivata da esigenze

cosmologiche. Inoltre, le osservazioni di interesse cosmologico sono una palestra per la relatività generale, per verificarne la validità su larga scala e in condizioni di campo gravitazionale forte, nella speranza anche di ottenere indicazioni sul comportamento della gravità in regime quantistico.

Oltre all'evidente interesse intrinseco, dunque, ci sono importanti argomenti di fisica fondamentale che spingono a migliorare e consolidare le osservazioni astrofisiche, utilizzando anche le nuove opportunità dell'astronomia multimessaggera. La possibilità di fare esperimenti su satellite è cruciale: ci sono infatti misure di grande interesse astrofisico e cosmologico che non si possono effettuare con gli esperimenti a terra. L'INFN contribuisce a queste ricerche con la sua notevole esperienza nel campo dei rivelatori di particelle, degli interferometri e dell'analisi dei dati, e con il forte impegno dei suoi teorici. Le presentazioni che troverete in questo numero di "Asimmetrie" non pretendono di essere esaustive, né di coprire tutte le attività che vedono coinvolto il nostro Istituto. Ma vi permetteranno di scoprire la ricchezza della fisica fondamentale che si fa nello spazio e le sue affascinanti prospettive.

Buona lettura.

Antonio Zoccoli
presidente INFN



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Registrazione del Tribunale di Roma numero 435/2005 del 8 novembre 2005. Rivista pubblicata da INFN.

Semestrale, anno 18, numero 34, aprile 2023

direttore editoriale

Antonio Zoccoli, *presidente Infn*

direttore responsabile

Catia Peduto

direttore comitato scientifico

Vincenzo Barone

comitato scientifico

Nicolao Fornengo
Giuliana Galati
Sandra Leone
Paolo Pani
Paolo Valente

redazione

Matteo Massicci

hanno collaborato

Luca Baldini, Roberto Battiston, Stefania Maria Beolè, Elisabetta Bissaldi, Ignazio Ciufolini, Rita Dolesi, Matteo Duranti, Stefano Dusini, Beatrice Fraboni, Giovanna Giardino, Roberto Iuppa, Massimiliano Lattanzi, Marco Pallavicini, Lorenzo Pinna, Luca Stanco

contatti redazione

INFN Ufficio Comunicazione
Piazza dei Caprettari 70
I-00186 Roma
T +39 06 6868162
comunicazione@presid.infn.it
www.infn.it

impaginazione

Hylab

stampa

Tmb Stampa srl



su carta certificata FSC
carta interno:
gardapat bianca 13 da 135 gr/m²
carta copertina:
garda matt art da 250 gr/m²

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'INFN, proprietario della pubblicazione.

Finita di stampare nel mese di aprile 2023.
Tiratura 17.000 copie.

come abbonarsi

L'abbonamento è gratuito.

Per abbonarsi compilare l'apposito form sul sito www.asimmetrie.it

In caso di problemi contattare la redazione all'indirizzo comunicazione@presid.infn.it

sito internet

Asimmetrie 34 e tutti i numeri precedenti della rivista sono disponibili anche online su www.asimmetrie.it

e-magazine

Asimmetrie è anche disponibile in versione digitale, ricca di ulteriori contenuti multimediali, come app di iOS e Android sull'Apple Store e nel Google Play Store.

crediti iconografici

Foto copertina © Oran Tantapakul / Adobe Stock // foto p. 4 © Leon Truong / Getty Images; fig. b p. 5 © Pablo Carlos Budassi-Wikipedia; fig. c p. 7 © EGO Massimo D'Andrea; fig. d p. 8 © NASA; fig. e p. 9 © Jordan Sirokie // fig. pp. 10-11 © Hylab/Asimmetrie-INFN// fig. a p. 12 © NASA Jerry Cannon, Robert Murray; fig. b p. 13 © NASA DOE Fermi LAT Collaboration; fig. c p. 14 © L. Rezzolla (GU AEI) & M. Koppitz (AEI Zuse) // fig. a p. 15 © NASA; fig. b p. 16 © INFN; fig. c p. 17 © Hylab/Asimmetrie-INFN // fig. a p. 18 © NASA, ESA, CSA, STScI, Megan Reiter (Rice University), with image processing by Joseph DePasquale (STScI), Anton M. Koekemoer (STScI); fig. b p. 19 © NASA/Chris Gunn//fig. a p. 20 © ESA-CNES-Arianespace / Optique Vidéo du CSG - L. Mira; fig. b p. 21 © ESA Planck; fig. c p. 22 © JAXA // fig. a p. 23 © CERN; fig. b p. 24 © NASA; fig. 1 p. 25 © NASA, Mini-EUSO collaborazione e Hylab/Asimmetrie-INFN // fig. a p. 26 © ESO; fig. b p. 27 © Hylab/Asimmetrie-INFN; fig. c p. 28 © ESA // fig. a p. 29 © NASA GSFC; fig. 1 b p. 30 © EHT collaboration; fig. c p.31 Ignazio Ciufolini // fig. a p. 32 © ESA; fig. b p. 33 © Hylab/Asimmetrie-INFN; fig. 1 p. 34 © Nasa Apollo Project // fig. a p. 35 © NASA Bill Ingalls; fig. b p. 36 © Hylab/Asimmetrie-INFN; fig. c p. 37 © UNIBO// fig. a p. 38 © Solar Orbiter EUI Team ESA & NASA; fig. b p. 39 © NASA // fig. a p. 40 © NASA; fig. b p. 41 © Hylab/Asimmetrie-INFN // fig. a p. 42 © ESA; fig. b p. 43 NASA // fig. a p. 44 © RAI; fig. b p. 45 © dpa picture alliance / Alamy Stock Photo // figg. a p. 46 © NASA// fig. p. 48 ©25 A. Nagar/Asimmetrie-INFN.

Ci scusiamo se, per cause del tutto indipendenti dalla nostra volontà, avessimo ommesso o citato erroneamente alcune fonti.

as

34 / 04.23

[spazio]

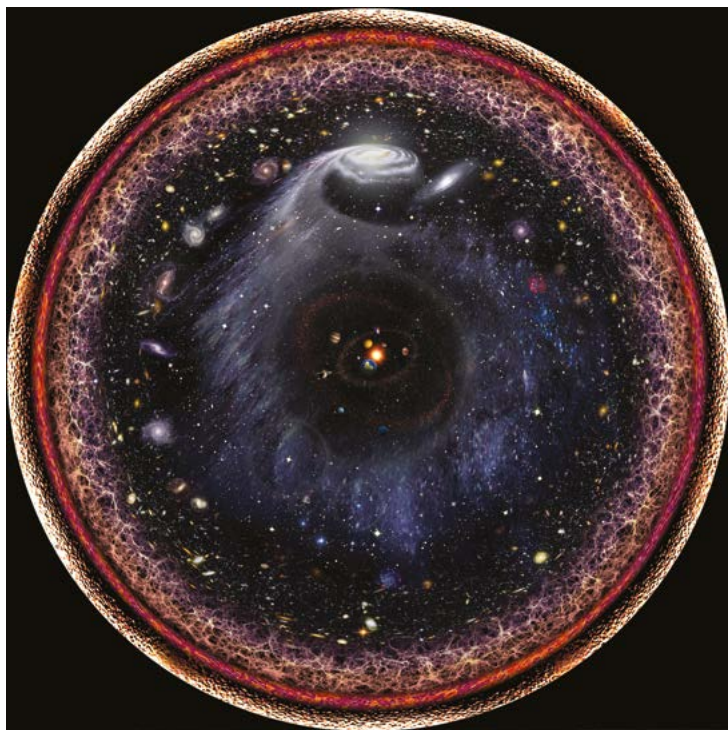
Laboratori in orbita di Marco Pallavicini	4	[as] riflessi Un nuovo sguardo sulla Terra di Stefania Maria Beolé e Roberto Iuppa	38
Bagliori nel buio di Elisabetta Bissaldi	12	[as] intersezioni La <i>new space economy</i> di Roberto Battiston	40
Radiografia del cosmo di Luca Baldini	15	[as] traiettorie AMS a cuore aperto di Matteo Massicci	42
Ai confini dell'universo di Giovanna Giardino	18	[as] radici Quella volta a Cape Canaveral... di Lorenzo Pinna	44
Un'eco lontana di Massimiliano Lattanzi	20	[as] visioni Ho visto un wguehdbb! di Giuliana Galati	46
Poca ma buona di Matteo Duranti	23	[as] lampi	47
Luce sull'energia oscura di Stefano Dusini e Luca Stanco	26	[as] segni	48
Einstein alla prova di Ignazio Ciufolini	29		
Lisa dagli occhi laser di Rita Dolesi	32		
Mal di spazio di Beatrice Fraboni	35		

Laboratori in orbita

Ricerche di fisica fondamentale nello spazio

di Marco Pallavicini





a.
Rappresentazione artistica dell'universo osservabile
(opera di Pablo Carlos Budassi).

Lo spazio, inteso come punto privilegiato d'osservazione del cosmo, perché non disturbato dagli effetti di assorbimento o aberrazione atmosferici, oppure come luogo dove svolgere esperimenti impossibili a terra, svolge un ruolo essenziale nella ricerca in fisica. L'indagine fisica del mondo, infatti, sin dagli albori della scienza moderna, ha seguito due strade distinte che nelle ricerche spaziali e astrofisiche si fondono in modo sinergico: una di esse, antica come l'umanità, è fondata sull'osservazione passiva del cielo al fine di carpirne leggi e regolarità; l'altra, propriamente sperimentale, desume le leggi fisiche dall'interpretazione teorica di esperienze controllate e riproducibili in laboratorio. Sebbene entrambe abbiano avuto importantissimi e antichissimi precursori, queste due vie hanno avuto in Galileo Galilei il moderno rifondatore e, da allora, hanno camminato insieme.

Nel corso dei secoli successivi nessuna delle due vie ha prevalso o ha potuto assumere un ruolo preminente. Continuiamo a scoprire nuove proprietà del mondo fisico attraverso l'osservazione del cosmo, oggi rinforzata e ampliata dal paradigma multimessaggero, per il quale guardiamo l'universo avvalendoci non solo dell'intero spettro elettromagnetico dalle onde radio ai raggi gamma, ma anche di nuove sonde come neutrini e onde gravitazionali. Ma continuiamo anche ad aver bisogno di "sensate esperienze" per comprendere e riprodurre i fenomeni fisici, essendo la mera osservazione spesso insufficiente a capire ciò che osserviamo, ed essendo l'approccio sperimentale controllato – quando è possibile – assai più efficace.

La scoperta del mondo microscopico delle particelle elementari ha rinforzato questo legame, arricchendolo con la

consapevolezza che processi fisici che avvengono su distanze infinitesime sono la chiave per comprendere l'universo. Non solo nessuno oggi dubita che le leggi fisiche siano le stesse ovunque nel cosmo, ma abbiamo la certezza che la fisica microscopica, scoperta per mezzo della radiazione cosmica e poi sviluppata agli acceleratori di particelle, sia alla base del funzionamento delle stelle, delle galassie e dei meccanismi fisici che hanno dato origine all'universo e all'evoluzione della vita.

Nel mezzo secolo appena trascorso entrambe le strade hanno raggiunto risultati straordinari, sviluppando quasi in parallelo due "modelli standard", teorie che descrivono accuratamente gli ambiti a cui si applicano. Il modello standard delle particelle elementari, la teoria fisica che spiega (finora) ogni fenomeno microscopico conosciuto regolato dalle forze elettromagnetiche, nucleari deboli e forti, ha visto il suo trionfo nel 2012 con la scoperta del bosone di Higgs, che ha completato la costruzione della teoria e coronato decenni di straordinari esperimenti e profondissime intuizioni teoriche. Il modello standard sintetizza la nostra conoscenza attuale della materia ordinaria e delle leggi fisiche che la governano e, coadiuvato dalla teoria einsteiniana della gravitazione, pone le fondamenta, seppur in modo ancora incompleto, della comprensione del cosmo.

Tale comprensione ha anch'essa avuto un recente prodigioso sviluppo, a partire dagli anni '20, con la scoperta di Hubble dell'espansione isotropa dell'universo e poi, soprattutto dopo gli anni '60, con la scoperta del fondo cosmico a microonde (CMB – Cosmic Microwave Background) e l'avvento di tecniche astronomiche anche satellitari che hanno portato l'occhio umano ai confini dell'universo osservabile. Queste osservazioni, coadiuvate con lo sviluppo della teoria del Big



b.
Vista esterna di uno dei due bracci dell'interferometro gravitazionale Virgo.

Bang e dell'applicazione della fisica delle particelle elementari e della fisica nucleare a esso, hanno condotto allo sviluppo della teoria Big Bang- Λ CDM (Lambda Cold Dark Matter, vd. in Asimmetrie n. 30 p. 17, ndr), uno schema teorico che potremmo chiamare "il modello standard cosmologico", anche se assai meno fondato e soddisfacente di quello delle particelle elementari.

La teoria Big Bang- Λ CDM spiega quantitativamente quasi ogni proprietà cosmologica osservabile, seppur postulando l'esistenza di tre elementi fisici *ad hoc* che non sono spiegabili in termini del modello standard delle particelle e che quindi, per ora, non hanno fondamento nelle leggi fisiche note: l'esistenza di una componente importante di materia oscura fredda (*cold dark matter*), ovvero lenta e catturata dai campi gravitazionali al momento della formazione delle principali strutture dell'universo, che contribuisce in modo evidente alla dinamica di galassie, *cluster* di galassie e alla formazione delle strutture primordiali; l'esistenza di una costante cosmologica (Λ) di valore inspiegabilmente piccolo o in alternativa di una forma di energia oscura dalle proprietà fisiche ignote, che rende conto sia dell'accelerazione dell'espansione cosmica a grande distanza sia della densità critica necessaria a

spiegare l'apparente geometria euclidea piatta dello spazio; e, infine, l'ipotesi che per qualche ragione nei primissimi istanti del Big Bang l'antimateria sia scomparsa, dando luogo a un universo fatto solo di materia barionica, materia oscura ed energia oscura, con una piccola, significativa e ancora sconosciuta componente di neutrini.

La fisica nello spazio, sia per mezzo di nuovi strumenti osservativi sia portando in ambiente spaziale veri e propri apparati sperimentali, è uno dei modi per affrontare i problemi che questi scenari pongono. I due modelli standard sono infatti parzialmente soddisfacenti nei loro rispettivi ambiti, ma totalmente inadeguati se messi insieme. Il modello standard delle particelle – per come oggi lo conosciamo – non ci dice di che cosa possa esser fatta la materia oscura, non incorpora in modo coerente la gravitazione – la quale per ora resta nella formulazione classica di Einstein senza legami chiari con il mondo quantistico – e non offre alcun meccanismo che spieghi la scomparsa dell'antimateria. Un ulteriore problema a sé stante è costituito dall'energia oscura, la quale, se interpretata in termini di costante cosmologica pura, ha un valore insensatamente piccolo per essere messo in relazione a una teoria di campo quantistica,

c.
Lo shuttle Endeavour in procinto di effettuare, nel maggio del 2011, l'attracco e la consegna di AMS-02, visibile all'interno della stiva di carico del velivolo, a bordo della Stazione Spaziale Internazionale nel corso della missione STS-134.



mentre, se interpretata in termini di un nuovo campo dinamico, rende il mistero ancora più fitto. Per non parlare del fatto che le evidenze sia della materia oscura sia dell'energia oscura sono tutte di origine gravitazionale ed esiste quindi la possibilità – poco popolare e non facilmente conciliabile con i dati osservativi astronomici – che siano entrambe artefatti di una teoria della gravitazione inadeguata. Anche la teoria LCDM deve affrontare le sue difficoltà: oltre a postulare l'esistenza di elementi fisici ancora sconosciuti, le tensioni ormai evidenti tra le diverse determinazioni della costante di Hubble lasciano intravedere, almeno potenzialmente, problemi importanti.

Questo quadro motiva ampiamente la necessità di volgere lo sguardo al cosmo non solo per chi nutre interessi astronomici e astrofisici ma anche per chi si occupa di fisica fondamentale. Non v'è dubbio che la soluzione dei problemi sopracitati non potrà che venire da un approccio combinato, dove ricerche dirette di laboratorio (ricerca diretta di materia oscura in laboratori sotterranei, ricerca di neutrini sterili o fotoni oscuri con acceleratori e reattori, ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini, misura diretta di massa del neutrino, ricerca di nuove particelle agli acceleratori, sia per produzione diretta sia per inferenza indiretta attraverso anomalie in decadimenti rari) siano coadiuvate dall'osservazione multimessaggera del cosmo, dallo studio della gravitazione in un campo forte (come per esempio intorno a un buco nero) per mezzo di onde gravitazionali, dalla ricerca dell'effetto delle onde gravitazionali

primordiali nel CMB, dalla ricerca indiretta di materia oscura nei raggi cosmici per mezzo di sonde cariche come nuclei di anti-elio o anti-deuterio oppure neutre come fotoni X e gamma.

A questo si aggiungono ricerche su problemi più tradizionali ma ancora vitali e irrisolti: l'identificazione dei siti e dei meccanismi di accelerazione di energia estrema, i cosiddetti "pevatroni", lo studio delle anomalie spettrali osservate da Pamela e AMS-02 su positroni e antiprotoni e molto altro ancora che verrà approfondito negli articoli a seguire.

Un esempio di perfetta sinergia tra attività terrestri e spaziali è fornito dal nuovissimo campo della ricerca di onde gravitazionali. La prima osservazione di LIGO e Virgo del 2015 e la successiva scoperta di un'inattesa popolazione di buchi neri binari in coalescenza hanno confermato l'esistenza delle onde gravitazionali e aperto una nuova finestra cosmologica. Se certamente la storia di LIGO e Virgo continuerà ancora per almeno un decennio e speriamo possa essere seguita e ampliata da strumenti di terza generazione sia in Europa (l'Einstein Telescope, per il quale l'INFN sta promuovendo con entusiasmo la candidatura del sito sardo di SOS Enattos) sia negli Stati Uniti, una parte importante del futuro delle onde gravitazionali è nello spazio. Il progetto LISA condurrà ricerche con una tecnica analoga a quella di LIGO e Virgo, ma espandendo la lunghezza dei bracci dai tre chilometri di Virgo ai milioni di chilometri – ottenibili evidentemente solo nello spazio – dislocando una terna di satelliti in orbita. Il progetto

LISA-Pathfinder, un esperimento di grande successo che ha visto gruppi italiani INFN in prima linea, ha dimostrato la fattibilità della tecnologia provando che è possibile tenere sotto controllo l'assetto dei satelliti attorno alle masse di prova senza disturbarle. LISA sta ora entrando nel vivo della fase di costruzione, che la porterà ad acquisire dati nella seconda decade degli anni '30, speriamo in sinergia e collaborazione con l'Einstein Telescope (l'eventuale osservazione contemporanea di alcuni eventi in fasi diverse della loro evoluzione aprirebbe scenari magnifici). I due nuovi occhi esploreranno il cielo in onde gravitazionali con sensibilità mai viste e, nel caso di LISA, a frequenze bassissime, consentendo l'osservazione di collisioni tra buchi neri supermassicci in tutto l'universo osservabile.

A questo sforzo si unirà la ricerca di onde gravitazionali primordiali attraverso il loro effetto indiretto sul fondo cosmico a microonde; onde gravitazionali prodotte durante la fase inflazionaria possono aver lasciato un'impronta osservabile nelle fluttuazioni termiche del CMB, un'impronta di tipo caratteristico che con uno strumento di sensibilità e precisione adeguata può essere misurata e riconosciuta dal fondo. Il satellite LiteBird affronterà il tema portando nello spazio nuove tecnologie di rivelazione a cui l'INFN ha contribuito attivamente negli ultimi decenni.

A questi progetti di lungo termine si affiancano missioni già operative ma che possono dare ancora risultati importanti. Con AMS-02 sulla stazione spaziale orbitante e con le misure su pallone stratosferico di GAPS continuerà la ricerca di segnali di materia oscura per mezzo della ricerca indiretta di anti-nuclei quali l'anti-elio3 e l'anti-deuterio. Anche in questo caso la sinergia tra misure di laboratorio a terra e osservazioni è fortissima; ALICE al CERN ha misurato recentemente le sezioni



d.

La spettacolare scia tracciata nel cielo dal decollo del vettore Falcon 9, che ha effettuato il lancio di IXPE dal Kennedy Space Center della NASA il 9 dicembre 2021.

d'urto di produzione e di interazione di questi anti-nuclei con la materia ordinaria, fornendo dati importanti per la stima della produzione secondaria di questi anti-nuclei dalla propagazione di raggi cosmici nel mezzo interstellare. Saranno i dati a dire se vi sia un eccesso di questi anti-nuclei attribuibile al decadimento di particelle di materia oscura, oppure se i pochi interessantissimi eventi osservati da AMS-02 siano tutti di origine secondaria. Resta comunque il fatto che le osservazioni dirette di AMS-02 sono di straordinario valore in sé, per la qualità dello strumento in orbita e per la stabilità della presa dati dimostrata negli anni. Speriamo che nei prossimi anni si possa avviare lo sforzo di pensare al futuro, immaginando e costruendo uno spettrometro magnetico spazializzato di sensibilità e accettazione ancora maggiori. Non va dimenticato, d'altra parte, il ruolo che ancora può avere il telescopio spaziale Fermi nello studio del cielo gamma e quello che sta avendo IXPE nella ricerca di effetti fisici associati a fotoni X polarizzati. Entrambi basati su tecnologie inventate e sviluppate in seno all'INFN, continueranno a esplorare il cielo per mezzo di fotoni di alta energia alla ricerca di materia oscura, nuova fisica e osservando oggetti astrofisici noti con occhi nuovi. In particolare, la recente missione IXPE, uno dei primi polarimetri a raggi X, sta aprendo un nuovo fronte osservativo che ha cominciato a dare i primi risultati ma che probabilmente rappresenterà una vera e propria rivoluzione nel campo. Un altro elemento di sinergia fortissima tra osservazioni spaziali e misure a terra riguarda i neutrini. Ad oggi non sappiamo quanto pesa un neutrino. Le oscillazioni hanno vincolato la differenza di massa tra le tre specie, senza fissarne la scala. Vi sono tre modi per misurare la scala di massa, tutti e tre di grande interesse perché non identici e dipendenti in modo diverso dai parametri di mescolamento misurati attraverso le oscillazioni: la misura diretta cinematica, la ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini e la misura dell'effetto complessivo dei neutrini prodotti dal Big Bang sulla formazione delle strutture dell'universo.

La misura diretta, secondo una tecnica suggerita da Enrico Fermi nel 1934 ancora a fondamento di tutti gli esperimenti in corso, non ha ancora dato risultati, fornendo come miglior limite il valore misurato dall'esperimento tedesco KATRIN nel 2022 di 0,8 eV. Neanche la ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini, pur con enormi progressi, ha ancora dato

risultati. Anch'essa offrirebbe una misura della scala di massa, ma finora il processo non è stato osservato e anche in questo caso sono disponibili solo limiti, inferiori a quelli di KATRIN ma più dipendenti da modelli e assunzioni.

