

bimestrale,
ottobre
2021

ISSN 0036-4681 - ISBN 978-88-220-9451-3 - anno 88°, n. 5 / € 8,00

Sapere

idee e progressi della scienza

 edizioni
Dedalo

**SPECIALE
ASTROFISICA**



**ESOPIANETI • ASTROMETRIA GRAVITAZIONALE • ASTRONOMIA MULTI-MESSAGGERA
UNIVERSO VIOLENTO • NUOVO TELESCOPIO SPAZIALE • RADIOASTRONOMIA FUTURA**

Abbonati a Sapere!

abbonamenti@edizionidedalo.it



in omaggio
questo mese



www.saperescienza.it

Seguici anche su



DIRETTORE
Nicola Armaroli

EDITORIAL BOARD
Tommaso Castellani, Elena Ioli, Massimo Trotta

COMITATO SCIENTIFICO
Vincenzo Barone, Giulio Biroli, Enrico Bonatti,
Claudio Franceschi, Maria Cristina Facchini,
Marco Garavelli, Alba L'Astorina, Barbara Mognetti,
Massimo Monteleone, Roberto Natalini, Alina Polonia,
Stefano Sandrelli, Sara Tortorella, Adriana Valente

REDAZIONE
Micaela Ranieri - sapere@edizionidedalo.it

RUBRICHE
Philip Ball, Marco Cervino, Cristina Mangia,
Monica Marelli, Roberto Natalini,
Vincenzo Palermo, Armando Pisani, Alina Polonia,
Stefano Sandrelli, Massimo Trotta

TRADUZIONI
David Santoro (per Philip Ball)

PROGETTO GRAFICO
Coordinamento: Rosanna Pucciarelli
Grafica: Salvatore Modugno
Impaginazione: Stefano Fontana

DIRETTORE RESPONSABILE
Claudia Coga

DIREZIONE, AMMINISTRAZIONE, ABBONAMENTI
Edizioni Dedalo
divisione della Dedalo litostampa srl
V.le Luigi Jacobini 5, Bari 70132
Tel. 080/531.14.13 - Fax 080/531.14.14
e-mail: abbonamenti@edizionidedalo.it
www.edizionidedalo.it

ABBONAMENTO 2021
cartaceo più pdf euro 44,00 (estero euro 85,00)
versione pdf euro 25,00
A tutti gli abbonati verrà inviato a fine anno,
in omaggio, il raccoglitore dei fascicoli dell'annata

CONTO CORRENTE POSTALE
n. 11639705 intestato a: Dedalo litostampa srl, Bari

ARRETRATI
per i fascicoli arretrati consultare il sito internet
www.edizionidedalo.it o contattare l'Editore

COPYRIGHT
edizioni Dedalo
divisione della Dedalo litostampa srl - Bari
Manoscritti e fotografie non richiesti non si restituiscono

PUBBLICITÀ
edizioni Dedalo
divisione della Dedalo litostampa srl
V.le Luigi Jacobini 5, Bari 70132
Tel. 080/531.14.13 - Fax 080/531.14.14
info@edizionidedalo.it

STAMPA
Dedalo litostampa srl, Bari

REGISTRAZIONE
n. 372 del 3 ottobre 1969 del Tribunale di Bari

DISTRIBUZIONE IN LIBRERIA
Messagerie libri

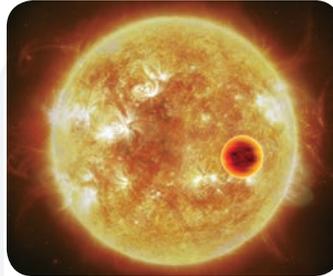
immagine di copertina © SKAO

Ogni tentativo è stato fatto per recuperare i crediti fotografici
corretti. Ci scusiamo se, per cause indipendenti dalla nostra
volontà, avessimo ommesso o citato erroneamente alcune fonti.



ASSOCIATO ALL'USPI
UNIONE STAMPA
PERIODICI ITALIANA

IN QUESTO NUMERO

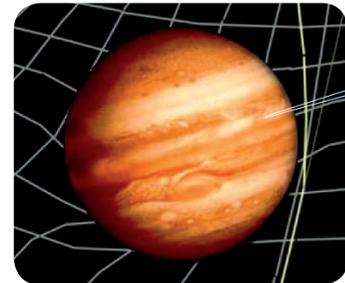


La rivoluzione esoplanetaria

di Giuseppe Malaguti

Mappare lo spazio-tempo dell'Universo

di Mariateresa Crosta



INTEGRAL reloaded

di Angela Bazzano
e Pietro Ubertini

Il cielo ai raggi gamma di altissima energia

di Lucio Angelo Antonelli



Il telescopio spaziale James Webb

di Monica Tosi

L'osservatorio SKA: il più grande radiotelescopio del mondo

di Grazia M. Umata



EDITORIALE

Le chiacchiere sul nucleare

di Nicola Armaroli

GUEST EDITORIAL

Astronomia: la scienza più antica e più moderna

di Patrizia Caraveo

SATELLITE

news a cura di Luigi Minervini

ARTICOLI**ESOPIANETI**

La rivoluzione esoplanetaria

di Giuseppe Malaguti

ASTROMETRIA GRAVITAZIONALE

Mappare lo spazio-tempo dell'Universo che ci circonda, dal Sole verso miliardi di stelle

di Mariateresa Crosta

ASTRONOMIA MULTI-MESSAGGERA*INTEGRAL reloaded*

di Angela Bazzano e Pietro Ubertini

UNIVERSO VIOLENTO

Il cielo ai raggi gamma di altissima energia

di Lucio Angelo Antonelli

OSSERVAZIONE SPAZIALE

Il telescopio spaziale James Webb

di Monica Tosi

RADIOASTRONOMIA FUTURA

L'osservatorio SKA: la costruzione del più grande radiotelescopio del mondo

di Grazia M. Umara

SCIENZA A SCUOLA

L'essenziale è invisibile agli occhi

di Armando Pisani

5



6

8

12

18

24

30

36



42

48

■ STORIE DI SCIENZA

Dove nessun uomo è mai giunto
di Vincenzo Palermo

50

■ RUBRICHE

TERRA, TERRA!

Rischi geologici dal cielo
di Alina Polonia

52

L'ISTINTO MUSICALE

Ascoltare l'Universo
di Philip Ball

53

SPAZIO ALLA SCUOLA

L'astronomia per un mondo migliore
di Stefano Sandrelli

54

COSCIENZIAT@

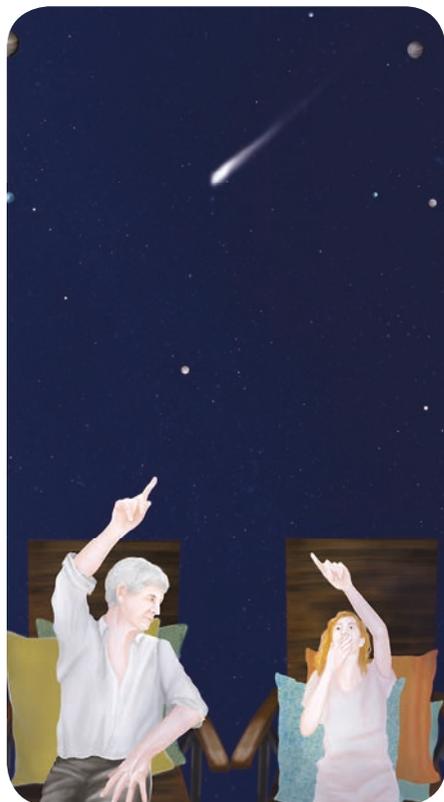
Classici fuochi
di Marco Cervino e Cristina Mangia

55

PROTEINE OPERAIE

L'olezzo in fondo al tunnel
di Massimo Trotta

56



HOMO MATHEMATICUS

Camminando nella pazza folla
di Roberto Natalini

57

BUFALE E MISTERI

L'anomalia del Sud Atlantico
di Monica Marelli

58

■ SCIENZA LIGHT

IL RACCONTO

A caccia di satelliti
di Giulia Bignami

60

GRAPHIC NOVEL

Ipazia
di Silvia Sbaragli e Andrea De Carli

62

LA MAPPA

E incominciavo a volare nel cielo infinito...

64



Attesa

Fotografia di Claudia Coga



Le chiacchiere sul nucleare

Nicola Armaroli

Da anni ho deciso di non partecipare più a dibattiti sul nucleare, che diventano immancabilmente una sterile contrapposizione fra tifoserie. Potrei scrivere dieci editoriali sui motivi economici, tecnici ed etici per cui il nucleare è finito su un binario morto. Ma lasciamo perdere gli argomenti pro e contro, e andiamo al punto: perché il dibattito sul nucleare in Italia è totalmente inutile?

Un reattore nucleare non si accende e spegne come un phon. Per questo motivo si presta a coprire il carico di base (*baseload*) di un sistema elettrico, cioè la domanda di potenza sotto la quale non si scende mai. Il *baseload* italiano è circa 25 GW, quindi occorrerebbe installare almeno 20 GW di centrali a fissione. Accontentiamoci della metà: 10 GW, cioè dieci centrali nucleari standard da 1 GW. Occorrerebbe localizzare dieci siti idonei, in un Paese a elevato rischio sismico e in dissesto idrogeologico, dove da anni non si riesce a localizzare *un solo sito* per lo stoccaggio dei rifiuti nucleari. Ammettiamo pure di individuare questi dieci siti in un tripudio popolare, in rigorosa ottemperanza a un punto cardine della transizione ecologica in corso: la sostenibilità sociale. A questo punto dovremmo trovare aziende disposte a investire almeno 100 miliardi di euro (una centrale da un 1 GW costa almeno 10 miliardi). Non so voi, ma io già mi vedo la fila dei volenterosi con 100 miliardi da investire sul nucleare in Italia.

Passiamo oltre: quanto tempo occorrerebbe? In uno slancio di ottimismo supponiamo di metterci dieci anni. Nonostante si tratti di un'ipotesi totalmente irrealistica, sarebbe comunque troppo, perché fra dieci anni dovremo *già* aver decarbonizzato, anno dopo anno, il sistema elettrico, secondo gli obiettivi UE. In conclusione, persino nelle ipotesi più minimali e irrealistiche (10 GW, 100 miliardi, 10 anni) parlare di nucleare equivale a parlare di nulla. Figuriamoci in quelle realistiche.

Se allarghiamo lo sguardo al mondo intero, la situazione non migliora. Affinché il nucleare

possa giocare un ruolo rilevante nella produzione elettrica mondiale, bisognerebbe costruire almeno 3000 centrali da 1000 MW, cioè due alla settimana da qui al 2050, cominciando domattina. Negli anni d'oro (1960-1980) si è arrivati al massimo a costruirne *occasionalmente* trenta all'anno. E comunque, a questi ipotetici ritmi, non avremmo uranio a sufficienza. Ovvero lo avremmo solo nella mente di chi vagheggia da decenni l'estrazione di uranio dall'acqua di mare, ma temo non abbia mai fatto due conti sulle ciclopiche quantità di acqua che si dovrebbero processare.

So che a questo punto sorge l'obiezione: non si faranno centrali da 1 GW, ma piccole centrali da 0,3 GW di nuova generazione e ultrasicure! Di nuovo, stiamo parlando del nulla. Innanzitutto queste centrali "piccole" sono utilizzate da decenni nel settore militare e non hanno niente di nuovo. L'uso di design e combustibili alternativi per la produzione elettrica civile è ancora un tema da "libro dei sogni" tecnico e autorizzatorio, cioè l'ennesimo argomento impalpabile.

In conclusione, il nucleare può essere un divertente argomento di discussione tra amici, nei forum o al bar. Ma è e resterà sempre un argomento totalmente irrilevante per le prospettive concrete di transizione energetica da qui al 2050. È per questo che ho deciso, da anni, di lasciar perdere.

Davvero non mi capacito del fatto che si debbano inseguire idee irrealizzabili quando le soluzioni per decarbonizzare il sistema elettrico non solo esistono già, ma sono veloci da installare, sicure, affidabili ed economicamente imbattibili.

Se siete abbonati a *Sapere*, è inutile che vi ripeta di cosa si tratta. Non so che dire: convincete altri a farlo. Anche nei Ministeri.

Intanto, godetevi questo numero speciale sull'astrofisica curato da Patrizia Caraveo, magari pensando che le stelle sono un bellissimo esempio di fusione termonucleare, anche se per noi inarrivabile.

Astronomia: la scienza più antica e più moderna

di Patrizia Caraveo

L'astronomia è la più antica tra le scienze, tanto che è l'unica ad avere una musa: Urania. La vetustà non la rende però una scienza ancorata al passato, tutt'altro. Facendo tesoro dello sviluppo tecnologico, e spesso contribuendo a ideare e mettere a punto nuovi strumenti, è cresciuta fino a diventare una forza trainante del pensiero scientifico: le grandi rivoluzioni sono nate nel cielo e hanno cambiato la nostra visione della Terra e della sua posizione nell'Universo.

Pensavamo di essere al centro di tutto, ma ora sappiamo che viviamo sul terzo pianeta che orbita intorno a una nana gialla, una delle centinaia di miliardi di stelle che compongono la nostra Via Lattea, che è a sua volta una delle centinaia di miliardi di galassie che compongono l'Universo. L'ultimo e definitivo colpo alla visione antropocentrica del cosmo viene dalla scoperta dei pianeti extrasolari nel 1995. In un quarto di secolo sono stati scoperti migliaia di pianeti in orbita intorno ad altre stelle ed è solo la punta dell'iceberg.

Generalizzando i risultati ottenuti, possiamo affermare che ogni stella della Via Lattea debba avere almeno un pianeta e che un quinto di questi pianeti sia simile alla Terra. Adesso vorremmo capire se in qualcuno di questi "mondi" si possa essere sviluppata la vita. Dobbiamo farlo da lontano con gli strumenti sempre più sensibili che gli astronomi progettano e costruiscono.

In questo campo, ma anche in molti altri, si aspetta con trepidazione il lancio del nuovo telescopio spaziale James Webb, che vede l'agenzia statunitense NASA e quella europea ESA lavorare ancora in stretta collaborazione, come era successo per il mitico Hubble Space Telescope. Il mondo astronomico ha atteso decenni questo momento e ora ci sono grandi speranze, e aspettative altrettanto grandi, per il rivoluzionario strumento

che assomiglia a un gigantesco origami, perché il suo specchio segmentato di oltre 6 metri di diametro non entra nell'ogiva di nessun lanciatore e deve partire ripiegato.

Il telescopio James Webb raggiungerà l'armata di strumenti astronomici che orbitano intorno alla Terra o che "stazionano" in punti privilegiati del sistema Sole-Terra. Uno degli strumenti spaziali più prolifici è Gaia dell'ESA. La sonda rappresenta un modo nuovo di portare avanti il lavoro di catalogazione celeste iniziato da Tolomeo nel II secolo d.C. Allora bisognava accontentarsi delle poche migliaia di stelle visibili a occhio nudo, adesso Gaia ha misurato la posizione, la distanza e il moto di oltre un miliardo di stelle. Si tratta di appena l'1% delle stelle della nostra galassia, ma per gli astronomi rappresenta un enorme patrimonio di conoscenza che permette di percorrere a ritroso la storia della Via Lattea, facendoci capire come essa si sia formata grazie a incontri con molte altre galassie. La banca dati di Gaia ci ha permesso di studiare intere popolazioni stellari, così come oggetti singoli che, magari, hanno in serbo qualche sorpresa.



Prove di piegatura dello specchio di JWST (© NASA/Chris Gunn).

In orbita ci sono anche sentinelle pronte a cogliere le emissioni generate dalle catastrofi più violente che avvengono nell'Universo. Lo strumento INTEGRAL, sempre dell'ESA, svolge questo compito da quando è stato lanciato nel 2002. INTEGRAL doveva studiare l'emissione dei buchi neri, sia quelli di taglia stellare, nei sistemi binari, sia quelli di taglia extra-large che dominano le galassie attive. In parallelo, bisognava capire la fisica alla base dei lampi gamma, brevissime e intense emissioni di fotoni di alta energia che devono essere riconosciute in tempo reale per poter lanciare un vero e proprio allarme astronomico e permettere ad altri Osservatori di andare a cercare le tracce dell'evento. Tutti compiti che INTEGRAL ha svolto in modo egregio, ma l'astrofisica cresce ed evolve e le priorità di oggi sono diverse da quelle di ieri.

Vent'anni fa, le onde gravitazionali erano ancora un obiettivo difficilmente raggiungibile, che sembrava allontanarsi ogni volta che si aveva l'impressione di aver fatto un passo in avanti; adesso sono una realtà e INTEGRAL ha dimostrato una straordinaria capacità di reinventarsi contribuendo da protagonista alla nascita dell'astronomia multi-messaggero, dove i rivelatori di fotoni agiscono di concerto con quelli di onde gravitazionali.

La caccia alle controparti delle onde gravitazionali è adesso uno dei fili conduttori della ricerca astronomica, è una nuova visione che unisce fisica e astronomia sfruttando tutte le finestre di osservazione che abbiamo aperto. Tuttavia, il punto di intersezione tra i messaggeri celesti vecchi e nuovi sembra essere nei fotoni di energia più alta, quelli che vengono creati nel corso della fusione di stelle di neutroni, che produce onde gravitazionali, oppure nei getti dei buchi neri supermassicci, dove ci sono le condizioni per l'accelerazione di particelle che poi dà origine a raggi cosmici e neutrini.

I raggi gamma di alta e altissima energia sono un ponte tra i diversi messaggeri celesti e per questo ci prepariamo a studiarli costruendo un nuovo sensibilissimo osservatorio distribuito: il Cherenkov Telescope Array (CTA), formato da circa 100 telescopi sparsi tra le Canarie e il Cile. È un approccio che unisce le tecniche prese in prestito dagli acceleratori con la potenza della visione stereoscopica: questa è resa possibile dall'utilizzo contemporaneo di grandi telescopi un po' speciali, ma bellissimi,



L'Etna in eruzione fa da sfondo ad ASTRI (cortesia di G. Leto).

come il prototipo ASTRI che opera sulle pendici dell'Etna, a testimonianza dell'impegno dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF) in questo campo.

Non dobbiamo però dimenticare che è stata la radioastronomia a sviluppare la tecnologia basata sull'utilizzo di diversi telescopi operanti in perfetta sincronia come se fossero un solo strumento. Un concetto che è alla base dello Square Kilometer Array (SKA), il progetto più ambizioso del suo genere che si comporrà di migliaia di antenne sparse tra i deserti del Sud Africa e dell'Australia, nelle zone più "radio-quiete" del mondo. La modularità è la carta vincente di progetti come CTA e SKA, molto ambiziosi e, purtroppo, altrettanto costosi, che possono essere costruiti in modo incrementale allargando via via il loro spazio di scoperta.

Confesso che è stato difficile scegliere gli argomenti da trattare in questo numero speciale. La ricerca astronomica offre una tale varietà di tematiche che ho avuto solo l'imbarazzo della scelta.

Spero che la selezione che proponiamo possa incuriosire i lettori, magari spingendoli ad approfondire gli argomenti qui trattati. Quello che posso garantire è l'entusiasmo con il quale i miei colleghi hanno aderito all'iniziativa. Vorrei quindi terminare ringraziando e abbracciando virtualmente (in rigoroso ordine alfabetico): Lucio Angelo Antonelli, Angela Bazzano, Mariateresa Crosta, Pino Malaguti, Monica Tosi, Pietro Ubertini e Grazia Umata.

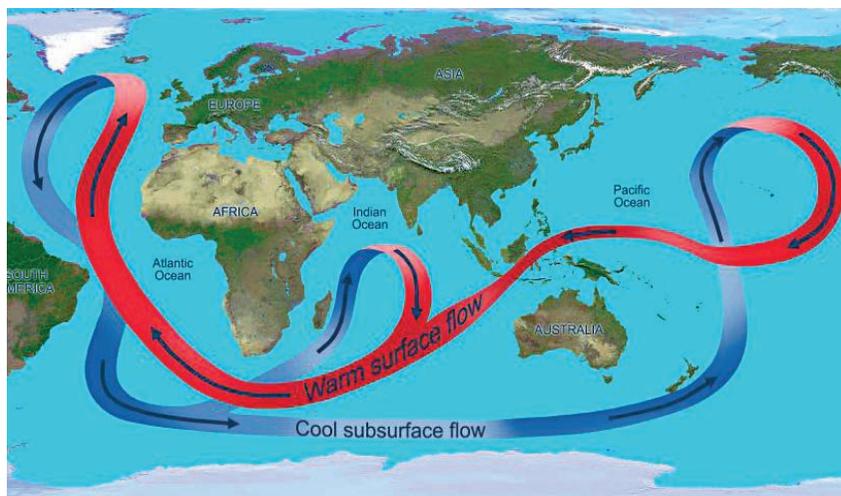
La caccia alle controparti delle onde gravitazionali è adesso uno dei fili conduttori della ricerca astronomica.

Correnti atlantiche in crisi: l'impatto sul clima

Non è banale comprendere la complessità dei fenomeni associati ai cambiamenti climatici in corso. Ad esempio, è difficile pensare che il riscaldamento globale possa manifestarsi con il raffreddamento di un'area grande quanto quasi l'intera Europa. Eppure è proprio una delle conclusioni di un nuovo studio in cui si è indagato sugli effetti che il recente riscaldamento dell'oceano Atlantico settentrionale ha avuto su un importante sistema di correnti, l'*Atlantic Meridional Overturning Circulation*, o AMOC.

Nell'insieme, i risultati sono tutt'altro che rassicuranti. In particolare, analizzando dati riguardanti le temperature superficiali e i valori di salinità raccolti in vari punti dell'oceano Atlantico, sono stati riconosciuti dei potenziali indicatori di un'instabilità della AMOC, instabilità che potrebbe minare l'equilibrio climatico globale. La ricerca è stata condotta da Niklas Boers, del Potsdam Institute of Climate Impact Research, in Germania, ed è stata pubblicata su *Nature Climate Change* ad agosto.

Il moto dell'AMOC è innescato da variazioni di salinità delle acque e contribuisce alla conservazione dell'equilibrio termico degli oceani e del pianeta. Secondo i modelli climatici, queste correnti possono circolare con due modalità: una definita forte, caratteristica degli ultimi millenni, e una debole, che secondo l'autore potrebbe essere dietro l'angolo. Il passaggio a quest'ultima può indurre cambiamenti bruschi e preoccupanti del sistema climatico, con ripercussioni su tutta l'umanità, tra i quali: alterazioni dei sistemi di piogge di India, Sud America e Africa occidentale, innalzamenti del livello del mare in Nord America e aumenti del numero di tempeste in Europa. L'unico effetto positivo potrebbe essere il succitato raffreddamento dell'Europa, provocato da una



© NASA

variazione di rotta della corrente del Golfo. «Ciò potrebbe compensare gli effetti del cambiamento climatico in queste regioni e stabilizzare lo scioglimento dei ghiacci della Groenlandia, il che sarebbe una buona cosa», ha commentato Tim Palmer dell'Università di Oxford.

Studi precedenti hanno messo in evidenza che l'AMOC ha registrato un indebolimento già negli ultimi 1600 anni, ma queste nuove analisi indicano che lo scioglimento dei ghiacci della Groenlandia degli ultimi decenni ha ridotto il contrasto di salinità in una maniera non prevista dai modelli di riferimento.

«Il fatto che i segnali di questa instabilità siano già osservabili è qualcosa che non mi sarei aspettato e che trovo spaventoso. È qualcosa che non possiamo permettere che accada» ha spiegato Niklas Boers. L'autore ha inoltre precisato che, poiché la complessità del fenomeno non consente – almeno per ora – di definire il preciso livello di CO₂ che indurrebbe un collasso della AMOC, «l'unica cosa da fare è mantenere le emissioni al livello più basso possibile. La probabilità che accada questo evento dall'impatto tanto elevato cresce per ogni grammo di CO₂ che immettiamo nell'atmosfera».



Luce che genera la materia

Creare materia e antimateria? È sufficiente un po' di luce. A dirlo fu implicitamente già Einstein, con la sua famosa $E = mc^2$ oltre un secolo fa, a realizzarlo un numeroso gruppo di scienziati la scorsa estate. Questa formula, così elegante nella sua semplicità formale, continua a sorprendere con conferme sperimentali finora impossibili per la complessità degli strumenti necessari. È infatti grazie al sofisticato Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) che il team è riuscito nell'impresa di produrre materia e antimateria facendo interagire fasci di fotoni prodotti da ioni di oro, accelerati quasi alla velocità della luce. Il team, guidato da Jaroslav Adams del Brookhaven

National Laboratory, ha pubblicato i risultati dello studio su *Physical Review Letters*.

Utilizzando il rivelatore STAR del RHIC, sono state analizzate oltre 6000 coppie di elettroni e positroni prodotte nell'esperimento, confermando il cosiddetto effetto Breit-Wheeler, previsto – solo in teoria – oltre 80 anni fa. «I nostri risultati forniscono una chiara evidenza della creazione di coppie materia-antimateria attraverso la collisione della luce come fu descritta da Breit e Wheeler» ha spiegato Daniel Brandenburg, coautore dello studio. E non è tutto: la precisione dello STAR ha inoltre permesso ai fisici di dimostrare che il fenomeno della birifrangenza – associato alle interazioni tra le particelle di luce con il potente campo magnetico generato dagli ioni accelerati – avviene anche nel vuoto.



Medaglia Dirac, prima volta a un'italiana

Negli stessi giorni in cui l'Italia faceva incetta di vittorie ai giochi olimpici, l'importante medaglia Dirac veniva assegnata ad Alessandra Buonanno del Max Planck Institute di Potsdam per i suoi studi sulle onde gravitazionali. Il premio, conferito dall'International Centre for Theoretical Physics (ICTP), è uno dei più prestigiosi riconoscimenti della fisica. Alessandra Buonanno è la seconda donna in assoluto, e la prima italiana, a vincere questo premio.

La medaglia è stata assegnata anche ai fisici Thibault Damour, Frans Pretorius e Saul Teukolsky, tutti per meriti inerenti al lavoro che, nel 2015, ha permesso di rivelare per la prima volta le onde gravitazionali dopo decenni di lavoro. «La medaglia Dirac celebra la fisica teorica, ma in questo caso è legata all'esperimento perché fondamentale per essere finalmente in grado di rivelare le onde gravitazionali», ha spiegato Paolo Creminelli, cosmologo all'ICTP. I vincitori sono stati premiati per aver determinato le proprietà delle onde gravitazionali generate quando dei sistemi binari



© Sven Döring - Wikimedia

costituiti da due stelle o due buchi neri ruotano reciprocamente per poi scontrarsi. «Si tratta», ha detto il direttore dell'ICTP, Atish Dabholkar, «di una verifica impressionante dell'accuratezza della relatività generale. È un meraviglioso tributo allo straordinario potere della nostra comprensione teorica della natura, che fino a poco tempo fa sembrava troppo bizzarra per la verifica osservativa».



Teorema di Pitagora o dei Babilonesi?

Il teorema di Pitagora è forse uno dei più noti della geometria. Che un popolo lo conosca non è certo una notizia. Ma cosa pensereste scoprendo che era noto già ai Babilonesi, vissuti mille anni prima della nascita di Pitagora? A rafforzare questa ipotesi sono nuove analisi condotte da Daniel Mansfield della New South Wales University di Sydney sulla tavoletta Plimpton 322, uno dei reperti matematici più sofisticati e interessanti dell'antichità. I Babilonesi, probabilmente, non solo conoscevano le terne pitagoriche, ma erano in grado di utilizzarle nella risoluzione di problemi pratici associati ai triangoli rettangoli. Gli studi che lo affermano sono stati pubblicati su *Foundation of Science*.

Di fatto, Plimpton 322 è una tavoletta di argilla risalente al periodo compreso tra il 1900 e il 1600 a.C., contenente una serie di terne pitagoriche. Finora si riteneva che queste terne venissero usate come strumento didattico nelle scuole. Mansfield, però, sarebbe arrivato a nuove conclusioni abbinando all'analisi di questo reperto quella di Si.427, un'altra tavoletta rinvenuta nel 1894 e considerata il "foglio" che i geometri utilizzavano per ripartire un appezza-



© Daniel Mansfield - Wikimedia

mento di terra. «I rettangoli sono perfetti: il geometra li ha calcolati usando terne pitagoriche», ha spiegato l'autore. Questo dimostrerebbe che ai Babilonesi era noto, in qualche maniera, il teorema di Pitagora, seppure in una forma che di certo non ne renderà necessaria una modifica del nome.



La sensibilità dei polpi

Si torna sempre dove si è stati bene. Un esperimento sui polpi (*Octopus bocki*), in un certo senso basato su questo modo di dire, sembra sfatare l'idea che la componente emotiva del dolore sia provata solo dai vertebrati, dotati di un complesso sistema nervoso. Anche questi invertebrati, come noi, preferiscono infatti certi luoghi ad altri in funzione delle esperienze vissute. Lo studio è stato condotto da Robyn Crook della San Francisco State University e pubblicato su *iScience*.

Per testare il principio della *conditioned place preference*, i polpi venivano posti di fronte a due stanze. Dopo essere entrati in una delle due, veniva

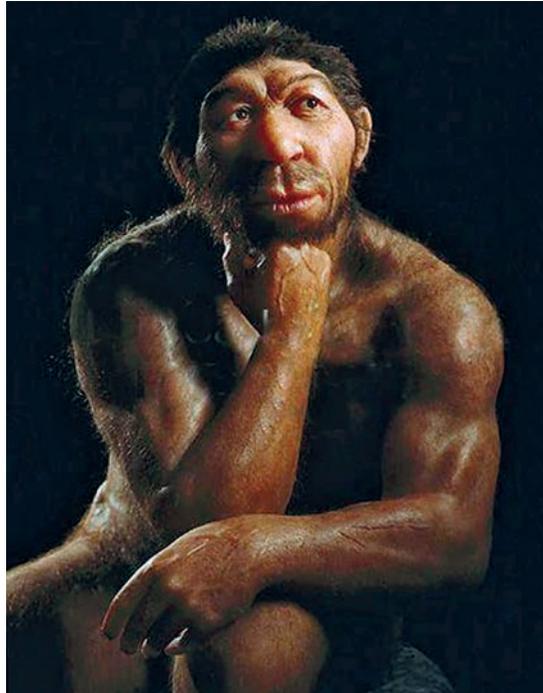
iniettato loro dell'acido acetico, una sostanza nociva, e ad alcuni di essi il dolore veniva alleviato con un analgesico. In seguito, i polpi che avevano provato la sensazione di sollievo grazie all'analgesico ritornavano nella stanza, mentre quelli che avevano ricevuto solo lo stimolo doloroso la evitavano. I polpi che non avevano ricevuto alcuno stimolo doloroso non hanno invece mostrato preferenze.

La conclusione dell'autrice è che il dolore provato da questi animali sia dotato di una forte componente emotiva che, finora, si reputava tipica solo dei vertebrati. Si tratta di un risultato che si inserisce in un acceso dibattito, con implicazioni etiche, che dovrebbe farci riflettere su come rapportarci a questo gruppo di animali, estremamente più numerosi di noi.



