

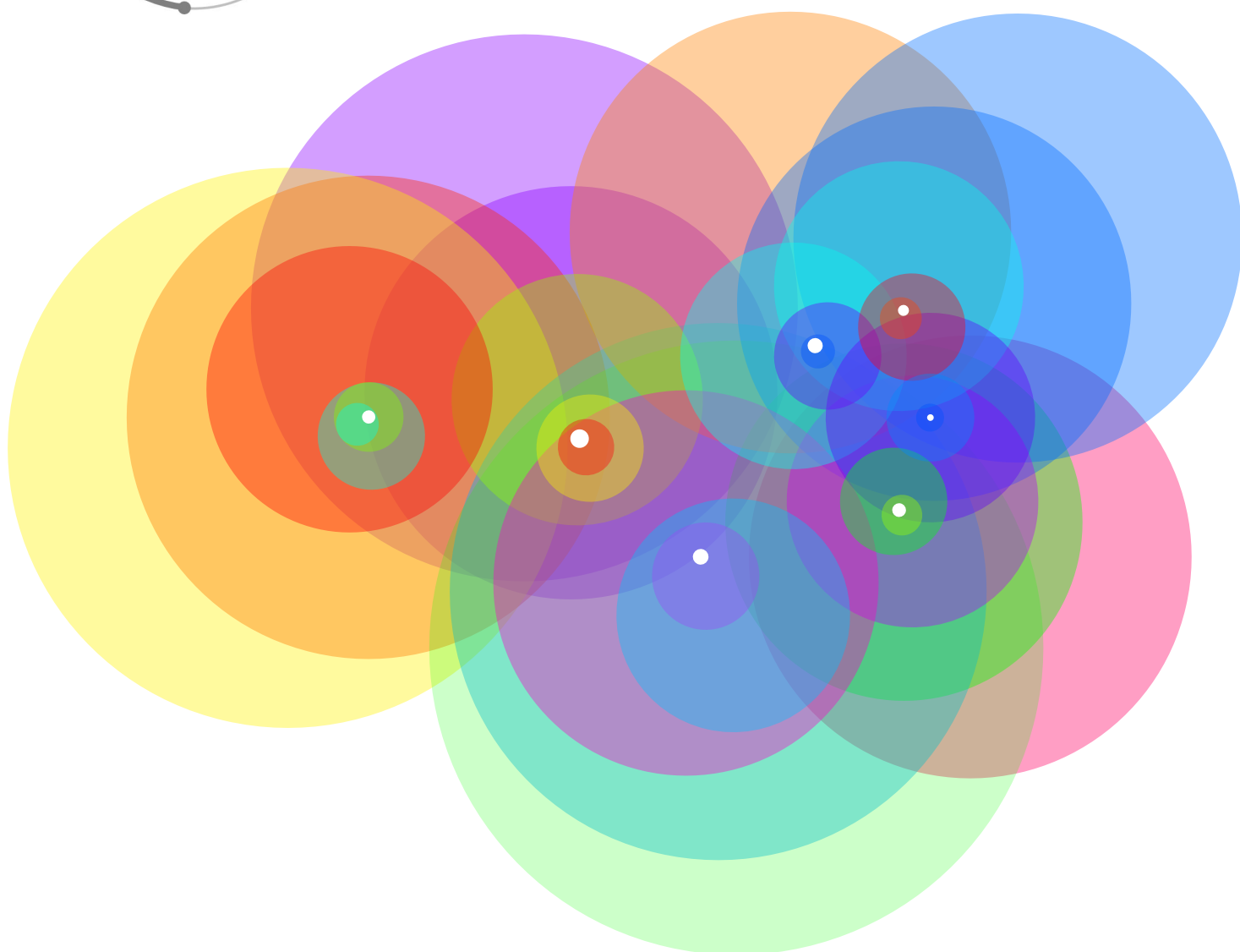
Numero XX
Anno 2022


DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E FISICA
"Ennio De Giorgi"


UNIVERSITÀ
DEL SALENTO

Viaggio nella Scienza

Ithaca



Missioni Spaziali

Ithaca: Viaggio nella Scienza

Una pubblicazione del Dipartimento di Matematica e Fisica “Ennio De Giorgi” dell’Università del Salento.

Registrazione presso il Tribunale di Lecce n. 6 del 30 Aprile 2013.
e-ISSN: 2282-8079

Direttore Responsabile
Luigi Spedicato.

Ideatore
Giampaolo Co’.

Comitato di Redazione
Adriano Barra,
Rocco Chirivì,
Paolo Ciafaloni,
Maria Luisa De Giorgi,
Vincenzo Flaminio,
Luigi Martina,
Giuseppe Maruccio,
Marco Mazzeo,
Francesco Paparella,
Carlo Sempi.

Segreteria di Redazione
Daniela Dell’Anna.

© 2013-2023 Dipartimento di Matematica e Fisica “*Ennio de Giorgi*”.

© 2023 per i singoli articoli dei rispettivi autori.

Il materiale di questa pubblicazione può essere riprodotto nei limiti stabiliti dalla licenza
“*Creative Commons Attribuzione – Condividi allo stesso modo 3.0 Italia*” (CC BY-SA 3.0 IT).