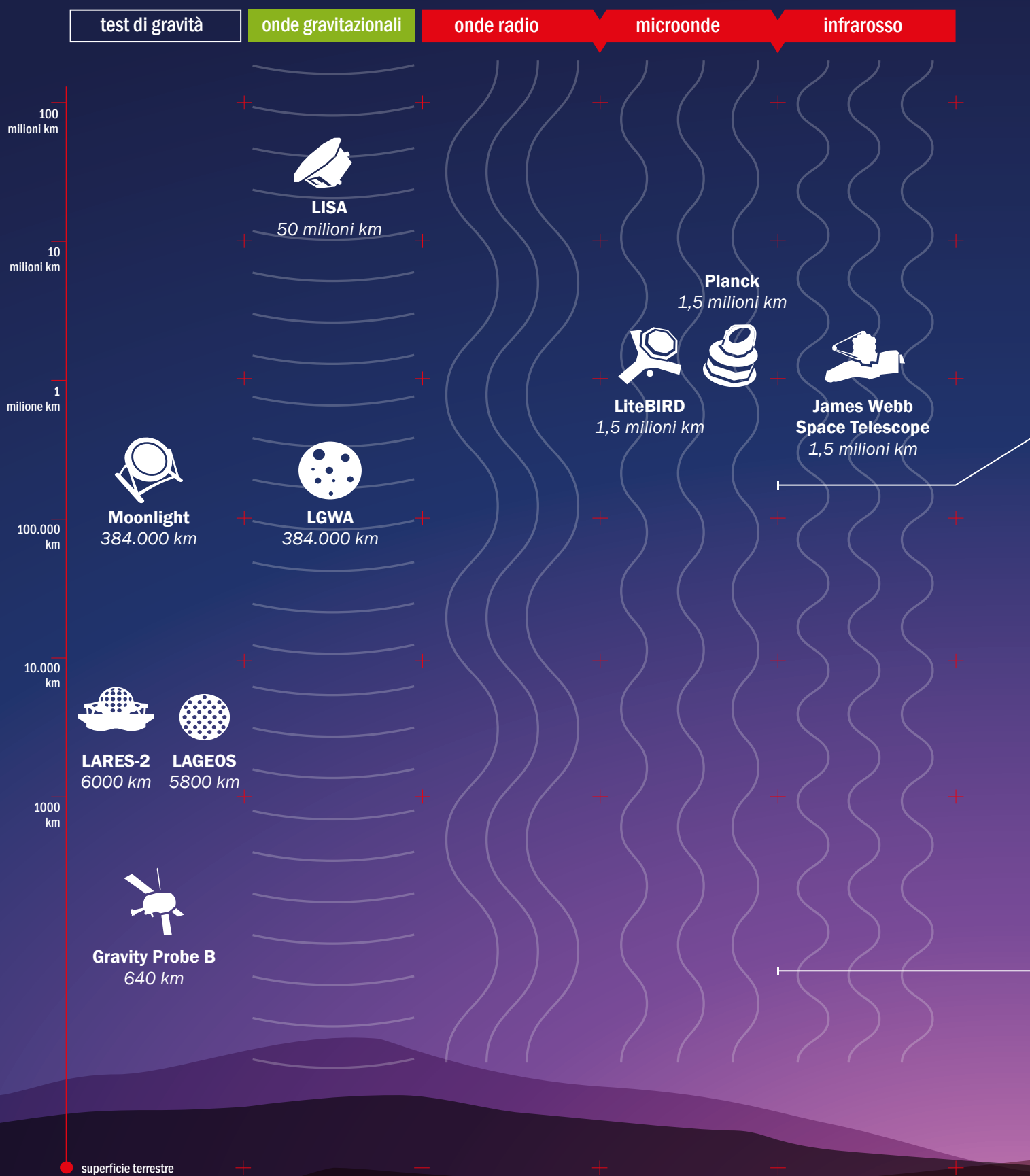
La terza via, forse la più promettente ad oggi, è quella di pesare i neutrini per mezzo dell'universo intero. Durante il Big Bang, oltre al fondo di fotoni osservato dal CMB si deve esser prodotto anche un fondo di qualche centinaio di neutrini per cm^3 la cui temperatura, oggi, è calcolata essere 1,95 K; tali neutrini, a seconda della massa, hanno avuto una piccola ma misurabile influenza gravitazionale durante la formazione delle strutture, e dallo studio sistematico della distribuzione delle galassie in funzione della distanza è possibile inferirne il peso. È ciò che faranno i rilevamenti cosmologici della prossima generazione, come quello che sarà avviato dalla missione Euclid. Euclid è un satellite dedicato che misurerà distanza e distorsioni dovute al *lensing* gravitazionale di milioni di galassie, fornendo una mappa tridimensionale dell'universo e della sua evoluzione di precisione mai vista. Insieme al progetto concorrente da terra LSST porterà la precisione dei calcoli nella formazione delle strutture a livelli mai raggiunti prima, fornendo indicazioni sulla natura fisica dell'energia oscura, distinguendo, entro certi limiti, una pura e semplice costante cosmologica da energia oscura di origine dinamica e misurando l'effetto associato alla massa dei neutrini. La sensibilità di Euclid e LSST potrebbe esser sufficiente a estrarre un valore significativamente diverso da zero, fornendo la prima misura assoluta della massa del neutrino.

Questa sintesi, che gli articoli a seguire approfondiranno, mostra che comprendiamo parzialmente solo qualche percento dell'universo, e che il resto è mistero. Ciò basterebbe per guardare al futuro con entusiasmo, ma il viaggio nello spazio è anche altro. Il panorama dei *"known-unknown"* – delle cose che non sappiamo ma che in qualche modo sappiamo di non sapere perché osservazioni o teorie ce ne suggeriscono l'esistenza – è solo un aspetto. Aprire un occhio nuovo che guarda meglio e più lontano, o che usa una sonda nuova come i raggi cosmici, i neutrini o le onde gravitazionali, significa quasi certamente imbattersi in fenomeni inaspettati, in *"unknown-unknown"*, per loro natura imprevedibili ma che costituiscono la vera ragione per cui la ricerca scientifica e l'esplorazione del cosmo sono, anche e soprattutto, delle meravigliose e impagabili avventure.

Biografia

Marco Pallavicini è vicepresidente dell'INFN, professore di fisica sperimentale all'Università di Genova e ricercatore INFN. Ha lavorato negli USA al Fermilab e al laboratorio SLAC in esperimenti su quark pesanti e partecipato alla missione ESA Euso per lo studio dei raggi cosmici in atmosfera. Dal 1999 lavora ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso su esperimenti sulla fisica del neutrino e sulla ricerca di materia oscura. È co-portavoce dell'esperimento Borexino dal 2011.

[as] Occhi sull'universo



visibile

ultravioletto

raggi X

raggi gamma

raggi cosmici

GAIA

1,5 milioni km



Euclid

1,5 milioni km



Hubble
540 km



IXPE
550 km



Fermi
550 km



Dampe
500 km



Limadou
500 km



mini-Euso
400 km



Calet
400 km



AMS
400 km



GAPS
40 km

Bagliori nel buio

I lampi gamma e le loro sorgenti

di Elisabetta Bissaldi

L'universo ospita numerosi fenomeni esotici e meravigliosi, alcuni dei quali possono generare quantità di energia quasi inconcepibili. Buchi neri supermassicci, stelle di neutroni che si fondono, flussi di gas caldo che si muovono quasi alla velocità della luce: sono solo alcune delle meraviglie che generano i raggi gamma, la forma di radiazione più energetica, miliardi di volte più energetica della luce visibile. Grazie al telescopio spaziale Fermi Gamma-ray Space Telescope, denominato precedentemente GLAST, che l'11 giugno 2023 celebra il quindicesimo anniversario della messa in orbita attorno alla Terra, l'astronomia nei raggi gamma rappresenta oggi la scienza degli estremi – gravità estrema, campi magnetici estremi, ecc. Un paio di mesi dopo il lancio nel 2008, GLAST è stato ribattezzato Fermi Gamma-ray Space Telescope e dedicato a Enrico Fermi (1901 – 1954), scienziato che fu pioniere dello studio delle particelle di alta energia e in particolare studiò il meccanismo fisico per accelerare i raggi cosmici che pervadono la nostra galassia e giungono fino a noi. In questo

a.

La missione spaziale GLAST decolla a bordo di un razzo Delta II dalla Cape Canaveral Air Force Station l'11 giugno 2008. Ribattezzata poi Fermi, è una missione spaziale internazionale della NASA che conta su una fondamentale partecipazione italiana, con i contributi dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF).



lungo periodo, gli strumenti a bordo di Fermi hanno permesso numerose scoperte scientifiche che hanno rivoluzionato la nostra comprensione dell'universo visto attraverso i raggi gamma, aprendo una finestra su alcune delle strutture più interessanti dell'universo.

Fra le sorgenti più misteriose e affascinanti studiate da Fermi ci sono i lampi gamma o *gamma-ray burst* (GRB). Solitamente si distinguono due classi di lampi gamma in base alla durata del segnale gamma misurato a bassa energia. La maggior parte dei lampi gamma si verifica quando alcuni tipi di stelle massicce esauriscono il carburante e collassano per creare dei buchi neri, producendo un segnale "lungo" che continua per decine o centinaia di secondi. Altri si verificano quando due stelle di neutroni, resti superdensi di esplosioni stellari, si fondono. In questo caso il segnale "breve" dura meno di 2 secondi. Entrambi i tipi di eventi cataclismici creano getti di particelle che si muovono quasi alla velocità della luce. I raggi gamma sono prodotti nelle collisioni di materiale in rapido movimento all'interno dei getti e quando questi interagiscono con l'ambiente intorno alla stella. Tutti i lampi gamma appaiono nel cielo in maniera del tutto imprevedibile e non sono eventi ripetibili. Per questo motivo sono classificati come "transienti", e sono stati protagonisti indiscussi della storia di Fermi fin dagli albori della missione, permettendo alcune delle più importanti scoperte.

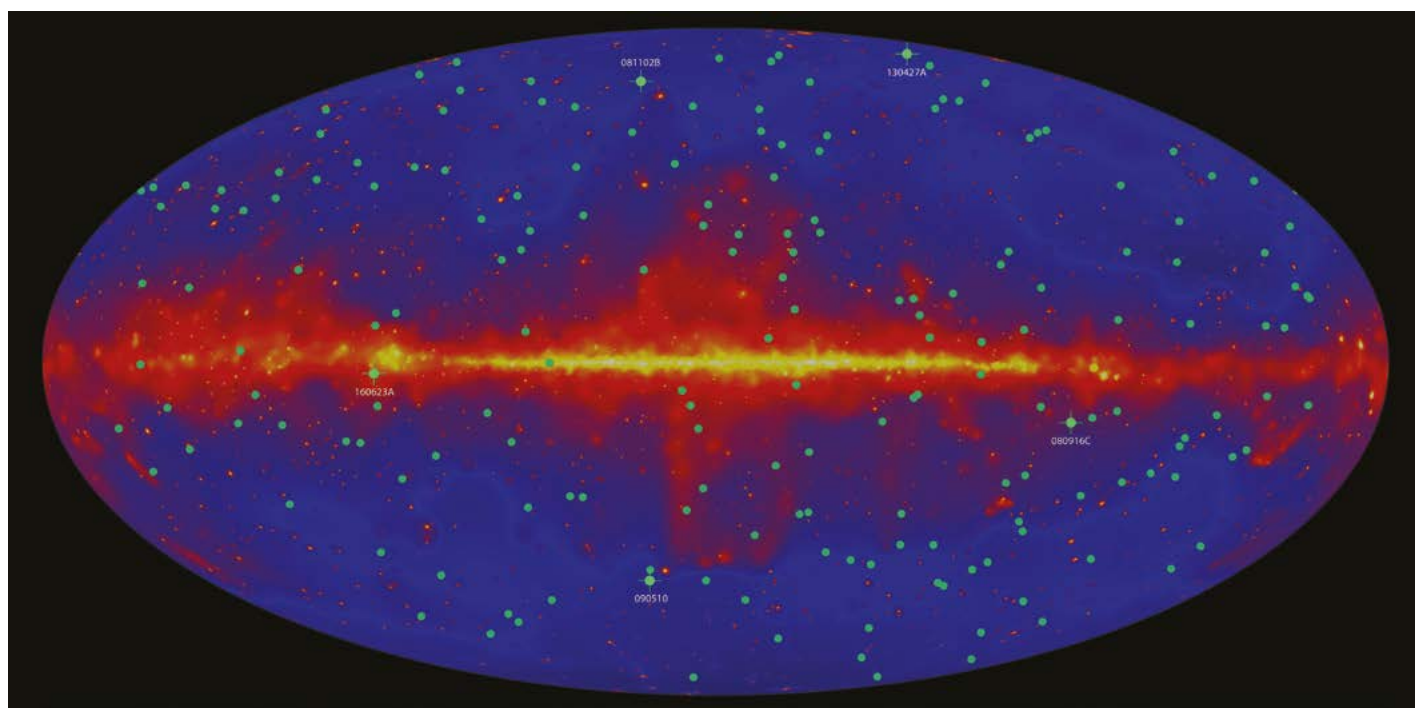
A bordo di Fermi si trovano due strumenti. Quello principale, il Large Area Telescope (LAT), scansiona il cielo ogni tre ore e ha osservato più di 6500 singole sorgenti di raggi gamma.

Lo strumento secondario, il Gamma-ray Burst Monitor (GBM), dedicato allo studio dei fenomeni cosmici "transienti", monitora in ogni istante l'intero cielo, tranne la porzione occultata dalla Terra, e ha osservato oltre 3500 lampi di raggi gamma durante tutto il periodo della missione.

Il primo lampo gamma osservato dal LAT nel settembre 2008, GRB 080916C, è stato anche l'evento più lontano e uno dei più brillanti registrati in tutta la missione, verificatosi a 12,2 miliardi di anni luce di distanza nella costellazione della Carena. Alcuni mesi più tardi, nel maggio 2009, un lampo gamma breve denominato GRB 090510 ha contribuito a testare un aspetto della teoria di Einstein secondo cui il tessuto dello spaziotempo è liscio e continuo. Grazie allo studio di questa sorgente, il *team* di Fermi è riuscito a dimostrare che tutta la luce, indipendentemente dalla sua energia, si muove alla stessa velocità attraverso il vuoto dello spazio.

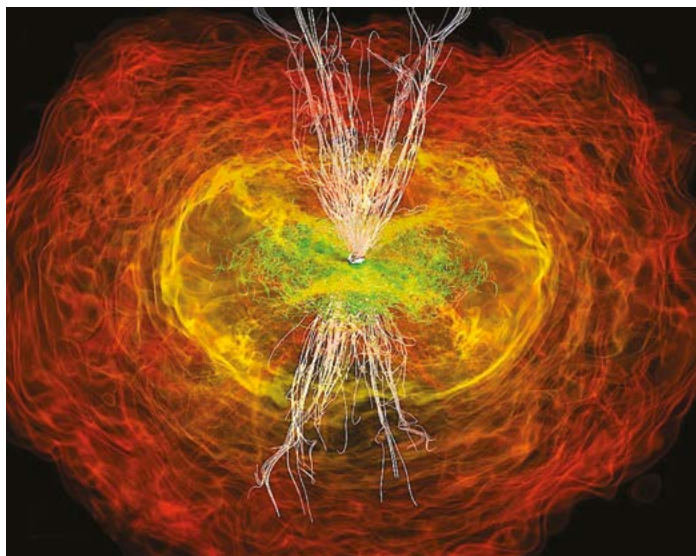
Un'altra fondamentale scoperta di Fermi, avvenuta il 17 agosto 2017, è stata l'aver osservato un lampo gamma breve, denominato GRB 170817A, in coincidenza con un segnale gravitazionale catturato dagli interferometri della collaborazione internazionale LIGO/Virgo. Questo evento è stato il primo in cui onde luminose e gravitazionali sono state rivelate dalla stessa sorgente, marcando così l'inizio della nuova era dell'astronomia multimessaggera.

Tra il 2018 e il 2019 Fermi ha rivelato due lampi gamma, GRB 180720B e GRB 190114C, che hanno prodotto la radiazione a più alta energia mai registrata da questi eventi. Entrambi i



b.

Costruita accumulando nove anni di dati di Fermi-LAT, questa mappa mostra come appare il cielo nei raggi gamma a energie superiori a 10 miliardi di elettronvolt. Il piano della nostra galassia, la Via Lattea, appare brillante al centro dell'immagine. I punti verdi mostrano le posizioni di 186 lampi di raggi gamma osservati dal LAT durante il suo primo decennio. Gli eventi più spettacolari della missione sono evidenziati ed etichettati.



c.
Simulazione di una collisione di stelle di neutroni, che potrebbe spiegare i lampi gamma brevi.

lampi gamma sono stati osservati in combinazione con due diversi osservatori a terra e hanno fornito nuove e fondamentali informazioni sui meccanismi che li producono. Infatti, i getti prodotti durante l'evento catastrofico di formazione del nuovo buco nero, mentre si propagano verso l'esterno, emettendo in banda gamma, possono anche interagire con il gas circostante ed emettere radiazione in tutto lo spettro, dalla radio ai raggi gamma di energia più estrema.

Questi cosiddetti *afterglow* (bagliori ritardati) possono essere rivelati mesi – e raramente, anche anni – dopo l'esplosione del lampo gamma, generalmente a lunghezze d'onda maggiori (e a energie inferiori).

Per entrambi i lampi gamma in questione, Fermi ha rivelato un picco di raggi gamma in tempo reale e ha immediatamente allertato la comunità astronomica sulla posizione dell'esplosione, in modo da permettere ad altri telescopi a terra e nello spazio di monitorare la stessa porzione di cielo e osservare possibili controparti. I due esperimenti che hanno rivelato l'*afterglow* alle altissime energie sono stati rispettivamente l'osservatorio High Energy Stereoscopic System (HESS), situato in Namibia, che ha osservato il bagliore di GRB 180720B ben dieci ore dopo l'inizio dell'osservazione di Fermi, e l'osservatorio Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov (MAGIC), situato nelle Isole Canarie, che ha iniziato a osservare il GRB 190114C appena 50 secondi dopo che è stata data l'allerta di Fermi. Questo rivelamento, in termini di energia, ha superato di gran lunga quello del 2013, effettuato dal LAT, che aveva rivelato un fotone proveniente da un lampo gamma denominato GRB 130427A con un'energia di 95 miliardi di elettronvolt (GeV), all'epoca la più alta osservata per un lampo gamma. HESS e MAGIC, infatti, hanno registrato energie fino a mille miliardi di elettronvolt (1 TeV) (come termine di paragone, si consideri che l'energia della luce visibile varia da circa 2 a 3 elettronvolt!).

Tuttavia, i record sono fatti per essere infranti, e questo è quanto è accaduto nel 2022, quando Fermi ha registrato un impulso insolitamente luminoso e duraturo di radiazione ad alta energia,

prodotto da un lampo gamma di durata estremamente lunga, che ha investito la Terra domenica 9 ottobre. Questa ondata di raggi X e gamma, che ha attraversato il sistema solare, è stata così intensa da "accecare" per alcuni secondi sia il LAT che il GBM di Fermi, attivando oltre a questi anche gli strumenti di numerose altre missioni spaziali. I telescopi di tutto il mondo si sono quindi rivolti verso il luogo dell'esplosione per studiarne le caratteristiche e osservarne il bagliore ritardato. Denominato GRB 221009A e proveniente dalla direzione della costellazione della Sagitta, il lampo gamma ha percorso circa 1,9 miliardi di anni per raggiungere la Terra. Secondo le analisi preliminari, il LAT ha rivelato l'*afterglow* dell'esplosione per più di 10 ore. Uno dei motivi della luminosità e della longevità di questo *burst* è che, per un GRB, si trova relativamente vicino a noi. La vicinanza di questo evento è entusiasmante perché ci consente di rivelare molti dettagli che altrimenti sarebbero troppo deboli per essere visti. Si tratta infatti di una delle esplosioni più energetiche e luminose mai viste indipendentemente dalla distanza, il che lo rende doppiamente eccitante. La luce di questa antica esplosione porta con sé nuove intuizioni sul collasso stellare, la nascita di un buco nero, il comportamento e l'interazione della materia vicino alla velocità della luce, le condizioni in una galassia lontana e molto altro. Un altro GRB così luminoso potrebbe non apparire per decenni.

Biografia

Elisabetta Bissaldi è professoressa presso il Dipartimento Interateneo di Fisica del Politecnico di Bari e ricercatrice associata all'INFN Bari. Il suo lavoro si concentra sull'astrofisica dei raggi gamma alle alte energie, e in particolare sullo studio dei *gamma-ray burst*. È anche attiva nello sviluppo di nuovi sensori e rivelatori per strumenti di astrofisica gamma di nuova generazione.

10.23801/asimmetrie.2023.34.2

Radiografia del cosmo

Misure di polarizzazione dei raggi X

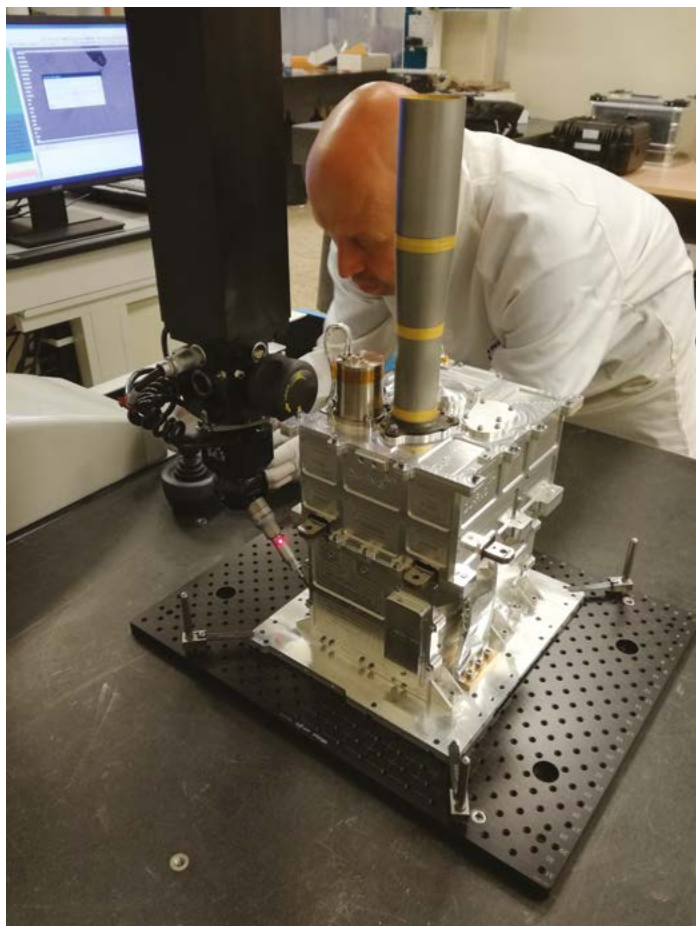
di Luca Baldini

Lanciata il 9 dicembre 2021 dallo storico Launch Complex 39 A del John F. Kennedy Space Center (quello utilizzato per il programma Apollo, vd. fig. d p. 8, ndr), la missione IXPE (Imaging X-ray Polarimetry Explorer) ha aperto una nuova finestra osservativa sull'universo, quella della polarimetria a raggi X. Si tratta di una piccola missione selezionata dalla NASA nel 2017 e realizzata in collaborazione con l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), con un fortissimo e caratterizzante contributo italiano, in particolare dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e dell'Istituto Nazionale di Astrofisica. Ma che cosa vuol dire "polarimetria"? Un'onda elettromagnetica consiste

essenzialmente nell'oscillazione sincronizzata di due campi (uno elettrico e uno magnetico) e le proprietà geometriche della direzione di oscillazione di questi campi costituiscono la "polarizzazione" della radiazione. La "polarimetria" è appunto l'insieme delle tecniche utilizzate per misurare la polarizzazione della radiazione. I polaroid che troviamo comunemente negli occhiali da sole e negli obiettivi delle macchine fotografiche sono oggetti di uso comune che mettono in evidenza questa proprietà della luce: si tratta di cristalli trasparenti solo a un particolare stato di polarizzazione della luce, quello in cui il campo elettrico oscilla

a. Rappresentazione dell'osservatorio IXPE nella configurazione in cui, da più di un anno, orbita intorno alla Terra osservando l'universo nei raggi X. Lo strumento è composto da tre telescopi identici, ciascuno dei quali comprende una serie di specchi concentrici che focalizzano i raggi X su un rivelatore sensibile alla polarizzazione posto a 4 m di distanza.





b.
Test metrologico di una delle unità di volo a bordo di IXPE, nelle camere pulite della sezione di Pisa dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. L'involucro metallico contiene il *Gas Pixel Detector* e l'elettronica di lettura associata. A bordo di IXPE ci sono tre unità identiche, al fuoco di altrettante ottiche a raggi X.

perpendicolarmente alla direzione della struttura cristallina. Gli astronomi ottici e radio li utilizzano comunemente per studiare gli oggetti di loro interesse: la polarizzazione fornisce infatti informazioni preziose sui processi fisici in atto nelle sorgenti, complementari alle misure di posizione, tempo ed energia acquisite con tecniche tradizionali.