Noi e i Neanderthal, quasi gemelli

«Umano, non troppo umano». Se Nietzsche avesse letto la ricerca pubblicata recentemente su *Science Advances*, avrebbe aggiunto quel “non” al titolo della sua celebre opera. Nello studio, condotto da un team guidato da Nathan Schaefer dell'Università della California di Santa Cruz, viene messo infatti in evidenza che, di tutto il genoma umano, quello davvero esclusivo dell'*Homo sapiens* varia dall'1,5 al 7%. Questo risultato, che prende il nome di *incomplete lineage sorting* (ILS), è il frutto di un confronto tra il nostro genoma e quello dei nostri più prossimi



© State Office for Heritage Management and Archaeology Saxony-Anhalt / State Museum of Prehistory Halle

parenti estinti, i Neanderthal e i Denisoviani.

L'ILS dipende dal fatto che una fetta significativa della nostra attuale variazione genetica si sarebbe originata prima che i progenitori comuni agli esseri umani contemporanei e ai Neanderthal si separassero. Ciò implica che le differenze genetiche che oggi distinguono due esseri umani erano caratteristiche anche dei nostri antichi avi e, cosa più significativa, erano condivise con i Neanderthal. L'ILS, in particolare, implica che un essere umano odierno possa avere molti più alleli in comune con un Neanderthal che non con un suo contemporaneo.

Il gruppo di ricercatori ha affrontato quantitativamente questa affascinante questione, complessa sia dal punto di vista biologico sia statistico, utilizzando un algoritmo noto come *Speedy Ancestral Recombination Graph Estimator* (SARGE). Attraverso il SARGE sono stati analizzati i genomi di 279 esseri umani moderni, di due Neanderthal e di un Denisoviano, giungendo alla conclusione,

come abbiamo detto, che di tutto il nostro genoma al massimo il 7% è esclusivo dell'*Homo sapiens*. Ma questa percentuale non è presente in ognuno di noi. Piuttosto, la porzione del genoma tipica della nostra specie e comune a tutti gli individui rappresenta una frazione ancora inferiore, pari all'1,5% del totale.

«È una percentuale molto piccola», ha commentato Nathan Schaefer, «questo tipo di scoperta è la ragione per cui gli scienziati stanno smettendo di pensare che noi umani siamo così incredibilmente diversi dai Neanderthal». Comunque, si

precisa nello studio, questa piccola parte riguarda esclusivamente modifiche nello sviluppo cerebrale, quelle che ci distinguerebbero come specie. Si tratterebbe, quindi, di un dettaglio che ci ha portati a divergere in modo sostanziale dai nostri cugini estinti.

E il lavoro svolto dagli scienziati non si ferma qui. Grazie al SERGE è stato infatti possibile ricostruire le modalità con cui, nel corso delle centinaia di migliaia di anni – in particolare a partire da circa 600000 anni fa –, queste modifiche genetiche si sarebbero verificate. Nello specifico, sono state individuate due ondate di mutazioni, avvenute rispettivamente 600000 e 200000 anni fa, che hanno poi portato allo sviluppo della nostra identità genetica. «Riuscire a produrre un catalogo delle regioni del genoma unicamente umane aiuterebbe a far luce sui processi evolutivi importanti nel renderci unici come specie», si legge nello studio.



SATELLITE

La rivoluzione esoplanetaria

Altri mondi oltre il Sistema Solare: le speculazioni del passato, le scoperte del presente, i grandi risultati che stanno per arrivare.

Le stelle «vorranno avere i loro pianeti, ciascuna i suoi propri». Con queste parole di rispettoso richiamo, il personaggio Copernico si rivolge niente meno che al Sole nella scena IV del dialogo omonimo, composto nel 1827 da Giacomo Leopardi, che anticipa di quasi due secoli una delle più grandi rivoluzioni dell'astrofisica.

L'ammonimento leopardiano – che riecheggia speculazioni filosofiche precedenti, dagli "infiniti mondi" immaginati da Epicuro nel III secolo a.C. agli "innumerevoli soli" di Giordano Bruno – ha infatti trovato conferma sperimentale solo nel 1995, con la scoperta del primo pianeta oltre i confini del Sistema Solare in orbita attorno

La rivoluzione esoplanetaria ha numerose implicazioni, che investono non solo l'astrofisica, ma anche le scienze della vita.

quella esoplanetaria, con numerose, molteplici e multidisciplinari implicazioni, che investono non solo l'astrofisica, ma anche le scienze della vita e la filosofia.

Giuseppe Malaguti,

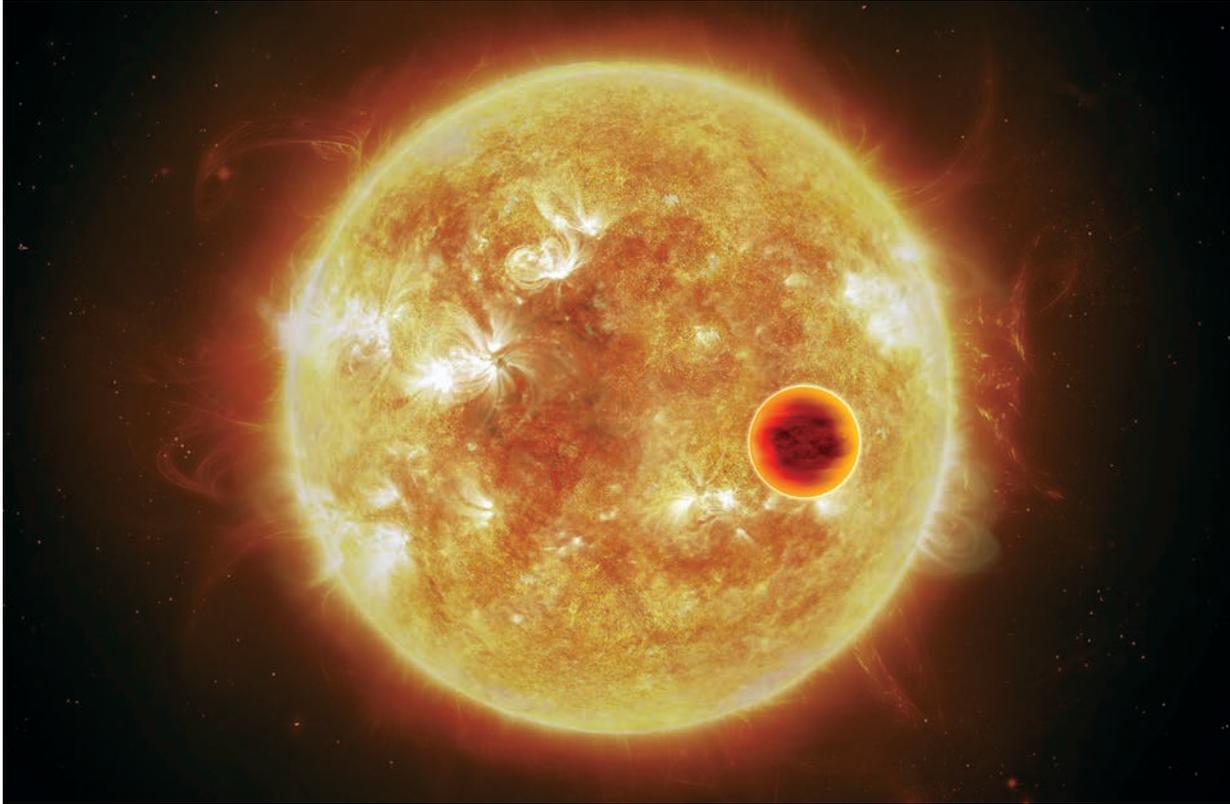
INAF, Osservatorio di Astrofisica e Scienza dello Spazio, Bologna

Ma cosa sono i pianeti? E gli esopianeti? Come li abbiamo scoperti? Cosa ne sappiamo? E cosa stiamo per scoprire?

I pianeti: (almeno) 3700 anni di studi

«Lo bel pianeta che d'amar conforta»: questi i versi con i quali Dante Alighieri, dalla spiaggia del monte Purgatorio, dipinge Venere nel cielo del mattino. Il vocabolo "pianeta" riprende il latino *planēta*, derivato dal greco *πλανήτης*, che vale "errante", "vagante", a indicare quegli oggetti del cosmo noti dall'antichità per non avere una posizione fissa sulla volta celeste. Etimologia a parte, l'Unione Astronomica Internazionale (International Astronomical Union, IAU) nel 2006 ha stabilito che un pianeta è un corpo celeste che possiede le seguenti tre proprietà: orbita attorno al Sole; ha massa sufficiente per assumere forma quasi sferica grazie alla gravità; ha ripulito la propria orbita.

I pianeti e i loro moti periodici affascinano l'umanità dai tempi più remoti. La tavoletta di Venere di Ammisaduqa, conservata al British Museum di Londra, ne è testimonianza tangibile. Rinvenuta a Ninive, odierno Iraq, è la copia di epoca neoassira (VII-VIII secolo a.C.) di una compilazione di osservazioni astronomiche del pianeta Venere: dati di levate eliache (ossia la comparsa del pianeta sopra l'orizzonte orientale appena prima dell'alba) e corrispondenti tramonti, raccolti e annotati da astronomi babilonesi per più di 20 anni nel



Rappresentazione artistica di un esopianeta in transito davanti alla propria stella madre (© ESA/ATG medialab).

XVII secolo a.C., durante il regno di Ammisaduqa, sovrano della prima dinastia di Babilonia, quarto dopo Hammurabi.

Con un balzo temporale, all'alba del XVII secolo d.C., troviamo un signore pisano, allora titolare della cattedra di matematica presso il prestigioso Studio di Padova: Galileo Galilei. Nel 1609 Galileo lavora a uno strumento nuovo, ideato con ogni probabilità da artigiani olandesi: il cannocchiale. Dopo averne migliorato le prestazioni lo punta verso il cielo. Subito vuole comunicare al mondo ciò che ha visto. Lo fa il 13 marzo 1610, pubblicando il *Sidereus Nuncius*, con il quale comunica al mondo ciò che ha visto. La faccia della Luna, la Via Lattea, innumerevoli stelle fisse, ma soprattutto un nuovo sistema planetario: «*quatuor planetis circa Iovis stellam*». Sono i satelliti del pianeta Giove: Io, Europa, Ganimede e Callisto.

L'invenzione del cannocchiale e l'intuizione rivoluzionaria di Galileo di usarlo per guardare il cielo aprono un nuovo universo. Ha inizio l'astronomia (e la scienza) moderna. E se ci sono voluti 33 secoli per passare dalle osservazioni degli astronomi babilonesi alla pubblicazione del *Sidereus Nuncius*,

solo un decimo di questo tempo, meno di 350 anni, separa Galileo dalla conquista dello spazio. Il 4 ottobre del 1957 la specie umana è capace di lasciare la Terra. Raggiungiamo l'orbita terrestre, poi la Luna, i pianeti vicini, Venere e Marte, infine lo spazio interplanetario. Nel 2019, la navicella New Horizons della NASA arriva a visitare Arrokoth, precedentemente noto come Ultima Thule, che, distante dal Sole più di 40 unità astronomiche (1 unità astronomica è la distanza media Terra-Sole), è il corpo celeste più lontano mai visitato da un manufatto umano.

Oggi la nostra conoscenza del Sistema Solare ha compiuto grandi passi. Sappiamo dell'esistenza di rilievi alti due volte e mezza il monte Everest (su Marte), oceani sotterranei (sul satellite Europa), getti ghiacciati di polveri e gas (che fuoriescono dalla superficie di Encelado, il sesto satellite di Saturno), abbiamo fatto atterrare una sonda su una cometa (Philae della missione Rosetta su 67P/Churyumov-Gerasimenko), siamo in grado di telecomandare dalla Terra un drone-elicottero e farlo librare nella rarefatta atmosfera di Marte (Ingenuity della missione Perseverance). E

soprattutto, proprio sul finire del secolo scorso, la planetologia ha compiuto il grande salto, valicando i confini del Sistema Solare. Siamo diventati la prima generazione a sapere che esistono pianeti in orbita attorno ad altre stelle, e ad avere la possibilità di studiare questi veri e propri mondi alieni.

Ma un pianeta non emette luce. Come si fa allora a svelarne la presenza intorno a una stella lontana?

Come trovare (e studiare) gli esopianeti

Sono diversi i metodi utilizzati per determinare la presenza di esopianeti in orbita attorno a una stella. Tra essi i più efficaci e oggi maggiormente utilizzati sono l'analisi delle velocità radiali e lo studio dei transiti. Riassumiamone in breve i principi base.

La presenza di un pianeta intorno a una stella fa sì che entrambi gli oggetti orbitino attorno a un punto, chiamato centro di massa. Il moto orbitale della stella causa variazioni periodiche della propria velocità radiale (la componente della velocità proiettata lungo la nostra linea di vista), perturbando, per effetto Doppler, la lunghezza d'onda della luce emessa dalla stella. Il *metodo delle velocità radiali* prevede quindi osservazioni prolungate dello spettro di una stella, volte a cercarne spostamenti alternati e periodici verso il rosso (durante il moto in allontanamento) e verso il blu (in avvicinamento).

Per quanto riguarda invece il *metodo dei transiti*, notiamo che, quando due oggetti celesti sono al-

lineati con la linea di vista, quello più vicino all'osservatore potrà, per un certo tempo e in ragione delle dimensioni relative, nascondere parzialmente (transito) o totalmente (eclissi) quello più lontano. Durante il transito è l'esopianeta a trovarsi davanti alla stella ospite, mentre in occasione dell'eclissi le posizioni si invertono. Non siamo in grado di "vedere" un transito esoplanetario con i nostri telescopi, dato che il disco stellare anche con le lenti più potenti ci appare puntiforme. Possiamo però misurare la diminuzione di luminosità della stella durante il transito. Diminuzione che, ad esempio, nel caso di un pianeta simile a Giove in transito davanti a una stella di tipo solare, sarà intorno all'1%.

Per esopianeti in transito di cui si conoscano le rispettive effemeridi (con dati di distanza, magnitudine, ecc.) diventa possibile caratterizzarne spettralmente le atmosfere. Le fasi di transito consentono l'osservazione dello spettro in trasmissione, mentre dallo studio delle fasi immediatamente precedenti o successive all'eclissi si può ottenere, per differenza, lo spettro in emissione.

Per applicare questi metodi, oggi centri di ricerca in tutto il mondo utilizzano strumentazione installata su infrastrutture osservative di terra o a bordo di telescopi spaziali, dove l'assenza di atmosfera consente condizioni particolarmente favorevoli. Questa strumentazione deve possedere alta precisione, accuratezza e stabilità, tali da consentire di distinguere la firma spettrale causata dalla presenza dell'esopianeta. Una traccia tanto importante quanto difficile da rilevare, la cui intensità può essere inferiore a 50 parti per milione rispetto al segnale stellare.



Rappresentazione artistica di 51 Pegasi b, il primo esopianeta scoperto (© ESO/M. Kornmesser/Nick Risinger).

1995: la scoperta di un altro mondo

Per 18 mesi tra il 1994 e il 1995, Michel Mayor e Didier Queloz, astrofisici dell'osservatorio di Ginevra, osservano un campione di 142 stelle note, alla ricerca di variazioni delle velocità radiali. Trovano che una di esse, 51 Pegasi, stella di tipo solare distante da noi 50 anni luce, mostra una variazione spettrale con

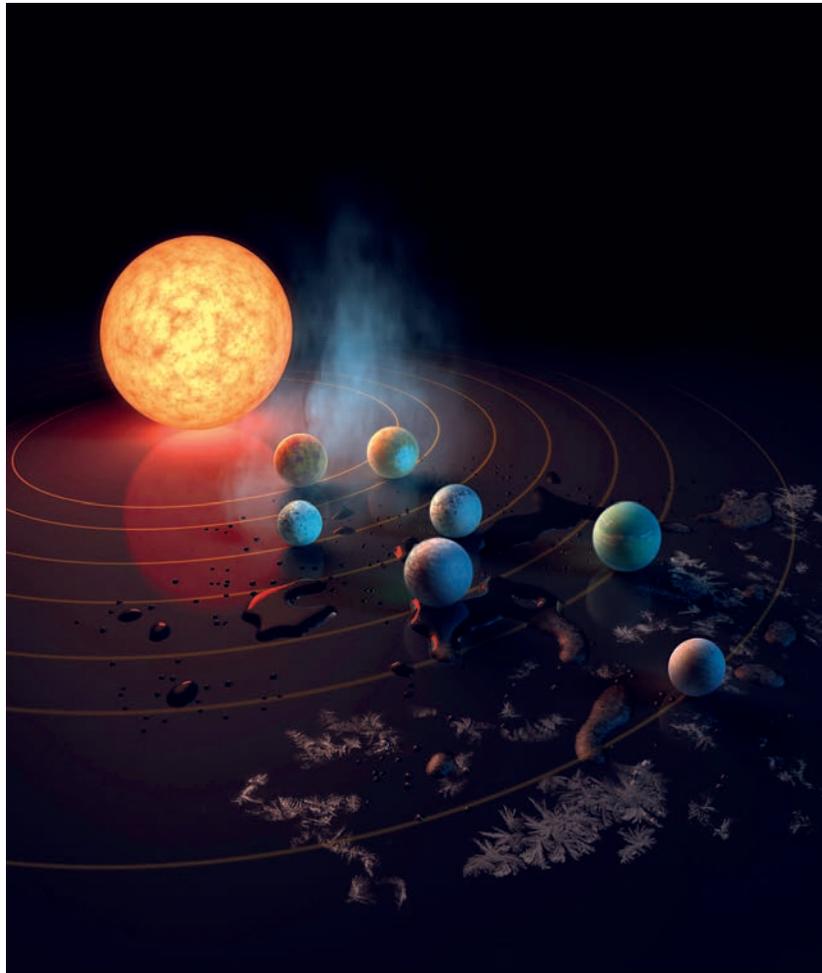
periodo appena superiore a 4 giorni [1]. Un risultato spiegabile solo con la presenza di un pianeta di massa simile a quella di Giove, ma orbitante a una distanza cento volte inferiore a quella che separa Giove dal Sole, e che nel nostro Sistema Solare si troverebbe ben all'interno dell'orbita di Mercurio. Il pianeta, classificato come 51 Pegasi b, mostra proprietà mai viste prima. È un gioviano caldo (1300 gradi Kelvin). Un pianeta gigante, vicinissimo alla propria stella, dove un anno dura solo 4,23 giorni terrestri.

Pochi anni prima, nel 1992, era stato scoperto un pianeta in orbita intorno a una pulsar. Ma nel caso di una pulsar, i pianeti potrebbero essere il risultato della stessa esplosione di supernova da cui si è formata la stella di neutroni rotante e quindi non rappresentativi di processi di formazione planetaria per una stella di tipo solare. 51 Pegasi è invece una stella "normale", che sta ancora bruciando idrogeno proprio come il nostro Sole.

Mayor e Queloz diventano i primi a scoprire un pianeta oltre i confini del Sistema Solare in orbita attorno a una stella di tipo solare e ricevono il premio Nobel per la Fisica nel 2019. Si apre così un nuovo campo della scienza. Inizia l'avventura esoplanetaria.

Pianeti di altri soli

Dopo 51 Pegasi b, ad oggi sono stati scoperti più di 4500 esopianeti in più di 3300 sistemi stellari diversi. Tanto da farci ragionevolmente supporre che ognuna dei 400 miliardi di stelle della nostra galassia potrebbe ospitare un sistema planetario (proprio come sosteneva il Copernico leopardiano). Alcune decine degli esopianeti scoperti si trovano inoltre nella zona abitabile, cioè entro quell'intervallo di distanza dalla stella ospite che,



Rappresentazione artistica dei 7 pianeti di classe terrestre in orbita intorno alla stella nana Trappist-1 (© NASA/JPL-Caltech/R. Hurt, IPAC).

in presenza di atmosfera, può consentire l'esistenza di acqua allo stato liquido.

Nel 2016 arriva l'annuncio che anche Proxima Centauri ospita un pianeta. Proxima Centauri, distante solo 4,2 anni luce dal Sistema Solare, è la stella più vicina al Sole. Il pianeta che le ruota attorno, Proxima b, ha periodo orbitale di appena 11 giorni, massa poco superiore a quella della Terra e distanza dalla stella corrispondente alla sua zona abitabile. Insomma, un pianeta vicino e potenzialmente abitabile, che inevitabilmente ha sollevato molto interesse, tanto che c'è chi si è messo a studiare progetti di missioni spaziali particolarmente veloci per andare a visitarlo con tempi di viaggio di poche decine di anni, scattare fotografie e inviare le immagini alla Terra.

Tra i sistemi planetari trovati finora, non ne mancano di complessi e sorprendenti. Trappist-1 è una stella nana fredda, distante da noi solo 40 anni luce,

nella costellazione dell'Acquario. Nel 2015, grazie al metodo dei transiti, si scopre che Trappist-1 ospita un sistema di tre pianeti di tipo terrestre. Studi successivi portano a sette i componenti di questo sistema planetario [2], di cui almeno tre situati nella zona abitabile, e arrivano a concludere che i pianeti di Trappist-1 potrebbero essere ricchi d'acqua. Un primo passo verso la conoscenza della materia di cui sono fatti gli esopianeti di classe terrestre.

A gennaio 2021 è stata annunciata la scoperta di sei pianeti in orbita intorno a una stella nana di classe K, un sistema esoplanetario denominato TOI-178 che include pianeti di dimensione superiore alla Terra, ma inferiore a Nettuno (classificati come super-Terre e sub-nettuniani), e mostra una disuniforme distribuzione delle densità dei pianeti associata a un'armonia dei moti orbitali [3]. Infatti, cinque dei sei pianeti di TOI-178 sono in risonanza fra loro, proprio come i satelliti medicei di Galileo. Lo studio approfondito di sistemi come TOI-178 sarà fondamentale per approfondire i processi che regolano la formazione e l'evoluzione dei sistemi planetari.

Abbiamo trovato pianeti terrestri, super-Terre, sub-nettuniani, nettuniani, saturniani, gioviani, super-gioviani e via di questo passo. Mondi alieni numerosi e diversi: ghiacciati o a temperature così alte da far evaporare i metalli, pianeti dove un anno dura pochi giorni o che orbitano attorno a due stelle, corpi rocciosi simili alla Terra o giganti gassosi vicinissimi alla propria stella madre.

È altresì emerso come i pianeti di dimensione compresa tra la Terra e Nettuno, del tutto assenti nel Sistema Solare, siano invece dominanti tra quelli identificati dalla missione Kepler della NASA. Il nostro Sistema non sembra quindi essere tipico nella galassia.

Che aria tira sugli altri mondi?

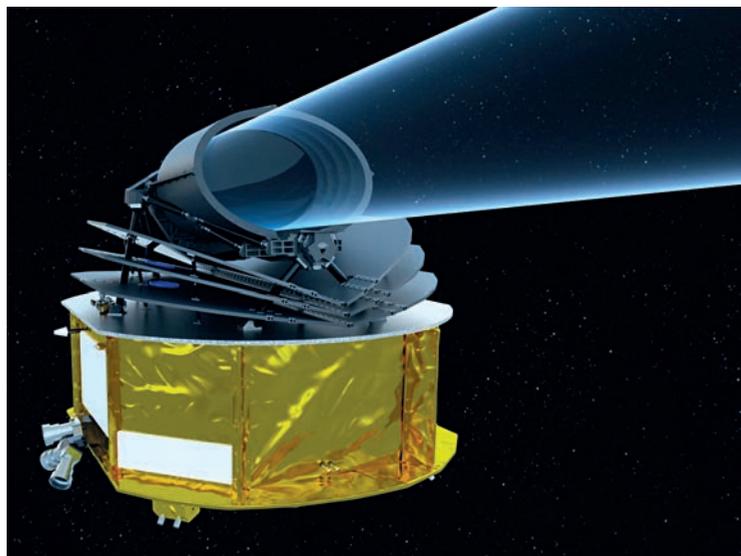
La rivoluzione esoplanetaria ci ha portato, sul finire del secolo scorso, a scoprire l'esistenza di pianeti oltre i confini del Sistema Solare. Tuttavia, per arrivare a capire la formazione e l'evoluzione dei sistemi planetari, e con essi del Sistema Solare, abbiamo bisogno di acquisire elementi relativamente alla natura fisica

e alla composizione chimica degli esopianeti e delle loro atmosfere, di cui oggi sappiamo ancora poco. La comunità astrofisica e i centri di ricerca di tutto il mondo si sono attivati per raggiungere tali obiettivi. In questo contesto risulta di livello assoluto in ambito mondiale il contributo degli scienziati italiani, sia con studi e osservazioni da terra che, con il sostegno dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), dallo spazio.

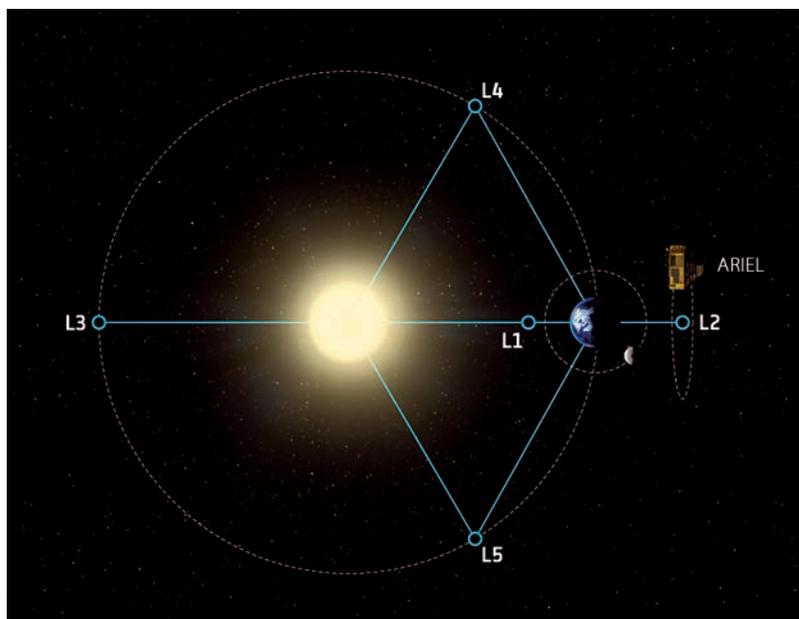
Il Telescopio Nazionale Galileo (TNG) dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), situato nelle isole Canarie, ospita HARPS-N, High Accuracy Radial velocity Planet Searcher. HARPS-N è uno spettrometro ad alta precisione, che lo rende strumento ideale per trovare esopianeti con il metodo delle velocità radiali o studiarli con i transiti. Infatti, nel caso di pianeti transitanti, l'atmosfera del pianeta filtra le emissioni della stella. L'elevata risoluzione spettrale permette di distinguere tali effetti e stimare ad esempio la presenza di determinate specie chimiche nelle esoa atmosfere.

La statunitense NASA, dopo la missione Kepler che ha scoperto più di 2500 esopianeti con il metodo dei transiti, ha lanciato nel 2018 il telescopio TESS, Transiting Exoplanet Survey Satellite, per la ricerca di pianeti transitanti con incrementata precisione e su un'area di cielo più vasta. E lo stesso James Webb Space Telescope, il grande telescopio ottico-infrarosso che l'agenzia prevede di lanciare entro fine anno, include lo studio della natura dei sistemi esoplanetari tra i propri obiettivi prioritari.

Anche l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) si è posta l'obiettivo di capire quali sono le condi-



Il telescopio spaziale Ariel dell'ESA, il cui lancio è previsto nel 2029 (©ESA/STFC RAL Space/UCL/UK Space Agency/ ATG Medialab).



Ariel sarà posto in orbita attorno a L2, il secondo dei punti lagrangiani del sistema Terra-Sole, a una distanza di circa 1,5 milioni di km dalla Terra nella direzione opposta al Sole (© ESA/STFC RAL Space/UCL/Europlanet-Science Office).

zioni per la formazione dei pianeti e l'emergere della vita. È questo infatti il primo tra i temi chiave posti alla base di *Cosmic Vision* [4], il programma scientifico pluriennale, per affrontare il quale ha previsto una piccola flotta di telescopi spaziali, come CHEOPS, PLATO e Ariel.

CHEOPS (CHAracterising ExOPlanet Satellite), lanciato nel dicembre 2019, è in grado di percepire le variazioni delle luminosità stellari con una precisione di poche decine di parti per milione.

Nel 2026 sarà lanciato PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars), che avrà l'obiettivo principale di scoprire e studiare pianeti terrestri in orbita attorno a stelle simili al Sole nella loro zona abitabile.

Poi arriverà Ariel (Atmospheric remote-sensing infrared exoplanet large-survey) [5], che l'ESA ha selezionato come quarta missione di classe media di *Cosmic Vision*, oggi in fase di realizzazione

Conosceremo la composizione chimica e i parametri fisici delle atmosfere di mondi alieni.

da parte di un ampio consorzio internazionale costituito da più di 50 istituzioni di 17 Paesi, nell'ambito del quale l'Italia ricopre ruoli e responsabilità scientifiche di primaria importanza. Ariel sarà lanciato nel 2029

e opererà per almeno 4 anni posizionato in un'orbita intorno a L2, il secondo punto lagrangiano del sistema Terra-Sole, a circa 1,5 milioni di km dalla Terra. L2 è una posizione favorevole per le osservazioni in quanto il Sole risulta sempre nascosto dalla Terra.

Ariel sarà la prima missione in grado di misurare la composizione chimica e le proprietà termiche delle atmosfere di centinaia di esopianeti transitanti. La luce delle stelle raccolta dall'occhio di Ariel, uno specchio di forma ellittica di circa un metro che sarà completamente *made in Italy*, verrà convogliata dal sistema ottico agli strumenti di bordo, per essere scomposta in immagini spettroscopiche multi-dimensionali ordinate temporalmente. I

dati così ottenuti saranno infine inviati a terra per essere analizzati.

Potremo così conoscere la composizione chimica e i parametri fisici delle atmosfere di centinaia di mondi alieni. Un censimento chimico che consentirà di studiare le fasi primordiali della formazione dei pianeti e delle loro atmosfere, capire come si situa il Sistema Solare nel più generale contesto cosmico e affrontare il complesso problema dell'origine della vita nell'Universo.

Grazie ad Ariel, arriveremo inoltre a poter studiare l'evoluzione dinamica delle atmosfere di alcuni esopianeti, riconducibile ad esempio a variazioni della copertura di nubi. Sarà l'avvio dell'esoclimatologia. Insomma, tempo 10 anni e sapremo che aria tira sugli altri mondi.

Riferimenti bibliografici

- [1] M. MAYOR, D. QUELOZ, "A Jupiter-mass companion to a solar-type star", *Nature*, 378, 1995, pp. 355-359.
- [2] M. GILLON *et al.*, "Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1", *Nature*, 542, 2017, pp. 456-460.
- [3] A. LELEU *et al.*, "Six transiting planets and a chain of Laplace resonances in TOI-178", *Astronomy and Astrophysics*, 649, 2021.
- [4] G. BIGNAMI *et al.*, "Cosmic vision: space science for Europe 2015-2025", ESA, 2015.
- [5] G. TINETTI *et al.*, "Ariel: enabling planetary science across light-years", ESA, 2020.