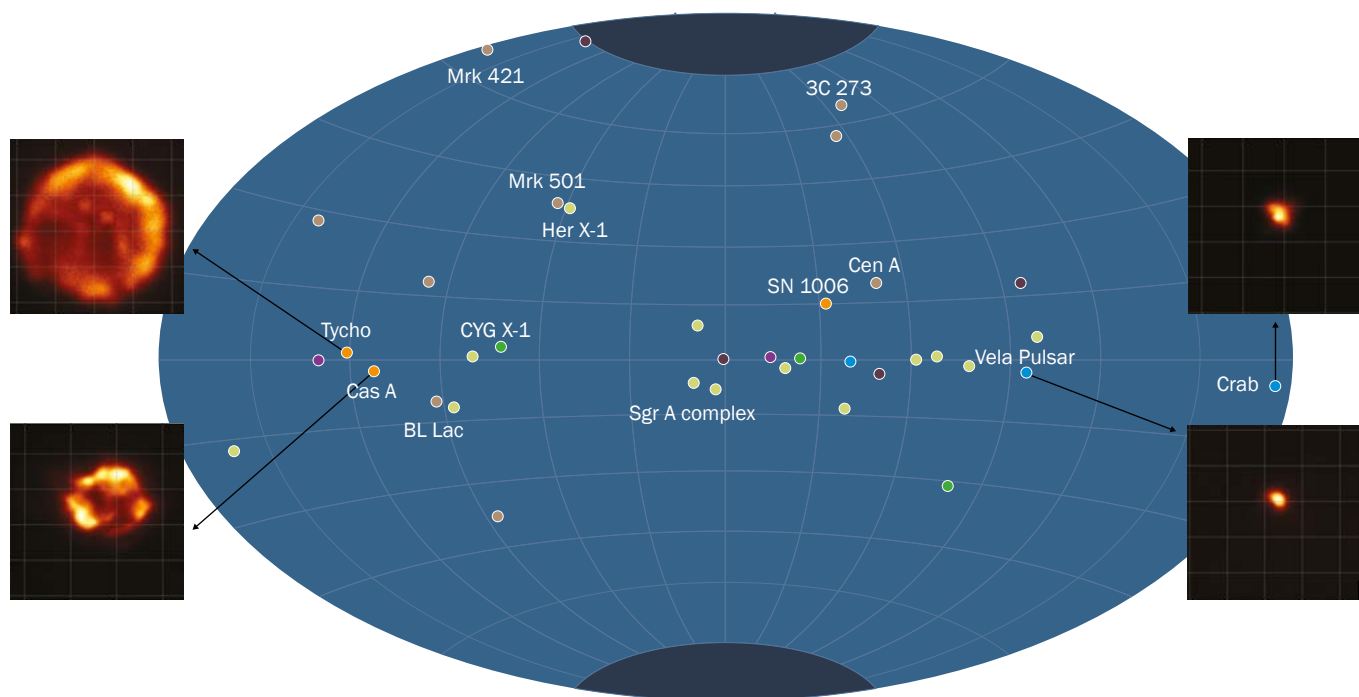
Lo scopo di IXPE è quello di estendere questa tecnica osservativa a energie più elevate. Ma misurare la polarizzazione nei raggi X non è semplice come per la luce visibile. I raggi X sono caratterizzati da lunghezze d'onda migliaia di volte più piccole di quelle della luce visibile, dell'ordine di grandezza delle dimensioni atomiche, e non è possibile creare strutture ordinate su scale di lunghezza così piccole. I raggi X interagiscono con la materia in modo fondamentalmente diverso, mettendo in evidenza le proprietà corpuscolari della luce: vengono assorbiti dai singoli atomi liberando "fotoelettroni" (elettroni a bassa energia). Questi ultimi, essendo particelle cariche, vengono emessi preferenzialmente lungo la direzione di oscillazione del campo elettrico associato alla radiazione incidente e proprio questa è la chiave per la misura della polarizzazione in questa banda di energia: se siamo capaci di misurare la direzione di emissione degli elettroni possiamo risalire alla polarizzazione della radiazione incidente.

Lo sviluppo della tecnologia dei *Gas Pixel Detector* (GPD), i rivelatori a bordo di IXPE, inizia nella seconda metà degli anni '90, e si inserisce nello sviluppo più ampio dei rivelatori a gas miniaturizzati costruiti con le tecniche tipiche dell'industria della microelettronica. Il GPD, ottimizzato per la polarimetria a raggi X sotto la guida di Ronaldo Bellazzini, è una sorta di "macchina fotografica" pensata per realizzare immagini delle tracce dei "fotoelettroni", lunghe tipicamente qualche centinaio di micrometri, con un livello di dettaglio tale da permettere di ricostruire il punto di assorbimento e la direzione di emissione, che sono i due ingredienti fondamentali alla base della tecnica di misura.

Il "cuore" del GPD è un circuito integrato di lettura di $1,5 \times 1,5 \text{ cm}^2$ che è stato progettato e caratterizzato nei laboratori INFN. Si tratta di un chip altamente ottimizzato che non solo è sensibile alla carica elettrica prodotta dal fotoelettrone nella sua interazione con il gas, ma è capace anche di "accorgersi" in autonomia del passaggio di una particella, e di identificare la sottoregione della matrice di lettura interessata dall'evento, limitando drasticamente il tempo di lettura.

I tre anni che vanno dalla selezione alla consegna dello strumento alla NASA sono stati un periodo di eccezionale intensità per tutto il gruppo di ricerca di IXPE. Si tratta di quella fase in cui i prototipi di laboratorio debbono essere ingegnerizzati, integrati in un sistema completo e qualificati per lo spazio, il tutto all'interno dell'involucro limitato di dimensioni, massa e potenza disponibili.

La sfida più grande del programma IXPE non è stata portare in orbita un rivelatore mai utilizzato prima nello spazio, quanto piuttosto completare gli sviluppi tecnologici necessari nel tempo estremamente ridotto tipico delle missioni della sua classe. Basti pensare che l'immediato predecessore di IXPE, GEMS, che aveva obiettivi scientifici molto simili, era stato cancellato nel 2012 proprio per le difficoltà tecniche incontrate nella fase di ingegnerizzazione. Il modello di lavoro adottato, in cui i rivelatori sono stati non solo progettati, ma interamente realizzati nei



- plerioni e pulsar radio
- resti di supernova
- buchi neri di massa stellare
- nane bianche e stelle di neutroni

- magnetar
- nuclei galattici attivi e Sgr A*
- blazar e radiogalassie

c.

Rappresentazione in coordinate galattiche delle 37 sorgenti osservate da IXPE nel primo anno di presa dati, disaggregate per tipologia di oggetto. Si tratta di un campione rappresentativo di tutte le classi di sorgenti X. Per circa metà di queste sorgenti IXPE ha misurato un grado di polarizzazione non nullo con alta significatività statistica.

laboratori INFN, coniugando la creatività e la flessibilità tipiche degli istituti di ricerca con le tecniche industriali di gestione progetto e controllo della qualità, è stato la chiave che ha permesso la consegna dello strumento nei tempi e costi previsti. Dopo un periodo di verifica del funzionamento del telescopio di circa un mese, IXPE ha cominciato le osservazioni scientifiche l'11 gennaio 2022, puntando per circa 20 giorni il residuo di supernova Cassiopea A. Nel primo anno in orbita, IXPE ha puntato 37 sorgenti distinte, con tempi di osservazione che vanno da alcune ore a diverse settimane, misurando un livello di polarizzazione non nulla con alta significatività statistica per circa la metà di esse. Il "catalogo" del primo anno di IXPE include un campione rappresentativo di tutte le classi di sorgenti X rilevanti, sia galattiche che extragalattiche, e rappresenta la prima osservazione sistematica dell'universo polarizzato a queste lunghezze d'onda. Questo primo segmento di missione ha messo in discussione alcune delle idee comunemente accettate sull'universo ad alta energia, offrendoci una messe di informazioni preziose sulla geometria, l'orientamento, la magnitudine e la turbolenza del campo magnetico e i meccanismi di emissione in atto in oggetti celesti completamente diversi tra loro come buchi neri, stelle di neutroni, sistemi binari, galassie attive, resti di supernova. Non senza sorprese del tutto inaspettate, come il lampo gamma GRB 221009A (il GRB del secolo), che è stato possibile osservare

ripuntando velocemente il satellite in virtù della sua luminosità senza precedenti (vd. p. 12, ndr).

Lo sviluppo temporale della missione prevede una prima fase di tre anni, ma la stabilità del funzionamento dell'osservatorio permetterà con ogni probabilità di estendere significativamente le osservazioni. I dati raccolti e gli strumenti di analisi sono fin dall'inizio disponibili a tutta la comunità, con un'enfasi sul funzionamento "da osservatorio" crescente nel tempo. Le scoperte sorprendenti che IXPE sta facendo fanno ben sperare che l'esplorazione dell'universo polarizzato possa procedere con futuri strumenti via via più sensibili.

Biografia

Luca Baldini è professore presso l'Università di Pisa. Impegnato attivamente nella missione spaziale Fermi dal 2002, a seguito dell'approvazione di IXPE ha guidato il team di fisici, ingegneri e tecnici che ha progettato, realizzato e qualificato i rivelatori sensibili alla polarizzazione al piano focale della missione.

10.23801/asimmetrie.2023.34.3

Ai confini dell'universo

Il telescopio spaziale James Webb

di Giovanna Giardino

In base alle nostre stime ci sono, nell'universo, oltre cento miliardi di galassie (ognuna contenente fino a molte centinaia di miliardi di stelle), come la galassia in cui viviamo, la Via Lattea. Come si sono formate tutte queste galassie? Quali processi astrofisici sono alla base della loro nascita ed evoluzione? Rispondere a domande come queste è la sfida per cui il telescopio spaziale James Webb (JWST – James Webb Space Telescope) è stato costruito: un telescopio che potesse spingere lo sguardo dell'umanità oltre l'orizzonte del telescopio Hubble o dei grandi telescopi a terra.

Per capire come nascono ed evolvono le galassie è necessario osservarle i progenitori, ovvero le proto-galassie che vediamo agli albori della storia cosmica, oggetti così lontani che la luce impiega oltre 13 miliardi di anni per raggiungerci, cosicché li vediamo com'erano poche centinaia di milioni di anni dopo il Big Bang, durante le fasi iniziali della loro formazione. Il segnale luminoso che riceviamo da queste galassie è estremamente debole e centrato alle frequenze del vicino e medio infrarosso dato che, nel viaggio attraverso lo spazio cosmico in espansione, la lunghezza d'onda della luce viene dilatata. È così che il segnale emesso nella banda visibile dalle stelle nelle galassie primordiali arriva a noi "spostato" verso il rosso. Per studiare l'origine delle galassie è quindi necessaria una strumentazione capace di rivelare segnali molto deboli nell'infrarosso – una regione dello spettro elettromagnetico per lo più accessibile solo fuori dall'atmosfera.

È così che nasce il telescopio Webb. Dotato di uno specchio primario con un diametro di 6,5 m, corrispondente a un'area di oltre 6 volte quella del telescopio spaziale Hubble, e di uno schermo solare delle dimensioni di un campo da tennis, l'osservatorio opera in regime criogenico: ciò significa che sia il telescopio sia la strumentazione primaria sono mantenuti a una temperatura molto bassa, di circa -230°C , il che permette loro di funzionare in maniera ottimale nella banda infrarossa. L'osservatorio è in orbita attorno a un punto di equilibrio del sistema Terra-Sole (il punto di Lagrange L2) a una distanza di 1,5 milioni di km dalla terra (circa quattro volte la distanza della Luna dalla Terra). Questa traiettoria consente al telescopio di poter osservare, nell'arco di un anno, qualsiasi punto del cielo, mantenendo un orientamento tale da essere sempre all'ombra del suo schermo solare, e quindi sempre al freddo. I 18 elementi esagonali che compongono lo specchio primario sono realizzati in berillio, elemento al contempo molto resistente e leggero, e ricoperti da una sottilissima patina d'oro, il metallo che meglio riflette i raggi infrarossi. Come tante altre componenti di Webb, la realizzazione di queste ottiche ha richiesto lo sviluppo di tecniche innovative.

Ovviamente, oltre allo studio della formazione delle galassie, un telescopio così avanzato e potente è ideale per osservare molti altri tipi di sorgenti astronomiche: dalle strutture di gas e polvere, dove si formano le stelle, ai corpi del sistema solare, dal materiale incandescente in orbita attorno ai buchi neri agli esopianeti –



a.
Immagine della Nebulosa Carina ottenuta da una delle prime osservazioni del telescopio Webb. Nelle dense regioni di gas e polvere (in colore bruno) si stanno formando nuove stelle. La ricchezza di dettagli in questo "panorama cosmico" dimostra la straordinaria sensibilità di questo nuovo osservatorio spaziale.



b.
Il telescopio Webb al termine dei test eseguiti nei laboratori del Johnson Space Center della NASA in Texas, nel 2017. Sul retro, l'entrata e l'enorme porta del gigantesco criostato usato per ricreare le condizioni di vuoto e freddo dello spazio.

i pianeti che osserviamo al di fuori del sistema solare, in orbita attorno a stelle, per così dire, “nel nostro vicinato”. Non c'è da stupirsi quindi che tutta la comunità astronomica mondiale fosse con il fiato sospeso il giorno del lancio della missione, il 25 dicembre del 2021, e in stato di alta tensione nei giorni successivi durante le delicate operazioni di dispiegamento, quando lo schermo solare e il telescopio sono stati manovrati dalla configurazione compatta del lancio a quella finale di osservatorio spaziale – una particolarità questa, di doversi aprire nello spazio, che ha fatto paragonare il telescopio Webb ai cosiddetti personaggi “*transformer*” amati dai bambini e che gli ha conferito un'aura quasi fantascientifica. Tutto è andato secondo i piani e il grande sforzo ingegneristico richiesto per costruire il telescopio Webb è stato ripagato.

Il lancio della missione Webb effettuato con il razzo europeo Ariane 5 dallo spazioporto dell'Agenzia Spaziale Europa (ESA) è uno dei contributi dell'industria e della comunità scientifica europea a questa missione. Gli altri due elementi fondamentali dell'osservatorio sviluppati in Europa sono lo spettrografo, che opera nell'infrarosso vicino, NIRSpec, e parte dello strumento per le osservazioni nel medio infrarosso, MIRI. NIRSpec è il primo spettrografo cosiddetto “multi-oggetto” lanciato nello spazio e che ci permette di raccogliere, simultaneamente, lo spettro ad alta definizione della luce emessa da centinaia di oggetti nel campo di vista.

I primi dati scientifici acquisiti da Webb a giugno dell'anno scorso sono stati resi pubblici attraverso la pubblicazione di immagini straordinarie. Come non ricordare alcune delle immagini iconiche apparse in quei giorni sui nostri giornali e nella televisione, come il campo di cielo con migliaia di galassie, alcune tra le più lontane (e quindi più giovani) mai osservate, oppure l'affascinante panorama cosmico della

Nebula Carina, dove le strutture eteree di gas e polveri si innalzano come giganti montagne. Anche se meno appariscenti, insieme a queste immagini, sono presenti anche preziosi dati spettroscopici raccolti da NIRSpec e MIRI: ad esempio, gli spettri delle galassie primordiali che ci permettono, per la prima volta, di rivelare e quantificare la presenza di elementi chimici come l'ossigeno e il carbonio in questi oggetti; o la spettroscopia delle atmosfere degli esopianeti che transitano di fronte alla loro stella. In questo campo, Webb ha aperto una nuova era, e potrebbe aiutarci a capire se in alcuni di questi mondi alieni vi sono le condizioni chimico-fisiche che associamo alla presenza di attività biologica.

Webb è stato costruito per funzionare per almeno dieci anni e, date le riserve di carburante (grazie anche al lancio perfetto eseguito da Ariane 5), pronostici recenti stimano un futuro di non meno di vent'anni di osservazioni. Insomma, l'avventura è appena cominciata!

Biografia

Giovanna Giardino è ricercatrice al Centro Scientifico e Tecnologico dell'ESA nei Paesi Bassi. Presso l'ESA, ha contribuito alla realizzazione del satellite Planck che, lanciato nel 2009, ha eseguito le più accurate osservazioni della radiazione cosmica di fondo e dal 2010 è parte del gruppo responsabile dello sviluppo e calibrazione dello strumento europeo NIRSpec, l'avanzato spettrografo a bordo del telescopio spaziale Webb.

10.23801/asimmetrie.2023.34.4

Un'eco lontana

Nuovi studi sulla radiazione cosmica di fondo

di Massimiliano Lattanzi



a.
Ispezione del satellite Planck prima del suo lancio dallo spaziorporto europeo di Kourou in Guyana francese nel 2009.

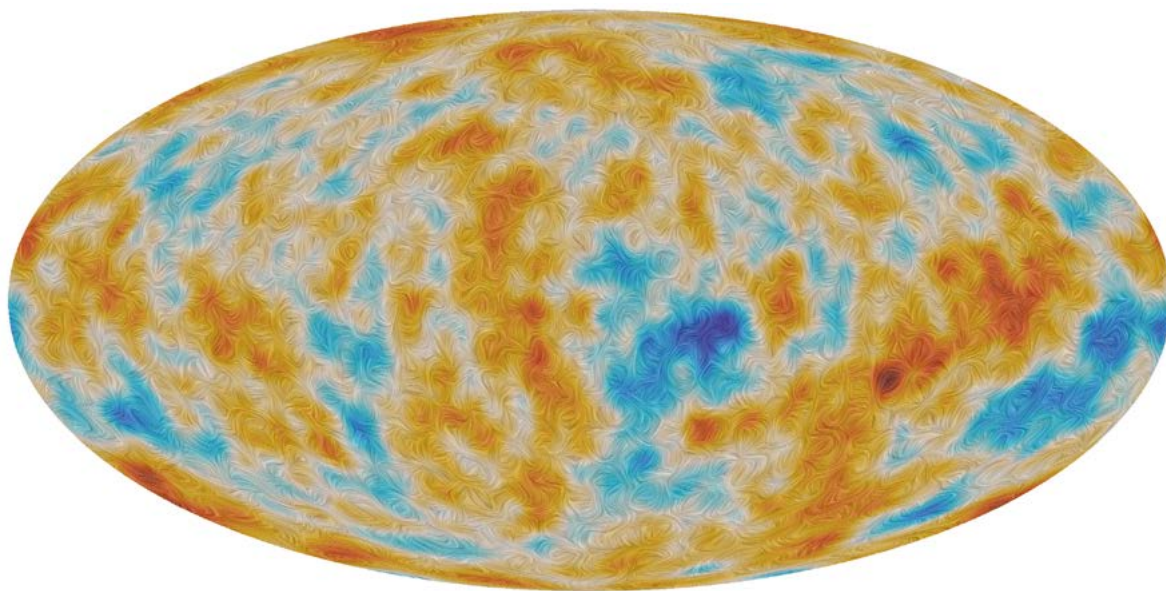
Sin dalla sua inattesa scoperta nel 1964, che valse il premio Nobel ad Arno Penzias e Robert Wilson, la radiazione cosmica di fondo è stata una fonte apparentemente inesauribile di informazioni sull'universo in cui viviamo. Nota con l'acronimo CMB – dall'inglese Cosmic Microwave Background –, questa radiazione elettromagnetica, parzialmente polarizzata, si trova attualmente a una temperatura di 2,7 K, corrispondente alla regione delle microonde dello spettro elettromagnetico. Essa permea l'intero universo ed è il residuo della fase primordiale, estremamente densa e calda, della sua evoluzione: in particolare, è un'istantanea dell'universo nel momento in cui esso divenne trasparente alla radiazione, a un'età di "soli" 400.000 anni.

La CMB è estremamente isotropa, ovvero ci appare la stessa in ogni direzione; tuttavia, a un esame più attento, ci si accorge che questo uniforme mare di radiazione presenta delle increspature, delle fluttuazioni di temperatura. Pur essendo molto piccole – solo qualche decina di milionesimo di grado in media –, queste contengono preziose informazioni sul cosmo. Studiandole, possiamo infatti conoscerne, per esempio, la composizione, la geometria e la velocità di espansione; e perfino

sondare le primissime fasi della sua storia, quando, durante una fase di espansione accelerata chiamata inflazione, sono state generate le fluttuazioni di densità primordiali – i semi da cui poi avranno origine le galassie –, come afferma il modello cosmologico più accreditato.

Non stupisce dunque sapere che grandi sforzi sono stati dedicati, negli ultimi decenni, all'osservazione della CMB. Le misure da terra o da pallone stratosferico forniscono, ora come in passato, contributi importanti, ma sono complicate da effetti sistematici legati alla presenza dell'atmosfera terrestre. Al contrario, le osservazioni da satellite, a fronte di un maggiore sforzo e dei più lunghi tempi di progettazione associati a una missione spaziale, non risentono di tale limitazione. La possibilità di osservare un intervallo di frequenze ampio, che includa non solo le microonde ma anche le regioni vicine del radio e dell'infrarosso, è particolarmente importante in quanto permette di caratterizzare e rimuovere le emissioni galattiche che oscurano il segnale della CMB. Le osservazioni spaziali hanno inoltre accesso alla sfera celeste nella sua interezza, permettendo di misurare le fluttuazioni anche alle scale angolari più grandi.

Le osservazioni del satellite COBE della NASA nei primi anni '90



b.
L'immagine della polarizzazione della radiazione cosmica di fondo vista dall'osservatorio spaziale Planck.

segnarono la prima pietra miliare in questo campo, confermando che l'emissione della CMB è quella caratteristica di un corpo nero a una temperatura di 2,7 K, e stabilendo l'esistenza delle anisotropie in temperatura. Le due scoperte valsero il premio Nobel ai responsabili scientifici dell'esperimento John C. Mather e George F. Smoot. Nel decennio successivo, le anisotropie vennero ulteriormente caratterizzate dagli esperimenti su pallone BOOMERanG e MAXIMA, e da un altro satellite della NASA, WMAP. Infine, negli anni '10 appena trascorsi, il satellite dell'ESA Planck ha mappato in maniera esaustiva le anisotropie in temperatura, di fatto raggiungendo il limite di precisione per cui, anche aumentando la sensibilità dei nostri strumenti, ci scontriamo con il fatto di avere un solo universo da osservare.

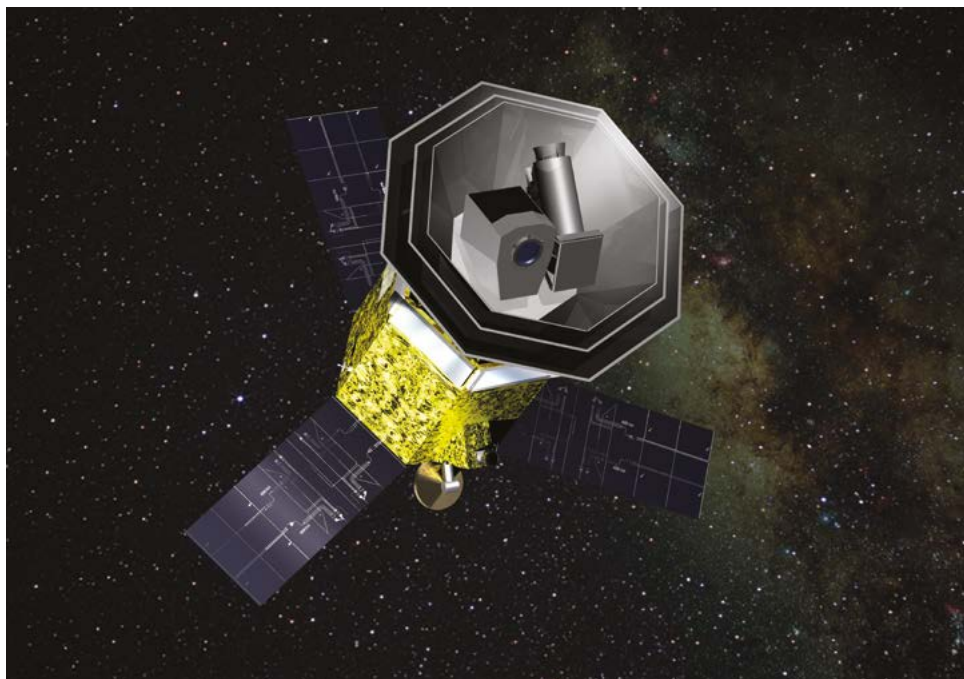
Cosa ci riserva il futuro? Per quanto l'eredità di Planck, i cui dati sono stati rilasciati nel 2018, rappresenti la misura definitiva delle anisotropie in temperatura, il forziere della CMB nasconde ancora molti tesori. In particolare, le anisotropie della polarizzazione potranno aiutarci ad approfondire la nostra comprensione del modello cosmologico standard, e forse segnalare la necessità di modificarlo. La polarizzazione della CMB può essere scomposta in due componenti distinte (modi), chiamate E e B. I modi E sono stati già osservati, ma non ancora caratterizzati con precisione. I modi B sono particolarmente interessanti in quanto possono essere generati nell'universo primordiale solo dalla presenza di onde gravitazionali, le quali sono a loro volta una conseguenza inevitabile del meccanismo inflazionario menzionato sopra. Ad oggi non sono stati ancora osservati modi B di origine primordiale;

una loro misura costituirebbe una ulteriore, forte indicazione a favore dell'inflazione, e permetterebbe di esplorare scale di energia superiori di molti ordini di grandezza a quelle sondate da acceleratori di particelle come LHC.

La misura delle anisotropie in polarizzazione e, in particolare, la ricerca del segnale delle onde gravitazionali inflazionarie costituiscono il principale obiettivo scientifico degli esperimenti cosmologici di prossima generazione.

I programmi di osservazione dal suolo si affidano alla collocazione in ambienti estremamente secchi: è il caso del dimostratore dell'esperimento QUBIC, finanziato dall'INFN, che si trova in un sito desertico in alta quota sulle Ande argentine. Nel futuro, i programmi Simons Observatory (SO, situato nel deserto di Atacama in Cile, in partenza nell'estate 2023) e CMB-S4 (che osserverà da Atacama e dall'Antartide, previsto per il 2029), grazie alla possibilità di impiegare un numero molto elevato di rivelatori, raggiungeranno una sensibilità al segnale inflazionario rispettivamente 10 e 30 volte migliore di quella degli esperimenti attuali.

L'imminente programma LSPE, finanziato da ASI e INFN, impiega invece una strategia ibrida nella sua caccia ai modi B. Esso è infatti composto da due strumenti: un telescopio situato a Tenerife, che osserverà il cielo alle frequenze più basse, sotto i 100 GHz, per cui la presenza dell'atmosfera è meno problematica; e un pallone stratosferico indirizzato alla misura delle frequenze sopra i 100 GHz. La loro combinazione permetterà di migliorare la sensibilità alle onde gravitazionali inflazionarie circa di un fattore tre rispetto al presente.



c.
Vista del criostato di
QUBIC, all'interno del
quale è contenuta
l'ottica del rivelatore.

Infine, il satellite LiteBIRD dell'agenzia spaziale giapponese JAXA osserverà, a partire dal 2029, la polarizzazione della CMB su tutta la volta celeste tramite tre telescopi in 15 bande di frequenza tra 40 e 450 GHz, con una sensibilità che è 30 volte quella di Planck. Questo permetterà di raggiungere una sensibilità al segnale delle onde gravitazionali inflazionarie quasi 20 volte maggiore di quella degli esperimenti attuali. Diversi modelli inflazionari predicono un segnale sufficientemente forte da essere chiaramente visibile da LiteBIRD. Nel caso in cui i modi B non dovessero essere invece rivelati, sarebbe comunque possibile escludere una vasta classe di modelli inflazionari. Inoltre, potendo osservare tutto il cielo, LiteBIRD fornirà una misura precisa dei modi E alle grandi scale angolari. Questo migliorerà

la nostra comprensione dei meccanismi che hanno portato all'accensione delle prime stelle, e potrebbe condurre, in combinazione con altre osservazioni, a una misura cosmologica delle masse dei neutrini, le uniche particelle elementari note di cui ignoriamo la massa. La collaborazione LiteBIRD comprende ricercatori e istituzioni in Giappone, Nord America ed Europa, incluso l'INFN, coinvolto sia nello sviluppo strumentale che nell'analisi dati. A quasi 60 anni dalla sua scoperta – parafrasando Italo Calvino a proposito dei classici della letteratura – la radiazione cosmica di fondo non ha ancora finito di dire quel che ha da dire; e noi, tramite gli esperimenti di prossima generazione, siamo sicuramente pronti ad ascoltare con attenzione!

Biografia

Massimiliano Lattanzi è ricercatore presso la sezione di Ferrara dell'INFN. Si occupa dei vincoli alla fisica fondamentale da osservazioni del fondo cosmico di microonde e delle strutture cosmologiche a grande scala. Ha fatto parte della collaborazione Planck ed è attualmente membro delle collaborazioni LiteBIRD, LSPE, Simons Observatory ed Euclid. È coordinatore nazionale del progetto InDark dell'INFN.

Poca ma buona

A caccia di antimateria cosmica

di Matteo Duranti



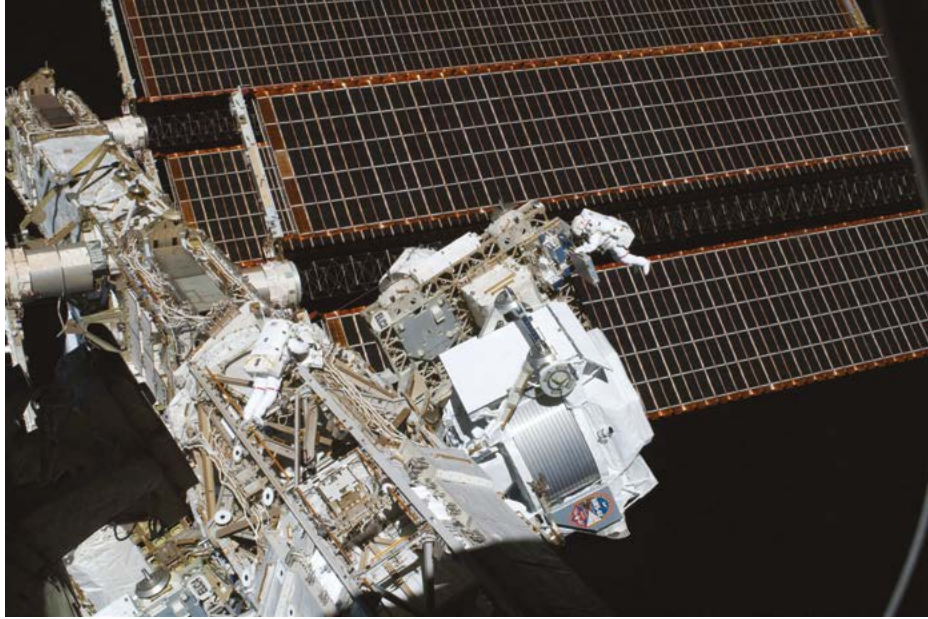
a.
L'apparato AMS-02, nella Clean Room, al CERN, in cui è stato assemblato. Nella foto solo una parte del MultiLayer Insulator (MLI, il tipico materiale bianco che riflette la radiazione solare con cui vengono rivestite le apparecchiature nello spazio) è installata, lasciando "nude" le strutture e i rivelatori sottostanti.

"[...] dobbiamo considerare un puro caso che la Terra (e presumibilmente l'intero sistema solare) contenga una preponderanza di elettroni negativi e di protoni positivi. Tuttavia, è possibile che per alcune stelle valga il contrario, ossia che esse siano costituite principalmente da positroni e protoni negativi. [...]". Terminò così, Paul Dirac, il discorso in occasione del conferimento del premio Nobel il 12 dicembre del 1933. L'esistenza dell'antimateria, e in particolare dell'antielettrone (positrone), era stata verificata sperimentalmente da Carl Anderson l'anno precedente. Oggi, dopo quasi un secolo, siamo in grado di produrre l'antimateria in laboratorio e di studiarla con elevata precisione. Tuttavia, un'evidenza sperimentale della presenza delle stelle di antimateria previste da Dirac non è ancora stata trovata.

Il nostro pianeta è continuamente bombardato da un flusso di particelle, i raggi cosmici, prodotte e accelerate in sorgenti astrofisiche, come ad esempio resti di supernova. Questo flusso è composto per quasi il 90% da nuclei completamente ionizzati di idrogeno (protoni), per quasi il 10% da nuclei di elio, per circa l'1% da nuclei più pesanti, principalmente di carbonio e ossigeno, per l'1% da elettroni e da tracce ($< 0,1\%$) di altre particelle, tra cui fotoni, neutrini e anche positroni e antiprotoni. L'antimateria finora trovata nei raggi cosmici, però, è antimateria

"leggera": la collisione, con il mezzo interstellare, di un raggio cosmico di materia, infatti, può produrre sia particelle di materia (elettroni, kaoni, pioni, protoni, ...), sia positroni o antiprotoni, cioè antimateria. Lo studio di queste componenti rare è anche importantissimo per la ricerca indiretta di materia oscura. La probabilità, invece, che si produca un nucleo di antideuterio (un antiprotone e un antineutrone) o di antielio-3 (due antiprotoni e un antineutrone) è diversi ordini di grandezza inferiore. Ancora più improbabile è che si produca un antielio-4 (due antiprotoni e due antineutroni) o addirittura un anticarbonio. Affinché un (anti)nucleo sia formato è infatti necessario produrre tutti i suoi costituenti, i quark, nella giusta composizione e con velocità e direzioni simili ("coalescenza"), in modo da potersi fondere in un'unica particella. Nell'interazione fra un raggio cosmico molto energetico e un nucleo del mezzo interstellare è facile che le varie particelle elementari prodotte siano, invece, sparate in direzioni diverse. Trovare un antinucleo "pesante" sarebbe quindi una prova molto forte dell'esistenza di stelle di antimateria.

In un secondo scenario, invece, un antideuterio o un antielio-3 potrebbero essere prodotti dall'annichilazione di due particelle di materia oscura, che, essendo sostanzialmente ferma rispetto alla Galassia, potrebbe più facilmente generare quark coalescenti.



b.

L'apparato AMS-02, installato sulla trave principale (*main truss*) della ISS. Sullo sfondo è possibile vedere i grandi pannelli solari che forniscono elettricità a tutta la strumentazione della ISS, tra cui i circa 2,5 kW di potenza necessari per il funzionamento di AMS-02.

L'annichilazione di particelle di materia oscura è teoricamente in grado di produrre anche particelle "leggere", come protoni, antiprotoni, elettroni o positroni. Eccessi di queste particelle nei raggi cosmici (più un tipo di particella è raro nei raggi cosmici di origine astrofisica e maggiore è la probabilità di osservare un eccesso) possono confermare, indirettamente, l'esistenza della materia oscura.

La ricerca di un eccesso di elettroni e positroni è, infatti, uno dei metodi di indagine, per la ricerca di materia oscura, privilegiati dagli esperimenti DAMPE, CALET e, in futuro, da HERD, sulla Stazione Spaziale Cinese, e utilizzato anche dall'esperimento Fermi. Benché la tecnica di rivelazione ("calorimetria") adottata da questi esperimenti non permetta loro di distinguere elettroni da positroni (in genere materia da antimateria), è comunque possibile rivelare un eccesso delle due specie, insieme, rispetto alla somma dei rispettivi flussi astrofisici attesi.

Per poter sperare di catturare un, raro, antinucleo, è necessario operare fuori dalla troposfera che agisce da schermo e impedirebbe l'arrivo al rivelatore. La tecnica standard per distinguere materia da antimateria è la "spettrometria magnetica": si utilizza un campo magnetico per deflettere le particelle cariche e dei piani traccianti (tipicamente fatti di rivelatori al silicio, in grado di misurare la posizione di passaggio delle particelle con un'accuratezza di qualche micrometro) per ricostruire la traiettoria curvilinea.

La tecnica della spettrometria è stata utilizzata dai rivelatori AMS-01, PAMELA e BESS, ma ora l'unico spettrometro operativo nello spazio è l'Alpha Magnetic Spectrometer 02 (AMS-02). AMS-02 opera in orbita a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (ISS) dal 19 maggio del 2011. Cuore dell'esperimento è un tracciatore a strisce di silicio composto da 9 piani di rivelazione, di circa 1 m² ciascuno, inserito all'interno di un campo di circa 0,15 T generato da un magnete permanente. Il verso di curvatura delle particelle nel campo permette di identificare il segno della carica (materia oppure antimateria) e il raggio di curvatura è inversamente proporzionale alla quantità di moto (ovvero massa per velocità). Altri rivelatori permettono di completare la "carta d'identità" di ogni particella: carica, velocità, energia, massa, ecc. Ad oggi l'esperimento ha osservato più di 200 miliardi di raggi cosmici.

Progettato per rimanere operativo per soli 3 anni, AMS-02 si prevede attualmente che rimanga operativo per tutta la durata

della ISS, cioè fino all'inizio del 2031. Questo straordinario prolungamento è dovuto anche a una serie di interventi di aggiornamento. Nel corso del 2019, infatti, quattro *extra vehicular activity* (EVA), condotte dagli astronauti Luca Parmitano e Andrew R. Morgan, hanno installato l'Upgraded Tracker Thermal Pump System (UTTPS), un aggiornato sistema di pompe per il raffreddamento del tracciatore di AMS-02. Nel corso del 2025, un'altra serie di EVA e di interventi con bracci robotici installerà un ulteriore piano di tracciamento, *layer-0*, per migliorare ulteriormente le prestazioni di AMS-02.

Un'altra tecnica innovativa per l'identificazione di antinuclei sfrutta la tipicità delle interazioni di questi con la materia ordinaria: un antinucleo di bassa energia, rallentato fino a fermarsi, viene catturato dagli atomi del rivelatore creando un atomo "esotico" eccitato. Questo decade rapidamente producendo fotoni di energie ben determinate e, a seguito dell'annichilazione dell'antinucleo, una distribuzione caratteristica di pioni. Questa tecnica è alla base del General AntiParticle Spectrometer (GAPS) che effettuerà il suo primo volo, su pallone stratosferico, in Antartide nella seconda metà del 2023.

Se la rete mondiale di interferometri gravitazionali è riuscita a effettuare le prime misure di onde gravitazionali e a fare luce sulla presenza dei buchi neri, la speranza è che gli aggiornamenti e l'estensione temporale di AMS-02, tecniche innovative come quelle di GAPS e la progettazione di una nuova generazione di spettrometri (ALADInO, AMS-100) possano far luce su un altro problema cosmologico tuttora aperto: l'asimmetria materia-antimateria e, più in generale, la "bariogenesi" (vd. in *Asimmetrie* n. 29 p. 4, ndr).

Biografia

Matteo Duranti è ricercatore INFN impegnato in esperimenti di raggi cosmici nello spazio. Da sempre lavora su AMS. Ha lavorato su DAMPE, in orbita su satellite cinese dal 2015, e ora si occupa di HERD, che andrà sulla stazione spaziale cinese nel 2027.

10.23801/asimmetrie.2023.34.6

Un osservatorio per l'ultravioletto

Mini-EUSO è un telescopio rivolto allo studio di emissioni ultraviolette di origine terrestre, astrofisica e cosmologica. È stato posto a bordo della ISS nell'agosto 2019 e successivamente attivato dall'astronauta Luca Parmitano nel corso della sua missione Beyond. Si tratta di un telescopio in banda ultravioletta sviluppato da una ampia collaborazione internazionale guidata dall'INFN, con varie istituzioni nazionali e internazionali, orientato verso il nostro pianeta.

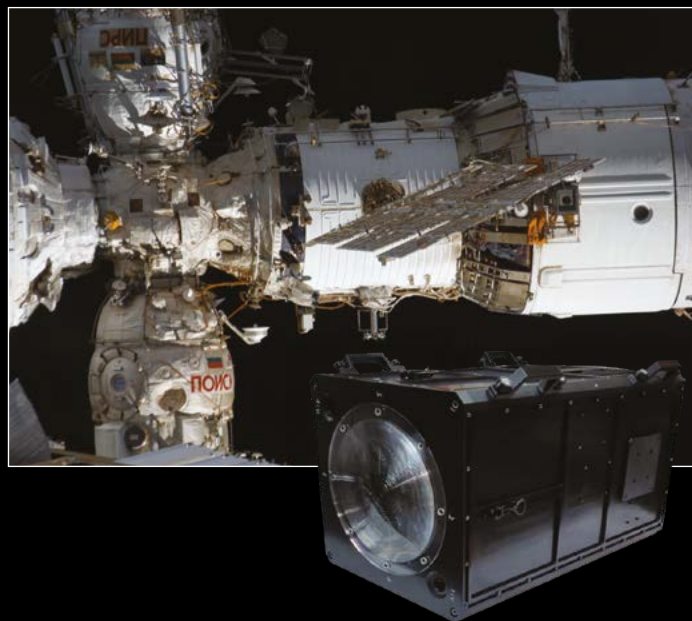
Lo strumento osserva la Terra dal modulo russo Zvezda della ISS. L'ottica a lenti di Fresnel e la superficie focale basata su fotomoltiplicatori multianodo consentono di raggiungere una sensibilità senza precedenti, permettendo di rivelare ciascun fotone emesso in un campo di vista di 44 gradi e con una frequenza di 400.000 immagini al secondo. Una delle caratteristiche principali dell'apparato è la capacità di effettuare osservazioni su diverse scale temporali, da qualche microsecondo in su, e di poter correlare i dati con quelli provenienti da due telecamere ancillari, sensibili nelle bande del visibile e del vicino infrarosso.

Gli obiettivi scientifici di Mini-EUSO si estendono su più campi. È stata realizzata, per la prima volta, una mappa delle emissioni notturne della Terra nell'ultravioletto. Vengono inoltre cercati segnali provenienti dalla "materia strana", uno stato della materia – contenente quark strani – ancora mai osservato, ma previsto da vari modelli teorici. Questi segnali vengono cercati tra quelli delle meteore del sistema solare e di origine interstellare. Mini-EUSO è anche in grado di porre un limite al flusso di raggi cosmici di altissima energia, cioè particelle la cui esatta natura è ancora dibattuta e che si presume provengano da altre galassie.

Altri studi riguardano l'osservazione di ELVES, bagliori di luce generati dall'interazione tra gli impulsi elettromagnetici generati da un fulmine e la ionosfera, sotto forma di anelli che possono espandersi sino a raggiungere dimensioni di varie centinaia di chilometri e della durata di frazioni di millisecondo.

La tecnologia sviluppata per Mini-EUSO è anche utilizzata su apparati posti su palloni stratosferici, come il progetto NASA SPB-2 (Super Pressure Balloon flight 2), il cui lancio è previsto dalla Nuova Zelanda per il 2023, e sarà utilizzata in future missioni spaziali.

[Marco Casolino, Laura Marcelli]



1.
Il modulo all'interno del quale si trova Mini-EUSO sulla ISS. In basso a destra, lo strumento Mini-EUSO.

Biografie

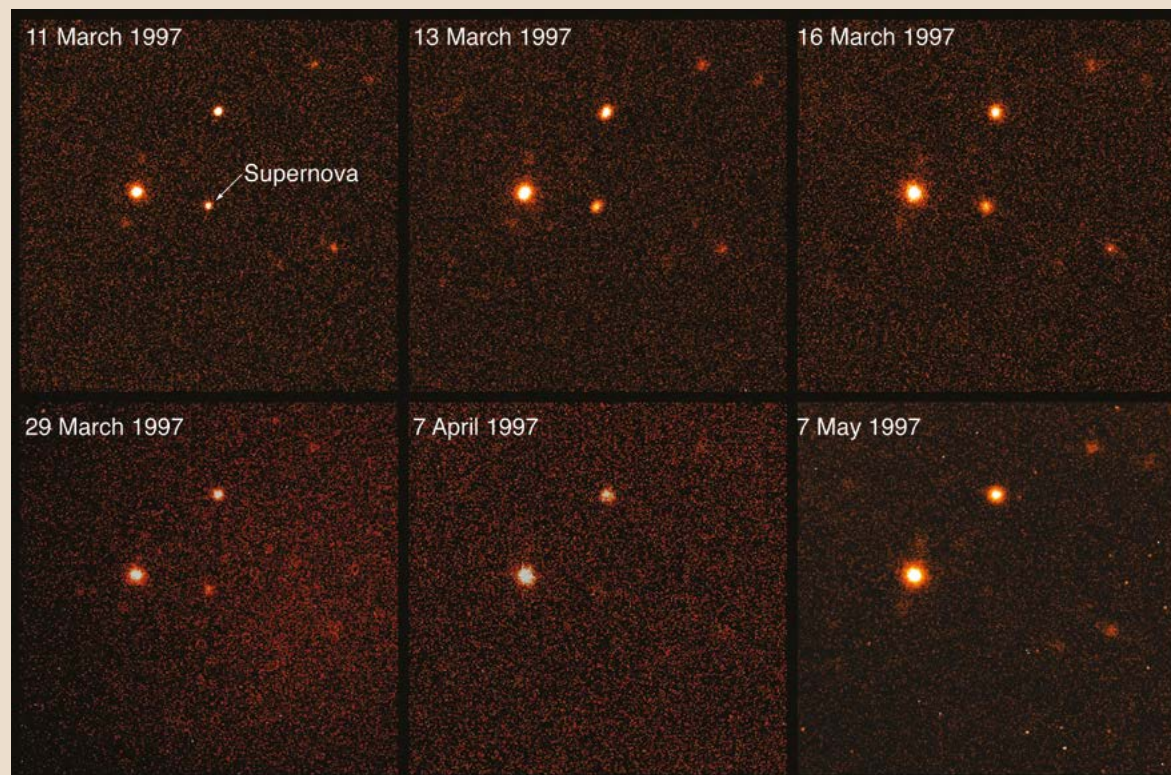
Marco Casolino è ricercatore presso la sezione INFN di Roma Tor Vergata, *principal investigator* (PI) dell'esperimento Mini-EUSO e ha preso parte alla realizzazione di vari esperimenti a bordo di stazioni spaziali e su satellite. Tra questi, l'apparato Pamela, rivolto allo studio della componente di antimateria e alla ricerca indiretta di materia oscura.

Laura Marcelli è ricercatrice presso la sezione INFN di Roma Tor Vergata e vice-PI dell'esperimento Mini-EUSO. Il suo campo principale di ricerca è lo studio di raggi cosmici e la ricerca di componenti esotiche con apparati posti nello spazio.

Luce sull'energia oscura

La missione Euclid

di Stefano Dusini e Luca Stanco



a.
L'immagine mostra una supernova con *redshift* di $z = 0,40$ (corrispondente a una distanza di circa 6 miliardi di anni luce), osservata in sei date con la fotocamera SUSI al New Technology Telescope. La galassia ospite è appena visibile, molto probabilmente perché è una galassia a bassa luminosità superficiale. La luminosità della supernova raggiunge il picco intorno al 16 marzo 1997.