Mappare lo spazio-tempo dell'Universo che ci circonda, dal Sole verso miliardi di stelle

L'astrometria relativistica, avviata dal satellite Gaia, rivoluziona la mappa della Via Lattea secondo il paradigma "elastico" della teoria di Einstein.

Fin dalla Preistoria l'osservazione e la proiezione sulla terra del movimento ciclico degli astri e dei pianeti hanno consentito di creare dei riferimenti utili a orientarci nello spazio e nel tempo. La geografia terrestre è stata speculare alla geografia astronomica: gli spostamenti, guidati dalle stelle, erano viaggi di corrispondenze, da ignoto a ignoto, accompagnati dalla creazione di costellazioni e dei miti a esse associati; forse erano il riflesso di una tecnica arcaica o multisensoriale, come mostrato in epoche più recenti dalle *stick charts*, le mappe costruite con piccole stecche di legno, palme e conchiglie e adoperate dai naviganti delle isole Marshall nelle rotte verso terre sconosciute.

Da tempi remoti siamo misuratori di stelle, del caos puntiforme che ci sovrasta senza un evidente perché strutturale. Scoprire questo "perché" è il

L'astrometria è la branca più antica dell'astronomia che quantifica posizioni e movimenti delle stelle fin dal tempo dei Babilonesi.

compito dell'astrometria, la branca più antica dell'astronomia, non a caso detta fondamentale, che quantifica posizioni e movimenti delle stelle fin dal tempo dei Babilonesi.

Il cosmo è come un'enorme pista da ballo dove ogni ballerino celeste danza

Mariateresa Crosta,
INAF, Osservatorio
Astrofisico, Torino

al proprio ritmo, con la propria musica e il proprio stile. Quelli che sembrano cammini senza senso sono, invece, moti ordinati. Nel corso dei secoli, gli astrometri hanno confrontato

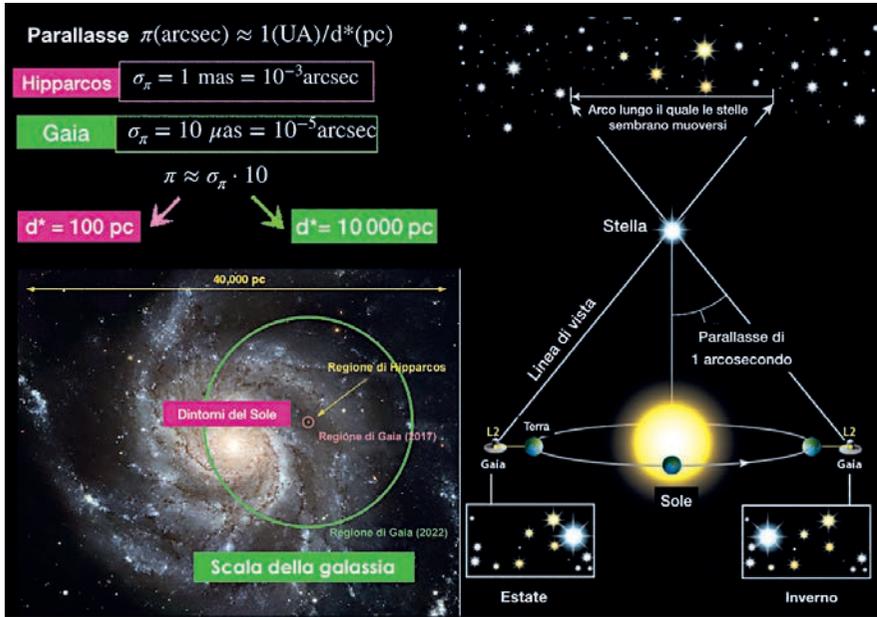
minuscoli cambiamenti nel cielo con crescente precisione; in pratica, hanno misurato angoli tra gli astri sempre più piccoli, tramandandoci i passi di danza di ogni stella osservata.

Misurare le stelle dallo spazio

Nella proiezione degli astri su una sfera bidimensionale perdiamo la percezione della profondità dello spazio. In realtà, misurare angoli sempre più piccoli ci porta a distanze sempre più grandi.

Per ottenere un'elevata accuratezza bisogna svincolarci dalle limitazioni terrestri; è quindi necessario operare dallo spazio, come nel caso della missione Gaia dell'Agenzia Spaziale Europea ESA, lanciata nel 2013: un grande progetto europeo che coinvolge circa 450 scienziati. "Gaia" all'origine stava per Global Astrometric Interferometer for Astrophysics; sebbene l'acronimo non sia più applicabile, il nome è rimasto per dare continuità al progetto.

A guisa di un compasso celeste, Gaia ricava le posizioni – direzioni e distanze – e le velocità di quasi 2 miliardi di oggetti, corrispondenti a cir-



Le linee di vista dei due telescopi ottici installati su Gaia si combinano su un unico piano focale. Qui si registrano misure volte a identificare in astronomia le caratteristiche fondamentali degli oggetti celesti: quelle astrometriche per ricavare posizioni, parallassi e moti propri; quelle fotometriche per ottenere l'intensità luminosa apparente e i colori; infine, quelle spettroscopiche per individuare le velocità radiali, la temperatura e la composizione chimica. È l'insieme di questi dati che permette di determinare la fisica degli oggetti: massa, distanza, velocità e, per le stelle, stato evolutivo o, più prosaicamente, l'età.

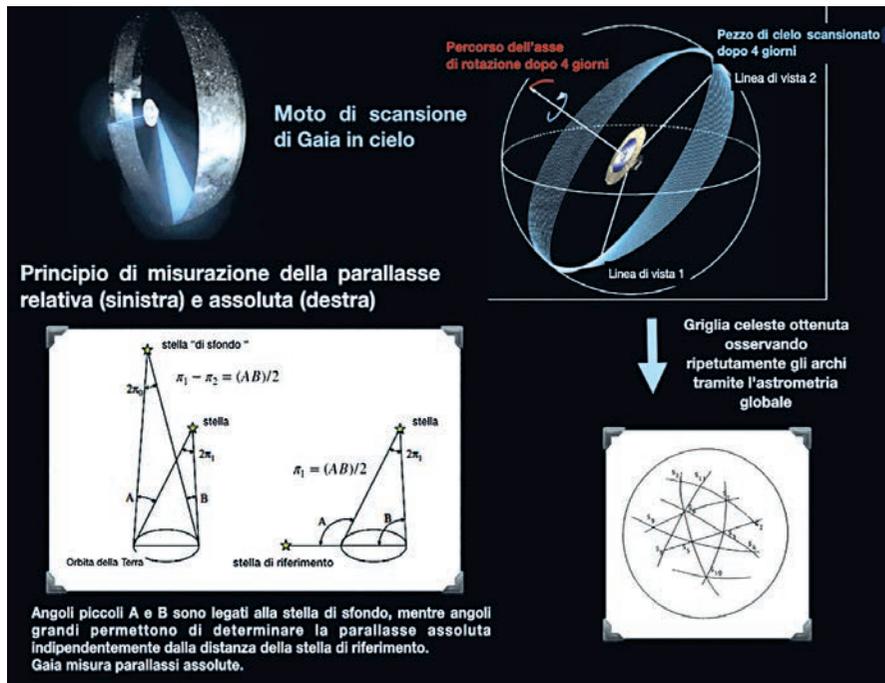
La parallasse (π) di un secondo d'arco ($1''$) è lo spostamento angolare di un oggetto sotteso dall'unità astronomica (UA) alla distanza di 1 parsec (pc). Poiché la posizione di un astro è affidabile se l'errore relativo è inferiore al 10%, con 1 milionesimo di secondo d'arco (μas) otteniamo distanze affidabili fino ai confini della galassia (10000 pc). Per gli oggetti 4000 volte meno luminosi di quelli visibili a occhio nudo, Gaia fornisce le posizioni con una precisione di 24 μas , paragonabile alla misura del diametro di un capello umano a una distanza di 1000 km. Il piccolo cerchio rosa delinea la regione galattica coperta dal predecessore di Gaia, Hipparcos (© ESA).

Gaia rivela oggetti fino alla magnitudine 20 nel visibile, corrispondente a una luminosità circa 400000 volte più debole di quanto si possa vedere a occhio nudo. Per la sua modalità di osservazione del cielo, la precisione

ca l'1% delle stelle della nostra galassia, con una precisione sbalorditiva. Sappiamo che un grado è la 360^{ma} parte di una circonferenza; a sua volta, un grado è formato da 60 minuti d'arco, ciascuno dei quali è formato da sessanta secondi d'arco. La precisione di Gaia è pari a 10 milionesimi di secondo d'arco.

alla magnitudine 20 nel visibile, corrispondente a una luminosità circa 400000 volte più debole di quanto si possa vedere a occhio nudo. Per la sua modalità di osservazione del cielo, la precisione

Gaia si trova a 1,5 milioni di km dalla Terra, nella posizione L2 del sistema Terra-Sole, lontano dal calore irradiato dalla Terra e dal suo cono d'ombra. Da qui tiene il passo con la Terra mentre orbitiamo attorno al Sole e scansiona in modo continuo il cielo grazie alla combinazione del moto di rotazione su se stessa e di quello di precessione rispetto alla direzione solare.



La legge di scansione di Gaia e l'astrometria globale dallo spazio basata sulle misure di parallasse assoluta (© ESA).

delle misure dipende principalmente dalla luminosità degli oggetti.

Ogni giorno, Gaia trasmette verso la Terra circa 500 milioni di misure grezze che vengono trasformate nell'insieme calibrato dei dati di cui sopra affinché ne possano liberamente usufruire la comunità astronomica e i cittadini. Di recente, il consorzio europeo per l'analisi dei dati di Gaia (DPAC) ha rilasciato la prima parte del terzo catalogo. La pubblicazione finale è prevista per il 2025 e costituirà il più importante deposito di informazioni per i prossimi 50 anni.

Fare luce sulla Via Lattea

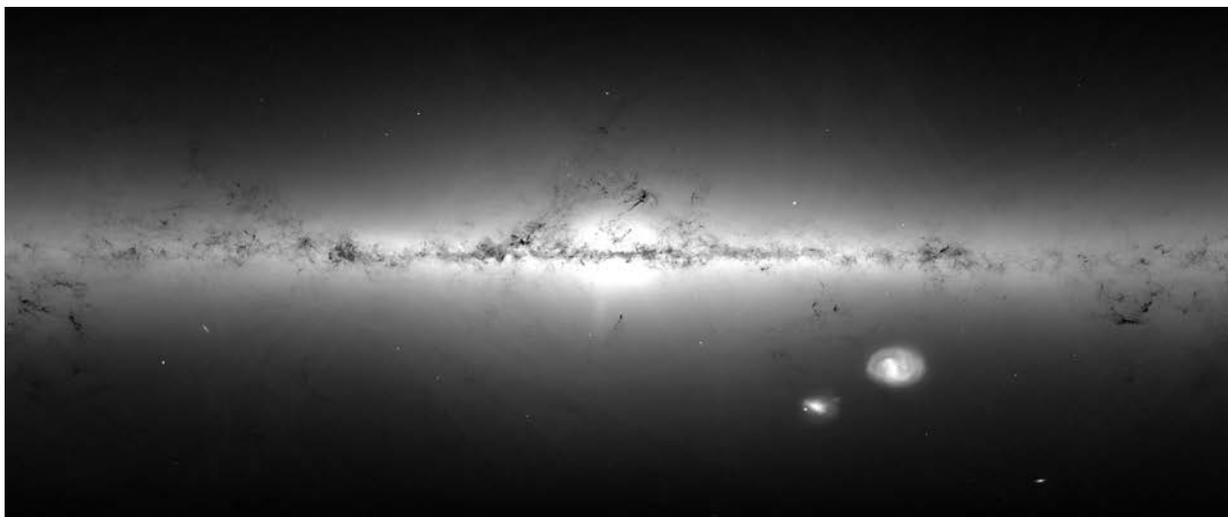
Gaia ci sta aiutando a mettere ordine nella comprensione della Via Lattea. La mappatura sta fornendo un dettagliato censimento di singole stelle e delle loro proprietà intrinseche, del mezzo e della polvere interstellari, di sistemi binari irrisolti e di sorgenti extragalattiche. Saranno scoperti centinaia di migliaia di nuovi oggetti celesti, tra cui pianeti extrasolari e nane brune, e verranno monitorati centinaia di migliaia di asteroidi all'interno del nostro Sistema Solare. In aggiunta, Gaia scandaglierà fino a 1,6 milioni di quasar, ovvero i nuclei galattici attivi talmente lontani da avere un moto proprio quasi nullo.

Non mancheranno indizi sulla formazione e l'evoluzione della Via Lattea, che può subire drammatici cambiamenti dinamici dovuti alle interazioni gravitazionali e alla fusione con galassie più piccole ubicate nelle sue vicinanze. Dunque, potremo son-

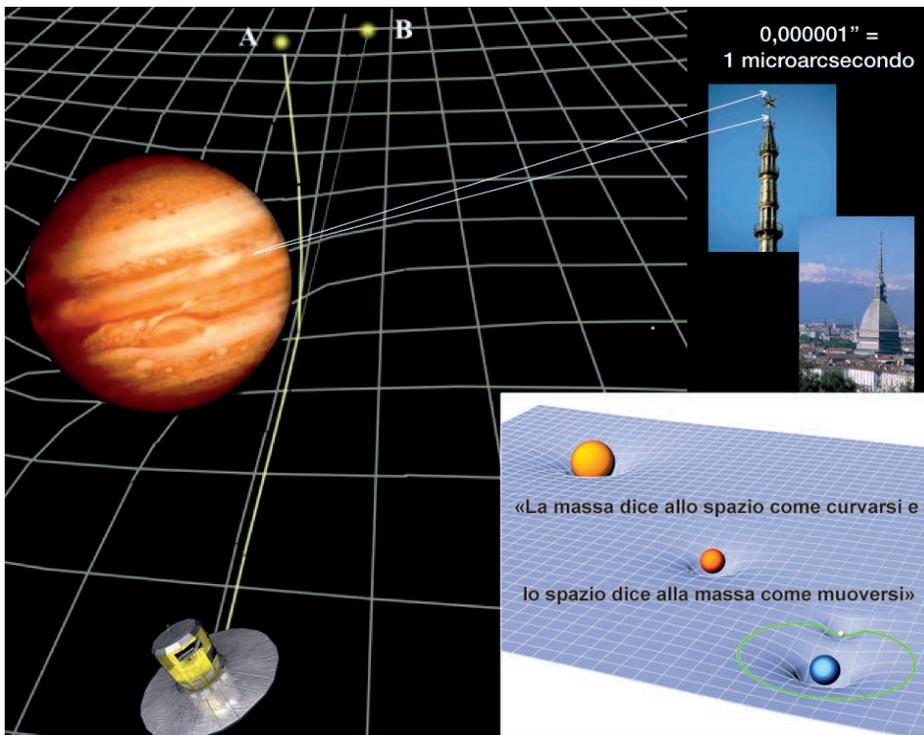
dare l'archeologia galattica su scale temporali di miliardi di anni e scovare stelle fossili di altre galassie inghiottite molto tempo fa. Dopo solo 34 mesi di attività, sono disponibili i dati di oltre 1,8 miliardi di osservazioni di Gaia. La mappa ricostruita evidenzia la struttura orizzontale luminosa dominante – il disco della Via Lattea – contenente la maggior parte delle stelle, mentre le regioni più scure corrispondono alle nubi di gas e polvere interstellari, che assorbono la luce delle stelle più lontane, e in molte si nascondono siti di nascita stellare. Uno sbuffo allungato verso il basso, appena visibile sotto il rigonfiamento centrale, mostra un flusso di stelle della galassia nana satellite del Sagittario, trascinate dall'attrazione gravitazionale della nostra galassia. In basso a destra vi sono le Grandi e Piccole Nubi di Magellano, due galassie nane che orbitano attorno alla Via Lattea. Del Gruppo Locale sono visibili la galassia di Andromeda in basso a sinistra insieme al suo satellite, la galassia Triangulum.

Gaia è anche una miniera per la fisica fondamentale e la cosmologia locale.

Gaia è quindi astronomia per antonomasia, ma è anche una miniera per la fisica fondamentale e la cosmologia locale [1]; quest'ultima si occupa di verificare se la galassia in cui viviamo e l'Universo vicino che ci circonda – il Gruppo Locale – sono il prodotto atteso dell'evoluzione cosmologica e, in particolare, come la gravità agisca nell'assemblare le masse, dal microcosmo di gas,



Mappa dell'intero cielo ricostruito con i dati di oltre 1,8 miliardi di osservazioni di Gaia dopo 34 mesi di attività. Le tracce circolari sono artefatti che riflettono come Gaia scansiona il cielo e che svaniranno raccogliendo più dati (© ESA/Gaia/DPAC).



L'astrometria relativistica implica un'analisi nel contesto della relatività generale della traiettoria del fotone. La figura mostra come Giove deflette la traiettoria della luce da cui si ricavano le reali posizioni delle stelle (A anziché B). L'entità dell'effetto per il Sole va da 1,75 secondi d'arco (per raggi radenti) fino a $1 \mu\text{as}$ a 180° dal suo centro, una perturbazione praticamente ubiqua. Per Giove va da circa 16 millesimi di secondi d'arco (e $240 \mu\text{as}$ per la parte obblata!) fino a $1 \mu\text{as}$ a 90° dal suo centro; $1 \mu\text{as}$ corrisponde alla dimensione angolare, vista da Giove, della stella posta sulla sommità della Mole Antonelliana.

polvere e plasmii, al macrocosmo delle stelle, delle loro composizioni e architetture.

L'astrometria relativistica

La relatività generale di Einstein è la teoria standard che spiega come funziona la gravità su oltre sessanta ordini di grandezza, dalla scala di Planck (10^{-35} m), alla dimensione dell'Universo osservabile (10^{10} anni luce). È nota la parafrasi di J.A. Wheeler dell'equazione di Einstein: «La massa dice allo spazio come curvarsi e lo spazio dice alla massa come muoversi», a indicare una geometria, una metrica, che estrinseca la logica delle relazioni tra gli eventi-sorgenti dello spazio-tempo. Qualsiasi modifica o alternativa alla relatività generale dovrebbe spiegare la gravità su un intervallo così ampio.

In un Universo governato dalla teoria di Einstein, gli angoli vanno tracciati tra linee curve. Le masse del Sistema Solare, seppur non comparabili a quelle di un buco nero o delle stelle di neutroni, produco-

no uno spazio-tempo curvo variabile. Gaia, immersa nella gravità locale, effettua misure di deflessione dei raggi di luce implementando un'astrometria relativistica [2] per determinare la distribuzione spaziale e la cinematica delle stelle fuori dal Sistema Solare. A partire da angoli in cielo, ricostruiamo all'inverso le traiettorie di luce emesse dalle stelle, come se dipanassimo un filo d'Arianna attraverso le curvature mutevoli dello spazio-tempo. Il nodo da districare sta nel modellare correttamente la direzione propria del fotone (il quanto di luce emesso dalla stella) nel labirinto oscuro dello spazio.

Così i fotoni divengono i principali misuratori dello spazio-tempo che separa le varie parti osservabili dell'Universo. Ma sono anche i rivelatori delle interazioni fisiche intrecciate e nascoste nelle pieghe della geometria entro ordini di grandezza a cui l'astrometria relativistica può essere sensibile. Un esempio sono le onde gravitazionali, che mutando lo spazio-tempo si aggiungono alle perturbazioni locali, spostando ulteriormente la direzione d'arrivo della luce. Solo se l'analisi dei dati viene effettuata correttamente nel quadro di un modello astrometrico coerente alla relatività generale forniremo posizioni, moti e distanze corrette, oltre che verifiche della teoria della gravità, della fisica fondamentale e della cosmologia.

Valutare con quale precisione un'unità di massa curvi lo spazio-tempo implica mettere a confronto molte teorie alternative a quella standard, tra le quali quelle che predicano le stringhe o la gravità quantistica.

Quindi, se le masse dicono allo spazio come curvarsi, le misure di Gaia, volte a ottenere le posizioni reali delle stelle – circa 2 miliardi di di-

rezioni coinvolte! –, costituiranno il più grande esperimento relativistico con l'astrometria nello spazio, una riedizione con la tecnologia del XXI secolo del test di deflessione della luce attorno al Sole che rese famoso Einstein nel 1919. Inoltre, giacché ogni oggetto sarà osservato almeno 70 volte, il metodo galileiano – che valida i dati sperimentali sulla base della loro riproducibilità – verrà applicato all'intera volta celeste.

Il puzzle della Via Lattea secondo Einstein

Se lo spazio dice alle masse come muoversi, la cinematica stellare – il movimento delle stelle senza preoccuparsi delle cause – è il modo più affidabile per valutare i contributi di curvatura e per tracciare il ruolo della gravità. Siccome Gaia determina direttamente il moto relativistico delle singole stelle, la filosofia dell'astrometria relativistica andrebbe estesa alla ricostruzione

della Via Lattea, che è il suo principale obiettivo scientifico.

La cinematica e la dinamica agiscono in modo intrecciato, una proprietà intrinseca dell'equazione di Einstein di cui si conoscono poche soluzioni. La difficoltà di risoluzione aumenta per un oggetto esteso e multistrutturato come la galassia, e pertanto si adotta la gravità di Newton.

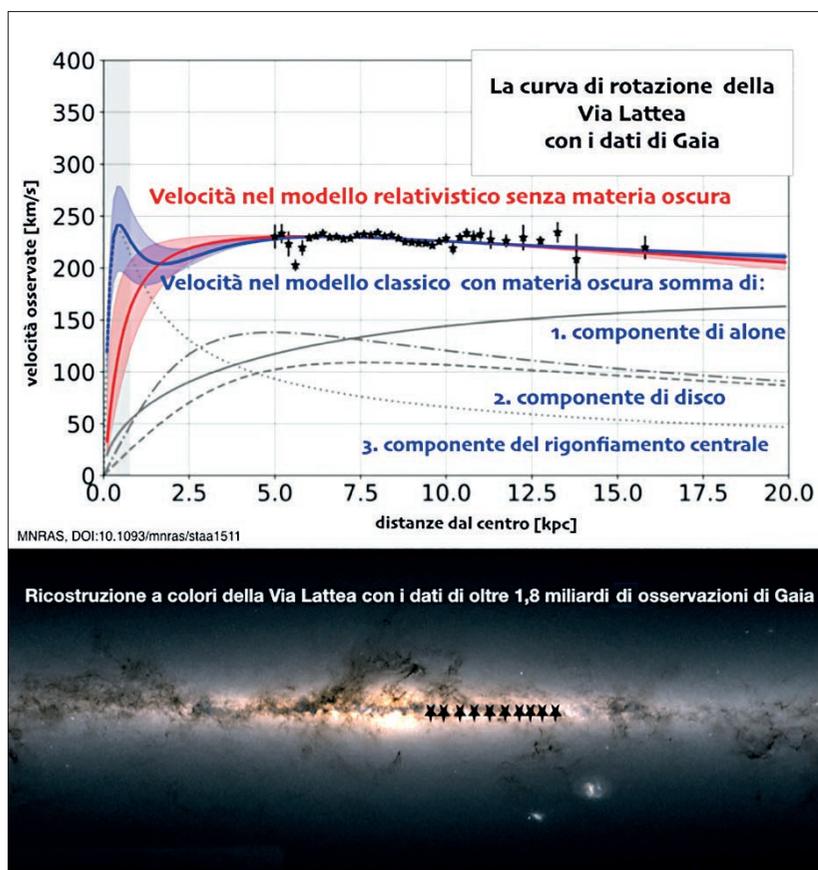
E se, invece, la Via Lattea fosse assemblata con un puzzle diverso? Gaia ci sta aprendo nuove frontiere, oltre il limite newtoniano: anche su scala galattica ci accorgiamo che il regime debole in realtà può essere forte, se confrontato con le accuratezze in gioco.

Un primo importante esempio sono le curve di rotazione osservate, cioè la velocità a cui le stelle orbitano attorno al centro galattico. È un problema quasi centenario per gli astronomi, risalente alle storiche osservazioni di Fritz Zwicky prima e di Vera Rubin poi. Attualmente si ipotizza che le galassie siano circondate da enormi aloni fatti

di materia oscura la cui natura resta sconosciuta. Sappiamo infatti che, lontano dal centro galattico, le stelle e il gas non seguono le orbite prescritte dalla legge di Newton, ma mantengono le loro velocità costanti anziché diminuire. La spiegazione più semplice è che le galassie contengano molta più massa di quella che può essere dedotta dagli oggetti nei dischi galattici sicché l'aggiunta ad hoc di un alone di materia oscura consente un buon adattamento ai dati.

Tuttavia, un recente studio [3], basato solo sui dati di Gaia e su un modello che tratta le stelle alla stregua di granelli di polvere relativistica, suggerisce che sia proprio la geometria dello spazio-tempo a guidare la curva di rotazione nel piano della Via Lattea coerentemente con le equazioni di Einstein, senza aggiungere massa extra.

Questo dimostra, per la prima volta, che il modello cinematico relativistico è in grado di



Curva di rotazione della Via Lattea derivata dai dati di Gaia. Per la prima volta si confronta un modello relativistico di Einstein con quello classico di materia oscura rispondente alla gravità di Newton su un ampio intervallo di distanze galattocentriche (da 5 a 16 kpc, grosso modo indicato dalle stelline sull'immagine a colori della Via Lattea) (© ESA/Gaia/DPAC).

rappresentare i dati sperimentali con una qualità del tutto simile a quella di un modello tradizionale che usa la dinamica newtoniana e introduce la materia oscura. Tale analisi richiama la rivisitazione sulla cinematica fatta da Einstein, che impose una velocità della luce costante per eliminare l'etere, anziché aggiungere una nuova forza molecolare.

Se guardiamo ancora al passato, la teoria di Newton spiegava i cambiamenti inaspettati nell'orbita di Urano ipotizzando una perturbazione gravitazionale di un pianeta sconosciuto, vale a dire Nettuno. Sulla scia di tale successo, si propose di interpretare l'anomalo avanzamento del perielio di Mercurio cercando un "pianeta oscuro"; la relatività generale, invece, spiegò l'eccesso di 43 secondi d'arco per secolo tenendo conto dei campi gravitazionali non lineari vicino al Sole, e offrendo così la seconda conferma della teoria di Einstein. Benché questo effetto sia debole, esso può considerarsi tanto "forte" da giustificare l'abbandono della teoria di Newton.

Contrariamente all'astronomia classica, il processo di misura in relatività generale dipende dalla metrica, e la velocità di rotazione delle stelle risulta legata al trascinamento gravitazionale dello spazio che dice alle masse come muoversi. La geometria dello spazio-tempo, come manifestazione della gravità, renderebbe da sola conto delle proprietà della materia oscura, caratterizzata dal non assorbire né emettere luce e interagire solo con la gravità.

Questi primi incoraggianti risultati affermano la necessità di sviluppare geometrie galattiche relativistiche più complesse in previsione di nuovi dati sempre più accurati. Infine, non dimentichiamo che, come gli atomi stanno ai processi chimici, la Terra sta agli esopianeti, il Sole alle stelle, la Via Lattea alle galassie. La Via Lattea è il prodotto cosmologico a noi più vicino: una sua adeguata rappresentazione relativistica può aiutare a mettere sul banco di prova le previsioni di qualsiasi modello cosmologico.

Verso il Galactocene

Con il livello di accuratezza delle misure compiute da Gaia, persino la perturbazione gravitazionale di un esopianeta sulla sua stella madre diventa rilevante. Già entro i 200 parsec, Gaia scoperà 10 000 esopianeti rocciosi simili a Nettuno. Mappare la galassia ci condurrà a quella che potremmo defini-

re l'era del "Galactocene", vale a dire sondare rotte verso nuove Terre e inaugurare l'antropologia stellare.

L'astrometria antica è legata a varie culture; quella nuova vi introduce i concetti di spazio-tempo coinvolgendo molte altre discipline e il nostro mondo emozionale-simbolico.

Si pensi solo alla relazione soggetto-oggetto dettata dalla luce stessa: senza gli scienziati l'Universo non potrebbe rivelarsi, e senza luce non esisterebbero gli scienziati che studiano l'Universo. Se la cartografia delle stelle segue la geometria in cui è immerso l'osservatore-partecipante, le mappe relativistiche obbligano un ripensamento epistemologico sulle nostre concezioni di luogo, tempo e orientamento. Al di là della propria isola, il divenire può assumere forme diverse, secondo le energie e le curvature in gioco; alcune geometrie inusitate delle equazioni di Einstein rendono pensabili viaggi nel futuro e nel passato [4] e per viaggiare nell'immensità dell'Universo ci spingiamo a immaginare velocità superluminali, motori a curvatura, energie negative, singolarità nude, ponti di Einstein-Rosen.

L'astrometria relativistica e le conferme della relatività generale raffinano sempre di più i limiti da esplorare e ci preparano ai viaggi interstellari, dove il tempo sarà inscindibile dallo spazio. E i viaggiatori dello spazio-tempo saranno guidati non solo dalle stelle, come fu per i nostri antenati, ma anche dalla gravità.

I viaggiatori dello spazio-tempo saranno guidati non solo dalle stelle, ma anche dalla gravità.



Riferimenti bibliografici

- [1] M.G. LATTANZI, *Astrometric cosmology*, in "QSO astrophysics, fundamental physics, and astrometric cosmology in the Gaia era", *Memorie della Società Astronomica Italiana*, 83, 3, 2012.
- [2] M. CROSTA, "Astrometry in the 21st century. From Hipparchus to Einstein", *La Rivista del Nuovo Cimento*, 10, 2019, pp. 443-510.
- [3] M. CROSTA, M. GIAMMARRIA, M.G. LATTANZI, E. POGGIO, "On Testing CDM and geometry-driven Milky Way rotation curve models", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 496, 2, 2020, pp. 2107-2122.
- [4] M. CROSTA, "Viaggiare a ritroso nel tempo si può", *Media INAF*, 2015.

INTEGRAL *reloaded*

L'incredibile storia della missione INTEGRAL, rilanciata dopo l'apparente conclusione, che ha aperto la strada dell'astronomia multi-messaggera.

Baikonur, 17 ottobre 2002. INTEGRAL è sulla rampa di lancio, poco distante da quella da cui è partita 41 anni prima la Vostok che avrebbe portato in orbita Jurij Alekseevič Gagarin, il primo uomo a uscire dall'atmosfera terrestre e compiere un'orbita attorno alla Terra. Alle ore 4:42 Tempo Universale (UTC), con due minuti di ritardo rispetto a quanto stabilito anni prima, parte il razzo Proton con a bordo INTEGRAL, osservatorio spaziale per raggi gamma realizzato dall'Agenzia Spaziale Europea ESA, in collaborazione con la NASA e l'Agenzia Spaziale Russa. Oltre 700 tonnellate di carburante e motori, come due treni "Frecciarossa", per portare in orbita il più pesante strumento scientifico mai realizzato.