Negli anni '90 la concezione del mondo fisico su grande scala godeva di una relativa tranquillità. Sebbene la descrizione teorica del mondo microscopico non fosse in grado di includere la gravità, un diffuso ottimismo accompagnava le ricerche in ambito cosmologico. Un ottimismo fondato sia sulla presunta incompletezza del modello standard che sulle ancora limitate osservazioni del cosmo. Sempre con riferimento al mondo macroscopico, la concezione era inoltre abbastanza ben delineata: un universo nato dal Big Bang, caratterizzato da una fase di incredibile espansione iniziale, denominata inflazione, seguita da una fase di progressivo rallentamento. Perciò, in un simile contesto, la domanda essenziale che ci si poneva era se l'universo si sarebbe espanso all'infinito o se, a un certo punto, per effetto della gravità sarebbe collassato con un Big Crunch. Nel 1998 questa concezione del mondo ricevette quella che si potrebbe definire una doccia fredda. Le osservazioni del satellite Hubble (Hubble Space Telescope)

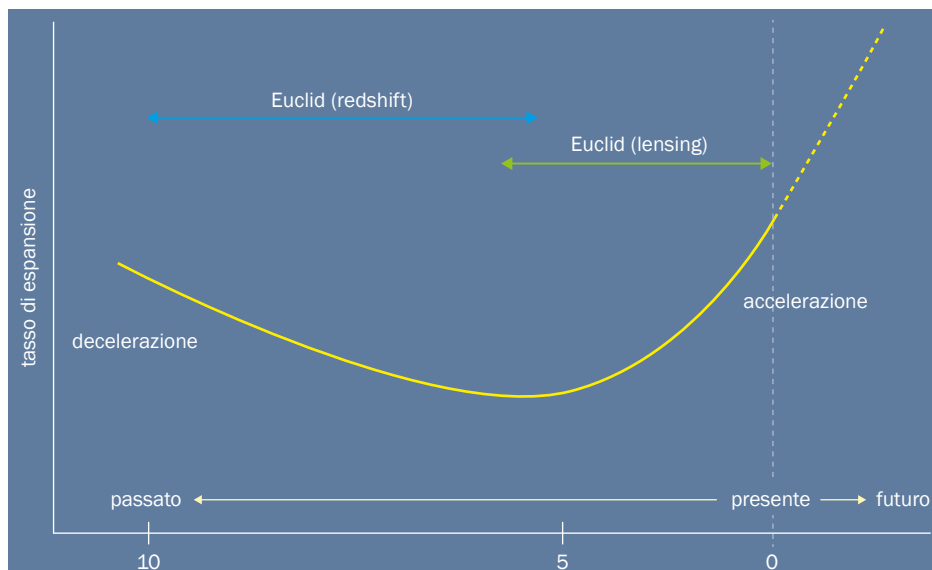
mostravano delle supernovae che si stavano allontanando più velocemente del previsto. L'universo, invece di continuare a rallentare come aveva fatto per i suoi primi 10 miliardi di vita, da circa 4 miliardi di anni aveva ripreso ad accelerare! Successivamente il fenomeno fu confermato in più modi, e gli scopritori ricevettero infine il premio Nobel nel 2011. Tuttavia, a fronte di semplici possibili conseguenze, come il fatto che la materia osservata sia solo il 5% di quella descritta dal modello standard, le varie spiegazioni teoriche date per l'accelerazione dell'universo sono tuttora abbastanza elusive. Già nel 1998 al fenomeno era stato dato il nome di energia oscura (con una parte che si poteva agglomerare in materia oscura, considerata già dagli anni '70 un'altra possibile componente dell'universo), che ben indicava la vaghezza del concetto. Per far luce "sul lato oscuro" dell'universo, circa dieci anni dopo il 1998, l'Agenzia Spaziale Europea ESA approvava la missione spaziale Euclid, con l'obiettivo di misurare con

estrema accuratezza l'evoluzione dell'universo e delle strutture a grande scala per comprendere la natura dell'energia oscura e capire se questa sia dovuta a una nuova forza o a un comportamento differente della gravità su scala cosmica.

In effetti per studiare l'energia oscura dobbiamo ricostruire la storia dell'universo negli ultimi 10 miliardi di anni e capire come, nelle varie fasi della sua evoluzione, materia ed energia oscura abbiano agito per creare gli ammassi di galassie che oggi vediamo, partendo da una distribuzione omogenea di materia: quella dei primi anni di vita dell'universo.

Mentre la materia, oscura o visibile che sia, tende attraverso l'attrazione del campo gravitazionale a favorire la formazione delle galassie e la loro concentrazione in ammassi, l'energia oscura si opporrebbe a questa spinta, limitando la formazione di strutture cosmiche su larga scala.

A seconda di quale di queste due "forze" domina, si ha una decelerazione o un'accelerazione nell'espansione dell'universo. Questo gioco di forze ha lasciato traccia di sé nella storia dell'universo: una traccia leggibile attraverso l'osservazione di come è distribuita la materia a diverse distanze da noi. Infatti, più un oggetto è distante da noi, maggiore è il tempo che la luce ha impiegato a raggiungerci. In questo lasso di tempo, però, lo spazio in cui è immerso l'universo si è espanso causando, tra le altre cose, un allungamento della distanza tra i fronti d'onda della luce delle galassie e quindi facendola apparire più rossa. Misurando lo spettro delle galassie possiamo capire quanto antiche siano e quindi vedere l'universo in una sua precedente fase di evoluzione. Proprio questo sarà uno degli obiettivi dell'ambizioso programma scientifico di Euclid, satellite costituito da un telescopio con uno specchio di 1,2 metri di diametro che fornirà immagini estremamente accurate e nitide su un campo visivo molto ampio, pari a 0,5 gradi quadrati (circa 180 volte quello dell'Hubble Space Telescope). Uno dei due sofisticati strumenti che avrà il compito di "fotografare" le immagini raccolte dal telescopio (NISF) sarà costituito da uno spettrometro e un fotometro, e avrà il compito di misurare lo spostamento della luce verso il rosso (*redshift*) causato dall'espansione dell'universo, e quindi la distanza delle galassie. Per questo NISF è dotato di due ruote con tre filtri ottici e tre *grism* (reticoli di diffrazione montati su prismi ottici) in modo da poter alternativamente interporre un filtro o un *grism* e misurare, rispettivamente, la quantità di luce emessa dalle galassie nelle tre bande dei filtri (fotometria) o lo spettro della luce emessa dalle galassie (spettrometria). Le immagini prodotte sia dai filtri che dai *grism* di NISF sono rivelate da 16 sensori a pixel, per un totale di 67 milioni di pixel,



b. Tasso di espansione dell'universo in funzione del tempo (espresso in miliardi di anni), con indicati gli intervalli di azione di Euclid tramite *redshift* e *lensing* gravitazionale.



c.
Il satellite Euclid viene sottoposto agli ultimi test presso il sito Thales (luglio 2022).

e una risoluzione di 0,3 secondi d'arco per pixel. Questi rivelatori sono stati costruiti specificamente per essere sensibili alla luce infrarossa fino a lunghezze d'onda di 2 micron, quella emessa da galassie oltre 10 miliardi di anni fa.

Non solo energia oscura. Attraverso le sue osservazioni, Euclid fornirà anche una accurata misura della distribuzione della materia nell'universo nelle sue varie fasi evolutive, e lo farà per mezzo della seconda "macchina fotografica" di cui sarà dotato, VIS, estremamente sensibile alla luce visibile grazie ai suoi 36 sensori, per un totale di 600 milioni di pixel. Sebbene la materia oscura, come suggerisce il suo nome, non sia direttamente visibile, VIS la potrà comunque "osservare" e misurare, andando a vedere come essa deflette la luce per effetto dell'attrazione gravitazionale che esercita anche sui fotoni. Questo effetto, chiamato "lente gravitazionale" (*lensing*), fa sì che la forma delle galassie che noi osserviamo sia distorta dal campo gravitazionale degli aloni di materia oscura che la luce attraversa nel suo cammino fino a noi. Un po' come il fondo di un bicchiere, o in generale un vetro non uniforme della cui esistenza ci accorgiamo, perché vediamo un'immagine distorta degli oggetti che vi stanno dietro. Attraverso la ricostruzione delle lenti gravitazionali, l'altro obiettivo dell'indagine di Euclid, possiamo perciò ricostruire la distribuzione della materia nell'universo nelle sue varie fasi evolutive.

Il satellite Euclid verrà lanciato nell'estate del 2023 e messo in orbita a 1,5 milioni di chilometri dalla terra nel punto lagrangiano L2 del sistema Sole-Terra. Qui in sei anni mapperà circa 15.000 gradi quadrati di cielo extragalattico, pari al 36%

di tutta la volta celeste, osservando 12 miliardi di galassie, per 1,5 miliardi delle quali verrà ricostruita la forma e il loro *redshift* fotometrico, e per 35 milioni anche il *redshift* spettroscopico con una accuratezza di una parte su mille. Le mappe tridimensionali che Euclid produrrà permetteranno agli scienziati del Consorzio Euclid, di cui l'INFN è membro, di ricostruire l'evoluzione dell'universo e delle sue strutture a larga scala per comprendere la natura dell'energia oscura e la sua origine.

A partire dal 2015, l'INFN partecipa alla realizzazione dello strumento NISP, occupandosi dell'integrazione e dei test a terra dell'elettronica di controllo e di processamento dati dello spettro-fotometro NISP.

Biografie

Stefano Dusini, ricercatore dell'INFN di Padova, è responsabile dell'integrazione e validazione dell'elettronica di controllo e processamento dati dello strumento NISP e responsabile locale INFN di Padova per la missione Euclid.

Luca Stanco, ricercatore dell'INFN di Padova, è responsabile nazionale dell'INFN per la missione Euclid.

10.23801/asimmetrie.2023.34.7

Einstein alla prova

Test spaziali della relatività generale

di Ignazio Ciufolini



a.
Fascio laser inviato verso la Luna e riflesso da retro-riflessori sulla superficie lunare in un esperimento di misura laser lunare (Lunar Laser Ranging).

La relatività generale ha avuto un trionfale successo, sperimentale e teorico. È oggi applicata a varie tecniche spaziali, come la navigazione satellitare, ed è fondamentale per la comprensione di numerose osservazioni astrofisiche e cosmologiche, come l'espansione dell'universo, i buchi neri e le onde gravitazionali. Nonostante questi trionfi, deve fronteggiare dei problemi teorici e osservazioni cosmologiche inaspettate. È infatti una teoria classica, incompatibile con la meccanica quantistica, l'altra grande teoria della fisica fondamentale. Inoltre, prevede la formazione delle singolarità spaziotemporali, in cui la fisica conosciuta cessa di essere valida. Infine, per poter spiegare l'osservata espansione accelerata dell'universo, si ipotizza l'esistenza di una costante cosmologica legata alla misteriosa energia oscura (vd. p. 26, ndr) o si ipotizzano teorie gravitazionali alternative.

Questi motivi rendono necessarie ulteriori e più accurate prove sperimentali della relatività generale e, data la debolezza dell'interazione gravitazionale, l'ambiente spaziale è l'arena ideale per tali prove. Invero, i più accurati esperimenti che hanno confermato il principio di equivalenza di Galilei (l'universalità della caduta libera alla base delle teorie gravitazionali) sono quelli con bilance di torsione e il Lunar Laser Ranging della NASA (mediante retro-riflettori posti sulla Luna che permettono di tracciarne il moto con estrema precisione), che hanno consentito di confermare questo principio con una precisione relativa di circa 10^{-13} (un esperimento dell'INFN mediante retro-riflettori sulla Luna è Moonlight). Nel 2022 l'esperimento MICROSCOPE del CNES, con un satellite in orbita intorno alla Terra a circa 710 km di altitudine, ha confermato questo principio di base della relatività generale con una precisione di circa 10^{-15} .

Un'altra previsione della relatività generale, legata al principio di equivalenza, è il cosiddetto *redshift* gravitazionale, ossia il fatto che il tempo e gli orologi rallentino nelle vicinanze di una massa. Nel 1976, la NASA ha effettuato l'esperimento spaziale Gravity Probe-A mediante un razzo a un'altitudine di circa 10.000 km. Questo esperimento ha confermato il rallentamento degli orologi vicini alla Terra rispetto all'orologio atomico sul razzo, con un errore relativo di circa 10^{-4} . Gli orologi sui satelliti

[as] approfondimento

Sempre più a fuoco

Nell'aprile del 2019 una collaborazione internazionale ha rivelato la prima immagine nella storia di un buco nero, quello al centro della galassia ellittica Messier 87, M87* (vd. p. 33 in *Asimmetrie* n. 28, ndr). Questa immagine ci mostra un anello di plasma incandescente con un disco scuro al centro, che viene interpretato come l'ombra dell'orizzonte degli eventi di un buco nero. Questo risultato storico, che rappresenta una potente conferma della teoria della gravità di Einstein, la relatività generale, è stato reso possibile grazie a una rete mondiale di radiotelescopi, che formano l'Event Horizon Telescope (EHT).

Nel maggio del 2022, la stessa collaborazione EHT ha pubblicato una nuova immagine, quella del buco nero supermassiccio al centro della nostra Via Lattea, Sgr A*.

Le immagini pubblicate dimostrano che è ora possibile studiare direttamente l'ombra dell'orizzonte degli eventi dei buchi neri tramite radiazione elettromagnetica, trasformando così questa frontiera sfuggente da un concetto matematico in un'entità astrofisica.

Ma cosa ci riserva il futuro?

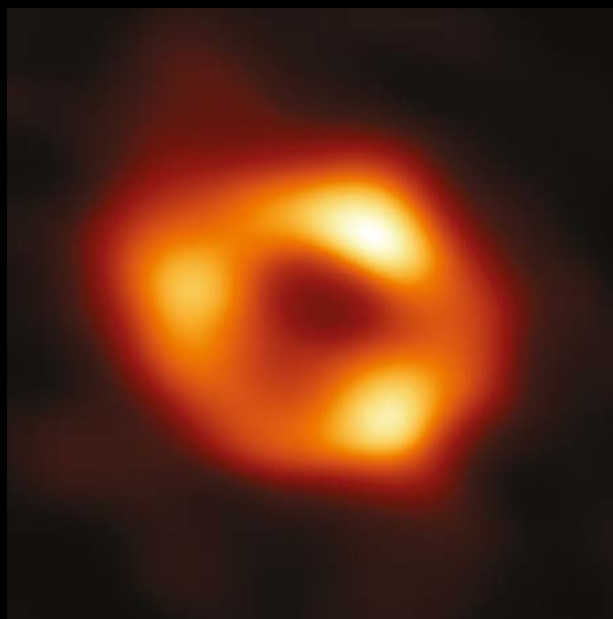
EHT è attualmente lo strumento con il più alto potere risolutivo in astronomia, equivalente a quello di un telescopio virtuale delle dimensioni della Terra. Per migliorare ulteriormente la risoluzione angolare ottenibile con EHT, l'unica strada possibile è lanciare radiotelescopi nello spazio.

Tra le numerose iniziative di missioni spaziali, nel 2019 è stato proposto il progetto THEZA, partito in risposta all'invito dell'ESA per definire la sua programmazione a lungo termine "Voyage 2050". Il progetto propone tre satelliti in orbite circolari attorno alla Terra, con raggi di ca. 14.000 km (orbite MEO, vd. p. Battiston, ndr).

Onde rilevare la debole emissione radio dai buchi neri, il diametro dell'antenna di ciascun satellite deve essere almeno di 10-15 m.

A causa di un limite pratico del diametro del *payload* (ovvero il "carico utile") di circa 4 m, l'unica opzione praticabile è l'assemblaggio in orbita di un numero (7-37) di antenne più piccole (4 m), così da creare un telescopio con un diametro effettivo di 10-15 m.

Un tale interferometro spaziale potrà fornire immagini di buchi neri ancor più nitide e con maggiore fedeltà rispetto a EHT e potenzialmente anche filmati del plasma caldo in orbita intorno al loro orizzonte degli eventi. Questi sviluppi ci permetteranno di affrontare questioni fondamentali su come funziona la gravità nel regime di campo forte vicino all'orizzonte degli eventi, come l'accrescimento di materia porti alla formazione di getti relativistici e come questi ultimi si propaghino condizionando l'evoluzione delle galassie su scala cosmologica. [Ciriaco Goddi]



1.
La silhouette del buco nero supermassiccio SgrA* al centro della Via Lattea, ottenuta tramite il network di radiotelescopi della collaborazione EHT.

Biografia

Ciriaco Goddi è docente di fisica presso l'Università degli Studi di Cagliari e ricercatore dell'INAF e dell'INFN con incarico di ricerca presso l'osservatorio astronomico e la sezione INFN di Cagliari. La sua attività scientifica è incentrata principalmente su osservazioni astronomiche di regioni di formazione stellare, buchi neri e nuclei galattici attivi utilizzando radiotelescopi. Ha ricoperto l'incarico di segretario del consiglio scientifico della collaborazione Event Horizon Telescope fino al 2020.

per la navigazione GALILEO hanno recentemente permesso di migliorare ulteriormente questa misura.

Il fondamento della relatività generale è che massa ed energia generino curvatura dello spaziotempo. I fenomeni della deflessione della luce e il ritardo delle onde elettromagnetiche in un campo gravitazionale sono in parte dovuti alla curvatura dello spazio generata da una massa. Le sonde Viking della NASA e la sonda spaziale CASSINI dell'ESA hanno misurato con precisione il ritardo delle onde elettromagnetiche e l'effetto della curvatura è stato confermato con una precisione di circa $2,3 \times 10^{-5}$. La radioastronomia con la tecnica VLBI (Very Long Baseline Interferometry) ha determinato con grande precisione la posizione delle radiosorgenti e relativa deflessione dovuta al Sole. Grazie a EHT (Event Horizon Telescope, vd. approfondimento), una collaborazione internazionale che fa uso della tecnica VLBI, è possibile studiare la dinamica della materia del disco di accrescimento intorno a un buco nero dove il campo gravitazionale è molto forte. Il satellite astronomico Hipparcos dell'ESA ha monitorato nell'ottico l'intera sfera celeste con la deflessione dovuta al Sole. Infine, il fenomeno della lente gravitazionale è onnipresente nelle immagini dei telescopi spaziali e la missione spaziale GAIA dell'ESA, con ASI e INAF, ha prodotto e produrrà precisissime misure della deflessione della luce.

Un importante capitolo delle verifiche della relatività generale con missioni spaziali riguarda infine il misterioso fenomeno del *frame-dragging*, o trascinamento dei sistemi di riferimento inerziali, efficacemente rappresentato nel film "Interstellar". La teoria di Einstein prevede che una massa rotante "trascini" con sé i sistemi di riferimento inerziali (quelli introdotti dalla prima e seconda legge della dinamica newtoniana). Il *frame-dragging* ha una peculiare influenza sullo scorrere del tempo intorno a un corpo rotante. Ad esempio, in alcuni modelli di universo rotante o intorno a un buco nero rotante ci sono "linee di universo" seguendo le quali un osservatore potrebbe in linea di principio tornare indietro nel tempo! Il *frame-dragging* ha un ruolo fondamentale nell'emissione di onde gravitazionali emesse durante la coalescenza di due buchi neri per formare un buco nero rotante. Questo effetto è infine anche alla base dell'orientamento costante degli spettacolari getti di plasma da nuclei galattici e quasar, che puntano sempre nella stessa direzione per tempi di emissione che possono raggiungere milioni di anni.

Misure del *frame-dragging* sono prima state ottenute con i satelliti LAGEOS (NASA) e LAGEOS 2 (ASI e NASA), poi con Gravity Probe-B (NASA) e recentemente con LARES (ASI). Future accuratissime misure saranno ottenute con LARES 2 dell'ASI. LAGEOS (Laser Geodynamic Satellite) è un satellite della NASA, lanciato nel 1976 e inseguito via laser che ancora oggi viene osservato dalle stazioni dell'International Laser-Ranging Service (ILRS). Grazie ai dati dei due satelliti inseguiti via laser LAGEOS e LAGEOS 2, nel 2004 e 2010, è stata ottenuta una misura del *frame-dragging* con un'accuratezza di circa il 10%. Nel 2019, grazie ai dati di *laser-ranging* del satellite LARES (Laser Relativity Satellite), lanciato dall'ASI nel 2012, è stata ottenuta un'accurata misura del *frame-dragging* con un errore relativo vicino a 10^{-2} .

La misura del *frame-dragging* è stato l'obiettivo principale



b.

Il satellite LARES 2 prima del lancio nei laboratori della compagnia aerospaziale OHB.

del complesso esperimento Gravity Probe-B (GP-B) della NASA. Lanciato nel 2004, GP-B ha avuto una durata di 17 mesi ma i risultati finali sono stati pubblicati nel maggio 2011, confermando ulteriormente il *frame-dragging* con un'accuratezza di circa il 20%. Infine, il 13 luglio 2022 è stato lanciato LARES 2 (vd. fig. b), progettato dalla Sapienza Università di Roma e costruito da INFN e OHB. Il satellite, grazie alla sua orbita speciale e alla particolare disposizione dei piccoli retro-riflettori, oltre ad altre misure di fisica fondamentale e geofisica e al monitoraggio dei cambiamenti climatici, consentirà di misurare il *frame-dragging* con un ambizioso e piccolissimo errore relativo vicino a 10^{-3} .

Biografia

Ignazio Ciufolini, associato al Centro Fermi, già professore di fisica all'Università del Salento, ha lavorato con i maggiori esperti di relatività come John Wheeler e Roger Penrose. È ideatore e responsabile scientifico del satellite LARES 2.

10.23801/asimmetrie.2023.34.8

Lisa dagli occhi laser

Un interferometro spaziale per onde gravitazionali

di Rita Dolesi



a.
Il satellite di LISA Pathfinder completo del suo modulo di propulsione, mentre sta per essere incapsulato nel razzo VEGA (Vettore Europeo di Generazione Avanzata) presso lo spazioporto di Kourou, nella Guyana francese.

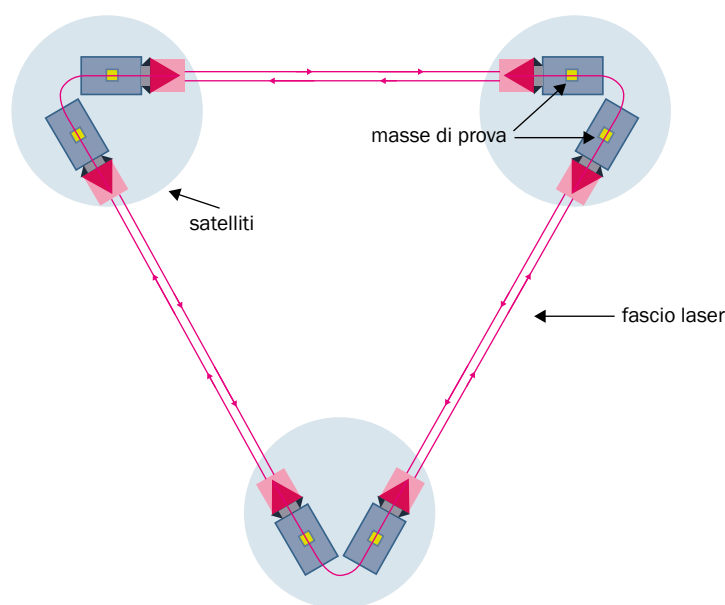
Fino a qualche anno fa, la nostra conoscenza dell'universo si basava esclusivamente sull'osservazione delle onde elettromagnetiche in un ampio spettro di frequenze. Ma a partire dal 2015 la rivelazione delle onde gravitazionali ha aperto una nuova finestra sul cosmo, con nuove straordinarie prospettive di indagine sulla natura della gravità, dei buchi neri, dei sistemi binari, e sulla formazione ed evoluzione delle strutture cosmiche fin dalle prime fasi dell'universo (vd. Asimmetrie n. 21, 25, 30, ndr).

L'astronomia delle onde gravitazionali è solo agli albori: le entusiasmanti osservazioni di Advanced LIGO e Virgo (e quelle previste da futuri interferometri a terra come l'Einstein Telescope) si concentrano su uno spettro di frequenza limitato (circa 10-1000 Hz), se confrontato con quello accessibile nella banda elettromagnetica. Una nuova finestra in frequenza verrà aperta dagli interferometri spaziali, in particolare dal progetto LISA (Laser Interferometer Space Antenna), che sta progredendo rapidamente verso la realizzazione del primo osservatorio spaziale di onde gravitazionali. Guardando a uno spettro di sorgenti complementari rispetto a quelle studiate dagli osservatori terrestri, LISA potrà ascoltare, nel silenzio

dello spazio, sorgenti che emettono a più bassa frequenza, tra 20 microHz e 1 Hz, non rivelabili da Terra a causa dei limiti di lunghezza del braccio degli interferometri e alla rumorosità della gravità terrestre.

Secondo la teoria di Einstein, un sistema spiraleggiante di buchi neri in orbita l'uno intorno all'altro produce variazioni quasi-periodiche del campo gravitazionale, e quindi delle ondulazioni del tessuto spaziotemporale, che si propagano alla velocità della luce e la cui frequenza dipende dalla frequenza orbitale del sistema binario. Nei suoi ultimi istanti di vita prima della fusione, un sistema binario di buchi neri supermassicci (di massa dell'ordine di un milione di masse solari, come il buco nero al centro della nostra galassia) emette onde gravitazionali proprio nella banda di "ascolto" di LISA (vd. p. 34 in Asimmetrie n. 30, ndr).

Le perturbazioni prodotte da questa mostruosa collisione si propagano nel cosmo fino a noi ma, anche a causa dell'enorme distanza delle sorgenti, modificano lo spaziotempo (e il moto delle particelle in esso) in maniera quasi impercettibile. Le onde gravitazionali possono essere dunque rivelate misurando con estrema precisione l'accelerazione relativa di masse in "caduta libera", cioè masse di riferimento inerziale soggette al campo



b.
LISA è costituita da tre satelliti identici posti ai vertici di un triangolo equilatero di lati pari a circa 2,5 milioni di km orbitante attorno al Sole. Il passaggio di un'onda gravitazionale viene rivelato tramite interferometria laser monitorando il moto relativo delle coppie di masse di prova in caduta libera nel campo gravitazionale in ciascun satellite.

gravitazionale, ma ben isolate da altre forze di disturbo. Già i primi progetti di LISA negli anni '80 mettevano in luce come fosse necessario raggiungere un livello di isolamento da forze spurie di diversi ordini di grandezza superiore a quelli mai raggiunti prima. Un divario troppo ampio per essere superato in un sol balzo da uno strumento che doveva essere lanciato nello spazio. Si rese quindi necessario realizzare delle tappe intermedie, delle evidenze di fattibilità basate prima di tutto su esperimenti a terra e poi nello spazio. Un'idea fondamentale fu quella di sospendere le masse a fili sottili come capelli, le cui torsioni infinitesime permisero di caratterizzare le forze spurie agenti su quelle masse. Questo consentì di disegnare una configurazione credibile al punto da poter proporre una missione spaziale esplorativa intermedia, LISA Pathfinder, che venne lanciata nell'autunno del 2015.

E mentre nel febbraio 2016 venivano mostrati al mondo i primi entusiasmanti segnali di onde gravitazionali misurati dagli osservatori terrestri, con il fiato sospeso il gruppo di ricerca di LISA Pathfinder rilasciava per la prima volta le masse di prova nello spazio a milioni di chilometri di distanza dalla Terra. Era il momento di sapere se si era raggiunto l'obiettivo di più di 15 anni di disegni, test, prototipi, revisioni, costruzione dei modelli di volo, pianificazione delle operazioni, tra duri fallimenti ed epici recuperi, affrontati con animate discussioni in un entusiasmante gioco di squadra tra istituti di ricerca, industrie e agenzie aerospaziali. Tra questi, l'INFN e l'ASI avevano sostenuto con grande lungimiranza i gruppi scientifici e le industrie aerospaziali italiane. E le masse di prova si abbandonarono al campo gravitazionale, indisturbate al livello a cui si era puntato, lasciando tutti felici e increduli per il grande salto compiuto. E nei mesi che seguirono, mentre LISA Pathfinder era ancora nel pieno delle sue operazioni, il progetto LISA iniziava a muovere rapidamente i primi passi. Nel gennaio 2017 venne presentata all'ESA la proposta formale di LISA, selezionata poi per esser lanciata nel 2035. Una missione ESA supportata da numerosi

stati membri, così come dalla NASA e da molti istituti di ricerca che lavorano insieme da una parte all'altra dell'Atlantico, compreso l'INFN che si confermava l'istituto di ricerca italiano di riferimento per gli osservatori di onde gravitazionali. Poco dopo, LISA Pathfinder veniva spento per sempre, ma la sua esperienza e la sua tecnologia erano già nel cuore di LISA, che ha potuto così procedere superando le rigorose tappe previste nelle missioni spaziali. Ciò grazie anche al successo di un'altra missione lanciata nel 2018, che impiegava tecnologie di LISA Pathfinder adatte alla necessità di mappare il campo gravitazionale terrestre per studi climatici. Si trattava di Grace-follow on, che ha fornito evidenze della realizzabilità dell'altro ingrediente fondamentale nella rivelazione di onde gravitazionali nello spazio: la misura dell'accelerazione relativa tra masse di prova in due satelliti distanti, realizzata grazie a tecniche di interferometria laser inter-satellite.

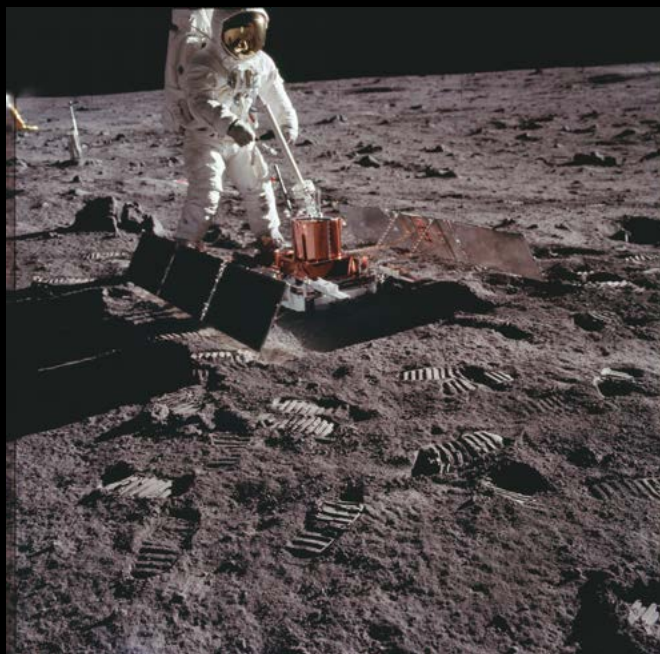
Attualmente LISA si sta preparando al prossimo cruciale appuntamento: alla fine del 2023 dovrà dimostrare la sua fattibilità per ottenere la cosiddetta "adozione" da parte dell'ESA, il traguardo che introdurrà LISA all'attesissima e impegnativa fase di costruzione.

Mancano solo 12 anni al lancio, e saranno di nuovo anni di attività frenetica senza sosta. Stavolta i satelliti sono tre e il sistema ancora più complesso rispetto a Pathfinder, e ci sono ancora degli sviluppi tecnologici che devono essere completati. Occorre preparare *facility* di test di frontiera, in parte messe a punto grazie all'esperienza di Pathfinder, ma anche *facility* del tutto innovative, che richiederanno un significativo investimento di energie e di idee. Sarà inoltre essenziale che fin d'ora la comunità scientifica affianchi i gruppi sperimentali nell'affrontare l'estrema complessità dell'analisi e interpretazione dei segnali di LISA, in cui si sovrapporranno innumerevoli sorgenti, dalle più deboli e vicine, alle più potenti e lontane, che, inviando fino a noi informazioni di eventi avvenuti fin dall'alba cosmica, ci racconteranno la storia dell'universo.

Un'antenna gravitazionale grande come la Luna

La Lunar Gravitational Wave Antenna (LGWA) è una delle più ambiziose proposte maturate nell'ambito della nuova fase dell'esplorazione lunare che sta muovendo oggi i suoi primi passi e che promette importanti ritorni culturali, economici e scientifici. L'idea alla base del progetto, sostenuto e promosso da gruppi di ricerca italiani dell'INFN, del GSSI, dell'INAF e dell'INGV, è quella di osservare le deboli vibrazioni della Luna prodotte dalle onde gravitazionali. Il monitoraggio delle vibrazioni della superficie lunare, grazie alla straordinaria sensibilità richiesta per la rivelazione delle onde gravitazionali, potrebbe inoltre migliorare la comprensione della Luna stessa in termini geologici, consentendo di acquisire nuove informazioni sulla sua struttura interna e sulla storia della sua formazione e della nostra Terra.

LGWA mira all'installazione di stazioni sismiche in una regione permanentemente ombreggiata (Permanently Shadowed Region, PSR) di uno dei poli lunari. Le stazioni saranno dotate di una nuova generazione di sismometri ad alta precisione, la cui installazione e funzionamento a lungo termine richiederanno lo sviluppo di tecniche e sistemi innovativi per l'alimentazione elettrica, la distribuzione e il posizionamento dei sensori e il supporto alla navigazione e alla comunicazione attraverso l'utilizzo di satelliti lunari. Con una sensibilità massima prevista nella banda dei decimi di hertz, LGWA potrebbe costituire l'anello mancante tra le bande di osservazione di LISA e dei futuri osservatori terrestri come l'Einstein Telescope, fornendo uno strumento per la rivelazione di diversi tipi di sorgenti di onde gravitazionali, quali binarie di buchi neri di massa intermedia, fusioni di binarie galattiche di nane bianche, eventi di distruzione mareale, supernovae e sorgenti primordiali. Contribuendo all'astronomia multimessaggera, LGWA potrebbe quindi fare luce sul mistero dell'origine delle supernovae che usiamo per valutare il tasso di espansione dell'universo e ci aiuterà a comprendere la natura degli oggetti compatti che danno origine agli eventi di distruzione mareale che osserviamo attualmente con i telescopi operanti nell'ottico e nei raggi X.



1.
Buzz Aldrin installa il sismografo lunare nel corso della missione Apollo 11.

Biografia

Jan Harms è professore di fisica al Gran Sasso Science Institute. La sua carriera è iniziata presso l'Albert-Einstein-Institute di Hannover. Nel 2013, dopo cinque anni negli Stati Uniti presso UMN e Caltech, si trasferisce in Italia. Come membro delle collaborazioni Virgo e Einstein Telescope, si dedica allo sviluppo di tecnologie innovative per i rivelatori di onde gravitazionali e di metodi di analisi dei dati. Dal 2020 è coordinatore del progetto Lunar Gravitational-wave Antenna.

Biografia

Rita Dolesi è professoressa presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Trento e incaricata di ricerca per l'INFN al TIFPA. Già nel core team di LISA Pathfinder, e ora in quello di LISA, si occupa in particolare del moto geodetico delle masse di prova, dall'implementazione dello strumento, alla sua verifica fino all'operazione in volo.

Mal di spazio

La sicurezza nei viaggi spaziali

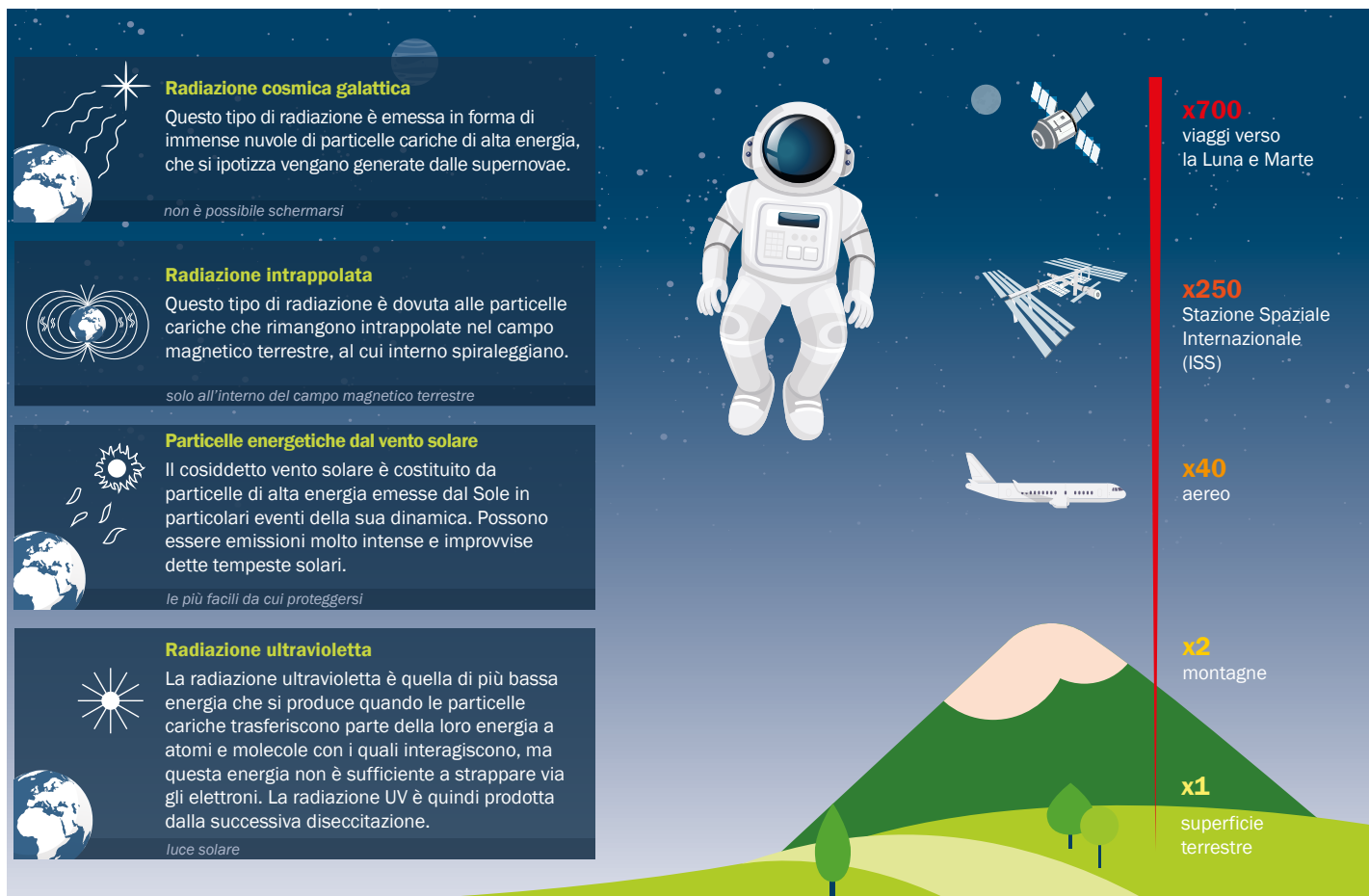
di Beatrice Fraboni



a. Samantha Cristoforetti (ultima a destra) è tra i quattro componenti dell'equipaggio che ha volato con Crew-4, una delle missioni di Crew Dragon verso la Stazione Spaziale Internazionale. Crew Dragon è la navicella riutilizzabile per il volo umano di SpaceX per la NASA.

L'esplorazione umana dello spazio è una delle sfide e imprese più affascinanti, un motore potente per stimolare e sviluppare la ricerca scientifica e l'innovazione tecnologica. Ma l'ambiente delle radiazioni nello spazio aperto rappresenta un rischio molto più elevato per la salute rispetto a quello determinato dalle radiazioni sulla Terra, a causa dell'assenza dell'effetto schermante offerto dall'atmosfera terrestre. Le radiazioni ionizzanti presenti nello spazio sono considerate dalla NASA uno dei cinque maggiori rischi per la salute da controllare e mitigare per consentire l'esplorazione umana del sistema solare. La pianificazione di una qualsiasi missione esplorativa umana richiede una solida conoscenza e una efficace mitigazione degli effetti di tali radiazioni e, quindi, un adeguato modello di

rischio. L'efficacia del modello di rischio è ancora limitata dalla nostra incompleta comprensione dei meccanismi di interazione delle radiazioni ionizzanti, non solo con i sistemi biologici e con i processi fisiologici, ma anche con i diversi materiali utilizzati per le navicelle spaziali e per le future basi extra-terrestri, che contribuiscono, con i processi di frammentazione, all'ambiente di radiazione cui risultano esposti gli astronauti. Il modello di rischio dovrà utilizzare congiuntamente le informazioni relative alle radiazioni e conoscenze di radiobiologia, che tengano conto dei possibili effetti su diversi organi, genere e storia personale, per produrre un output multiparametrico. È quindi evidente come sia necessario consolidare e promuovere ricerche in grado di misurare, controllare e mitigare gli effetti



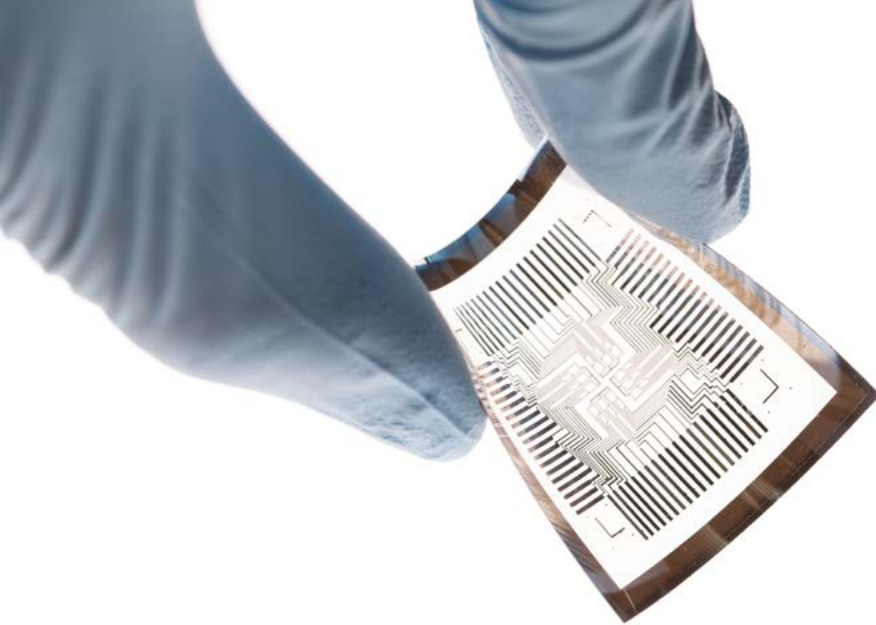
b.
Natura e origine della radiazione spaziale in funzione della distanza dalla superficie della Terra, fino agli habitat di navicelle spaziali utilizzate per l'esplorazione umana. La radiazione spaziale oltre le orbite definite basse (inferiori ai 500 km di quota) non solo può danneggiare la strumentazione elettronica ma costituisce un pericolo serio per gli esseri umani, poiché viene a mancare la protezione del campo magnetico terrestre.

dannosi delle radiazioni spaziali sulla salute, includendo approcci diretti sia alla riduzione dell'esposizione alle radiazioni, sia a strategie di mitigazione basate su biologia, farmacologia, fisiologia che portino a una maggiore resilienza umana alle radiazioni. Per consentire una sicura ed efficace esplorazione spaziale umana, non possiamo tuttavia limitarci a mitigare gli effetti delle radiazioni sugli astronauti, ma dovremo estendere lo studio a tutti gli strumenti a supporto della vita nello spazio (p.es. piante, cibo, medicine).

La radiazione spaziale è per lo più costituita da *galactic cosmic rays* (GCR) e da *solar particle events* (SPE). I primi sono costituiti da ioni di vari elementi, dall'idrogeno al ferro, i cui flussi decrescono per numero atomico maggiore di 26 e le cui energie coprono un intervallo che va da pochi MeV a oltre i TeV, con un picco massimo attorno a 1-2 GeV per nucleo. Gli SPE sono eventi sporadici e brevi (possono durare qualche ora o giorni), ma molto più intensi dei GCR, tipicamente costituiti da protoni con energie di un ordine di grandezza inferiore ai GCR.

La principale contromisura a protezione dalla radiazione cosmica

durante le missioni spaziali interplanetarie è costituita da schermaggi dedicati, che però producono particelle secondarie. Per poter stimare l'effettivo campo di radiazione presente nell'habitat spaziale (ad es. una navicella o una base lunare) occorre quindi tenere conto sia della modulazione della radiazione primaria indotta da eventuali campi magnetici sia della sua interazione con eventuali spessori di schermaggio, quali le pareti della navicella o le tute spaziali degli astronauti. I prodotti di radiazione secondari così generati sono la sorgente principale del danno biologico da radiazione a cui sono esposte le forme di vita nello spazio e di cui si occupa primariamente la radiobiologia. Gli schermaggi possono essere sia attivi che passivi. Generalmente, gli schermaggi passivi più efficaci sono costituiti da strati di materiali leggeri, altamente idrogenati (ad esempio polietilene). Tuttavia, a causa dell'alta energia delle particelle incidenti e dei processi di frammentazione nucleare che vengono attivati quando esse li attraversano, è necessaria ancora molta ricerca e innovazione nel campo dei materiali leggeri in grado di assorbire efficacemente la radiazione ionizzante. Sono



c.
Dosimetri personali innovativi, per il monitoraggio in tempo reale, non invasivo e continuativo, della dose ricevuta da membri di equipaggi spaziali.

stati studiati anche sistemi di schermaggio attivo, ad esempio campi magnetici attivati *ad hoc* per deflettere campi intensi di radiazione (ad es. durante un SPE), ma la loro realizzazione richiede ancora lavoro e innovazione tecnologica per ridurre il *budget* energetico richiesto e il peso del *payload* (carico da inviare) relativo.

Per poter prevedere e attivare contromisure efficaci è prima di tutto necessario conoscere la tipologia, le energie e i flussi della radiazione presente negli habitat extraterrestri in cui si prevede di sostenere vita biologica, e una consistente attività di ricerca si sta occupando di sviluppare rivelatori di radiazione che, oltre a fornire i dati richiesti con la precisione e accuratezza opportuna, soddisfino le stringenti richieste di peso e massa limitata, bassa potenza assorbita e piccole dimensioni.

Questo è particolarmente importante per i dosimetri personali necessari per monitorare la dose di radiazione ricevuta da ogni singolo astronauta e che, idealmente, dovrebbero essere sempre indossati nelle mansioni quotidiane. L'esposizione alla radiazione non è infatti isotropa e omogenea all'interno di una medesima navicella spaziale.