INTEGRAL è il nome che il gruppo di scienziati di dieci Paesi europei, statunitensi e russi hanno dato all'osservatorio disegnato per fare "radiografie" dell'Universo con una sensibilità e accuratezza mai raggiunta prima, in un intervallo di energia ancora pochissimo esplorato. L'idea di questa missione spaziale era nata molti anni prima, ma l'ESA aveva approvato la sua realizzazione solo nel 1995, con decisione unanime: la prossima missione del programma scientifico *Horizon 2000* sarebbe stata appunto un osservatorio capace di rivoluzionare la nostra conoscenza delle stelle dopo la loro fine, quando collassano completamente e diventano buchi neri (se sono di grandi dimensioni) o stelle di neutroni (se le loro dimensioni sono più piccole), oppure si spengono senza troppo clamore (se sono come il nostro Sole, una piccola stella come miliardi di miliardi di altre in tutto l'Universo). Il compito di INTEGRAL era esplorare i fenomeni più ener-

Angela Bazzano
e **Pietro Ubertini**, INAF,
Istituto di Astrofisica e
Planetologia Spaziali,
Roma

tici e violenti del cosmo, o, come direbbero i nostri colleghi scienziati, i processi "non termici", quali, per esempio, l'interazione tra particelle relativistiche e campi magnetici e fotonici; infatti, nella regione gamma dello spet-

tro elettromagnetico osservata, sono presenti righe nucleari con un'enorme potenzialità diagnostica.

Il Comitato internazionale di scienziati nominati da Roger Bonnet – all'epoca direttore scientifico dell'ESA – che aveva selezionato INTEGRAL era guidato da Giovanni Bignami, "Nanni" per tutti noi, il quale aveva sostenuto con forza la realizzazione del progetto e ha poi contribuito a uno dei risultati più importanti ottenuti, confermando l'esistenza di antimateria nella regione del centro e del piano della galassia, grazie alla presenza della riga spettrale a 511 keV rivelata dalla missione con una delle sue prime osservazioni, a una sensibilità mai raggiunta prima.

Sono passati tanti anni dal lancio di INTEGRAL e abbiamo risolto, grazie al piano osservativo deciso anno per anno da un Comitato internazionale attento all'eccellenza dei programmi, numerosi misteri scientifici, oltre ad aver rivelato per la prima volta alcune classi di sorgenti cosmiche: le *supergiant fast X-ray transients*, stelle di neutroni che orbitano intorno a stelle giganti e quando si avvicina-

**INTEGRAL è
disegnato per
fare "radiografie"
dell'Universo con
una sensibilità
e accuratezza
mai raggiunta
prima.**



INTEGRAL decolla con un Proton dal cosmodromo di Baikonur il 17 ottobre 2002 (© ESA).

no al loro mantello aumentano la loro emissione di raggi gamma fino a 10000 volte in pochi minuti; e le *transitional millisecond pulsars*, che utilizzano energia per emettere raggi gamma traendola dalla loro frenetica velocità di rotazione, oppure consumando l'energia intrappolata sotto forma di enorme campo magnetico, un po' come si ricaricano le batterie delle moderne auto elettriche quando si azionano i freni. INTEGRAL ha censito il cielo di alta energia, ora popolato da migliaia di nuove sorgenti scoperte in oltre un decennio di osservazioni "profonde"; alla fine degli anni '90, quando INTEGRAL è stato ideato, se ne conoscevano meno di cinquanta!

Perché "INTEGRAL reloaded"?

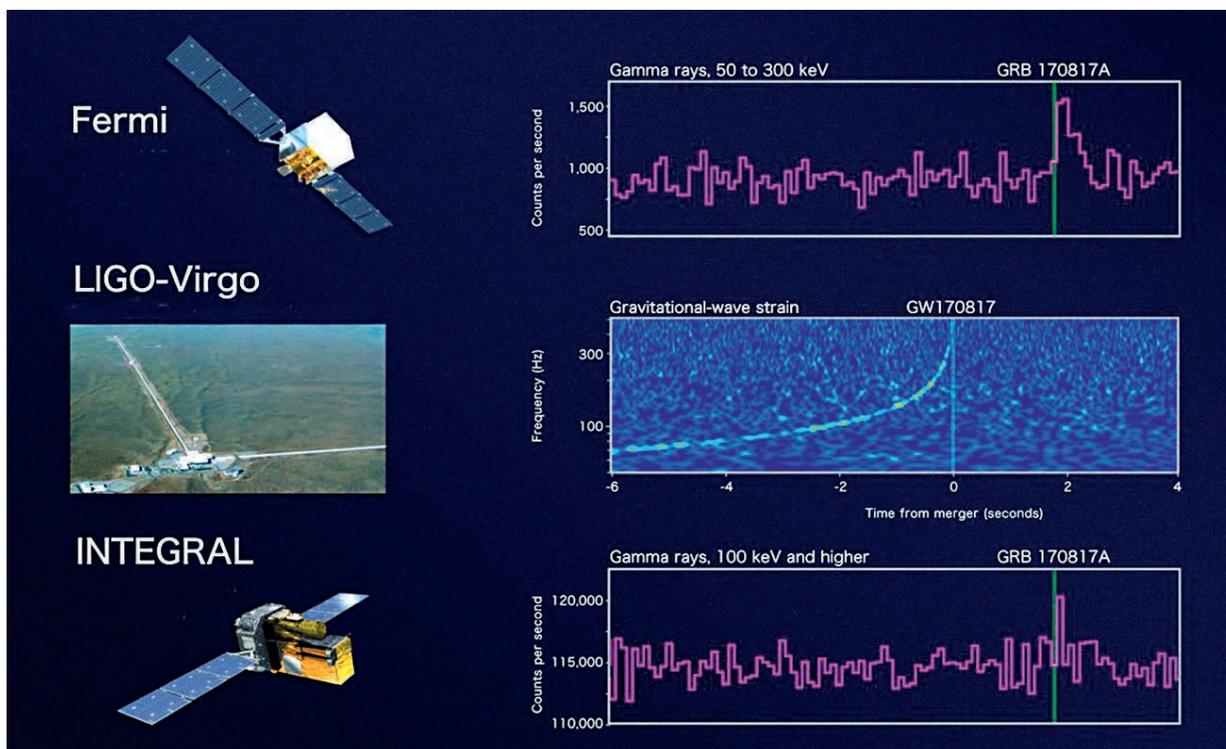
Proprio quando sembrava che la missione avesse quasi esaurito le sue capacità di indagine del cielo di alta energia, avendo composto la più sensibile mappa del piano della nostra galassia e dell'Universo lontano, con 400 milioni di secondi di osservazione in 15 anni di lavoro, sette giorni su sette e 24 ore su 24, INTEGRAL ha avuto un ruolo cruciale nel rivelare uno degli eventi cosmici più importanti del nuovo millennio e che rimarrà nella storia dell'astronomia per il suo impatto nella conoscenza del cosmo e della sua evoluzione.

Era il 17 agosto del 2017, in piene vacanze estive, quando gli interferometri costruiti dal consorzio internazionale LIGO-Virgo ad Hanford e Livingston (USA) e Cascina (Pisa) per rivelare il passaggio di onde gravitazionali, alle 12:41:04 UTC, registravano quasi contemporaneamente un segnale consistente con la coalescenza di due stelle di neutroni, due stelle composte da materiale nucleare super denso di dimensioni tra i 10 e i 15 km, con una massa superiore a quella del nostro Sole: una collisione

cosmica in grado di emettere una quantità enorme di energia sotto forma di onde gravitazionali.

La prima rivelazione di onde gravitazionali dovute alla collisione di enormi buchi neri lontani dalla nostra galassia era avvenuta il 14 settembre 2015, senza però che fosse stato possibile ottenere alcuna immagine o informazione di tipo astronomico dell'evento, nonostante le innumerevoli osservazioni fatte dallo spazio e da terra. A prima vista l'evento del 17 agosto poteva sembrare molto simile ai segnali registrati in precedenza e quindi essere solo un'ulteriore conferma della validità della geniale teoria elaborata da Einstein circa 100 anni prima e sintetizzata dalla semplice e ormai famosa equazione $E = mc^2$. Invece no! In questo caso si era verificato un evento atteso dalla comunità astrofisica con enorme interesse. Infatti i satelliti Fermi e INTEGRAL, circa 1,74 secondi dopo l'arrivo dell'onda gravitazionale sulla Terra, registrarono contemporaneamente un debole brevissimo impulso di raggi gamma, uno *short gamma-ray burst*. I fotoni gamma erano ovviamente stati emessi durante la collisione delle due stelle di neutroni.

Era la prova che l'Universo delle "onde gravitazionali" ipotizzato da Einstein all'inizio del Novecento e quello cosiddetto "elettromagnetico", svelato da Galileo Galilei 400 anni prima, erano in perfetta sinergia: insomma, si parlavano tra loro. Grazie alla rilevazione quasi in contem-



La figura mostra la rivelazione combinata di GW170817 e GRB170817A. In alto, la curva di luce di GRB170817A con Fermi/GBM fra 50 e 300 keV, corrispondente temporalmente ai dati dello spettrometro di INTEGRAL mostrati in basso. Nel mezzo, la mappa tempo/frequenza di GW170817 ottenuta combinando i dati LIGO-Hanford e LIGO-Livingston (© LIGO/Virgo; Fermi; INTEGRAL; NASA/DOE; NSF; EGO; ESA).

poranea delle onde gravitazionali e dei segnali gamma, gli astronomi sapevano dove puntare i più sensibili telescopi e satelliti con la speranza di capire cosa avvenisse dopo la coalescenza delle due stelle di neutroni. Grazie alla distribuzione delle informazioni ottenute da LIGO-Virgo, Fermi e INTEGRAL a tutti gli astrofisici praticamente in tempo reale via rete, è stato possibile ripuntare tutti gli osservatori disponibili nella direzione da cui venivano le onde gravitazionali e i raggi gamma. La rivelazione ottenuta in perfetta sincronia dagli interferometri a terra e dai due satelliti nello spazio aveva permesso di individuare con un'accuratezza incredibile la posizione in cielo della sorgente cosmica che 120 milioni di anni prima aveva generato i segnali registrati: uno *strike* cosmico! In 120 milioni di anni le onde gravitazionali e i raggi gamma avevano viaggiato ed erano arrivati a noi con una differenza di 1,74 secondi... e pensare che quando i due segnali erano ancora a metà del loro percorso verso la Terra, sul nostro pianeta si estinguevano i dinosauri!

La rivelazione contemporanea di onde gravitazionali e raggi gamma ha inoltre permesso, per la prima volta, di fare una misura accuratissima della velocità di propagazione delle onde gravi-

tazionali. Infatti, la minima differenza di tempo di arrivo tra i due segnali dopo un viaggio durato 120 milioni di anni ci ha dato un'informazione che conferma, ancora una volta, le ipotesi di Einstein sulla velocità di propagazione delle onde gravitazionali, che è risultata diversa da quella della luce per meno di una parte su un milione di miliardi: una verifica sperimentale attesa da oltre un secolo. Queste misure hanno una rilevanza storica anche nel campo della fisica fondamentale e della fisica quantistica, perché ci hanno permesso di verificare la struttura stessa del vuoto cosmico, permettendoci di capire meglio il "nulla" che contiene la poca materia che popola l'Universo.

Astronomia multi-messaggera

Ma questa è solo una parte della storia. Cosa ne è stato delle osservazioni fatte da tutti gli strumenti puntati verso la misteriosa sorgente che è stata chiamata banalmente GW170817 (GW sta per onda gravitazionale e il numero è la data di osservazione)? Non è questa la sede adatta per una disquisizione troppo dettagliata, però di certo abbiamo ottenuto un'immagine del luogo della col-

lisione stellare, ed è stato dimostrato che, dalla fusione delle due stelle di neutroni, è fuoriuscito materiale nucleare ad altissima densità, il quale ha generato oltre ai menzionati raggi gamma, anche radiazione a tutte le lunghezze d'onda.

Per fare solo un esempio, ci ha permesso di capire che questo tipo di coalescenze generano spruzzi di materiale nucleare ad altissima densità, che decadendo genera metalli pesanti come l'europio, l'oro e altri metalli rari che le stelle normali hanno difficoltà a generare con i processi standard di fusione durante la loro evoluzione. Forse qualche pezzetto di una "kilonova" simile alla GW170817 (così gli astrofisici l'hanno chiamata), generata milioni di anni fa, è arrivata sulla Terra come meteorite regalandonoci miniere d'oro, tungsteno, europio, molibdeno e altri preziosi materiali pesanti indispensabili per lo sviluppo della nostra tecnologia, oltre che per forgiare monili atti a soddisfare la nostra vanità...

L'osservazione combinata da due diversi strumenti spaziali distanti tra loro 100.000 km e in due diversi domini ha immediatamente aperto un nuovo modo di osservare e studiare eventi di così breve durata inaugurando una nuova astronomia detta *multi-messenger*.

Le osservazioni della coesistenza di onde gravitazionali e *short gamma ray bursts*, la recente scoperta dei cosiddetti *fast radio bursts* (brevissimi impulsi radio da oggetti distanti da noi emessi con processi fisici non ancora compresi pienamente), la rivelazione contemporanea di neutrini di alta energia (particelle subatomiche elementari di massa piccolissima e carica elettrica nulla) da parte dei nuovi Osservatori sottomarini e da satelliti per raggi gamma, stanno dando un enorme impulso a questa nuova scienza. Migliaia di scienziati collaborano in uno sforzo congiunto e multidisciplinare mai avvenuto prima.

INTEGRAL, come pochi altri satelliti che hanno capacità osservative a largo campo nel dominio delle alte energie, grazie alla sua capacità unica di identificare controparti elettromagnetiche di sorgenti di onde gravitazionali, *fast radio bursts* e neutrini di altissime energie, ha ora una nuova prospettiva di vita, che permetterà all'astrofisica italiana ed europea di avere una posizione di *leadership* a livello globale. Mai avremmo pensato, quando la missione è stata approvata dall'ESA nel 1995, che, un quarto di

secolo dopo, INTEGRAL avrebbe contribuito a dimostrare il nesso tra l'Universo di Einstein e quello di Galileo e a ottenere la prima misura diretta della velocità di propagazione delle onde gravitazionali.

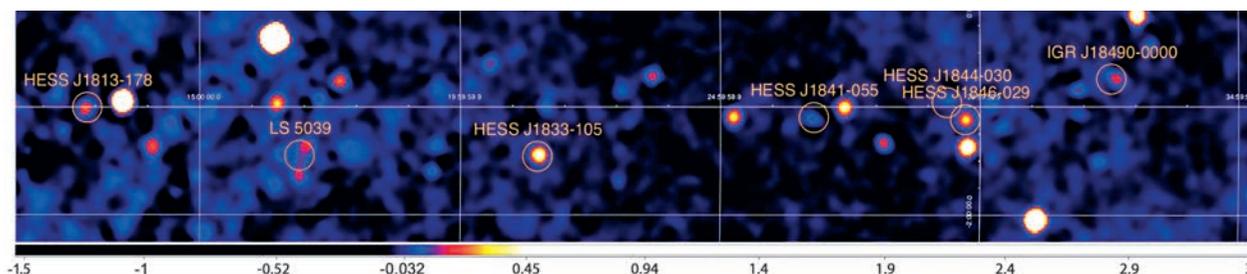
Darmstadt, we have a problem...

Tuttavia, la missione era stata progettata per durare tre anni, con una sua possibile estensione a cinque, quindi sta invecchiando. La dose di radiazione a cui è stata sottoposta durante le sue orbite a metà strada tra la Terra e la Luna è cinque volte quella per cui era stata progettata. Inoltre la "benzina" è terminata: non c'è più idrazina, il carburante di bordo, indispensabile per poter puntare i telescopi verso le sorgenti cosmiche da osservare. Storia finita? No, c'è ancora spazio per un lieto fine.

Nella primavera del 2020, dopo varie incertezze sull'estensione della missione per motivi finanziari, un problema serio ha messo in dubbio le operazioni in volo e il funzionamento del satellite proprio nel momento in cui tutti ci stavamo abituando a un nuovo modo di lavorare che interessava anche l'INTEGRAL Flight Control Team di Darmstadt, in Germania. A maggio INTEGRAL si è messo, autonomamente, in "safe mode" – strumenti spenti e satellite in situazione di sopravvivenza, puntando i grandi pannelli solari verso il Sole per assicurarsi piena potenza – mettendo in allerta tutti i team per la situazione anomala. Infatti il satellite non ha alcun motivo per decidere di smettere di fare osservazioni scientifiche. Qualcosa quindi è sfuggito al team di controllo.



Un'immagine artistica dell'osservatorio INTEGRAL (© ESA/Medialab).



L'immagine mostra parte del piano della galassia osservata con IBIS nell'intervallo di energia 20-100 keV, alla quale sono state sovrainposte sorgenti osservate a ben più alte energie, nel TeV, con il telescopio da terra del progetto HESS. Gli oggetti trovati con l'analisi di cross-correlazione appartengono a varie classi, sia galattiche che extragalattiche, ma ci sono anche sorgenti ancora di natura non definite (© Angela Malizia, OAS/INAF).

Subito dopo il satellite prende un'altra decisione ben strana: ruota, allontanandosi dal Sole. Questo non è mai successo nei 18 anni di vita operativa. Si tratta di un chiaro malfunzionamento di bordo. Per i più che competenti "spacon" – così si chiamano i controllori dei satelliti ESA, da *spacecraft controller* – il caso è serio e subito si pensa a un guasto al sistema di propulsione: uno dei tanti motori a razzo in avaria, una micro-meteorite che ha forato uno dei quattro serbatoi di bordo con l'idrazina, o...? Bisogna però al più presto riprendere il controllo del satellite sfruttando le ruote d'inerzia di bordo, usate per regolare il suo assetto. Poi si sarebbe capito cosa fare.

Seguono giorni di discussione e di preoccupazione per la sorte della missione, da molti già data per spacciata quando diviene chiaro che il notevole carburante ancora presente a bordo, circa 30 kg, non è più utilizzabile per controllare l'assetto del satellite.

Poi, tra i membri del "Mission Control" viene concepita un'idea che sembra bizzarra ma potrebbe funzionare. Va però simulata a terra prima di provarla in volo con una serie di piccole manovre e tentativi di puntamento: se errata, infatti, sarebbe fatale per la sopravvivenza dell'osservatorio spaziale, che potrebbe entrare in rotazione non controllata come successo tempo prima a un sofisticato osservatorio per raggi X andato perso per sempre.

Si tratta di controllare il satellite senza utilizzare i razzi di bordo, un po' come percorrere una ripida discesa di montagna in auto senza motore e senza freni. Ma non c'è altra soluzione. Così, tramite una sequenza di manovre mai fatte prima, il team capisce che si può ridistribuire il momento angolare generato a bordo dalla pressione delle particelle solari sugli enormi pannelli solari, usando due ruote d'inerzia diverse che ruotino in direzioni opposte, causando quindi un capovolgimento del satellite. In tal modo si possono utilizzare gli stessi pannelli solari per avere una spinta al contrario. Un metodo

geniale, diverso da quello progettato 18 anni prima per controllare il puntamento del satellite: questa manovra viene battezzata "z-flip".

Rimane l'incognita di poter continuare le osservazioni scientifiche in questo nuovo modo operativo. Seguono lunghe telefonate e discussioni tra il team in Germania, il team delle operazioni scientifiche, i programmatori delle osservazioni in Spagna e i responsabili degli strumenti per trovare una sequenza di possibili sorgenti da osservare e verificare la possibilità di ottenere dati scientifici utilizzabili. Comunque iniziano i test. Finalmente, il 20 luglio, tutto riprende secondo il piano scientifico già approvato. Incredibilmente, dopo qualche mese, viene caricato un nuovo software di bordo e INTEGRAL inizia una nuova vita operativa "senza motori".

Qualche tempo dopo si scopre con sorpresa che perfino il tempo di risposta a eventi transienti che richiedono un rapido ri-puntamento (*target of opportunity*) è più breve che nell'assetto precedente.

A settembre 2020 inizia una nuova vita operativa: INTEGRAL, ormai più che maggiorenne, può rispondere alle richieste della comunità più velocemente e mantenendo la stessa efficienza. L'astronomia multi-messaggera, a cui questo osservatorio dell'ESA ha dato un impulso fondamentale, è ancora alla portata della nostra comunità... e senza carburante possiamo continuare fino al 2029, quando INTEGRAL rientrerà nell'atmosfera terrestre disintegrandosi, come previsto. Non si disintegreranno le cosiddette "maschere codificate" in tungsteno e altre parti "dense" dei due strumenti principali SPI e IBIS, che sopravvivranno al rientro e finiranno in una zona di mare tra Capo Horn e l'Antartide. In ogni caso, i risultati scientifici della missione, che hanno fatto progredire le nostre conoscenze dei fenomeni più energetici dell'Universo e dato lustro alla nostra comunità scientifica, di certo rimarranno nei libri di testo a futura memoria: grazie, INTEGRAL!



Scambio

Fotografia di Angelo Perrini

Il cielo ai raggi gamma di altissima energia

Tra le nuove astronomie basate sulle radiazioni non ottiche, l'ultima arrivata è quella dei raggi gamma di altissima energia, che ha aperto una finestra sui fenomeni più estremi del cosmo.

L'astronomia si pone a cavallo tra una scienza naturale e una scienza esatta. L'astronomo può solo osservare passivamente l'Universo e non può agire su di esso modificandolo o ripetendo esperimenti come se fosse nel proprio laboratorio: la nostra conoscenza dell'Universo fisico deriva infatti quasi interamente dalla radiazione elettromagnetica – la luce – ricevuta dai nostri occhi e potenziata grazie ai sensori sempre più sensibili che la tecnologia ci mette a disposizione.

Gli astronomi, però, possono ovviare all'impossibilità di agire direttamente in laboratorio: l'Universo infatti mette a disposizione un numero

La nostra conoscenza dell'Universo fisico deriva dalla radiazione elettromagnetica.

elevatissimo di sorgenti da osservare, di diverse tipologie, e questo permette di studiare come uno stesso processo fisico si manifesta in varie fasi.

L'astronomia oltre la banda ottica

L'ampia quantità di sensori che la tecnologia mette a disposizione dell'astronomia permette di osservare i fenomeni in differenti regioni dello spettro elettromagnetico, cioè in "luci" diverse, così da esplorarne a fondo la natura. L'osservazione dell'Universo alle

Lucio Angelo Antonelli,
INAF, Osservatorio
Astronomico, Roma

diverse lunghezze d'onda ha definito delle "nuove astronomie" e la più recente è sicuramente l'astronomia dei raggi gamma di altissima energia. Gli astronomi hanno

studiato il cielo per millenni ma, fino a circa 70 anni fa, limitandosi alla sola banda ottica (l'intervallo della luce visibile), perché è quella a cui i nostri occhi sono sensibili e perché l'atmosfera terrestre è trasparente in questa banda.

In tutte le altre frequenze, con la sola esclusione di un'ampia parte della banda radio, la presenza dell'atmosfera provoca un assorbimento, parziale o totale, della radiazione emessa dagli oggetti celesti. Per ovviare a questo problema, a partire dagli anni '60 del secolo scorso, strumenti sensibili alle radiazioni più energetiche (ultravioletto, raggi X e raggi gamma) sono stati lanciati verso lo spazio così da osservare l'Universo senza la fastidiosa – ma assolutamente indispensabile per la vita sulla Terra – presenza dell'atmosfera.

Le osservazioni del cielo ai raggi X e ai raggi gamma, prima da razzo e da pallone e poi da satellite, hanno mostrato il volto di un Universo violento e tutt'altro che quieto e quasi statico, come invece le osservazioni nella banda ottica ci avevano insegnato a pensare. La luce infatti trasporta con sé le informazioni sui fenomeni che l'hanno generata.

La radiazione emessa da una stella, ad esempio, ha un'origine termica: dipende dalla temperatura della sua fotosfera che, a seconda della massa e dell'età, sarà più o meno calda, emettendo il mas-

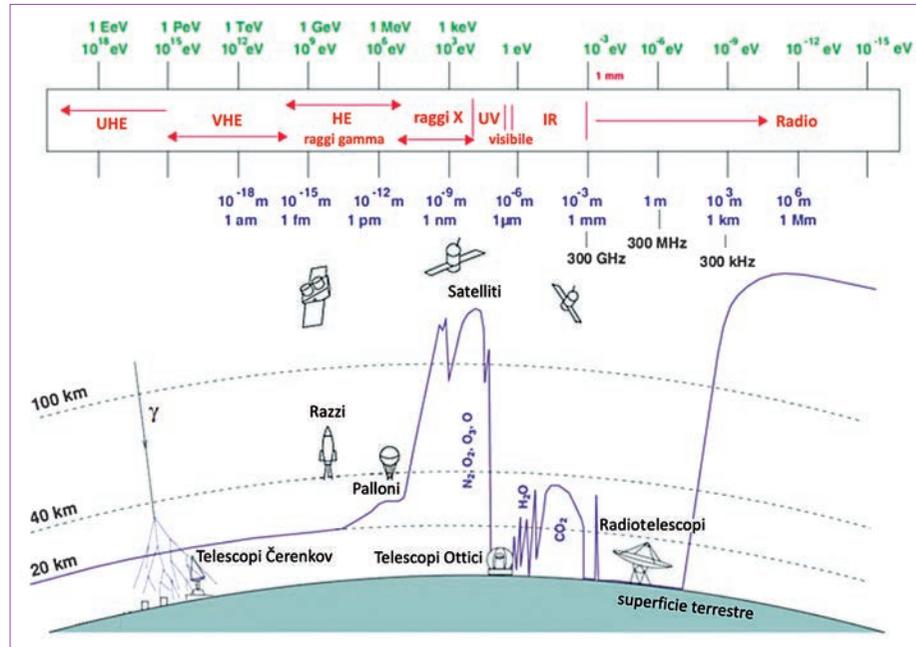
simo della propria luce nella banda ottica, con un picco di emissione che andrà dal blu per le stelle più massicce e/o più giovani (quindi più calde, con una temperatura della fotosfera di circa 30000 Kelvin), al rosso per le stelle più vecchie e/o più piccole (quindi più fredde, a una temperatura di circa 3000 Kelvin).

All'aumentare della frequenza della radiazione osservata – o, in altri termini, al crescere dell'energia trasportata – ci rendiamo conto però che l'emissione non può avere un'origine termica: non

possono esistere stelle con una temperatura di superficie tanto elevata (si tratterebbe di miliardi di gradi) da emettere radiazione alle energie tipiche dei raggi gamma. Perciò la radiazione di più alta energia che si osserva nell'Universo è originata in presenza di interazioni nucleari quali i decadimenti atomici – come avviene anche sulla Terra – o in presenza di fenomeni estremi, dove le particelle vengono accelerate a velocità prossime a quella della luce da intensi campi magnetici, o, ancora, in conseguenza di violente esplosioni. Tali fenomeni si verificano lì dove sono presenti condizioni estreme per la materia e per lo spazio, condizioni associate a oggetti altamente compatti e ultradensi come le stelle di neutroni

La radiazione di più alta energia rappresenta uno strumento molto importante per la comprensione dell'Universo e delle sue leggi fisiche.

o i buchi neri, questi ultimi sia di dimensione stellare che con massa pari a milioni di masse solari posti al centro di alcuni tipi di galassie. La radiazione di più alta energia trasporta dunque con sé le informazioni direttamente dal cuore del fenomeno che



Lo spettro elettromagnetico comprende diversi tipi di radiazione. I raggi gamma si dividono in tre bande: HE (High Energy, 500 keV-100 GeV), VHE (Very High Energy, 100 GeV-1 PeV) e Ultra High Energy (oltre 1 PeV). La linea continua viola in basso descrive l'assorbimento atmosferico alle diverse quote.

si sta osservando e rappresenta per gli astronomi uno strumento fondamentale per la comprensione dell'Universo e delle sue leggi fisiche.

Osservare il cielo nei raggi gamma

Le osservazioni del cosmo con i satelliti scientifici sensibili ai raggi X e gamma, dalla fine degli anni '60 a oggi, hanno svelato questi mostri del cielo all'opera; purtroppo non tutte le bande di energia sono alla portata di tali strumenti. In particolare, la strumentazione in orbita non è adeguata all'osservazione dei raggi gamma di energia superiore ai 100 Giga-elettronvolt, perché al crescere dell'energia diminuisce in maniera esponenziale il flusso della radiazione, cioè il numero di fotoni per unità di tempo che la trasporta, a parità di superficie dello strumento che la raccoglie. La strumentazione spaziale, perciò, da un lato è fondamentale, perché non risente degli effetti dell'atmosfera, e dall'altro è limitata per dimensioni fisiche e costi.

Per i raggi gamma di altissima energia, però, l'atmosfera terrestre si può trasformare da nemico in potente alleato: può infatti essere sfruttata come "rivelatore" per osservare quanto è precluso all'osservazione spaziale. Un'enorme quan-

Alla fine degli anni '80 abbiamo osservato raggi gamma di altissima energia dalla Nebulosa del Granchio.

gli atomi che la compongono. Vengono così liberate altre particelle che si propagano nell'atmosfera e interagiscono a loro volta con altri atomi, generando altre particelle che possono iniziare il loro volo in atmosfera. L'effetto a catena provoca degli sciame di particelle che si propagano nell'atmosfera percorrendo molti chilometri, allargandosi fino a raggiungere il centinaio di metri di diametro e viaggiando a una velocità superiore alla velocità della luce nell'aria: per tale motivo emettono una radiazione ottica bluastro, nota come effetto Čerenkov, dal nome del fisico sovietico che per primo la osservò e la studiò, ricevendo per la scoperta il premio Nobel nel 1958.

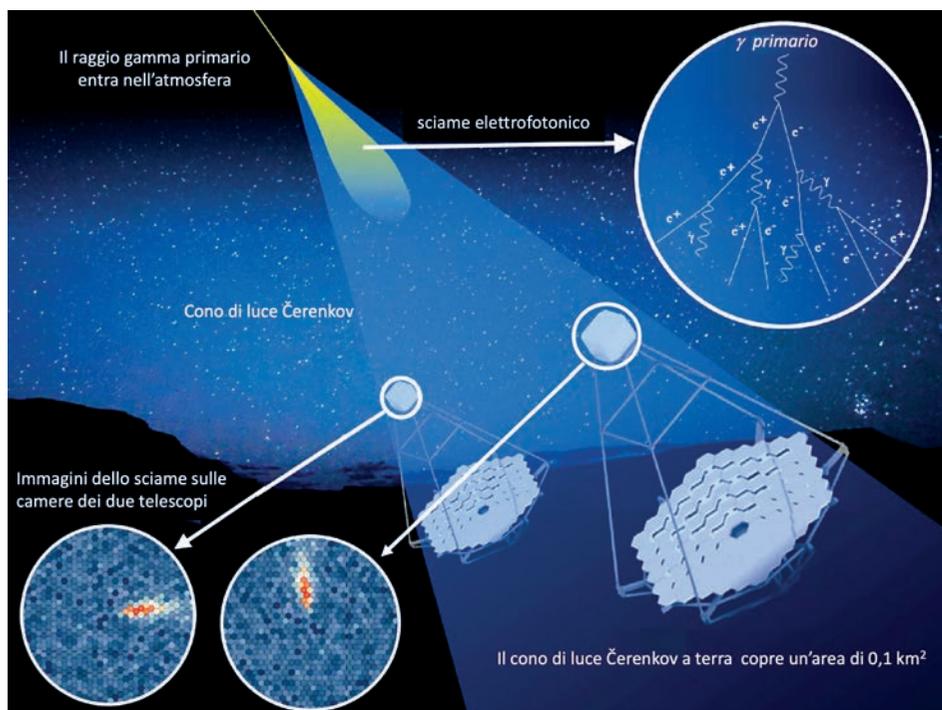
Queste nuvole di particelle, che si formano a una quota tra i 12 e gli 8 km e che durano ti-

tità di particelle di origine cosmica – per lo più protoni, ma anche ioni più pesanti e raggi gamma di altissima energia – colpisce ogni secondo la superficie dell'atmosfera terrestre, interagendo con

picamente qualche miliardesimo di secondo (nanosecondi), sono osservabili da terra con una strumentazione particolare che sfrutta, appunto, la luce Čerenkov emessa dallo sciame mentre si propaga. Poiché ogni sciame di particelle conserva l'informazione sul tipo di particella primaria che lo ha generato, sulla sua energia e la direzione di provenienza, disponiamo di uno strumento potentissimo per identificare i raggi gamma di più alta energia provenienti dalle sorgenti celesti e distinguerli dai ben più numerosi raggi cosmici costituiti da protoni e nuclei atomici.

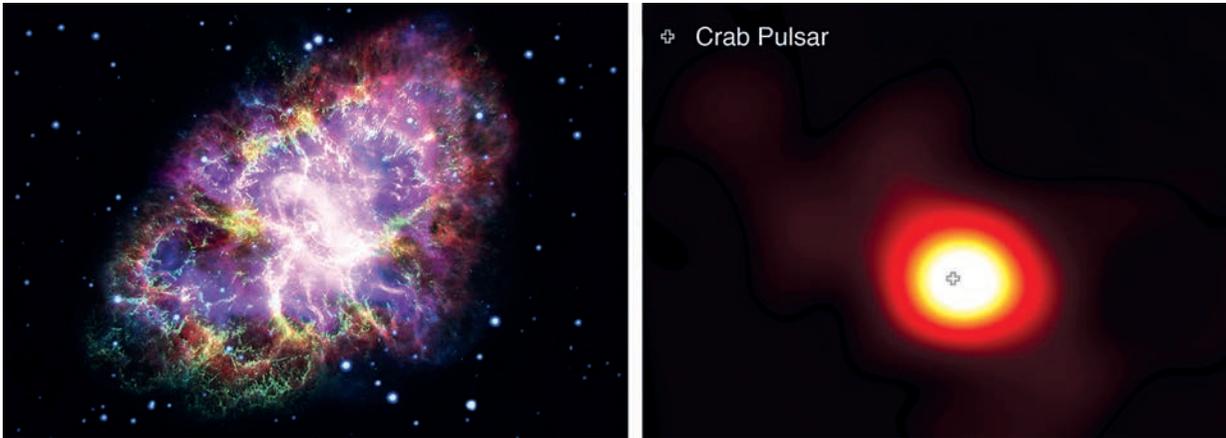
La possibilità di osservare questo effetto era stata prevista fin dagli anni '60 del secolo scorso, ma la tecnologia a disposizione sia per raccogliere il segnale che per elaborarlo non era ancora adeguata. Tuttavia, le tecnologie dei sensori e dell'elettronica sviluppate per gli esperimenti di fisica delle particelle e le tecnologie computazionali sempre più prestanti per l'elaborazione dei segnali hanno permesso di ottenere, alla fine degli anni '80, i risultati sperati, con l'osservazione di raggi gamma di altissima energia emessi dalla Nebulosa del Granchio, una sorgente ben nota agli astronomi per la sua emissione alle alte energie.

L'apparato usato per tali osservazioni è concettualmente abbastanza semplice: il rivelatore



Rappresentazione schematica del funzionamento dei telescopi a luce Čerenkov.

principale che raccoglie i raggi gamma provenienti dalla sorgente osservata e li trasforma in un diverso tipo di segnale è l'atmosfera terrestre. Gli astronomi hanno pertanto realizzato degli strumenti a terra che osservano la regione di atmosfera che si trova lungo la linea di vista tra l'osservatore e la sorgente celeste da osservare. Questi strumenti sono grandi telescopi: più grandi sono gli specchi, più efficace è la raccolta



A sinistra, un'immagine composta in ottico e ai raggi X della Nebulosa del Granchio, che ospita al centro una stella di neutroni ed è circondata da tenui filamenti di materia (© NASA, ESA, J. Hester, A. Loll, CXC, SAO, F. Seward et al.). A destra, l'immagine in falsi colori nei raggi gamma della regione centrale della nebulosa, ottenuta con i telescopi MAGIC dalle Canarie (© MAGIC Collaboration).

dei tenui segnali luminosi. I telescopi sono equipaggiati con sensori estremamente sensibili per osservare la luce Čerenkov e dotati di sistemi elettronici molto rapidi, in grado di raccogliere le immagini degli sciami di particelle. Tali immagini, raccolte da più di un telescopio in modo da osservarle in stereoscopia, ed elaborate con potenti calcolatori per tener conto dei possibili effetti associati all'atmosfera, permettono di ricostruire con grande precisione l'immagine della sorgente nel cielo a raggi gamma.

L'astronomia gamma alle altissime energie

Deve essere stata una grande emozione quando, dopo anni e anni di tentativi andati a vuoto, gli astronomi che avevano realizzato il telescopio Whipple in Arizona riuscirono a osservare nel 1989 la Nebulosa del Granchio, la sorgente di raggi gamma di altissima energia prodotta dalla catastrofica esplosione di una supernova avvenuta nel 1054 nella costellazione del Cancro. A questa prima sorgente seguirono due sorgenti extragalattiche, Markarian 421 e Markarian 501: due buchi neri supermassicci posti al centro di due galassie, che catturano stelle e materia emettendo radiazione elettromagnetica a tutte le frequenze.

Negli anni successivi un esperimento europeo chiamato HEGRA (High Energy Gamma Ray Astronomy) cominciò a monitorare il "cielo gamma" dalle isole Canarie e il numero di sorgenti os-

servate alle altissime energie nel 2003 salì a 12. Dal 2003 hanno iniziato a osservare il cielo i telescopi a luce Čerenkov dell'attuale generazione: HESS dalla Namibia, MAGIC dalle Isole Canarie e VERITAS dall'Arizona. Grazie a questi strumenti, il numero delle sorgenti gamma di altissima energia osservate ha superato

250, mostrando anche che le sorgenti appartengono a diverse tipologie. Di fatto, era nata una nuova branca dell'astronomia.

Ma cosa sono queste sorgenti? Osservazioni effettuate a energie più basse lasciavano ipotizzare che ci fossero in azione meccanismi di produzione di energia che si estendevano anche a energie maggiori, suggerendo l'esistenza di sorgenti che potessero emettere una simile radiazione di così alta energia. Nella nostra galassia, ad esempio, sono state osservate molte regioni in cui è esplosa una supernova; i residui della stella esplosa, sotto forma di materia e campi magnetici, sono stati accelerati durante la fase esplosiva. Queste zone sono la sede di accelerazione delle particelle che provocano l'emissione di radiazione non termica di alta e altissima energia.

Sono oltre 250 le sorgenti gamma di altissima energia osservate, di diverse tipologie: è la nascita di una nuova branca dell'astronomia.

Nel caso delle sorgenti extragalattiche, invece, si tratta per lo più di buchi neri supermassicci – da milioni a miliardi di masse solari – posti al centro di altre galassie, dove l'interazione tra la materia e gli intensi campi magnetici circostanti il buco nero genera processi che accelerano le particelle a velocità prossime a quelle della luce, facendo sì che venga emessa radiazione di alta e altissima energia. Tale radiazione trasporta informazioni direttamente dalle regioni più interne e più vicine al buco nero centrale, permettendo agli astronomi di svelarne i misteri.

L'astronomia gamma ha portato anche a nuove inaspettate scoperte, come l'emissione alle altissime energie da parte delle stelle di neutroni, o pulsar, che ha rivoluzionato la nostra conoscenza di questi oggetti, oppure l'osservazione dei "lampi gamma" ai Teraelettronvolt, avvenuta per la prima volta nel 2019. E ancora molto resta da scoprire.

Come osserveremo il cielo gamma nei prossimi anni

Tra i grandi misteri ancora irrisolti dell'astrofisica moderna c'è l'origine della radiazione cosmica di altissima energia: sin dalla scoperta nel 1912, i raggi

cosmici hanno rappresentato un importante laboratorio per la fisica moderna, ma anche un enigma. Tra i milioni di particelle cariche – protoni e nuclei atomici – che ogni secondo colpiscono l'atmosfera del nostro pianeta, ve ne sono alcune che mostrano energie estreme, la cui origine è ad oggi sconosciuta. Conosciamo molti processi che possono accelerare particelle a energie elevate, ma nessuno di essi al momento è realmente in grado di fornire le energie più alte misurate.

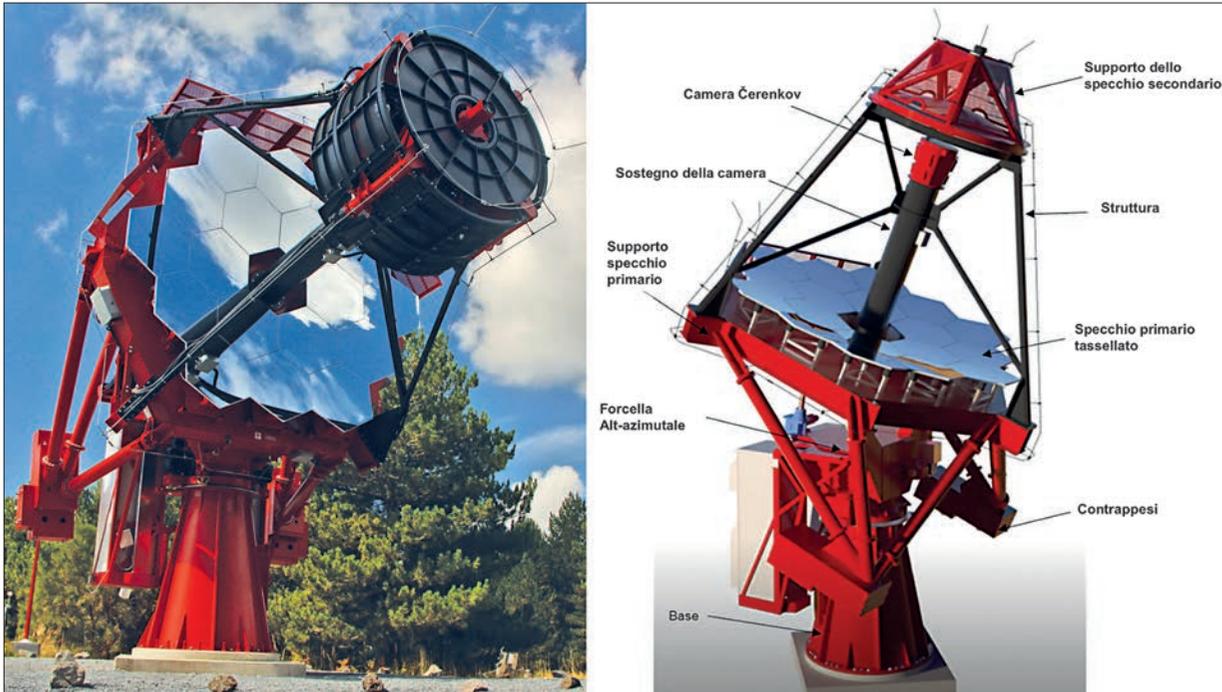
Risolvere questo mistero è uno degli obiettivi degli Osservatori con telescopi a luce Čerenkov di nuova generazione che si stanno realizzando. Tra di essi va ricordato sicuramente il Cherenkov Telescope Array (CTA), un grande osservatorio internazionale per l'astronomia gamma da terra che verrà realizzato in due diversi siti: uno in Cile, nell'emisfero sud, e uno sull'isola di La Palma (Canarie), nell'emisfero nord.

Composto da quasi 100 telescopi di tre tipologie diverse, il CTA migliorerà di quasi dieci volte la sensibilità degli esperimenti attuali e ci si aspetta di

**L'origine
della radiazione
cosmica di
altissima energia
è ancora un
mistero per noi.**



Telescopi MAGIC all'osservatorio del Roque de los Muchachos (La Palma, Canarie). I telescopi MAGIC sono due telescopi a luce Čerenkov con specchio primario di 17 metri di diametro (© Daniel López, Instituto de Astrofísica de Canarias).



Il telescopio a luce Čerenkov ASTRI. A sinistra, il prototipo installato all'osservatorio di Serra La Nave (CT) sul monte Etna. A destra, il disegno del telescopio modificato di cui verranno installate nove repliche presso l'osservatorio del Teide a Tenerife a partire dalla fine di quest'anno.

osservare oltre mille nuove sorgenti di raggi gamma. L'Italia ha una partecipazione molto significativa nella realizzazione del CTA attraverso l'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e i Dipartimenti di Fisica di varie università. L'importanza del ruolo italiano nella realizzazione del CTA è testimoniata dal fatto che il suo quartier generale si trova a Bologna, che 37 telescopi per il sito cileno saranno realizzati dall'industria italiana su progetto dei ricercatori dell'INAF, che una parte del Centro Dati sarà ospitato in Italia, e che i ricercatori italiani partecipano in ruoli chiave alla costruzione dell'osservatorio e alla preparazione dei programmi per lo sfruttamento scientifico dei suoi dati.

Gli astronomi dell'INAF, a fronte di una lunga tradizione di successo nel campo dell'astrofisica delle alte energie, sono entrati nell'astronomia gamma da terra nel 2006 partecipando all'esperimento MAGIC. In particolare, attraverso il progetto ASTRI (Astrofisica con Specchi a Tecnologia Replicante Italiana), i ricercatori dell'INAF hanno realizzato un telescopio a luce Čerenkov con disegno ottico a doppia riflessione assolutamente innovativo, che è stato poi adottato dal CTA per equipaggiare il sito nell'emisfero sud.

Tutte le componenti hardware e software del prototipo di questo telescopio a doppia riflessione sono state interamente realizzate in Italia. Il prototipo, installato sull'Etna presso l'osservatorio di Serra La Nave (Catania) e dedicato a Guido Horn d'Arturo (1879-1967), astronomo italiano e pioniere della tecnologia degli specchi tassellati per i grandi telescopi, ha osservato nel 2018 la sua prima sorgente gamma – la ben nota Nebulosa del Granchio – dimostrando tanto la validità della tecnologia utilizzata, quanto la maturità raggiunta dalla comunità astronomica italiana in questo campo.

Il progetto ASTRI dell'INAF prevede ora la realizzazione di un gruppo di 9 telescopi di questo tipo che verranno installati all'osservatorio del Teide, sull'isola di Tenerife, a partire dalla fine del 2021 e che arriverà alla piena operatività per l'estate del 2024. L'obiettivo sarà dimostrare l'efficacia di questa tecnologia anche in configurazione stereoscopica. Inoltre, essendo questo tipo di strumenti tra i più performanti per studiare le sorgenti alle energie più alte, si potranno osservare le sorgenti astrofisiche dei raggi cosmici di altissima energia e risolvere così un mistero lungo cento anni.

Il telescopio spaziale James Webb

Entro dicembre 2021, verrà finalmente lanciato JWST, il più grande telescopio spaziale finora realizzato.

Ormai dovremmo esserci! Uso il condizionale per scaramanzia, ma al momento non ci dovrebbero essere motivi per temere un ulteriore ritardo nel lancio del più grande telescopio spaziale finora realizzato: il James Webb Space Telescope (JWST).

Il telescopio prende il nome da James Webb, capo della NASA dal 1961 al 1968, che ideò e gestì il programma per portare gli astronauti americani sulla Luna.

JWST è il frutto della collaborazione fra le agenzie spaziali statunitense (NASA), europea (ESA) e canadese (CSA) e verrà lanciato dalla base di Kourou, nella Guyana francese, a bordo di un razzo Ariane-5 dell'ESA. La finestra attualmente prevista per il lancio è nella seconda metà di dicembre.

Sono venticinque anni che aspettiamo questo momento: chi all'inizio lo chiamò genericamente Next Generation Space Telescope non sapeva quanto quel nome potesse essere profetico e quanto tempo ci sarebbe stato per formare una nuova generazione di scienziati prima di vederlo all'opera.

Ci sono voluti tanti anni per progettarlo e costruirlo principalmente per le difficoltà tecniche nella realizzazione di un telescopio così innovativo e sofisticato, ma ci sono stati anche ritardi legati a problemi socio-ambientali. Ricordiamo gli allagamenti di Houston provocati dall'uragano Harvey a fine agosto del 2017, quando JWST era nella

Monica Tosi,
INAF, Osservatorio
di Astrofisica e
Scienza dello Spazio,
Bologna

città texana per i test criogenici al Johnson Space Flight Center, e le restrizioni imposte in quest'ultimo anno e mezzo dalla pandemia di Covid-19, che hanno costretto i tecnici a lavorare rispettando le regole di distanziamento e quindi con turni ben diversi da quelli originariamente previsti.

D'altro canto, per un progetto così impegnativo e tecnologicamente avanzato, le difficoltà sono inevitabili: l'importante è individuare e risolvere i problemi per tempo. Ad esempio, l'ultimo dei rinvii in era pre-Covid fu legato alla scoperta, durante un apposito controllo, che non tutte le viti utilizzate erano in grado di reggere le fortissime vibrazioni sviluppate durante il lancio. Decidere di sostituirle con viti migliori fu una scelta sacrosanta, ma ovviamente richiese tempo aggiuntivo.

Quando eravamo ormai in dirittura d'arrivo, ci si è messo anche Ariane-5: sembra che negli ultimi lanci ci sia stata qualche incertezza e, giustamente, ESA vuole evitare qualsiasi rischio.

Insomma, già prima di essere lanciato, JWST ha avuto una serie di vicissitudini: speriamo che siano finite e che d'ora in poi vada tutto liscio. Quelli di noi che hanno avuto il privilegio di partecipare fin dall'inizio – con entusiasmo ma anche un pizzico di angoscia – alla vita appassionante dell'Hubble Space Telescope (HST), con i suoi eccezionali successi scientifici e mediatici, sanno bene quanto possa essere critico per uno strumento nello spazio qualsiasi piccolo dettaglio, dal bullone al fusibile.



Rappresentazione artistica del JWST (© NASA GSFC/CIL/Adriana Manrique Gutierrez).

Nei suoi 31 anni di attività (tuttora felicemente in corso), HST ha affrontato numerose crisi, anche potenzialmente fatali, e ogni volta è risorto, come un'araba fenice, più preciso e potente che mai. Questi "miracoli" della scienza e della tecnica sono stati possibili perché HST era raggiungibile dallo Shuttle e quindi riparabile. JWST non ha questa possibilità, perché sarà troppo lontano (a 1500000 km dalla Terra, nel cosiddetto "punto Lagrangiano L2" del sistema Terra-Sole). Per questo è indispensabile che JWST al momento del lancio sia perfetto, e che ogni minimo dettaglio sia sotto controllo.

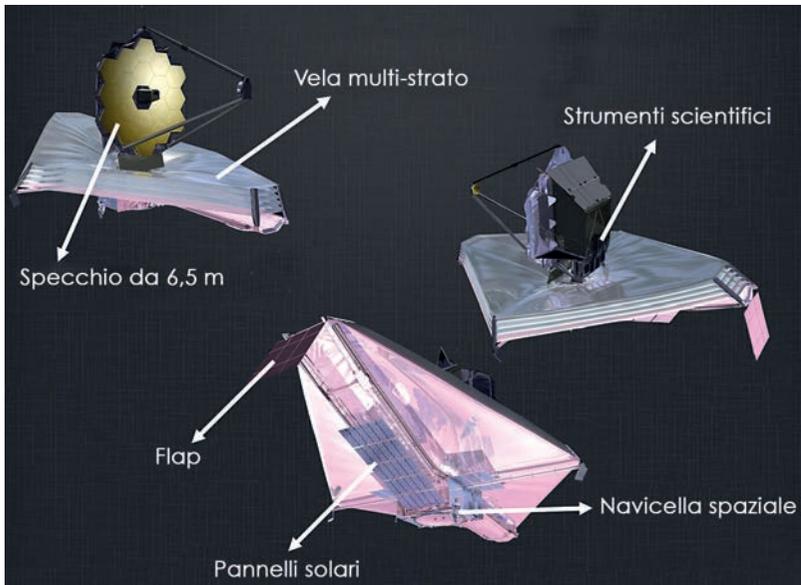
Le caratteristiche di JWST

JWST viene spesso citato come l'erede di HST, ma in realtà non lo è, se non per il fatto che entrambi operano fuori dall'atmosfera terrestre e consentono una eccezionale risoluzione delle immagini. Infatti, HST guarda nelle lunghezze d'onda dall'ultravioletto al visibile e al vicino infrarosso, mentre JWST è costruito per guardare nell'infrarosso, vicino e lontano, ed è molto più grande di HST, con uno specchio primario di 6,5 m di diametro, a fronte dei 2,6 m di HST.

Non essendo possibile mandare nello spazio uno specchio così grande, lo si è realizzato come un mosaico di 18 tasselli esagonali, ripiegabili su se stessi. Questi 18 tasselli sono di berillio (un metallo al tempo stesso molto leggero e resistente), ricoperto da un sottile strato di oro, che consente la migliore riflettività delle lunghezze d'onda infrarosse. I tasselli hanno forma esagonale perché è quella che consente di avvicinarsi maggiormente a un cerchio, cioè alla massima simmetria, quando li si compone a mosaico. Ognuno di essi viene gestito da 7 attuatori, minuscoli motori che gli fanno compiere quegli impercettibili movimenti che ne consentono un perfetto allineamento con tutti gli altri tasselli, con una precisione entro 1/10000 di capello e una perfetta messa a fuoco dell'intero specchio.

JWST ha un corredo di quattro strumenti, NIRCам, NIRSpec, NIRISS e MIRI, che consentono sia fotometria che spettroscopia in varie bande dell'infrarosso, con diverse risoluzioni spaziali e spettrali e dimensioni del campo di

JWST è costruito per guardare nell'infrarosso, vicino e lontano, ed è molto più grande di HST.



Le principali componenti di JWST viste da diverse angolazioni (© J. Kalirai).

vista. Per massimizzare il tempo a disposizione del telescopio, questi strumenti possono osservare contemporaneamente in coppia. Ad esempio, quando NIRCam punterà un certo oggetto, MIRI potrà simultaneamente osservarne un altro vicino. Questo, come si può ben immaginare, ha richiesto un complesso programma tecnologico e informatico per la gestione dell'intero sistema.

Oltre al grande specchio a tasselli dorati, l'elemento più caratterizzante dell'aspetto di JWST è lo scudo solare, una specie di vela multi-strato, grande come un campo da tennis, che ha lo scopo di proteggere il telescopio dalla luce e dal calore solari. Quando JWST sarà arrivato a destinazione e tutte le sue componenti avranno raggiunto la loro configurazione finale, da un lato del grande scudo solare ci sarà lo specchio primario, di fronte al quale, sorretto da tre piloni, ci sarà lo specchio secondario, mentre sul retro del primario ci sarà la cabina che contiene i quattro strumenti; sul lato opposto dello scudo solare, ci saranno i pannelli solari, i flap (quelle alucce mobili che vediamo anche sulle ali degli aerei di linea e che su JWST servono a bilanciare la pressione solare e i movimenti

dovuti al puntamento), e la navicella spaziale con tutte le altre componenti (motore, computer di bordo, sistema di comunicazione, ecc.). Le componenti da un lato dello scudo solare saranno sempre all'ombra, mentre quelle dall'altro lato saranno sempre esposte sia alla luce che al calore del Sole.

Per poter essere inserite nello spazio ristretto consentito da Ariane-5, le varie componenti di JWST sono state ripiegate su se stesse, grazie a materiali e tecnologie d'avanguardia, mai utilizzati prima. I 18 tasselli esagonali che compongono il grande specchio primario, lo specchio secondario, gli strumenti, i pannelli solari, lo scudo solare: tutto viene compresso in uno spazio incredibilmente piccolo (circa 5 m di diametro). Quando si vedono i filmati dell'apertura e richiusura dei 18 tasselli dello specchio o dei vari strati delle enormi vele sottilissime che costituiscono lo scudo solare, si ha



Lo specchio primario quando era ancora in fase di montaggio al Goddard Space Flight Center. Si può ammirare il mosaico di 18 tasselli di berillio, ricoperti d'oro, che compongono lo specchio consentendone il ripiegamento.

davvero la sensazione di un miracolo. Confesso che quando li apriranno dopo che JWST sarà arrivato a destinazione incrocerò le dita e tratterò il fiato.

Per lavorare nell'infrarosso, JWST deve rimanere sempre a temperature bassissime, circa -230 gradi Celsius, e quindi necessita di un sistema di raffreddamento potente. Questo elemento è così importante che in pratica, se non ci saranno guasti nelle altre apparecchiature, sarà proprio la durata del sistema di raffreddamento a determinare la durata della missione. Le previsioni vanno da un minimo di cinque anni a un massimo di dieci.

La scienza che faremo con JWST

JWST rivoluzionerà l'astrofisica, con la sua risoluzione spaziale, il suo specchio di superficie quasi sette volte maggiore di quello di HST e la sua sensibilità in un intervallo di lunghezze d'onda che finora era stato osservato solo dalla Terra, con la penalizzazione dell'atmosfera, o da telescopi spaziali di potenza e risoluzione assai inferiori. La sua versatilità consentirà di aprire o ampliare importanti filoni di ricerca, dall'energia oscura

alla cosmologia, agli studi di stelle, pianeti extrasolari e corpi del Sistema Solare.

Per la prima volta, JWST ci consentirà di studiare sia oggetti estremamente freddi, che nell'ottico non emettono abbastanza, sia oggetti nascosti dietro nubi di polvere, la quale emette proprio nell'infrarosso e finora ha quindi impedito di vedere quel che le stava dietro, come ad esempio le stelle appena formate e ancora immerse, con i loro dischi proto-planetari, in un guscio di gas e polvere freddi. Ci consentirà di capire le caratteristiche chimico-fisiche dei grani di polvere, i meccanismi con cui si formano – e in quali condizioni – nelle stelle più evolute e fredde, nelle esplosioni di supernove o direttamente nel gas, quando è abbastanza freddo e opportunamente sollecitato.

JWST fornirà dati fondamentali sui primi stadi della formazione delle galassie, consentendo di osservare in un colpo solo decine di galassie a redshift maggiore di 10, corrispondente a quando l'Universo era ancora molto giovane (500 milioni di anni di età) e perfino di vederne a redshift 20, corrispondente all'Universo bambino (200 milioni di anni). JWST trasmetterà anche informazioni chiave sui complessi processi che portano alla formazione di stelle e pianeti, consentirà di vedere i dettagli dei dischi proto-planetari, di acquisire spettri di pianeti extrasolari che orbitano intorno a stelle entro poche centinaia di anni luce dal Sole, di scoprire le caratteristiche delle atmosfere di pianeti che transitano davanti alla loro stella, possibilmente di quelli più simili alla Terra.

I programmi che potranno sfruttare JWST appartengono a due grandi categorie, quelli del cosiddetto tempo garantito (*Guaranteed Time Observations*, GTO) e quelli dei *General Observers* (GO). I primi

**JWST
rivoluzionerà
l'astrofisica, con
la sua risoluzione
spaziale e la
sua sensibilità.**



Rappresentazione grafica di Ariane-5 con il modulo contenente JWST opportunamente ripiegato.



Immagini di una zona di formazione stellare scattate da HST, rispettivamente nel visibile (in alto) e nel vicino infrarosso (in basso). Si nota come l'infrarosso consenta di vedere attraverso la cortina di polvere che nasconde le stelle nate dentro la regione. JWST vedrà molto meglio di così anche in regioni più lontane (© NASA, ESA, Hubble SM4 ERO Team).

spettano ai consorzi che hanno costruito gli strumenti e sono stati stabiliti in base agli accordi fra le tre agenzie spaziali; i secondi vengono selezionati con bandi competitivi aperti all'intera comunità internazionale.

Possiamo annoverare fra i GO i programmi di *Early Release Science* (ERS), istituiti dal direttore dello Space Telescope Science Institute di Baltimora, che gestirà l'utilizzo del telescopio, anch'essi selezionati con un bando competitivo aperto a tutti. I programmi ERS saranno i primi a usare il JWST, non appena sarà arrivato a destinazione e le sue componenti saranno state tutte controllate. Lo scopo degli ERS non è solo puramente scientifico, ma in qualche modo di servizio alla comunità. Questi programmi, infatti, sono stati selezionati perché, oltre a rivolgersi a tematiche astrofisiche di grande interesse, offrono la possibilità di testare le specifiche e i rendimenti dei diversi strumenti, di calibrarne i flussi e di mette-

re a disposizione della comunità i programmi numerici necessari per uno sfruttamento ottimale dei dati.

Subito dopo l'esecuzione dei programmi ERS, partiranno le osservazioni del primo ciclo regolare di osservazioni: GTO e GO. Fra fine febbraio e inizio marzo 2021, lo Space Telescope Science Institute ha riunito (telematicamente, per evitare rischi legati alla pandemia) centinaia di scienziati da tutto il mondo per selezionare i programmi scientifici che potranno usare JWST nel primo ciclo. La competizione era aperta a chiunque e a tutte le branche dell'astrofisica, ma la parte del leone l'hanno fatta i progetti su pianeti extrasolari e dischi proto-planetari e quelli sulle "prime" galassie, così lontane che vediamo l'immagine di quando si erano appena formate, 13 miliardi di anni fa.

Quello del Comitato di Assegnazione Tempo (TAC) è stato un lavoro lungo e difficile (chi scrive era presidente del TAC) perché quasi tutte le proposte presentate erano eccellenti, segno che tutti i proponenti si erano impegnati al

massimo per questa competizione così selettiva. Le proposte venivano da 44 diverse nazioni: il 58% guidate da ricercatori di istituzioni americane, il 32% da ricercatori di istituzioni europee, prime fra tutte quelle britanniche, e il 4% da ricercatori canadesi. Il 10% dei 266 programmi approvati è guidato da ricercatori italiani, di cui 9 lavorano presso istituzioni italiane e gli altri presso istituti stranieri, come purtroppo succede spesso ai nostri migliori scienziati. Molti altri progetti selezionati annoverano italiani fra i ricercatori partecipanti.