L'interesse primario è nello sviluppo di dosimetri personali attivi, ossia in grado di rivelare e trasmettere in tempo reale alla centrale operativa (di terra o della base spaziale) la dose ricevuta da chi li indossa, permettendo di attivare un allarme immediato in caso di sovraesposizione. Tipicamente tali rivelatori sono a base di materiali semiconduttori, in grado di convertire direttamente la radiazione ionizzante in un segnale elettrico di output. Recenti ricerche, al centro delle attività

sviluppate nel progetto IRIS, finanziato dall'ASI coordinato dall'INFN, hanno mostrato le interessanti potenzialità di dosimetri personali realizzati a base di semiconduttori innovativi (organici e "perovskiti", ovvero minerali composti da ossidi di due metalli che assumono una particolare struttura cristallina) che possono rivelare fotoni e protoni di alta energia anche in forma di film sottili (nano-micrometrici). Tali film possono essere depositati da una soluzione (a stampa inkjet) su substrati non convenzionali, quali plastica o tessuti, realizzando rivelatori ultrasottili e flessibili, anche su una larga area a forma di matrici pixellate, che garantiscono un peso e un volume estremamente ridotto rispetto ai semiconduttori tradizionali e che potranno essere utilizzati per un monitoraggio *in-situ* dell'esposizione di organi particolarmente delicati. La densità e la composizione chimica dei semiconduttori organici li rende inoltre equivalenti al tessuto umano, una proprietà preziosa per i materiali attivi nei dosimetri elettronici, per i quali non sarà più necessario effettuare delicate calibrazioni a valle della misura. La bassissima potenza richiesta (possono anche operare in modo completamente passivo) offre un ulteriore significativo vantaggio per il *payload* e per la sicurezza dell'equipaggio spaziale, che potrà indossarli impercettibilmente per tutto il tempo di permanenza in habitat extraterrestre, tenendo monitorata in tempo reale la dose di radiazione ricevuta.

Grazie agli studi effettuati fino ad oggi è stato possibile raggiungere traguardi impensabili qualche decennio fa, ma ancora tanta stimolante ricerca ci aspetta per poter rendere sicura l'esplorazione umana nello spazio.

Biografia

Beatrice Fraboni è professoressa di fisica all'Università di Bologna, dove coordina un gruppo di ricerca attivo nello studio di semiconduttori funzionali innovativi per rivelatori di radiazione ionizzante. Autrice di oltre 200 articoli scientifici e titolare di 15 brevetti, ha coordinato vari progetti europei e nazionali e coordina il progetto IRIS.

Un nuovo sguardo sulla Terra

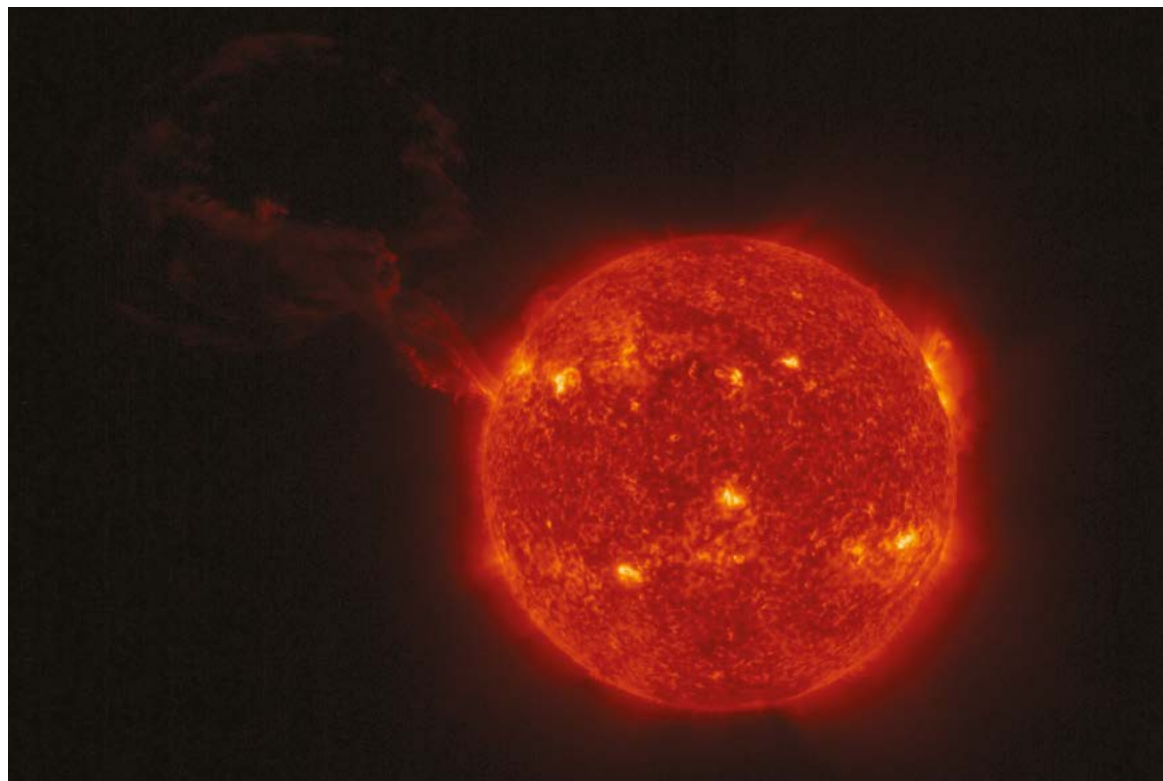
di Stefania Maria Beol  e Roberto Iuppa

Universit  di Torino e Universit  di Trento

Guardare la Terra dallo spazio, osservarla con occhi diversi per conoscerla meglio. Non bastano sistemi ottici per osservare l'interazione tra Terra, spazio e atmosfera, occorre utilizzare strumenti tecnologicamente avanzati, che permettono di analizzare fenomeni complessi. Come quelli che riguardano il Sole e la sua influenza sugli ambienti planetario e interplanetario, dove anche la minima perturbazione risulta difficile da comprendere e sono necessarie campagne osservative lunghe e articolate. I dati vengono raccolti da una rete di mini- e nano-satelliti, equipaggiati con sistemi di misura sofisticati e innovativi, lanciati dalle agenzie spaziali di tutto il mondo. In questo scenario l'INFN si distingue per la sua capacit  di sviluppare strumenti avanzati per la ricerca nella fisica fondamentale e per la facilit  con cui riesce a trasferire le sue competenze tecnologiche alle applicazioni spaziali.

Su queste premesse si fonda la partecipazione ormai quasi decennale di ricercatrici e ricercatori dell'INFN al programma spaziale Limadou. Il nome   la traslitterazione cinese di "Matteo Ricci", il gesuita italiano che nel XVI secolo ha rappresentato un ponte tra la cultura europea e quella cinese. Il cuore dell'iniziativa   la missione scientifica italo-cinese CSES (China Seismo Electromagnetic Satellite), che si ripropone di costruire e lanciare in orbita eliosincrona quasi-polare un *cluster* di satelliti per la misura delle perturbazioni del campo elettromagnetico, del plasma e del flusso di particelle cariche nella ionosfera e nella magnetosfera vicina. Il primo satellite (CSES-01)   stato lanciato nel 2018, mentre il lancio del secondo (CSES-02)   previsto per fine 2023.

Limadou ha tra i suoi obiettivi principali la misura di transienti veloci nella ionosfera, in cerca di possibili correlazioni tra eventi



a.
Una potente emissione solare, osservata dallo strumento Extreme Ultraviolet Imager a bordo del satellite Solar Orbiter. Si nota a sinistra il potentissimo getto di plasma solare, che si estende per 3,5 milioni di chilometri. Fenomeni come questo producono tempeste geomagnetiche sulla Terra, in grado di alterare il funzionamento dei sistemi di comunicazione satellitare e a Terra.

sismici di grande magnitudo e perturbazioni nel sistema di campi elettromagnetici, plasmi e particelle misurabili a 500 km di altezza, la quota a cui orbitano i satelliti. La letteratura scientifica riporta osservazioni di segnali elettromagnetici a varie frequenze (ELF, ULF e HF), così come perturbazioni locali del plasma e fluttuazioni nei flussi delle particelle cariche, in correlazione con forti terremoti e tsunami. Negli ultimi anni sono stati proposti nuovi modelli interpretativi che cercano di stabilire una relazione causa-effetto tra i processi sismici e tali perturbazioni, e indicazioni statisticamente significative sono attese proprio dai satelliti CSES, che costituiscono le infrastrutture satellitari più sofisticate di sempre per lo studio dei meccanismi di accoppiamento tra litosfera, atmosfera e ionosfera.

Il programma di fisica di Limadou non si limita alla ionosfera, ma contempla anche raggi cosmici di bassa energia, particelle intrappolate nelle fasce di Van Allen e studio dello *space weather*, argomenti che da anni costituiscono una parte importante delle attività sperimentali INFN dedicate allo studio della radiazione carica dallo spazio.

La collaborazione italiana ha lavorato su due dei nove strumenti a bordo del satellite, denominati EFD (Electric Field Detector) e HEPD (High Energy Particle Detector). EFD, sviluppato da INAF-INFN, è dedicato alla misura del campo elettrico dal continuo a 3,5 MHz, e a basse frequenze è sensibile a fluttuazioni di qualche microvolt/m (si pensi che quando fa bel tempo e usciamo per una bella passeggiata all'aperto ci muoviamo in un campo elettrico cento milioni di volte più intenso).

HEPD, sviluppato da INFN, è ottimizzato per la misura di elettroni, protoni e nuclei leggeri nell'intervallo di energie

MeV-GeV: per ciascuna particella misurata, HEPD è in grado di determinare la specie, l'energia e la direzione di arrivo.

HEPD-02, la nuova versione dello strumento che verrà ospitata a bordo del secondo satellite della missione CSES, consiste di una successione di rivelatori diversi, ciascuno con una propria funzione. Tra questi spiccano i sensori a pixel monolitici per il tracciamento delle particelle, il cui impiego non è solo una novità per il programma Limadou, ma una prima assoluta nelle applicazioni spaziali. Sono stati scelti per la loro velocità e perché garantiscono una migliore precisione della misura della traiettoria delle particelle, evitando ambiguità nella ricostruzione delle tracce. È un ottimo esempio di tecnologia sviluppata per un'applicazione (l'esperimento ALICE a LHC del CERN) che viene poi ottimizzata e riutilizzata in un ambito diverso. Lo studio di fattibilità è durato circa due anni, e ha compreso lo sviluppo di una struttura di supporto meccanico resistente alle vibrazioni previste durante il lancio, circuiti elettrici flessibili per dati e alimentazione con componenti e struttura compatibili con le richieste delle agenzie spaziali, ma soprattutto modifiche *ad hoc* della modalità di funzionamento dei sensori, dovute alla necessità di ridurre il consumo di potenza per non superare i limiti imposti dalla capacità del satellite CSES.

Gli strumenti da lanciare a bordo di CSES-02 sono stati costruiti con notevoli difficoltà durante gli anni della pandemia e sono ora sul punto di essere spediti in Cina per le ultime attività di preparazione in vista del lancio nell'autunno 2023. Sarà allora possibile osservare con maggiore sensibilità la ionosfera terrestre, sfruttando la copertura garantita dai due satelliti.

Il viaggio di Limadou continua: nuovi occhi per nuove scoperte.



b.
Un'aurora australe vista dalla Stazione Spaziale Internazionale (ISS).

[as] intersezioni

La *new space economy*

di Roberto Battiston

fisico sperimentale

Che cos'è la "*new*" *space economy*? Un fenomeno che mostra molte analogie è quello dell'esplosione della "*new*" *economy* di internet alla fine degli anni '90, con la nascita dei giganti del web, i GAFAM (Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft), che hanno contribuito a una drastica modifica delle nostre abitudini sociali, anche in termini economici. La "*new*" *economy* è caratterizzata dall'essere globale, legata al software piuttosto che al manifatturiero, basata su elementi infrastrutturali, come la rete internet e il linguaggio HTML sviluppato al CERN, ma, allo stesso tempo, sullo sviluppo di tecnologie di basso costo, come i personal computer fino agli smartphone dei nostri giorni. La formazione del valore è basata sui dati piuttosto

che sull'hardware, dati spesso ottenuti dagli utenti che beneficiano gratuitamente dei servizi forniti attraverso internet. Vent'anni dopo, sostituiamo al WWW l'accesso a basso costo alle orbite circumterrestri con razzi affidabili e recuperabili, al computer portatile i nanosatelliti, ai dati personali i dati del pianeta osservati dallo spazio, e cominceremo a capire che cos'è la "*new*" *space economy*: qualcosa di diverso, dunque, rispetto all'economia dei satelliti per le telecomunicazioni, già esistente dagli anni '80 e sostanzialmente saturata dal punto di vista del mercato. I dati di osservazione della Terra e quelli associati alla navigazione satellitare permettono la raccolta di informazioni uniche, quasi del tutto gratuite, il cui valore dipende



a.
Il lanciatore Falcon 9 e la capsula Dragon di Space X durante il trasferimento sulla rampa di lancio di Cape Canaveral.

dall'utilizzo che ne viene fatto per fornire "servizi". Un ulteriore elemento di analogia con la "new economy" è la nascita e il rapido sviluppo di compagnie che guidano il nuovo mercato spaziale, i cosiddetti "unicorni", ditte come SpaceX o Planet, che in meno di dieci anni hanno raggiunto e superato una capitalizzazione di un miliardo di dollari.

Non mancano tuttavia le differenze, collegate agli aspetti fisici degli ambiti in cui queste nuove economie si sviluppano. Lo spazio circumterrestre o interplanetario, per sua natura, è un ambito che pone molte sfide: raggiunta l'orbita tramite un lancio di un razzo, i satelliti devono poi operare senza praticamente la possibilità di riparazioni o interventi, esposti a condizioni ambientali ostili. Senza dimenticare la quantità di risorse potenzialmente "infinite" disponibili nello spazio, di cui oggi possiamo sfruttare solo la componente presente nelle orbite basse tra i 300 e i 1000 km di altezza. In questa regione orbitano infatti un numero di satelliti che nel 2023 supererà i 10.000, di cui più del 60% operativi, oltre a centinaia di migliaia di frammenti dovuti all'attività spaziale degli ultimi decenni e alle collisioni o distruzioni di satelliti in orbita. Per quanto riguarda le risorse minerarie, la prospettiva è ancora remota: la realizzazione di una base lunare, prevista entro il decennio, porterà a una limitata attività mineraria, principalmente dedicata alla ricerca di ghiaccio d'acqua nelle regioni polari, mentre l'esplorazione della fascia di asteroidi posta tra Marte e Giove, dove sono probabilmente presenti risorse ingenti in termini di materiali con alto valore economico, non è nemmeno iniziata. Ma anche così la crescita degli investimenti e delle attività collegate alla *new space economy* è chiaramente percepibile: le stime prevedono una crescita fino a dieci volte nel corso del decennio, a partire dai circa 400 miliardi di euro di fatturato globale del 2021.

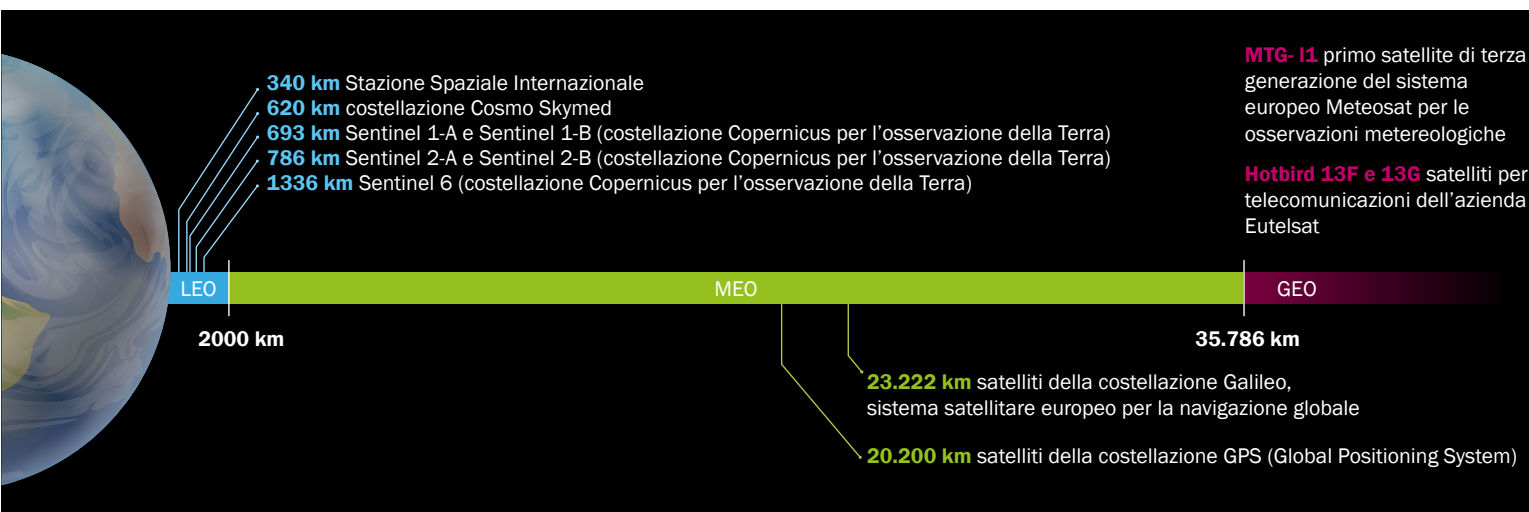
Quali sono i principali risultati della *new space economy* ad oggi? Un settore di grande interesse è l'osservazione della Terra, dove costellazioni formate da un gran numero di satelliti medio-piccoli hanno determinato cambiamenti radicali. Se, una volta,

grandi satelliti ottici permettevano di osservare specifiche aree di interesse con risoluzione spaziale decimetrica ma con lungo tempo di revisita (giorni), oggi possiamo osservare ogni giorno, ogni angolo della Terra, alla stessa ora, con risoluzione di circa 1 metro, grazie a costellazioni comprendenti più di un centinaio di nanosatelliti. Questo monitoraggio, sistematico e regolare, apre la strada allo sviluppo di una molteplicità di servizi a basso costo basati su questi dati raccolti da un punto di vista privilegiato: si va dal monitoraggio delle riserve delle raffinerie, sfruttando l'ombra prodotta dal sole sull'altezza dei gasometri, al calcolo della potenza delle centrali termiche misurando la dimensione del fumo di condensazione uscente dai camini, all'agricoltura di precisione (acqua, fertilizzanti, data di raccolta) basata sullo stato di salute delle culture, all'identificazione del traffico navale, legale e illegale, al monitoraggio delle emissioni clima-alteranti, al monitoraggio dei disastri naturali (tsunami, terremoti, uragani) e così via. I dati di geolocalizzazione combinati con quelli di osservazione moltiplicano le possibilità di servizi combinati: ad esempio Galileo, il sistema di navigazione satellitare europeo, permette la ricezione di segnali che consentono di attivare interventi di emergenza con precisione di pochi metri.

L'Italia partecipa allo sviluppo della *new space economy* grazie a una buona tradizione industriale, unita alla qualità della filiera di formazione universitaria e di ricerca. Nel cogliere questa opportunità di crescita, la sfida per il nostro paese è quella di sapersi muovere alla velocità richiesta da una fase del mercato in rapida evoluzione. L'investimento pubblico è stato molto rilevante negli ultimi anni: solo con il PNRR sono stati investiti più di due miliardi di euro in aggiunta al bilancio annuale dell'ASI che sfiora il miliardo di euro. Ma per cogliere le dinamiche dell'economia spaziale, occorrono strumenti con una forte caratterizzazione privatistica come il "venture capital" (VC), il "capitale di rischio". In questo caso l'Italia si è mossa tempestivamente, con l'attivazione nel 2019 del Fondo VC tematico Primo Space, dedicato proprio a cogliere le opportunità della *new space economy*.

b.

Tipi di orbite satellitari: orbite terrestri basse (LEO, Low Earth Orbits), al di sotto dei 2000 km di altitudine; orbite terrestri medie (MEO, Medium Earth Orbits), tra i 2000 km e i 35.786 km di altitudine; orbita geostazionaria (GEO, Geostationary Earth Orbit), a 35.786 km, in corrispondenza della quale il periodo di rivoluzione del satellite è uguale al periodo di rotazione della Terra.



[as] traiettorie

AMS a cuore aperto

di Matteo Massicci

Nel 2019 AMS-02 è stato sottoposto a una serie di complicati interventi di manutenzione nel corso di quattro attività extra-veicolari (EVA), le quali hanno richiesto una lunga e attenta pianificazione e la realizzazione di procedure e strumenti espressamente dedicati allo scopo. Uno scrupoloso lavoro, che ha visto la stretta collaborazione tra gli scienziati della collaborazione AMS-02 e l'astronauta italiano dell'ESA Luca Parmitano, responsabile, insieme al collega della NASA Andrew Morgan, delle operazioni di riparazione e aggiornamento del rivelatore.

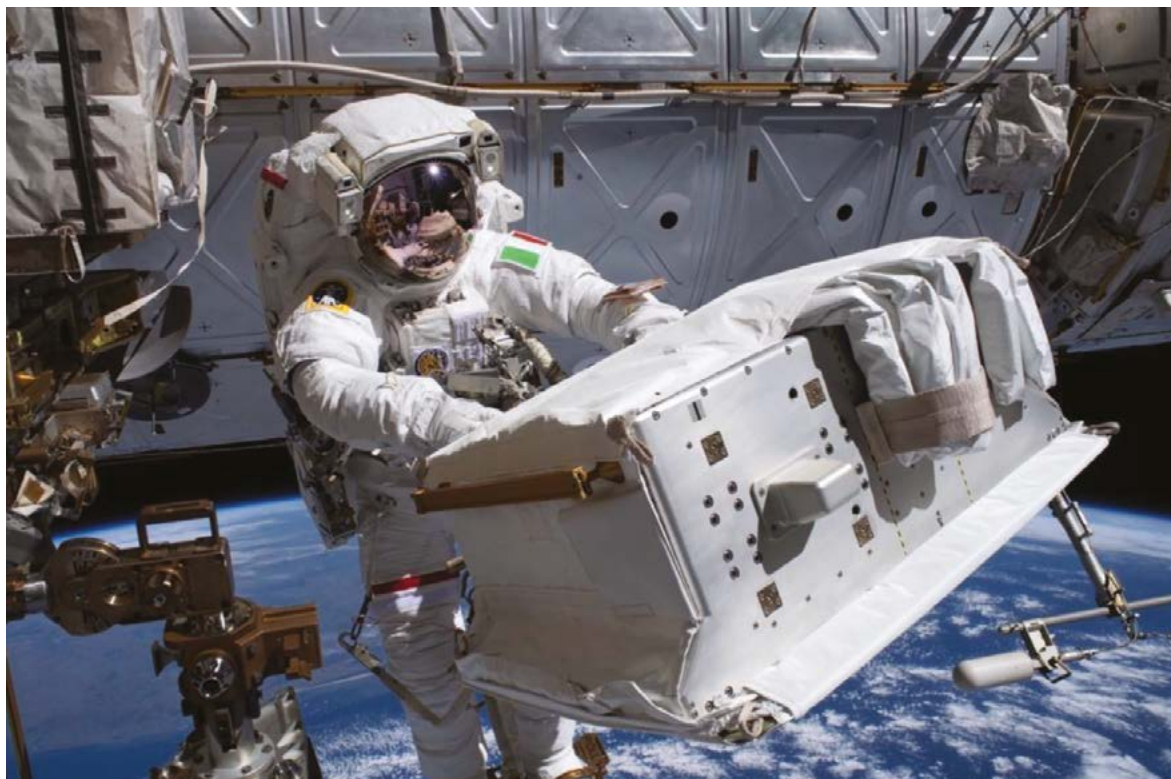
[as]: Quando matura l'idea di estendere l'operatività di AMS-02 attraverso delle riparazioni in orbita?

[Luca Parmitano]: Già nel 2015 fui contattato da chi si occupa di organizzare le EVA per esprimere un'opinione rispetto alla possibilità di effettuare le riparazioni del rivelatore in orbita. La mia risposta, come immagino quella di tutti gli altri astronauti interpellati, fu che le operazioni si sarebbero potute effettuare con l'utilizzo degli strumenti adeguati. Questa fase preliminare si è protratta fino all'inizio del 2018, quando fui assegnato come numero due delle EVA e iniziai un primo addestramento adatto a svolgere questo compito.

[as]: In che modo si è svolto il tuo addestramento di preparazione alla missione e quando è iniziato?