Grazie alla versatilità dell'apparato strumentale di JWST, i progetti più ambiziosi (quelli che richiedono più ore di osservazione) che hanno riscosso maggior successo nella selezione per ottenere tempo coprono praticamente tutti i settori dell'astrofisica e della cosmologia, dallo studio degli oggetti più vicini a quelli più lontani.

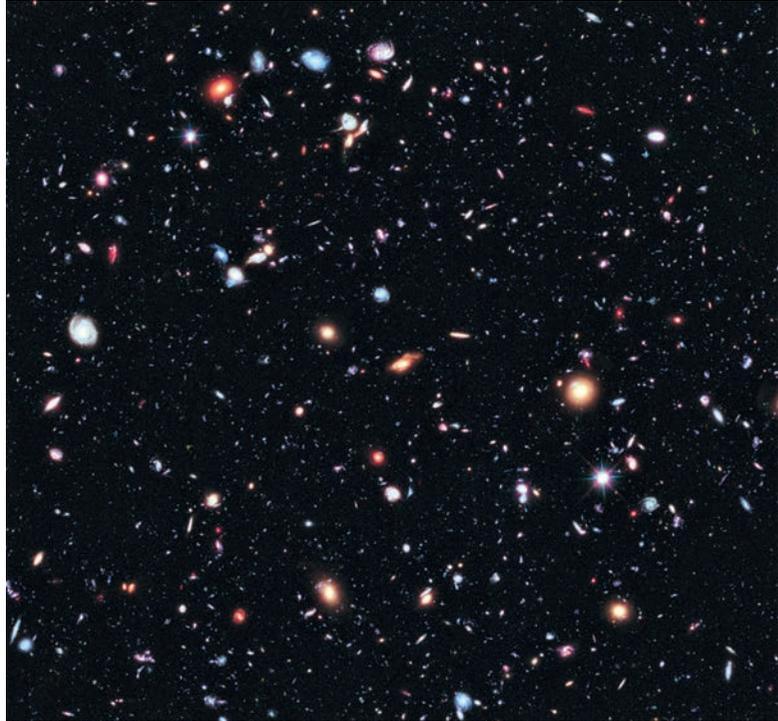
Ad esempio sono stati approvati due grandi progetti per il Sistema Solare, uno per la ricerca di acqua in corpi della fascia degli asteroidi e uno sui TNO, oggetti trans-nettuniani che orbitano nelle parti esterne del Sistema Solare e potrebbero fornire informazioni cruciali su come si siano formati i diversi corpi e pianeti. Fino al 1992 di questi oggetti conoscevamo solo Plutone, ora ne sono catalogati più di 2000.

Sono stati approvati progetti per studiare alcuni dei pianeti extrasolari già noti e capire le caratteristiche chimiche e fisiche delle loro atmosfere; progetti per osservare zone di formazione stellare in galassie relativamente vicine, per capire meglio non solo come si formano le stelle ma anche come si formano i pianeti nei dischi che le circondano nelle prime fasi di vita; progetti per comprendere i processi che regolano il mutuo impatto fra stelle che nascono e muoiono e l'ambiente che le circonda, in termini di arricchimento chimico, di flussi di gas e di energia.

Altri progetti approvati studieranno in modo approfondito le supernove (le stelle che muoiono esplodendo), che sono importanti non solo per la comprensione delle fasi finali della vita di una stella ma anche per la cosmologia (non dimentichiamo il Nobel per la Fisica assegnato nel 2011 a Adam Riess, Saul Perlmutter e Brian Schmidt per la scoperta dell'espansione accelerata

Ci saranno scoperte che al momento non siamo neanche in grado di immaginare, esattamente come è successo con HST.

dell'Universo, fatta appunto grazie alle supernove). E hanno avuto il via libera vari programmi per l'osservazione di galassie lontanissime e quindi visibili quando si erano appena formate, nelle prime fasi di evoluzione dell'Universo.



L'Hubble Ultra Deep Field: il campo osservato da HST che ha mostrato la miriade di galassie lontanissime presenti in una zona all'apparenza vuota. JWST, con la sua maggiore potenza, riuscirà a vedere galassie molto più lontane (© NASA; ESA; G. Illingworth, UCO/Lick Observatory and the University of California, Santa Cruz; R. Bouwens, UCO/Lick Observatory and Leiden University; and the HUDF09 Team).

E poi ci saranno le scoperte che al momento non siamo neanche in grado di immaginare, esattamente come è successo con HST. Quando Bob Williams, allora direttore dello Space Telescope Science Institute, nel 1995 decise di dedicare un centinaio di ambitissime ore di osservazione di HST a un punto del cielo che appariva completamente vuoto – e che, quindi, secondo lui era perfetto per cercare galassie lontanissime e dunque debolissime – i colleghi cercarono di dissuaderlo, sostenendo che era una perdita di tempo troppo prezioso e che quegli oggetti sarebbero stati troppo deboli perfino per HST. Lui non si fece scoraggiare, fece fare le osservazioni e ci regalò una delle immagini più importanti e celebrate di tutti i tempi, che mostra come lo spazio apparentemente vuoto contenga invece miliardi di oggetti lontanissimi: l'Hubble Deep Field.

Non ci resta che aspettare con impazienza il lancio, incrociare scaramanticamente le dita, chiudere il 2021 in bellezza... e quindi uscire a riveder le stelle, stavolta in infrarosso!



L'osservatorio SKA: la costruzione del più grande radiotelescopio del mondo

SKA è il radiotelescopio più grande del mondo, progettato per svelare i segreti più reconditi dell'Universo.

Tutti, almeno una volta nella vita, siamo stati rapiti dalla visione del cielo stellato nelle calde notti estive. Ma se usassimo degli occhiali sensibili nella banda radio, si presenterebbe a noi un cielo completamente diverso. Un cielo composto da numerosi oggetti puntiformi, da alcune sorgenti più estese, e, in direzione del centro della nostra galassia, una sorgente luminosissima, che domina fra tutte, Sagittarius A*, associata al buco nero supermassiccio centrale.

Questo è l'Universo invisibile della radioastronomia. Un Universo che si rivela nelle sue manifestazioni più energetiche, come quelle legate ai nuclei attivi di galassie (AGN), o a quel che resta

Le prestazioni di un radiotelescopio possono essere quantificate dai valori di tre parametri: la sensibilità, il potere risolutivo, la velocità di survey.

lassie. Per altre classi di oggetti, le osservazioni in banda radio – combinate con le informazioni raccolte in altre bande dello spettro elettroma-

Grazia M. Umama,
INAF, Osservatorio
Astrofisico, Catania

gnatico – forniscono un contributo unico per una piena comprensione della loro fisica. Infine, le osservazioni radio sono un formidabile mezzo per studiare le aree oscurate

dalle polveri interstellari (che assorbono la luce visibile e parzialmente anche quella infrarossa), come le regioni più prossime al centro della nostra galassia o le nubi dove si stanno formando le nuove stelle.

Il radiotelescopio e la sintesi di apertura

Per studiare l'emissione del cosmo nella banda radio, si utilizzano i radiotelescopi, formati da alcuni elementi fondamentali: l'antenna, la cui forma dipende dalla frequenza del segnale che si intende rilevare, e i ricevitori che, dovendo trattare segnali estremamente deboli, utilizzano apparecchiature elettroniche all'avanguardia.

Le prestazioni di un radiotelescopio possono essere quantificate dai valori di tre parametri: la sensibilità, che è funzione dell'area di raccolta del segnale (e quindi proporzionale alla dimensione dell'antenna) e della qualità dell'elettronica della catena di acquisizione; il potere risolutivo, cioè la capacità di osservare i più piccoli dettagli di una radiosorgente, anch'esso dipendente dalla dimensione dell'antenna ma anche dalla frequenza della radiazione osservata; la velocità di survey, cioè la velocità con cui si riesce a mappare vaste regioni del cielo a una data sensibilità, funzione della



Una visione artistica composta dell'osservatorio SKA (© SKAO).

sensibilità e del campo di vista dell'antenna, a loro volta collegati alla dimensione dell'antenna. Per ottimizzare questi tre parametri sarebbe necessario quindi costruire delle antenne estremamente grandi, impresa chiaramente impossibile.

Alla fine degli anni '40, Martin Ryle e i suoi collaboratori dell'Università di Cambridge costruirono il primo radiointerferometro, dimostrando che i segnali raccolti da diversi radiotelescopi possono essere combinati elettronicamente, simulando un radiotelescopio la cui dimensione coincide con la massima distanza tra le antenne, detta linea di base. Grazie alla cosiddetta sintesi di apertura, un radiointerferometro può avere in questo modo un elevato potere risolutivo – non raggiungibile in altre regioni dello spettro elettromagnetico – solo variando la linea di base massima.

Come costruire una macchina del tempo

Il concetto di SKA nasce all'inizio degli anni '90, dall'idea di utilizzare uno strumento formidabile della radioastronomia, la riga a 21 cm dell'idrogeno neutro, per studiare l'origine e l'evoluzione dell'Universo. L'idrogeno è l'elemento più abbondante nell'Universo (75%) ed è l'atomo più semplice in natura, formato da un nucleo (protrone + neutrone) e un elettrone. L'idrogeno neutro ha una firma molto visibile nella banda radio, alla lunghezza d'onda di 21 cm o a una frequenza di 1420 MHz. Se, studiando lo spettro, cioè la distribuzione dell'energia emessa da un corpo celeste, riusciamo a registrare l'emissione (o assorbimento) intorno a 21 cm, possiamo identificare in modo univoco la presenza di idrogeno neutro.

L'emissione nella riga a 21 cm è stata osservata per la prima volta negli anni '50 dalle nubi di idrogeno all'interno della nostra Via Lattea. Da allora, l'idrogeno neutro è stato identificato in decine di migliaia di galassie e, grazie alle osservazioni nella banda radio, si è potuto rivelare molto più materiale rispetto agli studi fatti nella banda ottica.

A causa dell'espansione dell'Universo, la riga a 21 cm emessa da una galassia che si allontana è osservata a una lunghezza d'onda maggiore. La differenza tra la lunghezza d'onda osservata e la lunghezza d'onda attesa è quindi una misura di quanto è lontana la galassia o di quanto tempo è trascorso dall'emissione della luce. Osservazioni a lunghezza d'onda crescente permettono di risalire indietro nel tempo, fino all'era cosmologica, quando il gas primordiale si condensò per la prima volta in stelle che, con la loro luce ultravioletta, riuscirono a ionizzare il mezzo circostante e l'atomo di idrogeno perse quindi la sua firma caratteristica a 21 cm (epoca della reionizzazione).

Per capire l'origine e l'evoluzione dell'Universo era quindi necessario progettare un radiotelescopio con caratteristiche tali da "fotografare" le regioni più distanti dell'Universo nella riga a 21 cm: grande sensibilità, alto potere risolutivo e banda di frequenza tale da coprire non solo l'epoca di reionizzazione, ma, ancora più indietro nel tempo, la cosiddetta alba cosmica, un'età dell'Universo inferiore a un miliardo di anni (corrispondente a uno spostamento in frequenza della riga dell'idrogeno tra 50 e 200 MHz).

Osservando regioni dello spazio sempre più profonde, questo radiotelescopio opererà proprio come una macchina del tempo, mostrando come

Osservando regioni dello spazio sempre più profonde, questo radiotelescopio opererà proprio come una macchina del tempo.

la firma dell'idrogeno neutro si è evoluta perché ionizzato dalle prime strutture cosmiche. Sarà possibile collezionare tutta una serie di immagini del nostro Universo, avere un "album di fotografie" che ci permetta di capire come si sono originate le strutture cosmiche che noi vediamo

adesso, quali sono state le prime a formarsi e quali caratteristiche avevano.

Un radiotelescopio di questo tipo può permettere scoperte in campi di ricerca differenti. Così è nato il progetto SKA.

L'osservatorio SKA

Il 4 febbraio 2021 è stato inaugurato l'osservatorio SKA (SKAO), una nuova organizzazione intergovernativa (IGO) dedicata alla radioastronomia. SKAO ha il compito di costruire e gestire SKA (Square Kilometre Array), la più grande infrastrut-

tura per la radioastronomia mai concepita, progettata per rispondere ad alcune delle domande fondamentali sull'Universo [1].

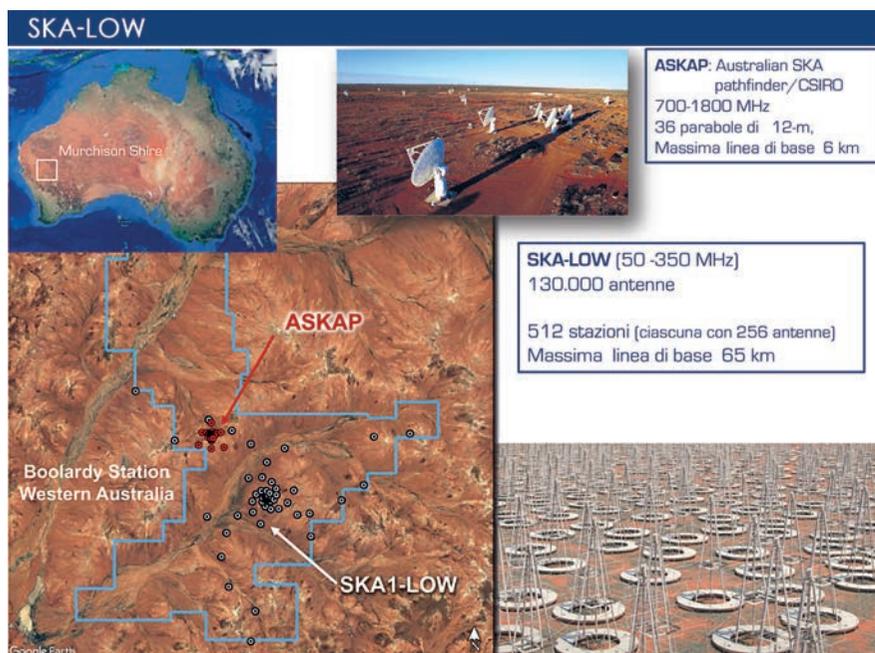
La creazione dello SKAO è frutto di un lavoro quasi decennale di progettazione ingegneristica, di definizione delle priorità scientifiche e di negoziazioni, portato avanti da più di 500 ingegneri, oltre 1000 scienziati e decine di politici in più di 20 Paesi.

SKAO ha la sua sede principale in Inghilterra, vicino Manchester, e comprende due siti osservativi situati in due regioni desertiche, selezionate sulla base della quasi totale assenza di interferenze antropogeniche (*radio quiet zone*).

Il progetto SKA prevede la realizzazione di due interferometri a sintesi di apertura distinti. Il primo, SKA-LOW, situato nell'Australia occidentale, nel Murchison Shire a nord di Perth, sarà formato da 130 000 antenne simili a quelle utilizzate per ricevere i segnali televisivi, raggruppate in 512 stazioni, con una massima linea di base di 65 km, e opererà a bassa frequenza, tra 50 e 350 MHz. SKA-LOW sfrutterà la tecnica del *beam forming*, combinando i segnali delle 256 antenne che compongono ciascuna stazione per creare uno o più fasci (*beam*) direttivi, cioè capaci di ricevere, in modo efficiente, solo emissione proveniente da una regione limitata del cielo. Questa tecnica, sviluppata per

la radioastronomia, è oggi applicata anche nelle reti di cellulari di ultima generazione (5G) per potenziarne le prestazioni.

L'altro interferometro, SKA-MID, situato in Sudafrica, nel deserto del Karoo a nord di Città del Capo, sarà formato da 133 antenne paraboliche, con massima linea di base di 150 km, e opererà a frequenze più alte, tra 350 MHz e 15,8 GHz. Le 64 antenne paraboliche del precursore SKA, MeerKAT, gestito dal South African Radio Astronomy Observatory (SARAO) e attualmente in funzione, verranno integrate nella



SKA-LOW verrà costruito nella regione del Murchison Shire, in Australia occidentale. Nella stessa regione è attualmente operativo ASKAP, l'Australian SKA Pathfinder, gestito dall'agenzia governativa australiana per la ricerca scientifica (CSIRO). Alcune caratteristiche operative di ASKAP e di SKA-LOW sono riassunte nelle due tabelle (© SKAO/CSIRO).

configurazione finale di SKA-MID.

L'enorme area di raccolta del segnale renderà SKA il più sensibile interferometro radio mai costruito, e la sua configurazione, in termini di linea di base, determinerà una risoluzione angolare superiore di 50 volte a quella del telescopio spaziale Hubble. Grazie alle caratteristiche uniche di SKA, sarà possibile rivelare anche i segnali delle radiosorgenti più deboli, con una precisione finora mai raggiunta. Inoltre, grazie alla sua velocità di survey, sarà possibile indagare i vari fenomeni astrofisici su vaste regioni di cielo e studiarne le caratteristiche su grossi campioni statistici.

Osservando un ampio volume dell'Universo, SKA ne rivelerà i segreti più reconditi, rispondendo a domande fondamentali sulla nostra origine e il nostro destino. I molti obiettivi scientifici del progetto possono essere riassunti in una frase: origine ed evoluzione dell'Universo. Si va dalla formazione di sistemi esoplanetari alla ricerca di possibili evidenze di vita nell'Universo,

Osservando un ampio volume dell'Universo, SKA ne rivelerà i segreti più reconditi, rispondendo a domande fondamentali sulla nostra origine e il nostro destino.

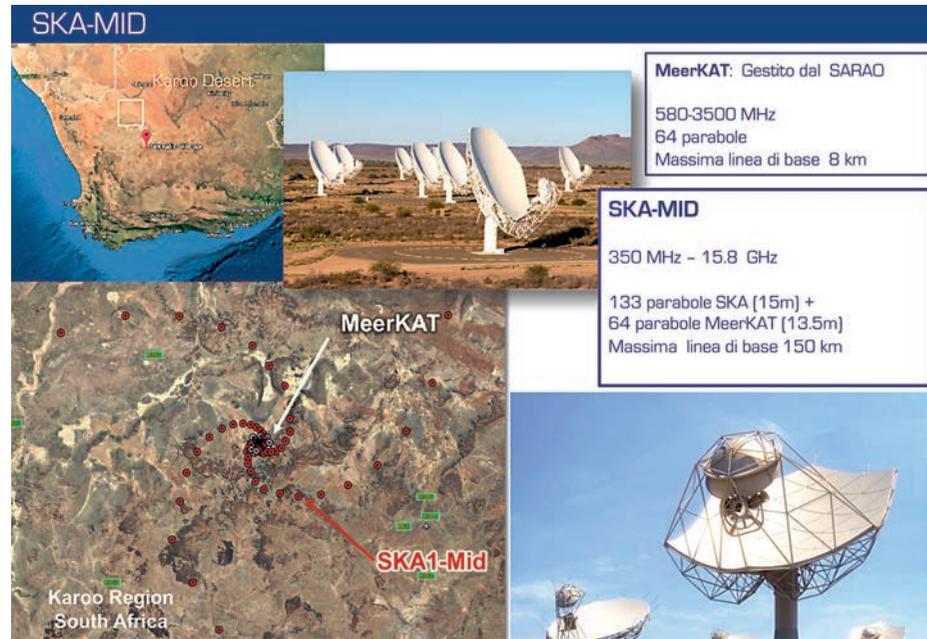
dalla cosmologia ed evoluzione delle galassie ai test di fisica fondamentale e alla rivelazione di onde gravitazionali. Ma probabilmente quello che scopriremo non è, per il momento, nemmeno immaginabile [2].

La tecnica di sintesi di apertura garantisce una grossa flessibilità al progetto, permettendo di utilizzare in

modo modulare l'interferometro. SKA è stato infatti progettato per funzionare sia come un gigantesco radiotelescopio che come una serie di telescopi più piccoli, combinando tra di loro le antenne che formano l'interferometro (*array*) anche in piccoli gruppetti (*sub-array*). Ciascun *sub-array* può lavorare indipendentemente dagli altri, permettendo di osservare simultaneamente più regioni di cielo, oppure lo stesso oggetto ma a differenti frequenze. È inoltre possibile sfruttare lo stesso flusso di dati per più progetti indipendenti.

È proprio questa grande flessibilità, che deriva dalla sua concezione "modulare" e "scalabile", a rendere SKA così differente rispetto ad altre infrastrutture osservative e a massimizzarne l'impatto scientifico.

L'aspetto modulare del telescopio SKA consente di ottenere importanti risultati scientifici anche prima di aver ultimato la sua costruzione, prevista tra 10 anni. SKA, anche con la metà delle antenne previste nella sua configurazione finale, avrà prestazioni superiori a molte delle infrastrutture radio oggi operative e permetterà di fare scienza ad altissimo livello ben prima del suo completamento. Questo approccio flessibile si è rivelato estremamente utile per gestire poten-



SKA-MID verrà costruito nella regione del Karoo, in Sudafrica. Nella stessa regione è attualmente operativo MeerKAT, precursore di SKA. MeerKAT è gestito dal South African Radio Astronomy Observatory (SARAO) e verrà, successivamente, incorporato in SKA. Alcune caratteristiche operative di MeerKAT e di SKA-MID sono riassunte nelle due tabelle (© SKAO/SARAO).

ziali vincoli finanziari negli Stati membri dello SKAO, le entrate di nuovi membri nella partnership o possibili cambiamenti inaspettati delle circostanze globali, come abbiamo imparato dalla pandemia di Covid-19.

Il ruolo dell'Italia nel progetto SKA

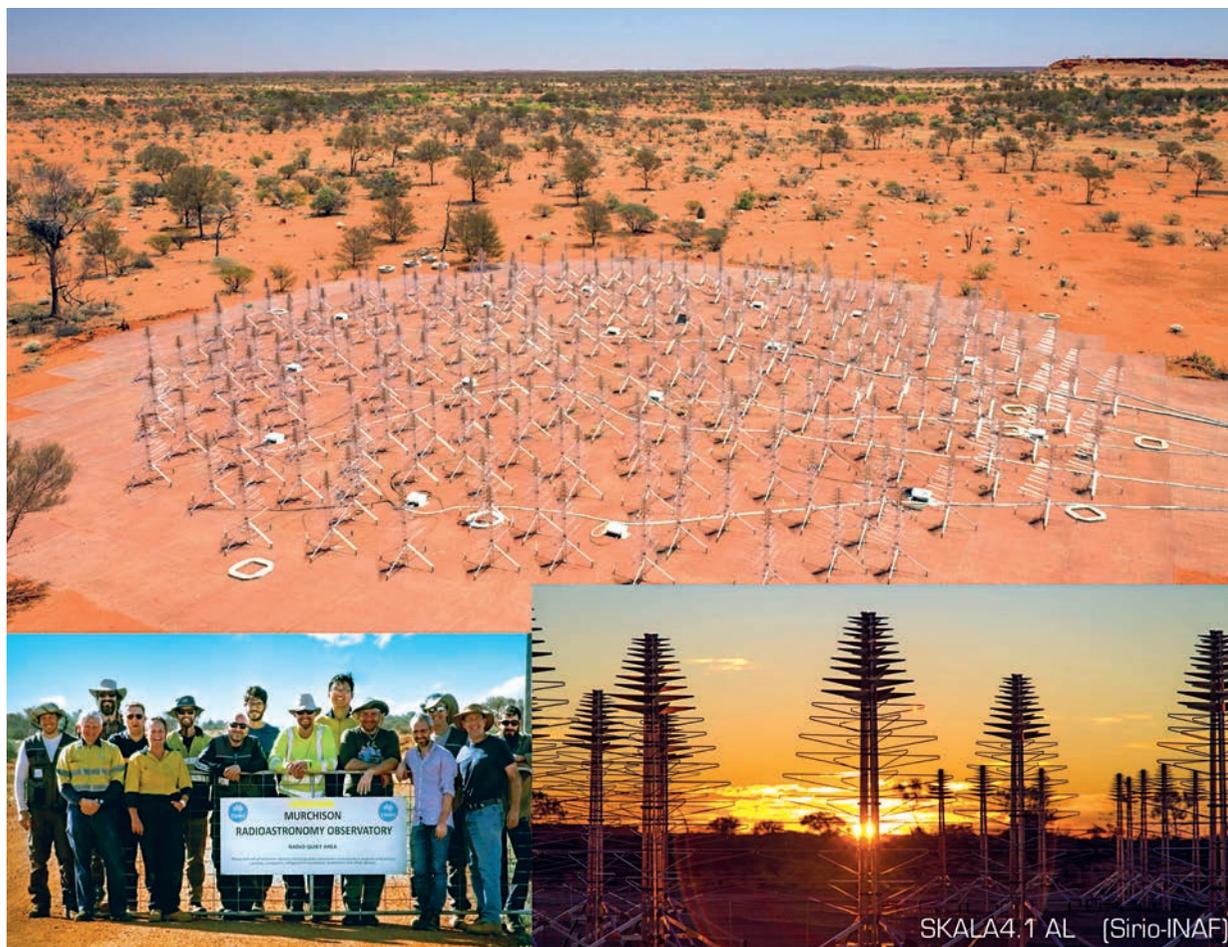
L'Italia è uno dei maggiori attori del progetto: è tra i sette Paesi fondatori dello SKAO e ha partecipato in prima linea a tutte le fasi che hanno portato alla creazione dell'osservatorio.

L'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), che ha una lunga tradizione nella radioastronomia anche grazie alla gestione e allo sfruttamento scientifico di grosse infrastrutture sul territorio nazionale, coordina la partecipazione italiana al progetto SKA, dalla fase di progettazione alla costruzione. Scienziati, tecnici e ingegneri del mondo accademico italiano

hanno collaborato in modo sinergico e molto efficace con gli esperti delle industrie e molte componenti del telescopio saranno *made in Italy*.

Nel febbraio 2018, è stato inaugurato in Cina il prototipo delle parabole SKA, quelle che verranno implementate in SKA-MID. È dell'industria italiana SAM il disegno di una parte fondamentale del telescopio, la struttura elettromeccanica dove sono montati i vari ricevitori (il *feed indexer*), che ne gestisce la movimentazione, permettendo di selezionare una specifica banda di frequenza. L'Italia ha anche contribuito, attraverso l'INAF, alla realizzazione del software di controllo dei telescopi e del correlatore.

Un significativo contributo italiano è presente anche in SKA-LOW, dal disegno delle antenne alla progettazione di tutta la catena elettronica di acquisizione. A fine 2019, un team internazionale ha installato, presso il sito in Australia, una stazione SKA-LOW completa [3]. Il dimostratore è formato da 256 antenne SKALA4.1 AL, prototipo



L'installazione della prima stazione SKA-LOW presso il sito australiano. La stazione AAVS-2 è formata da 256 antenne SKALA4.1 AL, progettate da INAF/Sirio Antenne. In basso a sinistra la squadra internazionale di ingegneri che ha installato e collaudato la stazione (© SKAO/INAF/ICRAR).

approvato per le antenne SKA-LOW, realizzato da INAF in collaborazione con l'industria italiana SIRIO.

L'Italia contribuisce in modo significativo anche alla definizione dei casi scientifici, attraverso la partecipazione in numerosi gruppi di lavoro internazionali, forum di incontro e confronto degli scienziati coinvolti in SKA e fucina di nuove collaborazioni internazionali.

L'impatto di SKA: oltre la scienza

L'impatto che la realizzazione di un'infrastruttura osservativa delle dimensioni e caratteristiche di SKA avrà sulla scienza è facilmente intuibile. Meno evidente è invece il ritorno, in termini di crescita economica, culturale e sociale, degli Stati che partecipano al progetto.

Nella fase di costruzione, gli Stati membri di SKAO avranno un vantaggio economico diretto, in termini di contratti industriali, secondo regole previste dallo statuto dell'IGO. Questi investimenti avranno ricadute sulle economie locali e creeranno, globalmente, centinaia di posti di lavoro in una varietà di settori, compresi i servizi associati alla gestione di SKA e le strutture ricettive per i visitatori dei centri scientifici e di divulgazione. Per la realizzazione di SKA, sarà necessaria tutta una serie di figure specialistiche, dai costruttori e ingegneri agli scienziati ed esperti della tecnologia dell'informazione, ai divulgatori.

Da sempre l'astronomia ha una grande capacità di catturare l'attenzione del pubblico, e quindi, in generale, di promuovere l'alfabetizzazione scien-

La radioastronomia è un volano per la tecnologia e l'innovazione.

tifica nella popolazione, e attrarre i giovani verso carriere scientifiche. Svolge, inoltre, un ruolo molto importante nell'istruzione

scientifica, tecnologica, ingegneristica e matematica (STEM). Lo SKAO è la prima infrastruttura scientifica internazionale che ha promosso, sin dalle prime fasi del progetto, attività di sensibilizzazione e istruzione finalizzate a ispirare le nuove generazioni a diventare utenti del telescopio o ingegneri e scienziati che lavorano per SKA.

La radioastronomia è un campo di ricerca relativamente nuovo, abilitato da una tecnologia

all'avanguardia: i radiotelescopi e la loro strumentazione sono tecnicamente impegnativi e molto spesso impiegano soluzioni di altri settori migliorandone ulteriormente la tecnologia. È un volano per la tecnologia e l'innovazione e contribuisce allo sviluppo di strumenti, dispositivi e metodi di elaborazione dati ampiamente utilizzati per scopi commerciali e a beneficio della società (un esempio per tutti il Wi-Fi).

Lo sviluppo e la progettazione di SKA produrrà ritorni indiretti, guidando l'innovazione tecnologica in settori che apporteranno numerosi benefici sociali, quali: lo sviluppo di amplificatori economici a basso rumore, di cui beneficia in modo particolare l'industria delle telecomunicazioni; lo sviluppo di algoritmi di *imaging*, con un forte impatto sulla tomografia medica; lo sviluppo di nuove tecniche di gestione di un'ingente mole di dati, *data mining*, visualizzazione remota e tecniche di *machine learning*, con forte impatto in settori come la medicina, i trasporti e la sicurezza.

La progettazione e la costruzione di SKA richiede la stretta collaborazione tra il mondo accademico e le industrie. Ciò consente alle industrie di acquisire conoscenze e competenze all'avanguardia e offre opportunità di ricerca e sviluppo, con evidenti ricadute sulle produzioni che saranno più innovative e competitive. Alcune tecnologie sviluppate per SKA hanno già trovato applicazioni più ampie all'interno dell'industria e della società, come nel caso dell'industria italiana che ha sviluppato assieme a INAF il prototipo SKALA.4 e che ha recentemente vinto una gara per l'utilizzo dell'antenna per un gestore di energia francese.

Il coinvolgimento italiano al progetto SKA è frutto della visione, della lungimiranza, dell'intelligenza e della tenacia di due grandi presidenti dell'INAF, da poco scomparsi, Giovanni Bignami e Nicolò D'Amico. Senza di loro, l'Italia non avrebbe mai raggiunto questo traguardo.

Riferimenti bibliografici

- [1] SKA Phase 1 Executive Summary, SKAO, novembre 2020.
- [2] *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array*, SKAO, 2 volumi, 2015.
- [3] M. ISIDRO, "Red sand in our shoes: the inspiring international story behind SKA-LOW", *Contact - SKA magazine*, 7, 2021, pp. 8-13.