[LP]: L'inizio dell'addestramento in vista degli interventi in orbita su AMS è coinciso con l'affidamento dell'incarico a svolgere in prima persona l'attività. La preparazione si è articolata in quattro momenti distinti: a partire da quello condotto in acqua, nella Neutral Buoyancy Laboratory Facility, dove abbiamo verificato che gli spostamenti della coreografia programmata fossero corretti ed eseguibili; per proseguire con le esercitazioni all'aperto su ARGOS, un sistema di sospensioni molto complesso, che consente di simulare la condizione di microgravità, grazie al quale è stato possibile fare pratica con un modello realistico di AMS, sul quale mi sono addestrato sulle vere operazioni di taglio e giuntura. Il periodo conclusivo dell'addestramento si è invece concentrato sulle esercitazioni relative allo spostamento del braccio robotico della stazione spaziale, una delle componenti essenziali delle EVA, in realtà virtuale, e sul controllo degli strumenti.





b.
Luca Parmitano,
attaccato al braccio
robotico "Canadarm2",
tiene in mano l'UTTPS
da installare su AMS-02.

[as]: Quali erano gli obiettivi delle quattro EVA di riparazione effettuate e quale difficoltà hanno comportato?

[LP]: Di fatto le attività extraveicolari che abbiamo effettuato erano talmente differenziate e distinguibili l'una dall'altra, che abbiamo potuto assegnare a ognuna di esse un nome. La prima è stata denominata "*the opening act*", come l'atto iniziale di un'opera teatrale, poiché è stato proprio nel corso di questa attività che è stato aperto AMS, con l'obiettivo di accedere, tramite un punto individuato dai tecnici responsabili della costruzione del rivelatore, all'area in cui è stata successivamente sostituita la pompa. Per fare ciò è stato necessario smontare la componente protettiva dell'esperimento, che non era stata disegnata per interventi di questo tipo, poiché nessuna delle sue parti era *captive*, ovvero progettata per rimanere agganciata. Sebbene possa sembrare semplice, l'operazione è stata in realtà molto complessa, in quanto c'era un forte rischio di generare spazzatura spaziale potenzialmente molto dannosa. Sono oggi orgoglioso di dire che non ho perso neanche la più piccola rondella. La seconda EVA è stata quella più complessa, e per questa ragione è stata chiamata *the "nail-biter"*, per richiamare il fatto che sarebbe stato il momento più delicato – da "mangiarsi le unghie" –, durante il quale abbiamo tagliato i tubi del sistema di raffreddamento di AMS. Il nervosismo causato da questa operazione risiedeva nel fatto che tagliare il tubo sbagliato, tra gli otto presenti e posizionati uno sopra l'altro, avrebbe significato mettere fine all'esperienza. Anche questa fase si è conclusa con un successo, soprattutto per merito delle centinaia di ore di preparazione a terra. La terza

EVA è stata battezzata "*the money maker*" e rappresentava il cuore della missione, poiché prevedeva l'installazione della nuova pompa e la sua integrazione con i sistemi di AMS, procedure mai svolte prima in orbita, in un ambiente microgravitazionale. La quarta attività extraveicolare, "*the closing act*", in cui non tutto è andato come programmato, ha infine rappresentato la prova del nove. Nel corso di questo atto conclusivo abbiamo infatti verificato che tutte le giunture fossero a tenuta stagna, operazione che ci ha portato a intervenire per ben due volte su una di esse, per poi richiudere l'apparato e coprirlo con il materiale protettivo che schermava termicamente tutti gli esperimenti a bordo della ISS, il Multilayer Insulation.

[as]: Avendo condiviso con gli scienziati di AMS una buona parte del tuo addestramento, puoi raccontarci quale aspetto ti ha maggiormente colpito del lavoro che si svolge nell'ambito di questa collaborazione?

[LP]: L'esperienza con questa realtà scientifica mi fa ancora oggi riflettere sul fatto che, sebbene siano a tutti gli effetti strumenti privi di anima e della capacità di comprendere, gli esperimenti come AMS incarnino tutto l'entusiasmo e i duri anni di lavoro e di studio degli scienziati che li hanno realizzati. Nel periodo trascorso a contatto con questo mondo, sono perciò rimasto sorpreso, come sempre mi capita, dai modi in cui l'umanità sappia e possa esprimersi ai suoi livelli più alti, in questo particolare caso attraverso il suo ingegno, la sua curiosità e la sua volontà di scoprire, ma anche per mezzo della capacità di mettere da parte delle teorie per costruirne di nuove.

[as] radici

Quella volta a Cape Canaveral...

di Lorenzo Pinna

divulgatore scientifico di Quark e Superquark

Piero Angela non è stato soltanto un grande giornalista, un grande divulgatore, come viene spesso ricordato dopo la sua scomparsa, ma anche un grande intellettuale. Una persona cioè che aveva un grande progetto culturale per il nostro paese, l'Italia. In tempi di grandi trasformazioni innescate dalle scoperte scientifiche e dalle innovazioni tecnologiche, spesso è difficile tenere il passo, comprendere e adeguarsi ai cambiamenti. L'idea di Piero era che il nostro paese avesse un gravissimo ritardo culturale a entrare nella modernità; cioè un deficit nella capacità di comprendere quelli che sono oggi i veri acceleratori dello sviluppo: educazione, conoscenza, competenza, flessibilità, innovazione, capacità progettuale, ecc. Tutte cose importanti anche in passato, ma che oggi sono ormai assolutamente necessarie. Non comprendere queste connessioni (e trarne le conseguenze) vuol dire tagliare le gambe allo sviluppo. La grande missione di Piero è stata proprio quella di favorire questo cambiamento culturale con i suoi programmi, i suoi libri e le sue innumerevoli iniziative. Ma come nasce, giornalmisticamente, Piero Angela? Non come giornalista scientifico, ma come corrispondente dall'estero, soprattutto dalla fine degli anni '50 agli anni '60 del secolo scorso. Era il periodo turbolento della decolonizzazione e Piero, che si trovava a Parigi come corrispondente della RAI, seguì da vicino le vicende della guerra d'Algeria. Fu in Israele durante la guerra dei sei giorni. In Yemen, ad Aden, ormai abbandonata dagli inglesi. O in Iraq per un reportage sulla produzione di petrolio. O in Vietnam durante le fasi più intense della guerra. Fu anche il corrispondente da Bruxelles e il testimone dei turbolenti inizi della Comunità Europea. Un lavoro davvero avventuroso nei centri nevralgici della storia dell'epoca. A questo punto ci possiamo chiedere: da dove arriva l'interesse di Piero, o meglio la sua passione, per la divulgazione scientifica? L'"illuminazione" avviene durante le corrispondenze dagli Stati Uniti per il progetto

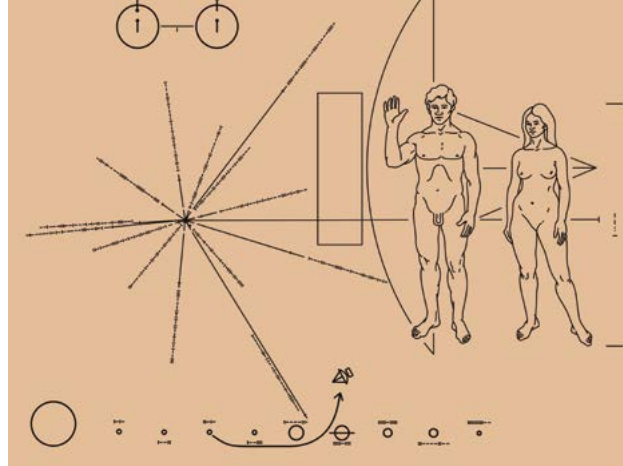
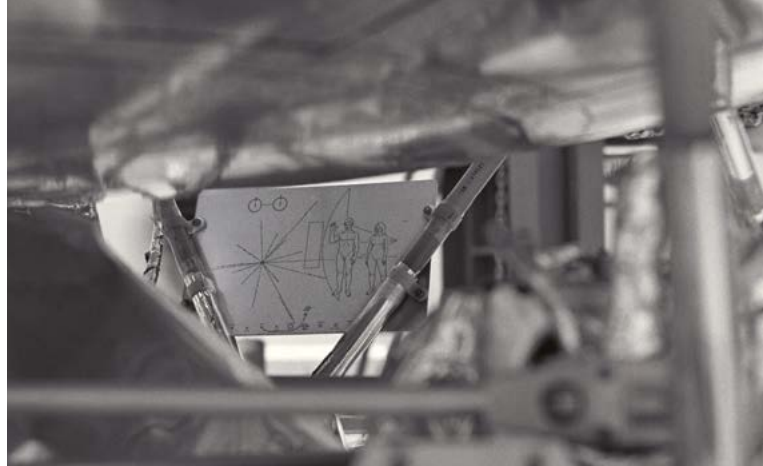


Apollo. Il progetto che avrebbe portato nel luglio del 1969 il primo uomo sulla Luna. L'incontro con tanti scienziati e ingegneri, fra i quali anche il leggendario Werner Von Braun, il padre del gigantesco razzo Saturno V, alto 110 metri, le visite ai centri della NASA, alle basi di lancio come Cape Canaveral, rappresentano il punto di svolta: la comprensione che la scienza e la tecnologia sono oggi il motore delle società moderne e lo saranno sempre di più in futuro. Ma c'è anche un altro momento molto importante in questa esperienza di corrispondente dalla NASA. Non è il primo passo sulla Luna di Neil Armstrong, ma la missione dell'Apollo 8 che non prevedeva nessuno sbarco, ma solo un'orbita intorno alla Luna per poi tornare sulla Terra. La prova generale. Durante la missione dell'Apollo 8 gli astronauti puntarono la telecamera verso la Terra che apparve, in bianco e nero, come un puntino luminoso perso nell'oscurità del cosmo. Un pianeta protetto da un sottilissimo strato di atmosfera che ci tiene in vita e sfreccia a 100mila chilometri all'ora intorno al Sole. "E sotto quel sottilissimo velo – come scriveva Piero Angela – ci sono gli uomini che continuano a scontrarsi, a insultarsi e a combattersi. Ecco: lo spazio ci aiuta anche a capire quanto siamo insignificanti e quanto sia prezioso il nostro piccolo angioletto". È forse l'immagine della Terra come granellino sperduto nell'immensità del cosmo che ispira a Piero alcuni dei programmi più significativi che realizzerà nel corso degli anni '70 e che riguardano proprio il tema, oggi diremmo, della sostenibilità.

Nei primi anni '70 il Club di Roma fondato da un grande manager, Aurelio Peccei, pubblica il famoso rapporto del MIT sui limiti della crescita. La scienza si comincia a porre numerosi interrogativi sui consumi di energia, sull'esplosione della popolazione, sulle risorse alimentari, sulle sostanze inquinanti che la enorme massa di attività umane riversa nel sottilissimo velo dell'atmosfera. Piero Angela è uno dei primi a spiegare a fondo le tesi del Club di Roma con un programma del 1973 che si intitola "Dove va il mondo?".

Ma l'incontro con lo "spazio", durante il progetto Apollo, riserva altre sorprese e altre riflessioni. In particolare sull'importanza della scuola, dell'educazione e del merito. La prima volta che Piero arrivò a Cape Canaveral, sfogliando l'elenco dei funzionari della NASA, vide un nome italiano, Rocco Petrone, con una posizione molto importante: il direttore del lancio! Come ci racconta lo stesso Piero: "Presi appuntamento e lo incontrai. Quando gli chiesi se fosse di origine italiana mi rispose testualmente: *'Sugnu du paese de Sasso de Castalda in provincia de Putenza!'* Mi raccontò che era figlio di emigrati poveri arrivati in America per fare fortuna. La sua è una storia molto esemplare, che dovrebbe far riflettere. Suo padre morì quando lui era ancora piccolo. La madre lavorava come operaia in una fabbrica di guanti e fece ogni genere di sacrificio per farlo studiare. Rocco era un ragazzo molto intelligente e riuscì a vincere un concorso per entrare all'Accademia militare di West Point. E in seguito a laurearsi in ingegneria spaziale al prestigioso MIT di Boston. Se fosse rimasto nel suo paesino, Rocco Petrone sarebbe diventato probabilmente un bravo contadino: in una società che premia il merito era invece diventato l'uomo che dirigeva il lancio per la conquista della Luna. Non solo, ma in seguito fu nominato capo di tutte le missioni Apollo".





a.
A sinistra la placca attaccata al Pioneer 10, a destra il suo aspetto nel dettaglio.

[as] visioni

Ho visto un wguehdbb!

di Giuliana Galati

La vastità dell'universo ci impone di chiederci: siamo soli? C'è qualcuno su uno degli altri innumerevoli pianeti di quelle galassie così lontane da essere appena un puntino sui nostri potenti telescopi? Ero lì a fissare il cielo nero quando uno strano essere si è schiantato a tutta velocità sui miei pensieri.

[as]: E tu chi sei?

[alien_]: Io sono un wguehdbb e tu devi essere uno di questi così. Sono qui per riportarvi questo inutile oggetto.

[as]: Ma allora vieni dallo spazio! Sei un alieno? Un'aliena? Incredibile, hai ritrovato la placca del Pioneer! È stata inviata nello spazio 50 anni fa, nella remota speranza che potesse essere intercettata da qualche altra forma di vita intelligente.

[alien_]: Intelligente lo dici ai tuoi simili, noi wguehdbb siamo ben più che intelligenti. Se anche voi lo foste, questo affare sarebbe stato più chiaro. Passino i vostri ritratti, che, ora che ti vedo, sono un po' abbelliti rispetto alla realtà. Abbiamo capito pure che questo dietro di voi è il disegno della sonda in cui ci siamo imbattuti. Ma questa specie di mappa per trovarvi nel sistema solare è alquanto ottimista. Pensate forse che il simbolo con cui indicate la vostra posizione sia universale?

[as]: La freccia intendi? Eh, sì, in effetti è un simbolo così tipico per noi che solo dopo qualcuno ha pensato potesse non avere senso per una società che non aveva un passato di cacciatori armati di frecce. Questi due tondi qui, invece, rappresentano la transizione iperfine per inversione di spin dell'idrogeno. Vedi questa piccola linea verticale? Rappresenta la cifra binaria 1. Il passaggio di un atomo di idrogeno da uno stato con spin su a

uno con spin giù definisce la lunghezza di 21 cm e la frequenza di 1420 MHz. Entrambe le quantità sono usate come unità di misura negli altri simboli...

[alien_]: Capisco... quasi astuto da parte vostra. E queste 15 linee che partono dallo stesso punto?

[as]: Tutte tranne quella che va verso destra, dietro le figure umane, rappresentano delle pulsar. Quella a destra invece indica la distanza del Sole dal centro della Galassia. Le linee delle pulsar corrispondono a un numero binario che ne rappresenta il periodo, usando la frequenza di 1420 MHz che abbiamo visto prima come unità di misura. Da questi dati si può ricavare la posizione dell'origine della sonda e anche quando è stata inviata. Se siete così intelligenti come dite, come avete fatto a non capirlo?

[alien_]: Il periodo di questa linea che punta in basso a destra è sbagliato.

[as]: Non sei molto comprensivo! Almeno ci siamo sforzati di mandarvi un messaggio... Questa placca è stata un'idea di due grandi fisici: Carl Sagan e Frank Drake, ed è stata realizzata in tempi record e tra mille polemiche. Non è facile decidere cosa comunicare e immaginare cosa potrebbero capire degli esseri completamente diversi da noi... Abbiamo mandato vari messaggi sai? Per esempio, c'è quello radio inviato dal radiotelescopio di Arecibo...

[alien_]: Sì, sì, li abbiamo ricevuti tutti. Solo non avevamo voglia di rispondervi. Ciao ciao.

La distanza della Luna

Una volta, secondo Sir George H. Darwin, la Luna era molto vicina alla Terra. Furono le maree che a poco a poco la spinsero lontano: le maree che lei Luna provoca nelle acque terrestri e in cui la Terra perde lentamente energia.

Lo so bene! – esclamò il vecchio Qfwfq, – voi non ve ne potete ricordare ma io sì. L'avevamo sempre addosso, la Luna, smisurata: quand'era il plenilunio – notti chiare come di giorno, ma d'una luce color burro –, pareva che ci schiacciasse; quand'era lunanuova rotolava per il cielo come un nero ombrello portato dal vento; e a lunacrescente veniva avanti a corna così basse che pareva lì lì per infilzare la cresta d'un promontorio e restarci ancorata. Ma tutto il meccanismo delle fasi andava diversamente che oggi: per via che le distanze dal Sole erano diverse, e le orbite, e l'inclinazione non ricordo di che cosa; eclissi poi, con Terra e Luna così appiccate, ce n'erano tutti i momenti: figuriamoci se quelle due bestie non trovavano modo di farsi continuamente ombra a vicenda.

L'orbita? Ellittica, si capisce, ellittica: un po' ci s'appiattiva addosso e un po' prendeva il volo. Le maree, quando la Luna si faceva più sotto, salivano che non le teneva più nessuno. C'erano delle notti di plenilunio basso basso e d'altamarea alta alta che se la Luna non si bagnava in mare ci mancava un pelo; diciamo: pochi metri.

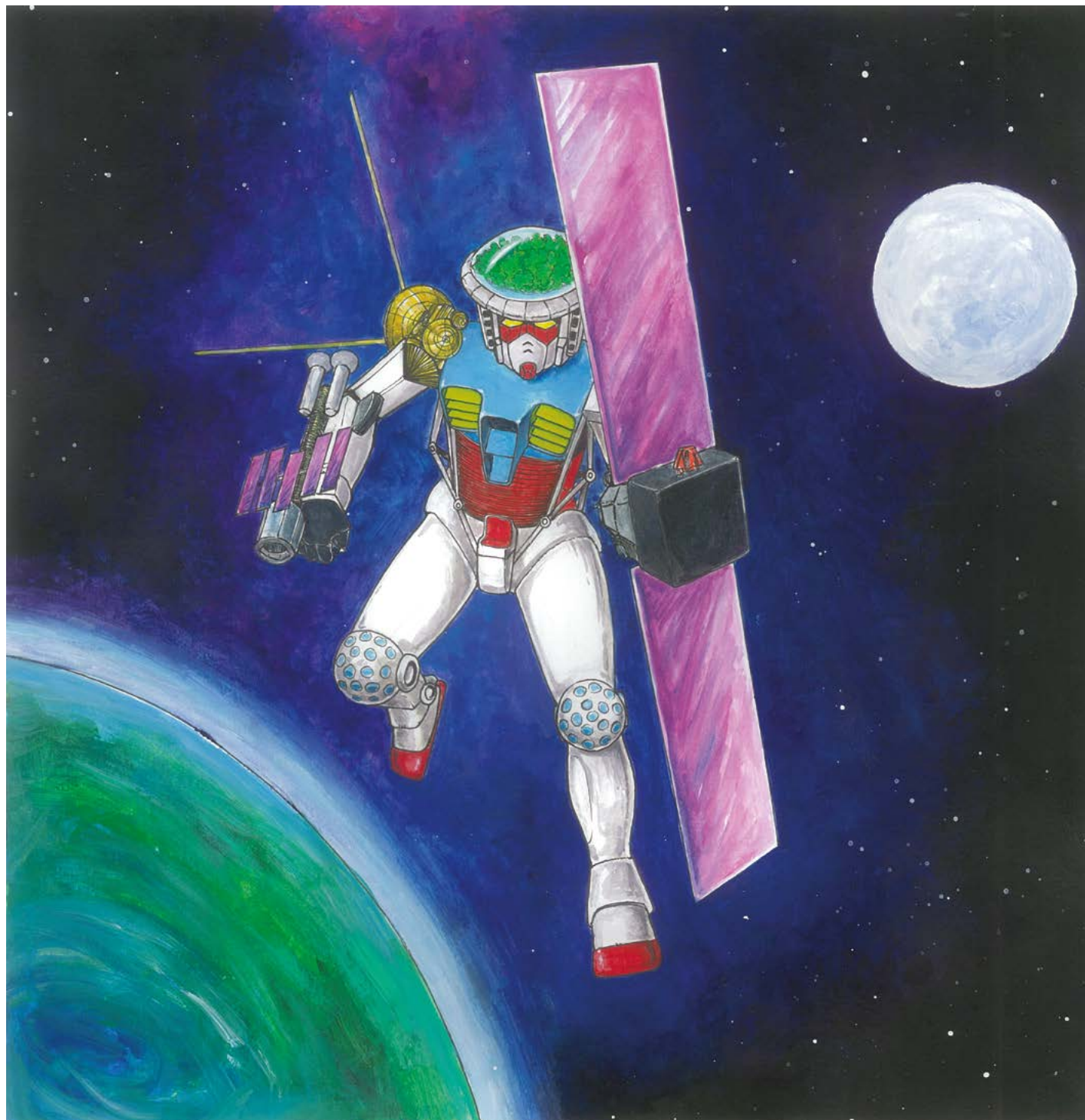
Se non abbiamo mai provato a salirci? E come no? Bastava andarci proprio sotto con la barca, appoggiarci una scala a pioli e montar su.

Il punto dove la Luna passava più basso era al largo degli Scogli di Zinco. Andavamo con quelle barchette a remi che si usavano allora, tonde e piatte, di sughero. Ci si stava in parecchi: io, il capitano Vhd Vhd, sua moglie, mio cugino il sordo, e alle volte anche la piccola Xlthx che allora avrà avuto dodici anni. L'acqua era in quelle notti calmissima, argentata che pareva mercurio, e i pesci, dentro, violetti, che non potendo resistere all'attrazione della Luna venivano tutti a galla, e così polpi e meduse color zafferano. C'era sempre un volo di bestioline minute – piccoli granchi, calamari, e anche alghe leggere e diafane e piantine di corallo – che si staccavano dal mare e finivano nella Luna, a penzolare giù da quel soffitto calcinoso, oppure restavano lì a mezz'aria, in uno sciame fosforescente, che scacciavamo agitando delle foglie di banano.

Tratto da "Le Cosmicomiche" di Italo Calvino

© 2002 by Eredi Calvino e Arnoldo Mondadori Editore S.p.A., Milano

© 2015 by Eredi Calvino e Mondadori Libri S.p.A., Milano



Occhi profondi per scrutare l'invisibile: raggi X, raggi gamma, il lieve sussurro gravitazionale della precessione di Lense-Thirring. Ma il successo di ogni odissea dipende da quanto la mente riesce a restare legata all'Itaca natia: preservare la bellezza del vivente, mentre la conoscenza varca nuovi confini.

"Spazio, ultima frontiera", acrilico su carta. Illustrazione e testo di Alessandro Nagar



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)

T + 39 06 94032423
/ 2552 / 2643 / 2942
comedu@lnf.infn.it
www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)

T +39 0862 437265/450
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)

T + 39 049 8068342 356
stage@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)

T + 39 095 542296
visiteguide@lists.lns.infn.it
www.lns.infn.it



Raccontaci che cosa pensi di Asimmetrie su Instagram.
Pubblica storie, post e reel con l'hashtag
#AsimmetrieInfn e taggando l'account @infn_insights.
Condivideremo i tuoi contenuti.

www.infn.it



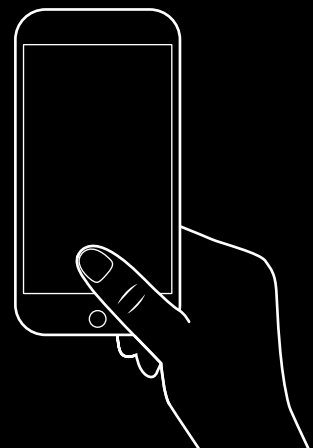
Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

Per **abbonarti gratuitamente** ad Asimmetrie
o per **modificare** il tuo abbonamento vai su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/abbonamento>

Si prega di tenere sempre aggiornato il proprio
indirizzo mail per ricevere le nostre comunicazioni.

Leggi anche le nostre **faq** su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/faq>

Asimmetrie è anche una app,
ricca di nuovi contenuti multimediali.





www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it