L'essenziale è invisibile agli occhi

di Armando Pisani

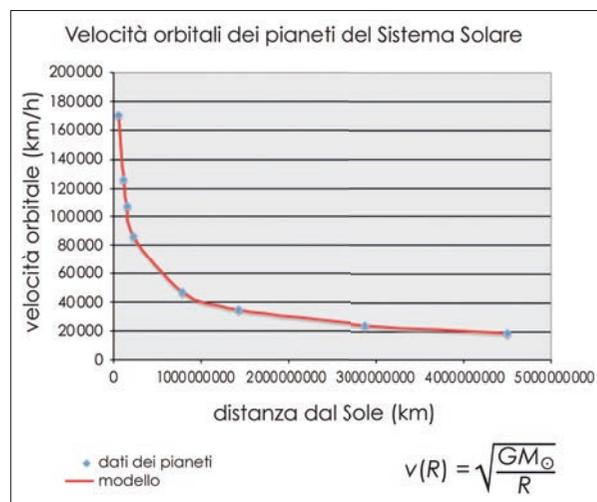
All'inizio del film *Balla coi lupi*, un ufficiale dell'esercito chiede di essere assegnato alla postazione più lontana dai territori controllati perché vuole vedere la frontiera prima che sparisca. Questa risposta mi ha sempre colpito: fin da quando ero studente ho sempre pensato che il libro di testo, in particolare quello di fisica, mi mostrasse quanto era ben consolidato e su cui nessuno aveva più dubbi. Non mi è mai stato possibile sbirciare la frontiera della conoscenza. Come insegnante mi sembra quindi quasi doveroso accompagnare i miei studenti fino a uno degli attuali confini della scienza: la materia oscura.

Il caso del Sistema Solare

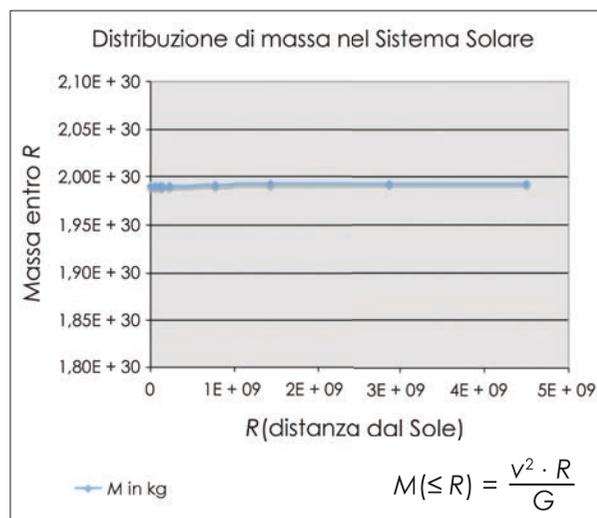
Lo strumento di analisi che costituisce la chiave per affermare l'esistenza della materia oscura è, tutto sommato, abbastanza semplice. Si tratta della terza legge di Keplero. Le leggi di Keplero, formulate tra il 1609 e il 1619, descrivono empiricamente le orbite dei pianeti attorno al Sole. Secondo la legge di gravitazione universale di Newton, o equivalentemente la terza legge di Keplero, i pianeti percorrono orbite a diverse distanze dal Sole e, al crescere della distanza dal Sole, diminuisce la velocità media con cui viene percorsa l'orbita. In particolare, la velocità orbitale è inversamente proporzionale alla radice quadrata della distanza dal Sole.

La relazione tra velocità e distanza dal Sole è una conseguenza del fatto che il Sole contiene circa il 99,85% della massa dell'intero Sistema Solare. Quindi potremmo dire che il nostro Sistema Solare è formato da una stella massiccia centrale e da una manciata di "polvere" distribuita attorno al Sole e che vi ruota attorno per effetto dell'attrazione gravitazionale. La velocità orbitale dei pianeti è anche legata a quanta massa è contenuta all'interno del raggio medio dell'orbita del pianeta. Dato che il Sole forma la quasi totalità della massa del Sistema Solare, anche allontanandosi molto dal centro del Sistema la massa non cambia e quindi si ha una legge semplice che lega la velocità

orbitale media al raggio medio dell'orbita. In questa situazione, vediamo tutto quello che produce la forza gravitazionale che fa muovere i pianeti. Ma ci sono situazioni in cui le cose vanno molto diversamente.



La distribuzione della velocità di rotazione dei pianeti attorno al Sole. La linea continua in rosso rappresenta la previsione ottenuta in base alla dinamica newtoniana o alla terza legge di Keplero.



In base alla dinamica newtoniana è possibile calcolare la massa contenuta entro una distanza R dal centro del Sistema Solare. Come si vede, all'esterno del Sole, la massa non cambia, dato che il Sole contiene il 99,85% della massa dell'intero Sistema Solare.

Una galassia in rotazione

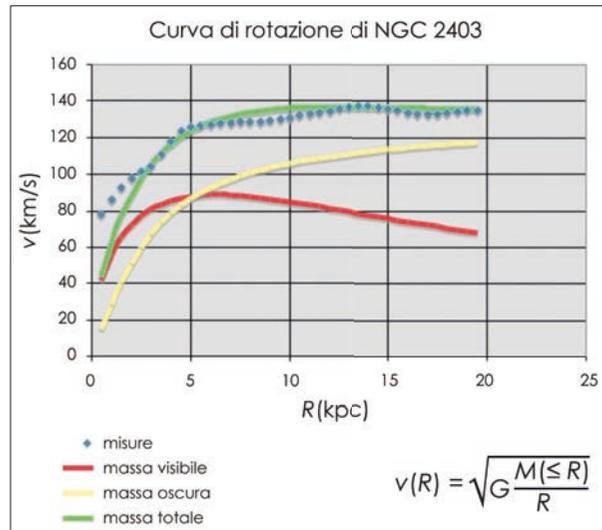
Una galassia è un insieme formato da diverse componenti tra le quali gas, polvere, stelle e pianeti. Si tratta di sistemi molto interessanti. Nel 1937 Fritz Zwicky pubblicò un articolo in cui studiava la dinamica di un particolare insieme di galassie nella costellazione della Chioma di Berenice. La sua analisi mostra che, dall'osservazione dei moti delle galassie che fanno parte della struttura e dal conteggio delle masse delle componenti della stessa struttura, risulta che la massa conteggiata non è sufficiente a produrre la forza gravitazionale necessaria a mantenere legate insieme le galassie che fanno parte del sistema.

Se la sola massa presente fosse quella osservata, allora il sistema si sarebbe dovuto disgregare molto tempo fa: non dovremmo proprio poterlo osservare! Questo implica che deve esserci una componente che non si osserva: la massa oscura.

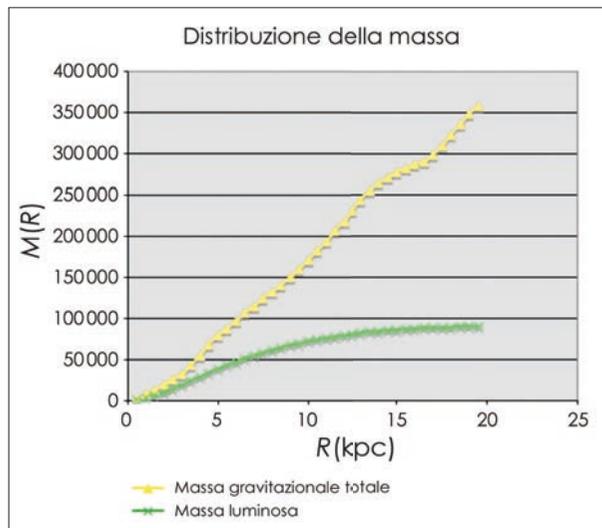
Qualche tempo più tardi, l'astronoma americana Vera Cooper Rubin analizzò diverse galassie a spirale e mise in luce il fatto che queste ruotano. Il punto chiave è che, molto diversamente da come ruota il Sistema Solare, le galassie hanno una velocità di rotazione costante rispetto alla distanza dal centro della galassia. Nel Sistema Solare, invece, la velocità di rotazione decresce con la distanza dal Sole. Nel caso delle galassie, Vera Rubin ha mostrato che le velocità con cui ruotano ha un andamento incompatibile con la massa delle componenti visibili della galassia. Se la massa fosse solo quella visibile, o meglio quella che emette radiazioni rilevabili, la rotazione dovrebbe essere più lenta e inoltre dovrebbe diminuire allontanandosi dal centro della galassia.

La forte differenza tra l'andamento della massa visibile della galassia e l'andamento della massa necessaria a produrre la rotazione della galassia ci permette di concludere che esiste un'importante differenza tra quanto vediamo e quanto esiste: la materia oscura. In particolare, per le galassie di questo tipo, la materia che compone la galassia è circa 4 o 5 volte la materia che vediamo. All'esterno delle galassie, nei sistemi come quello studiato da Zwicky, il rapporto tra quanto esiste e quanto vediamo dell'Universo sale ancora: arriva a circa 10.

Lo studio degli astri ci pone di fronte a uno degli enigmi più profondi che la scienza moderna si trova ad affrontare: di cosa è fatto l'Universo? Noi abbiamo informazioni solo sul 5% del totale, mentre la



La curva di rotazione della galassia NGC2403. Si può notare come la curva di rotazione indica la presenza di massa oscura.



Sulla base delle osservazioni della materia visibile (in verde) e della rotazione della galassia (in giallo), possiamo confrontare la distribuzione della massa entro la galassia. Appare evidente che la massa responsabile della dinamica della galassia è molto maggiore della massa visibile: è presente massa oscura!

quasi totalità di quello che compone noi e il cosmo ci è ignoto. Potremmo quindi concludere con le parole del Piccolo Principe di Antoine de Saint-Exupéry che «l'essenziale è invisibile agli occhi».



Armando insegna matematica e fisica presso il Liceo Linguistico e Scientifico M. Buonarroti di Monfalcone Gorizia. Dal 2012 le sue lezioni sono disponibili sul sito www.opendante.com e sul canale YouTube OpenDante.

Dove nessun uomo è mai giunto

di Vincenzo Palermo

Siamo così fieri di aver conquistato lo spazio che abbiamo battezzato gli ultimi anni della nostra storia "l'Era spaziale". La verità, però, è che abbiamo messo solo il naso fuori dall'uscio di casa, e lo spazio è ancora in gran parte sconosciuto.

Le distanze coinvolte in questa sfida sono difficili da immaginare. La Luna (dove siamo arrivati nel 1969, con un enorme sforzo e un viaggio di 4 giorni) dista da noi circa 384.000 chilometri. Marte, dove speriamo ora di arrivare, è distante da noi in media 254 milioni di chilometri. Gli altri pianeti sono enormemente più lontani; impossibile anche solo concepire una tecnologia adatta a trasportare esseri umani sin là, per milioni di chilometri, nel freddo deserto dello spazio.

Abbiamo però lanciato piccole sonde, che, sfruttando un trucco della fisica e l'energia atomica, hanno solcato lo spazio per decenni, abbandonando poi il Sistema Solare. Sono i primi e unici manufatti umani a raggiungere questo obiettivo arrivando, per citare il capitano Kirk in *Star Trek*, «dove nessun uomo è mai giunto prima». È questa l'ultima frontiera dello spazio.

Il problema fondamentale dei viaggi spaziali è che, per accelerare una sonda fino a una velocità adeguata allo scopo, servirebbe una quantità enorme di energia e quindi di carburante. Per portare questo carburante in orbita, sfuggendo alla gravità terrestre, serve però altro carburante, che pesa anch'esso, quindi richiede altro carburante... così, la massa da portare in orbita aumenta esponenzialmente, rendendo questa soluzione impraticabile.

È comunque possibile usare un trucco chiamato "fionda gravitazionale", per accelerare un'astronave tramite l'attrazione e il rapido movimento di un pianeta. Per capire come funziona, immaginiamo di lanciare una palla da tennis a 50 km/h contro un treno che viene verso di noi a 50 km/h (esperimento, ammetto, non molto furbo da fare nella realtà). La palla colpisce il treno con una velocità

somma delle singole velocità e, idealmente, rimbalza in avanti a 100 km/h rispetto al treno. Questa è la velocità relativa rispetto al treno; la velocità finale rispetto a noi sarà di 150 km/h, tre volte quella iniziale! Non c'è nessun trucco in questo; la pallina accelera perché, nell'urto, il treno rallenta leggermente, ma la sua massa enorme rende questo effetto trascurabile. I pianeti sono come enormi treni che viaggiano nello spazio a velocità incredibili (la Terra, ad esempio, viaggia a circa 30 km/s, anche se noi non ce ne accorgiamo). Non è possibile far rimbalzare una sonda su un pianeta come un treno, perché l'urto sarebbe tutt'altro che elastico; la forza di gravità, però, funziona come una molla quasi perfetta e quindi una sonda potrebbe, con l'angolo giusto, sfiorare un pianeta accelerando a causa della forte attrazione e poi ripartire, in direzione diversa, a velocità molto maggiore.

Il primo scienziato a immaginare un viaggio sfruttando la fionda gravitazionale è stato un italiano, Gaetano Crocco, pioniere dell'aeronautica nel primo Novecento. Nel 1956, Crocco, ottantenne, presenta al VII Congresso Internazionale Astronautico di Roma un lavoro dal titolo: "*One-Year Exploration-Trip Earth-Mars-Venus-Earth*". Immagina un viaggio di 365 giorni che, sfruttando la fionda gravitazionale, riesca a visitare sia Marte che Venere con un minimo consumo di carburante.

Tre anni dopo, i russi sono i primi a usare la fionda gravitazionale con la sonda Luna 3.

Passano gli anni e la corsa allo spazio diventa più frenetica, ma concentrata su obiettivi relativamente vicini come la Luna, Marte, Venere o Mercurio; i pianeti più lontani, i giganti gassosi come Giove o Saturno, sembrano irraggiungibili.

Nel 1964 un giovane studente del Jet Propulsion Laboratory della NASA, Gary Flandro, è incaricato di studiare l'uso della fionda gravitazionale. Flandro è da sempre un appassionato di astronomia; a sei anni, ricorda, ha visto su un libro per bambini tutti i pianeti del Sistema Solare, perfettamente allineati e vicini, un disegno comune sui libri di scuola ma in-

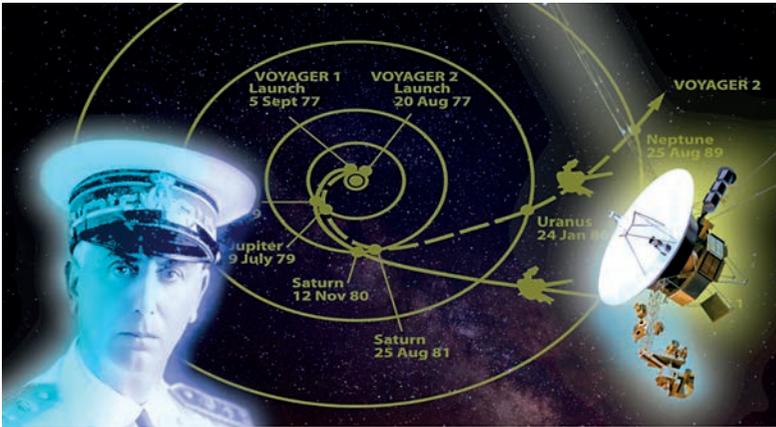


Foto di Gaetano Crocco su traiettorie delle sonde Voyager. Fonte: Wikipedia.
Grafica: V. Palermo.

gannevole, perché i pianeti sono molto più piccoli (e più distanti) di come li disegnano. Flandro scopre che, per coincidenza, ci sarà entro pochi anni un raro allineamento di pianeti, che permetterebbe di sfruttare la fionda gravitazionale come mai prima: una singola astronave potrebbe visitare non solo Giove e Saturno, ma anche Urano e Nettuno. I primitivi computer della NASA confermano l'ipotesi, ma il piano è ambizioso, e non esiste ancora soluzione ai molti problemi tecnici.

Il Congresso degli Stati Uniti nega i finanziamenti, tuttavia gli ingegneri della NASA decidono, quietamente, di continuare con la progettazione di non una, ma ben due sonde, chiamate Voyager. Il loro ottimismo è giustificato: dopo aver dimostrato la fattibilità e gli incredibili possibili benefici delle Voyager, la missione viene finalmente approvata.

Le due sonde partono in agosto e settembre del 1977. Ciascuna pesa circa 8 quintali, ha una grande antenna parabolica sempre puntata verso la Terra per trasmettere dati, 16 propulsori che usano il carburante idrazina e tre giroscopi, oltre a telecamere per luce visibile, UV e infrarossa, sensori di radiazioni, di particelle e di campi magnetici. Ognuna è dotata di un registratore magnetico a nastro della capienza di ben 64 Megabytes. Non c'è nessun carburante in grado di fornire l'energia necessaria al funzionamento previsto (vent'anni), e anche i pannelli solari sono inutili a grande distanza dal Sole. Perciò le Voyager sono alimentate dal decadimento radioattivo di sfere di plutonio, che forniscono circa 400 watt di potenza.

Mentre scrivo in questo caldissimo agosto 2021, Voyager 1 e Voyager 2 sono ancora in volo e attive, e rappresentano uno degli esperimenti scientifici più longevi e di successo della storia. Nel corso di questi 40 anni le sonde hanno reso

felici generazioni di scienziati raccogliendo una mole enorme di dati, tra cui immagini bellissime dei pianeti raggiunti. Ci hanno permesso di osservare i tremendi uragani e le aurore polari di Giove, hanno dimostrato che gli anelli di Saturno sono migliaia, diversi tra loro; hanno scoperto geysir che eruttano azoto a temperature vicine allo zero assoluto sulla luna di Nettuno, e hanno studiato i satelliti Europa ed Encelado, che sembrano i più promettenti per ospitare eventuali forme di vita.

In 43 anni di viaggio la Voyager 1 si è allontanata circa 25 miliardi di chilometri dalla Terra, viaggiando in media a circa 66000 km/h. Nel 2012 è uscita dall'eliopausa, cioè lo spazio delimitato dall'influenza del vento solare, entrando ufficialmente nello spazio interstellare. Neanche il telescopio più potente è ormai in grado di scorgerla; il suo segnale radio è flebile, ma ancora chiaro, e impiega circa 21 ore per raggiungere la Terra. Il plutonio che alimenta le sonde sta lentamente decadendo, Voyager 1 ha il 70% della potenza iniziale, e molti strumenti di misura sono stati spenti o si sono rotti. Nel 2050 smetterà di funzionare, continuando però il suo volo buio e solitario. Se non impatta con altri oggetti, si prevede che raggiunga la nube di Oort fra 300 anni, e che la attraversi nei prossimi 30000 anni. Tra 40000 anni sfiorerà – per modo di dire – una stella.

Le Voyager inoltre non sono solo una missione scientifica, ma anche un messaggio in bottiglia, lanciato dall'umanità nell'immenso mare cosmico. Su ogni sonda Voyager c'è un disco di oro con incise le istruzioni per farlo girare. Nel disco sono registrati i suoni del nostro pianeta: il canto delle balene, il pianto di un bambino, il rumore delle onde e una collezione di musica, da Beethoven a Chuck Berry, oltre a frasi di saluto in 55 lingue diverse. Un messaggio per una civiltà extraterrestre lontana che si spera lo leggerà, magari tra milioni di anni, quando saremo tornati ad essere semplice polvere nell'Universo.

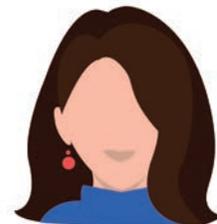


Vincenzo è il direttore dell'Istituto ISOF del CNR, dove monta assieme atomi e molecole per creare nuovi materiali. Ha pubblicato *La versione di Albert* (2015), un libro sulla vita e le idee di Albert Einstein, e *Newton, la mela e Dio* (2016) sulla vita di Isaac Newton.

TERRA, TERRA!

Rischi geologici dal cielo

Alina Polonia



Quando sentiamo parlare di “rischi geologici” pensiamo a processi che si originano all’interno della Terra, come terremoti o eruzioni vulcaniche, o al più sulla superficie del nostro pianeta, che può diventare instabile anche per frane e alluvioni. La storia della Terra, però, è costellata di eventi catastrofici molto più rari, ma assai più devastanti, causati dall’impatto di corpi extraterrestri che ne hanno condizionato profondamente l’evoluzione geologica e l’ecosistema.

Analizzando i fossili delle successioni rocciose riusciamo infatti a riconoscere diversi casi di estinzioni di massa per le quali è stato proposto un collegamento con impatti di corpi extraterrestri. Il passaggio tra Paleozoico e Mesozoico, ad esempio, è caratterizzato dalla più grande estinzione di massa che si sia mai verificata sulla Terra, con la scomparsa dell’80-90% delle specie marine e del 70% delle specie di vertebrati terrestri. Le Dolomiti contengono una delle migliori sezioni geologiche che registrano questo drammatico evento, per il quale sono stati ipotizzati svariati meccanismi, tra cui la collisione con un meteorite.

L’unico caso di estinzione di massa le cui cause extraterrestri sono sicure è il famoso “limite K-T”, che separa le ere mesozoica e cenozoica, al quale si fa risalire la formazione del cratere di Chicxulub nella penisola dello Yucatán, in Messico. Qui sono nascosti i segreti dell’evento che ha provocato la scomparsa di molte specie, inclusi i dinosauri, circa 65 milioni di anni fa. Per tale motivo, è stato organizzato un progetto internazionale di perforazione oceanica che, attraverso l’utilizzo di una nave specializzata in questo tipo di ricerche, ha prelevato rocce risalenti all’epoca dell’impatto al di sotto del fondale marino, e ha permesso di ricostruire lo scenario che ha fatto da sfondo alla scomparsa dei dinosauri.



© NASA

La violentissima collisione ha prodotto rocce particolarissime, la cui composizione e tessitura sono il risultato di processi di fusione causati dal calore sprigionato durante l’evento. Si è osservato che l’impatto ha prodotto cambiamenti estremi nelle proprietà meccaniche delle rocce, per uno spessore totale di circa 700 m. Sembra che queste abbiano assunto istantaneamente un comportamento molto plastico che ha provocato flussi rocciosi semi-fluidi in concomitanza a un collasso generalizzato nel cratere, con la formazione di onde di tsunami gigantesche e imponenti oscillazioni del bacino oceanico.

Ovviamente le conseguenze biologiche sono state pesantissime, ma il sistema è riuscito a recuperare in tempi relativamente brevi. Il periodo stimato di ripresa dell’ecosistema terrestre è stato, almeno nella prospettiva umana, comunque molto lungo: circa 30 000 anni per tornare a condizioni simili alle precedenti. Un “rinnovamento” che ci ha in qualche modo favorito come mammiferi, ma che non ci auguriamo certo di vivere ancora.

Alina si occupa di geologia presso l’Istituto di Scienze Marine del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

L'ISTINTO MUSICALE

Ascoltare l'Universo

Philip Ball



L'idea di un'armonia cosmica è antica. Platone credeva che l'Universo fosse costruito sugli stessi principi delle proporzioni geometriche che regolavano i rapporti tra le note musicali, dove le ottave derivano dal raddoppiamento della frequenza del suono e il rapporto tra le frequenze delle note in un intervallo di quinta perfetta è ad esempio 3:2.

Il grande astronomo tedesco del Rinascimento Keplero rifiutava la scala pitagorica, alla quale preferiva il sistema popolare dell'"intonazione giusta" della musica, che doveva essere solito udire a Praga, dove risiedeva in quanto astronomo di Corte dell'imperatore del Sacro Romano Impero Rodolfo II.

Gli istinti platonici di Keplero si manifestarono tuttavia nel suo modello cosmologico, secondo il quale ognuno dei pianeti conosciuti era incastonato in una sfera cristallina in movimento le cui dimensioni erano determinate dall'incastro dei classici "solidi platonici", i cinque poliedri perfetti, come il tetraedro e l'icosaedro. Tali principi sono alla base dell'antico concetto della "musica delle sfere", illustrato da Keplero nel suo libro *Harmonices Mundi* del 1619.

Si potrebbe quindi dire che il progetto della NASA di rappresentare in forma musicale le immagini del cosmo catturate dai telescopi rientra in una venerabile tradizione. Queste "sonificazioni" sono state create dall'équipe dell'osservatorio di raggi X Chandra, in collaborazione con il progetto di arte e scienza SYSTEM Sounds che ha base a Toronto. La sonificazione consiste nel convertire le lunghezze d'onda dell'immagine di un oggetto astronomico fornita da un telescopio in note musicali o toni di diversa altezza, mentre il volume del suono è determinato dalla luminosità dell'immagine.

Se prendiamo ad esempio una linea verticale che attraversi da un capo all'altro un'immagine del centro della nostra galassia, il suono che viene prodotto è un misto di quelli che rappresentano gli oggetti (stelle, gas e polvere) che giacciono su quella linea. Le stelle diventano singole note; le nubi di gas e polvere, un ronzio di sottofondo. Si possono ascoltare le parti



© NASA, Jeff Hester and Paul Scowen (Arizona State University)

"soliste" delle diverse bande di frequenza – ottica, infrarossa, raggi X – o la combinazione di esse.

Un altro esempio è quello che traduce la famosa immagine delle nuvole di polvere dei "Pilastrici della creazione" nella nebulosa dell'Aquila con una gamma di altezze continua anziché discreta. Mentre il brano della Via Lattea suona come una rilassante musica new age, con le sonorità del piano e dello xilofono chiaramente selezionate per produrre armonie, i Pilastrici della creazione danno luogo a una musica che fa pensare alla colonna sonora di un film di fantascienza.

Si tratta di scelte deliberate. «Volevamo creare un prodotto che non fosse solo scientificamente corretto, ma possibilmente anche piacevole da ascoltare», afferma uno degli scienziati del progetto. Ciò potrebbe far apparire la sonificazione astronomica come un espediente (che per le sue armonie Platone e Keplero avrebbero approvato). Ma poiché il sistema uditivo umano è altamente sintonizzato sugli schemi acustici – questo è il meccanismo che sfrutta la musica – tradurre in suoni dati scientifici come questi è stato utile per far notare ai ricercatori segnali e regolarità che possono sfuggire al solo esame visivo.



Philip, chimico e fisico inglese, è un divulgatore scientifico freelance. Per Dedalo ha pubblicato *L'istinto musicale* (2011).

SPAZIO ALLA SCUOLA

L'astronomia per un mondo migliore

Stefano Sandrelli



È già capitato più di una volta che in questa rubrica abbia fatto riferimento alle attività della International Astronomical Union (IAU), che da oltre un secolo si prefigge di sostenere la cultura scientifica del cosmo. La IAU finanzia congressi, borse di studio, promuove scambi e, nel complesso, collabora con oltre 100 Paesi. Vi aderiscono più di 12000 persone, astrofisici di professione, ma anche educatori, comunicatori della scienza o astrofili. A causa del fuso orario, capita di organizzare videoconferenze con colleghi e colleghe che vivono letteralmente in giorni diversi. Insomma, se il celebre «Sul mio regno non tramonta mai il Sole» pronunciato da Carlo V d'Asburgo, imperatore del Sacro Romano Impero dal 1519 al 1556, era una chiara millanteria, il segretario generale della IAU potrebbe sostenerlo su basi oggettive. Certo, poi sarebbe immediatamente espulso dalla IAU, ma questo è un altro aspetto.

La IAU ha uno slogan semplice e folle: *astronomy for a better world*. L'astronomia per un mondo migliore.

Ora, siamo onesti: qualsiasi comunità preferisce un mondo che – a suo giudizio – è migliore. Tutto sta a vedere che cosa ne pensano gli altri. Nel caso della IAU, si tratta di utilizzare l'astronomia per promuovere una cultura che affianca al metodo scientifico i valori più profondi di equità, giustizia, condivisione. Una cultura che promuove la discussione critica e i diversi punti di vista nell'ambito delle questioni astronomiche. L'idea sottesa, naturalmente, è che chi sia stato educato a un'analisi critica ne faccia poi uno strumento di vita che possa divenire, insomma, metodo e richiesta sociale.

Anche noi, come comunità italiana, ci siamo dentro fino al collo. Da febbraio, ospitiamo l'ufficio IAU che si occupa delle scuole primarie di tutto il mondo e promuove il dialogo fra tutti gli attori scolastici



dei Paesi del bacino mediterraneo: è il centro italiano dell'Office of Astronomy for Education.

Dal 12 al 15 ottobre, chiunque sia interessato potrà seguire online e gratuitamente un grande congresso internazionale, *Astronomy for Education*, finanziato dalla Shaw Prize Foundation. Il congresso si svolgerà online (in tutto il mondo) in inglese, con sottotitolatura di ogni intervento e resterà a disposizione di tutti al link indicato qui sotto.

Dunque se siete insegnanti o educatori o comunicatori della scienza, se siete astrofili, ricercatori, pensionati, studenti – in altri termini, chiunque voi siate – se vi interessa capire come utilizzare fenomeni astronomici per coinvolgere studenti e studentesse, confrontarvi con colleghi di Paesi sperduti, raccogliere spunti da realtà specifiche e riadattarli, avere informazioni su attività online e in classe o in laboratorio, questa sarà un'ottima occasione per iniziare!



Stefano è astrofisico, scrittore e responsabile della didattica e divulgazione presso l'Istituto Nazionale di Astrofisica – Osservatorio Astronomico di Brera.

COSCIENZIAT@



Classici fuochi

Marco Cervino e Cristina Mangia



Viviamo in terre dei fuochi, purtroppo non limitati a poche province del Sud. A volte si tratta di rifiuti abbandonati o frutto di precedente differenziazione (vanificata dal fuoco, spesso doloso), a volte di smaltimento di rifiuti agricoli, altre volte di incendi dolosi di pinete o di macchia mediterranea. Sono fenomeni di diversa origine, potenzialmente pericolosi per la salute pubblica.

Quando si tratta di rifiuti scatta il tentativo di misurare la “reale” esposizione agli inquinanti che ricadono al suolo. Il compito è impegnativo: la sorgente è informale e irregolare, le sostanze inquinanti poco note (le polveri sono una miscela, le molecole come le diossine possono viaggiare in frazione solida o gassosa). Tutto ciò richiederebbe uno standard molto elevato di “pronto intervento” che difficilmente abbiamo nelle strutture a disposizione delle regioni e delle province. Per questo, non disponiamo che di dati e risultati parziali, che rimandano a ulteriori analisi o conclusioni sommarie, relative unicamente a confronti con limiti di legge (alcuni dei quali superati dalla letteratura epidemiologica, altri non stabiliti). Determinanti per la valutazione di allerta e dell’esposizione sono inoltre le condizioni meteo.

Un ennesimo rogo di rifiuti si è verificato qualche tempo fa a Manfredonia (FG) ed è stato descritto e discusso sul sito di “Salute Pubblica”, associazione pugliese di cui Cristina fa parte e a cui Marco contribuisce.

Con riferimento al rogo di Manfredonia, nella descrizione delle attività svolte dall’ARPA Puglia si legge:

Anche ordinanze urgenti e contingenti di chiusura degli infissi o raccomandazioni a non uscire di casa sono ritenute di scarsa efficacia [...]. Unico vero intervento, difficilmente apprezzabile in termini quantitativi, è ritenuto quello della prevenzione e contrasto dell’innescarsi dei processi di combustione. Occorre, dunque, dotarsi di un “piano di intervento”, all’atto del ritrovamento di rifiuti abbandonati, che preveda velocemente il trasporto e conferimento degli



stessi verso idonei impianti di trattamento o smaltimento evitando il successivo classico incendio.

È difficile ottenere miglioramenti rispetto alle considerazioni precedenti. Esiste allora anche un “piano B” (la prevenzione primaria) che potrebbe fare meglio del piano A (la caratterizzazione degli impatti e il piano di intervento): trasformare radicalmente il “sistema” che produce e smaltisce rifiuti in modo insostenibile e nocivo. L’apparato tecnico di sorveglianza e controllo del danno è importante, ma non ha senso inseguire il danno se si può prevenire.

Per concludere, ci vuole grande crescita nell’assunzione di responsabilità: si migliorino le capacità tecniche di sorveglianza e controllo, anche di repressione, indicando le responsabilità puntuali. Ma in parallelo, e con la consapevolezza che si tratta dell’elemento decisivo per superare il problema del “classico incendio”, si sviluppino modalità sociali ed economiche che rendano il territorio libero da pratiche tossiche.



Marco e Cristina svolgono ricerche su ambiente e salute presso l’Istituto di Scienze dell’Atmosfera e del Clima del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

PROTEINE OPERAIE

L'olezzo in fondo al tunnel

Massimo Trotta



La sintesi dell'ammoniaca – uno dei processi più importanti della chimica industriale – ha garantito la disponibilità di cibo per miliardi di individui. L'ammoniaca è un composto chimico indispensabile per la produzione dei fertilizzanti che tanto hanno migliorato la qualità della vita sul pianeta Terra. Il processo messo a punto da Fritz Haber e dai suoi collaboratori ne ha reso poi possibile la produzione industriale.

La sintesi dell'ammoniaca è una reazione chimica in cui l'azoto (il gas che forma circa il 70% dell'atmosfera) viene fatto reagire in condizioni di alta pressione con l'idrogeno gassoso – prodotto *ad hoc* – per formare un altro gas, appunto l'ammoniaca. Semplice? Mica tanto: sono necessari diversi passaggi per produrre l'idrogeno, un catalizzatore a base di ferro (che facilita la reazione) e parecchia energia.

La natura fa la stessa cosa: produce ammoniaca grazie a un catalizzatore naturale, un enzima che trasforma l'azoto atmosferico in ammoniaca sfruttando l'idrogeno sotto forma di protoni provenienti dall'acqua attraverso la fissazione dell'azoto. Anche in questo caso la reazione è complessa e costosa dal punto di vista energetico. Sono necessarie circa otto molecole di ATP (la criptoaluta energetica dei sistemi biologici) per formare una molecola di ammoniaca, ma soprattutto serve un enzima – la nitrogenasi – dalla struttura piuttosto complessa.

La nitrogenasi è formata da diverse porzioni. C'è una parte centrale dove avviene la reazione in cui una molecola di azoto atmosferico si associa a un complesso chimico molto particolare formato da ferro, molibdeno e zolfo, e riceve i sei elettroni necessari per convertirlo in ammoniaca. La parte più esterna dell'enzima contiene invece un complesso formato da ferro e zolfo, che preleva elettroni dalle molecole di ATP e sostiene questo flusso per la sintesi continua dell'ammoniaca.

La nitrogenasi, presente in numerosi batteri azoto-fissatori, rende così disponibile a tutti gli organismi



viventi l'azoto, in una forma immediatamente utilizzabile che viene impiegata per la sintesi delle proteine, degli acidi nucleici e di tutti i composti necessari alla sopravvivenza. Inoltre, la reazione enzimatica produce idrogeno come sottoprodotto.

Esiste quindi una differenza fondamentale rispetto al processo industriale, che richiede l'uso massiccio di idrogeno (tre molecole per ciascuna molecola di azoto). Attualmente, questo gas viene prodotto dai combustibili fossili e il processo rilascia biossido di carbonio, il gas serra le cui emissioni siamo chiamati a ridurre per mitigare gli effetti del cambiamento climatico. Quanto a lungo il ciclo Haber-Bosch sarà sostenibile? Potrà essere sostituito da processi enzimatici che attualmente non garantiscono la stessa resa e la stessa rapidità di produzione? Potremo produrre idrogeno per via enzimatica? Come al solito è tutta questione di ricerca. Sono ottimista e vedo la luce in fondo al tunnel.

Eppure sento anche un certo olezzo, perché là dove si vuole fertilizzare si usa spesso lo stallatico che di azoto disponibile ne contiene tanto. Ma è un odore sopportabile. Soprattutto in una fresca serata estiva dopo aver riascoltato Fabrizio De André che canta in *Via del Campo* «dai diamanti non nasce niente, dal letame nascono i fior».

Massimo è ricercatore presso l'Istituto per i Processi Chimico-fisici del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Bari.

HOMO MATHEMATICUS

Camminando nella pazza folla

Roberto Natalini



A settembre le giornate sono ancora belle e all'Ho-mo Mathematicus piace fare dei lunghi giri per le strade della sua città. A volte da solo, a volte con la sua signora, ama passeggiare senza meta tra la folla, badando solo a non avvicinarsi troppo ai vari gruppi di persone. "Senza meta", però, non è l'espressione giusta, in realtà ci sono delle regole non scritte. Infatti, se imbocca un viale, come minimo dovrà percorrerlo fino alla fine. Oppure, quando c'è una piazza, è sua abitudine cercare di attraversarla per uscire dal punto più lontano rispetto a quello di entrata. E chiaramente, da un certo punto in poi, il suo giro, che di solito non supera le due ore, dovrà riportarlo verso casa, tranne nelle rare volte in cui, essendosi allontanato troppo, finisce per prendere un mezzo pubblico. In ogni modo, quando torna a casa camminando, la regola è di non ripassare mai per le strade fatte in precedenza, se non eventualmente per fugaci attraversamenti, oppure nell'ultimissima parte del tragitto.

Vedendolo camminare, ci si accorge che il suo tragitto ha delle oscillazioni improvvise dovute alla presenza delle altre persone che, come si è detto, cerca di tenere in tutti i modi a una certa distanza. Se poi con un drone, uno seguisse la sua traiettoria dall'alto, senza conoscere la posizione delle altre persone o di eventuali ostacoli, avrebbe l'impressione di osservare il percorso di una persona moderatamente alticcia, con frequenti cambi di direzione, comunque di ampiezza limitata. Si potrebbe pensare quasi che la presenza degli altri alteri la conformazione del terreno, come se lo spazio si curvasse intorno al tragitto seguito.

Se la linea retta è il percorso più breve tra due punti nel piano, il percorso che l'Homo Mathematicus segue è il cammino più veloce, tenendo conto della conformazione del paesaggio. In pratica è come se si creasse una specie di campo di forza repulsivo generato dalla presenza delle altre persone che passeggiano, che lo costringe a seguire un'andatura



ondivaga. Più persone ci sono e meno il suo percorso risulta rettilineo.

Questo comporta, tra l'altro, che il tipo di traiettoria perseguita può cambiare a seconda delle condizioni ambientali. Se è pomeriggio inoltrato ci saranno più persone, mentre al mattino presto la strada sarà quasi vuota. Insomma, sono condizioni variabili che dipendono dallo stato del sistema in quel momento.

Ma allora, si chiede, come si regolano tutti gli altri? Se ognuno di noi cambia le condizioni ambientali, tanto da influenzare il suo percorso e, di riflesso, quello degli altri, i quali si dovranno adattare di conseguenza, come è possibile a priori stabilire qual è il percorso più rapido tra due punti della città, dato un certo numero di persone presenti in quel momento? Ed è così intento nel seguire i suoi pensieri che non si accorge di attraversare con il rosso...



Roberto è un matematico ed è direttore dell'Istituto per le Applicazioni del Calcolo del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

BUFALE E MISTERI

L'anomalia del Sud Atlantico

Monica Marelli



C'è un mistero sulle nostre teste: un altro buco. Ma questa volta l'ozono non c'entra. In un'area che ora è stata definita dagli esperti "anomalia del Sud Atlantico" e che va dall'Africa al Sud America, il campo magnetico terrestre si sta gradualmente indebolendo. Questo strano fenomeno sta facendo impazzire i geofisici di tutto il mondo, che non conoscono i motivi fondamentali per cui ciò sta accadendo.

Potrebbe essere un guaio, soprattutto per i satelliti che orbitano attorno al nostro pianeta. Tradotto in parole povere: grossi problemi tecnici nel campo delle telecomunicazioni, GPS, ecc. In questo momento gli scienziati, per capirci di più, stanno usando i dati raccolti dalla rete di satelliti artificiali nell'ambito di Swarm, la missione spaziale europea che ha il compito specifico di studiare il campo magnetico che avvolge la Terra.

Questo campo è uno "scudo" senza il quale la vita non sarebbe possibile. Ci protegge infatti dal "vento solare" di particelle cariche che, come un phon potentissimo, ci investe ogni istante. Protoni, elettroni, ioni vari provenienti dalla nostra stella hanno l'energia sufficiente per danneggiare le molecole di DNA racchiuse nelle nostre cellule. Invece, per nostra fortuna, vengono deviati dal campo magnetico, come un ombrello che respinge le gocce di pioggia.

Come è generato questo campo? Secondo la teoria più accreditata scaturisce dal movimento di cariche elettriche che "inzuppano" l'oceano di ferro liquido in rotazione nelle viscere del pianeta, a circa 3000 km sotto i nostri piedi, esattamente come accade attorno a un filo elettrico percorso da corrente. Questo "cappello invisibile" non è statico, ma cambia in intensità e direzione: negli ultimi 200 anni ha perso in media il 10% della sua forza, mostrando una par-



© Monica Marelli

ticolare "perdita" in coincidenza appunto con l'area dell'anomalia.

Il fenomeno è normale? È in qualche modo legato al cambiamento climatico e quindi dovrebbe metterci in ulteriore allarme? Purtroppo gli scienziati non hanno ancora risposte certe. Una delle ipotesi sostenute dalla maggior parte degli studiosi è che l'anomalia sia prodroma dell'inversione dei poli magnetici, un evento spontaneo legato agli spostamenti della massa metallica in moto vorticoso che genera il campo stesso: il nord magnetico diventa sud e viceversa.

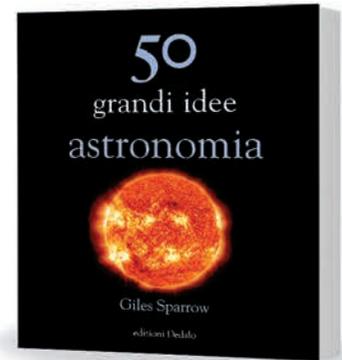
L'ultima volta l'inversione è avvenuta 780000 anni fa e oggi il polo nord magnetico (che non coincide con quello geografico) continua a muoversi: negli ultimi decenni dal Canada si è spostato verso la Russia. Nel 1989, per esempio, si è vista una prima vera "accelerazione" e nel 2007 c'è stata una seconda, quando il polo è scivolato, alla velocità di 55 km all'anno, verso la Siberia, meta che secondo Larry Newitt, del Geological Survey canadese, verrà raggiunta fra circa vent'anni. Non c'è alcun pericolo per la salute della popolazione, anche se molti sedicenti "esperti" di medicine (molto) alternative affermano che emicranie e malesseri inspiegabili in generale sono causati dall'imminente inversione dei poli.

In realtà, né in prossimità dell'area indebolita, né altrove si riscontrano problemi di salute, ma i satelliti in orbita vicini alla zona dell'anomalia avranno nell'immediato futuro una buona probabilità di guastarsi o presentare qualche malfunzionamento, perché le particelle cariche provenienti dal Sole potrebbero raggiungerli e danneggiarne i delicati microchip.

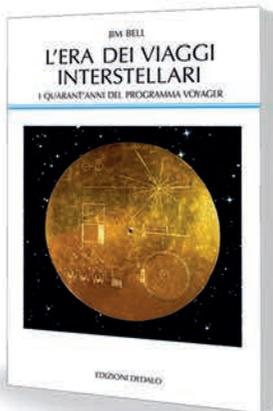
Monica, fisica, si occupa di divulgazione scientifica ed è giornalista freelance.



Patrizia Caraveo
Il cielo è di tutti



Giles Sparrow
50 grandi idee astronomia



Jim Bell
L'era dei viaggi interstellari
I quarant'anni del programma Voyager



Wernher von Braun
Progetto Marte
Storia di uomini e astronavi
edizione italiana a cura di Giovanni Bignami



Jim Al-Khalili
**Buchi neri, wormholes
e macchine del tempo**
prefazione di Vincenzo Barone

A caccia di satelliti

di Giulia Bignami

Tutti sono capaci di stare romanticamente ad aspettare una stella cadente. Ma in quanti sanno scovare un satellite nel cielo estivo?

Devo ammettere che quella di andare a caccia di satelliti era forse la mia attività estiva preferita. Ovviamente, era una idea di mio padre. A differenza dell'idea della zattera, però, questa idea funzionava ed era effettivamente divertente al punto da coinvolgere anche passanti e vicini di casa nel piccolo paesino ligure.

Il tutto si svolgeva sul terrazzo di casa nostra, che doveva essere preparato con una serie di sdraio, cuscini, materassini e coperte per accomodare tutti, persino la nonna sempre molto scettica e riluttante. Questo perché il vero cacciatore di satelliti deve scegliere una postazione di osservazione protetta dall'inquinamento luminoso delle luci del paese e deve osservare il cielo rigorosamente da sdraiato. Seguiva breve (si fa per dire) lezione, come sempre ma soprattutto in caso di presenza di ospiti, impartita da mio padre o mia madre, a scelta.

Non so se si è capito, ma io ho sempre detestato le loro lezioni di astronomia, sembrava di finire dentro una rubrica di SuperQuark, quindi la faccio breve: i raggi del Sole continuano a illuminare la Terra diverse ore dopo il tramonto e i pannelli solari dei vari satelliti che orbitano intorno alla Terra ogni tanto intercettano questi raggi e sbrilluccicano. Fine.

Loro ovviamente allungavano, e di molto, il brodo satellitare in questione con l'altezza e il tipo di orbita, il tipo di satellite, altezza del sole in funzione dell'ora e delle stagioni, eccetera.

Ci sono però alcune indicazioni che è doveroso dare al cacciatore di satelliti principiante.

La prima cosa è che i satelliti, e questa è un'importante differenza rispetto alle stelle cadenti, non brillano in modo costante, ma, come ho detto nella mia spiegazione riassuntiva: sbrilluccicano, che non è il termine tecnico ma rende l'idea. Questo avviene perché fanno tumbling (termine tecnico), cioè girano su sé stessi mentre girano intorno alla

Terra, quindi la loro luce può essere a momenti molto intensa, per poi scomparire e reintensificarsi nuovamente, mentre si spostano nel cielo seguendo la loro orbita. È facile intuire, anche per il cacciatore di satelliti alle prime armi, che questa variazione di luminosità complica molto la vita. Capita infatti, molto spesso, di vedere un satellite che dopo poco scompare per poi ricomparire dalla parte completamente opposta del cielo.

La seconda cosa è che tutti i satelliti sono diversi per cui non sono come i dipinti delle madonne con bambino, che visto uno son visti tutti. Bisogna aspettarsi sempre qualcosa di diverso in termini di luminosità, traiettoria nel cielo e velocità. Ed è qui che si inizia a vedere la bravura del cacciatore di satelliti esperto: alcuni satelliti, infatti, si travestono da stelle e solo fissandoli a lungo si riesce a smascherarli.

La terza cosa, forse la più importante, è che tutto questo funziona solo d'estate, non provateci neanche in inverno perché prendereste solo molto freddo e la vostra caccia sarebbe del tutto infruttuosa. Ci sono delle ragioni tecniche (mia mamma mi ha spiegato) che hanno a che fare con l'altezza del Sole durante la stagione invernale. In aggiunta, il cielo di inverno è anche diverso e si perdono tutte le costellazioni di riferimento.

Quindi, per riassumere, le condizioni per la migliore caccia di satelliti sono tra giugno e agosto, sdraiati, dopo cena, senza luci artificiali e, ovviamente, senza Luna.

Ogni caccia che si rispetti è competitiva e ha bisogno di regole. Perciò, con mio padre avevamo stabilito che:

- avvistamento aereo = 1 punto
- avvistamento stella cadente = 5 punti
- avvistamento confermato satellite = 10 punti

Il rationale dietro questo sistema di punteggi era che vedere una stella cadente è solo una questione di fortuna, mentre l'avvistamento di un satellite richiede bravura ed esperienza. Inoltre, l'avvistamen-

to di un satellite dava luogo a punteggio solo se confermato, cioè bisognava che qualcun altro, oltre all'avvistatore originario, riuscisse a vederlo. (Ovviamente, questo non era possibile per le stelle cadenti, data la brevità delle loro apparizioni e sparizioni).

L'avvistamento di un aereo aveva un suo punteggio solo per fare contenta la nonna che altrimenti non riusciva mai ad accumulare punti.

La competizione era forte solo tra me e mio padre, gli unici a prendere la caccia seriamente. Molti, tra ospiti occasionali, vicini di casa e amici di una vita, si sono uniti a questa attività, che, negli anni, è diventata una tradizione. Incluso Mattia, il figlio più piccolo dei nostri vicini di casa, che, pur non capendo molto, ma istruito da sua sorella Aurora, gridava con grande entusiasmo puntando il ditino al cielo: «Ecco! Tellite, tellite vitto io!». Ci sono stati anche casi meno scusabili, ma per questo forse più perfidamente divertenti di giornalisti, professori e rettori che non riuscivano mai a dire dove avevano visto i loro satelliti con comici scambi:

«Lì, lì l'ho visto ora, si muove!».

«Ma dove?».

«Sotto quella stella, quella luminosa!».

«Ma quale stella luminosa?».

«No, aspettate, adesso si è spostato, adesso è in quel triangolo di stelle!».

«Tre stelle qualsiasi fanno sempre un triangolo. Quali tre stelle?».

Alla fine, il tutto si risolveva o trovando un punto di riferimento terrestre (tipo montagna, campanile, tetto, comignolo) oppure quando finalmente il satellite, per pietà degli osservatori inesperti, si decideva a passare attraverso il Cigno, costellazione di riferimento fondamentale. Questa è una grande verità per il cacciatore di satelliti, un po' come tutte le strade che portano a Roma: tutti i satelliti prima o poi passano per il Cigno.

Mia mamma, che non aveva e non ha per niente talento nell'avvistamento di satelliti, barava spudoratamente usando una applicazione per l'iPad che diceva in anticipo dove e quando passano i satelliti. Ma questo, mi pare evidente, equivale ad andare a pesca con la dinamite.



L'applicazione aveva però qualche utilità. Per esempio, si scoprono i nomi dei satelliti. Mi ha fatto sempre riderissimo il nome che l'arma dei carabinieri, con fantasia senza limiti, ha dato al suo satellite. Credo che nessuno potrebbe mai neanche lontanamente immaginarlo: "ArmaSat".

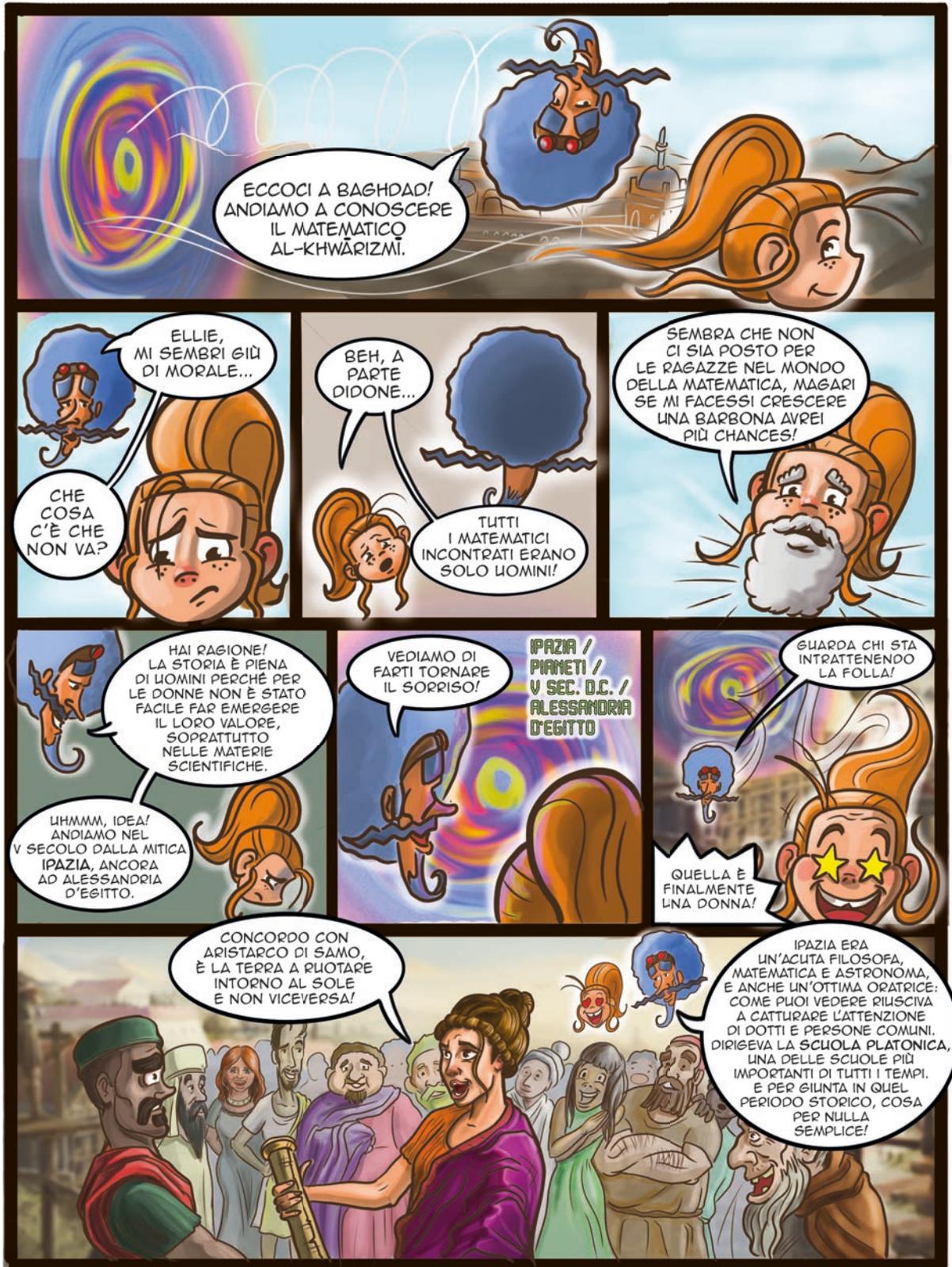
Un altro uso dell'applicazione era sapere quando sarebbe passata la Stazione Spaziale Internazionale e quello sì che è un vero spettacolo. Non capita spesso che passi sopra al momento giusto per essere vista, ma quando capita si capisce subito perché è luminosissima ed è il vero trofeo per il cacciatore di satelliti più esperto.

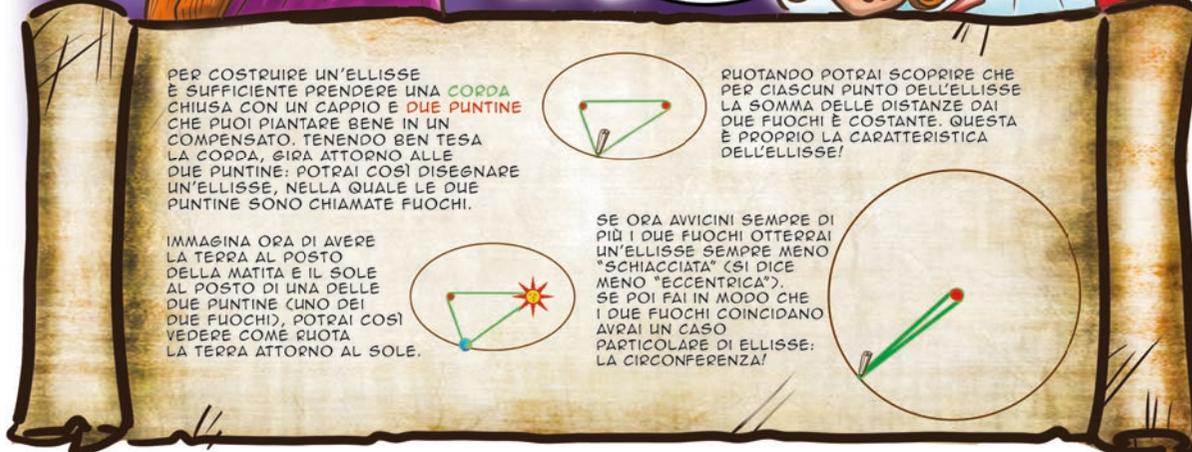
Il massimo punteggio mai ottenuto è stato 115 (dieci satelliti e tre stelle cadenti).

E ovviamente l'ho raggiunto io.

Il racconto è tratto dal romanzo *La zattera astronomica. Come sopravvivere a un papà scienziato* (Baldini+Castoldi, 2021) di Giulia Bignami, figlia di due noti astrofisici, Patrizia Caraveo e Giovanni Bignami, quest'ultimo purtroppo scomparso nel 2017.

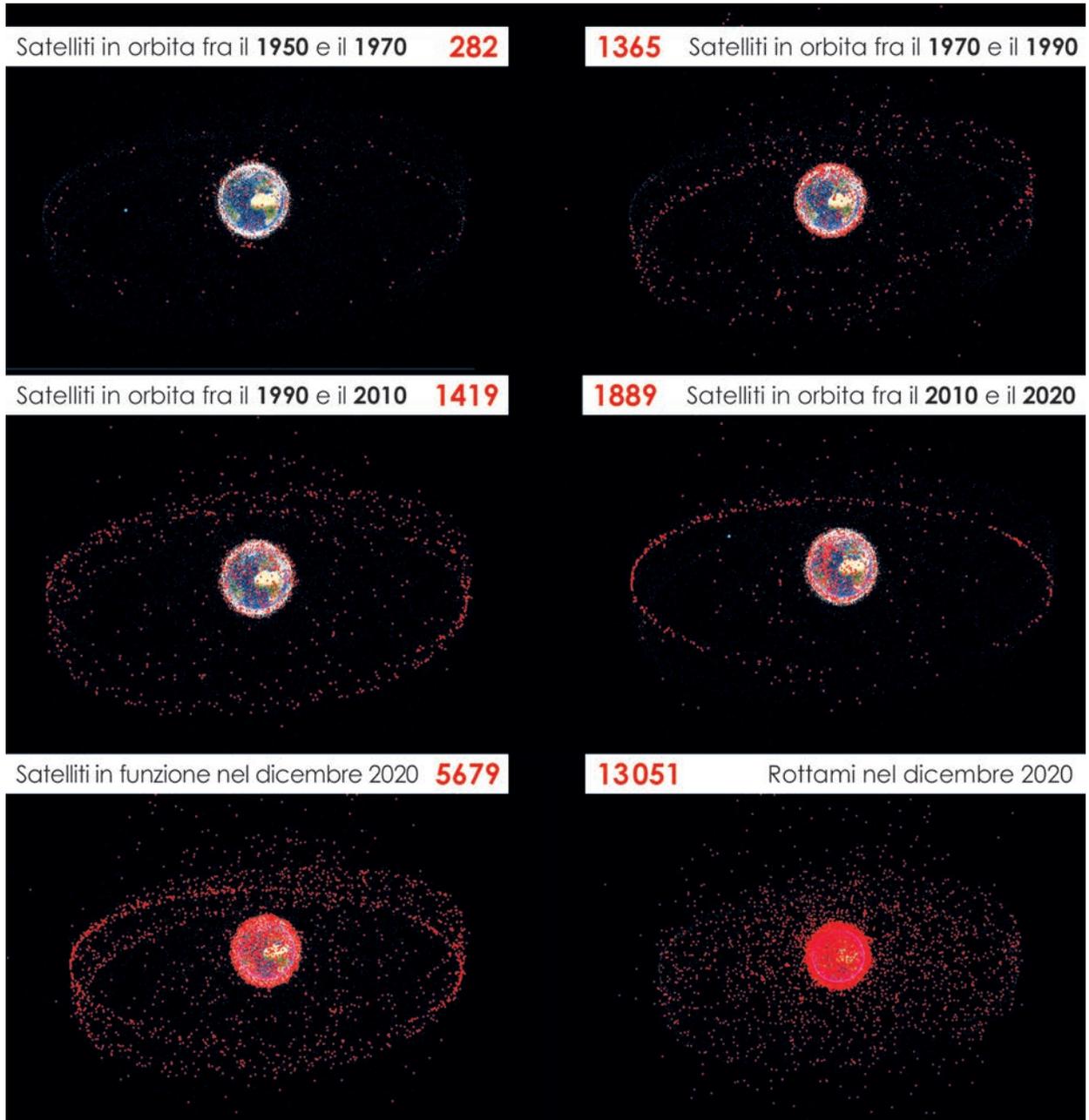
IPAZIA





Tratta dal libro *Matematici a fumetti* di Silvia Sbaragli e Andrea De Carli (Edizioni Dedalo, 2021), un divertente viaggio nel tempo per incontrare i matematici più importanti della storia.

E incominciavo a volare nel cielo infinito...



Nel dicembre 2020 il numero di satelliti artificiali nell'orbita terrestre ha raggiunto la considerevole cifra di 19 210, ma di questi meno di un terzo (5679) è funzionante. Il resto è costituito da rottami e spazzatura spaziale per i quali non esiste ancora una convenzione internazionale che stabilisca chi e come debba raccogliarli. Continueranno a orbitare intorno alla Terra – e a volte a cadere in atmosfera – per molto tempo ancora.

Notiamo poi che la progressione della messa in orbita è impressionante: nel ventennio 1950-1970 sono stati lanciati solo 282 satelliti, mentre nell'ultimo decennio ne sono stati lanciati quasi 2000. Ci si aspetta una crescita costante che acuirà il problema dei rifiuti spaziali.



EXTRA
INFO



Ottavio Davini

La medicina che non c'è



Edoardo Boncinelli

Ho troppo poco tempo per dire cos'è il tempo



Alessandro Abbotto

Idrogeno Tutti i colori dell'energia



Sebastia Serrano

Termodinamica dell'amore

Come salvare i rapporti di coppia investendo nella comunicazione



Georges Bataille

L'esperienza interiore

LE GRANDI
VOCI

**AMALIA
ERCOLI FINZI**

**CORSA ALLO
SPAZIO**
1, 2, 3... VIA!

 edizioni
Dedalo

 Dedalo
edizioni

La "signora delle comete", una delle grandi protagoniste dell'ingegneria aerospaziale, racconta le tre tappe fondamentali della corsa allo spazio, che hanno segnato l'inizio di una nuova era per l'umanità.

www.edizionidedalo.it

Seguici anche su