Per il testo della licenza: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/it/deed.it>

Ithaca: Viaggio nella Scienza

è disponibile sul sito:

<http://ithaca.unisalento.it/>

Scriveteci all’indirizzo:

ithaca@unisalento.it

Ithaca

Viaggio nella Scienza

XX 2022

3 In questo numero

5 Esplorando il nostro sistema solare
Christina Plainaki, Eleonora Ammanito

37 LISA: un osservatorio per le onde gravitazionali
nello spazio
Philippe Jetzer

45 A caccia di antimateria nello spazio
Roberto Battiston

53 Drain Brain: monitorare il drenaggio cerebrale negli astronauti per prevenire problemi cardiovascolari
S. Mari, G. Valentini, G. Mascetti, S. Pignataro, A. Taibi, A. Proto, E. Menegatti, P. Zamboni

63 Spazzatura spaziale: origine, pericoli, che fare
Giulio Avanzini

71 Siamo soli nell'universo?
Paolo Saraceno

83 È possibile comprendere la Meccanica Quantistica?

Claudio Garola

In questo numero

La maggior parte degli articoli di questo ventesimo numero di **Ithaca** riguarda le missioni spaziali.

Le innovative scoperte delle missioni Juno e Dawn, orbitanti attorno a Giove e ai suoi satelliti Vesta e Ceres, sono descritte in dettaglio nell'articolo di **Cristina Plainaki** e **Eleonora Ammanito**.

La futura missione LISA che sarà lanciata per studiare nello spazio le onde gravitazionali è presentata da **Philippe Jetzer**.

Roberto Battiston racconta la storia della costruzione e del lancio della missione AMS pensata per l'identificazione di antimateria nello spazio, e ne discute alcune osservazioni preliminari indicando anche l'esistenza di dati ancora in fase di elaborazione.

L'articolo di **Silvia Mari, Giovanni Valentini, Gabriele Mascetti, Salvatore Pignataro, Angelo Taibi, Antonino Proto, Erica Menegatti e Paolo Zamboni** tratta di uno studio dell'influenza del campo gravitazionale sull'afflusso di sangue al cervello fatto a bordo della Stazione Spaziale Internazionale.

Un problema sottovalutato, ma che sta diventando sempre più rilevante per le missioni spaziali, è la presenza di detriti di satelliti nell'alta atmosfera del nostro pianeta. Di questo problema, e di come affrontarlo, parla l'articolo di **Giulio Avanzini**.

L'articolo di **Paolo Saraceno** non è strettamente legato alle missioni spaziali, ma riguarda le nostre domande sullo spazio. Si pone una domanda che già Fermi si pose negli anni '50. Perché non abbiamo mai incontrato alieni dato che, statisticamente parlando, la vita dovrebbe essere molto comune nell'Universo?

L'ultimo articolo di questo numero, scritto da

Claudio Garola, non è legato al tema principale ma riprendo un argomento affrontato dallo stesso autore in un articolo sul numero XIII di **Ithaca**. La struttura matematica della Meccanica Quantistica è così astratta da rendere estremamente difficile la sua comprensione in termini di concetti che ci sono familiari. Questo provoca paradossi, cioè situazioni conflittuali con ciò che ci aspettiamo. Una interpretazione non ingenua, e tradizionale, delle entità matematiche presenti nella formalizzazione della Meccanica Quantistica evita questi paradossi.

Buona lettura,
il Comitato di Redazione

Esplorando il nostro sistema solare

Christina Plainaki, Eleonora Ammanito

Agenzia Spaziale Italiana

La comunità scientifica internazionale che si occupa dello Studio del Sistema Solare ha oggi a disposizione per le proprie attività un'enorme quantità di dati grazie ai programmi di Esplorazione del Sistema Solare. L'uso di questi dati avviene in forte sinergia con attività teoriche numeriche e sperimentali. Ed è proprio questo coordinamento che ci ha permesso di fare enormi passi avanti nella nostra comprensione dei fenomeni atmosferici, geologici ed elettromagnetici di pianeti diversi dalla Terra. In questo articolo parleremo di due missioni di esplorazione Spaziale con forte partecipazione italiana: la missione NASA/Juno verso Giove (lanciata nel 2011 e ancora attiva) e la missione NASA/Dawn verso Vesta e Ceres (lanciata nel 2007 e terminata nel 2018). Le scoperte di queste missioni ci hanno aiutato a capire meglio la storia evolutiva del nostro Sistema Solare e i meccanismi fisici determinati dalle interazioni tra i corpi planetari e gli ambienti che li circondano.

Introduzione

Esploriamo il Sistema Solare per comprendere meglio il nostro pianeta, i suoi dintorni e le dinamiche che hanno portato allo sviluppo della vita sulla Terra. Per esplorazione del Sistema Solare

Thanks to the Solar System exploration programs, an enormous amount of data is now available to the space science community. Planetary science data exploitation, often in strong synergy with modelling and theoretical research efforts, has been essential for incrementing our knowledge on atmospheric, geological, and electromagnetic phenomena on planets other than the Earth. In this article, we discuss some recent insights from two innovative exploration missions with strong Italian participation: the NASA/Juno mission to Jupiter (launched in 2011 and still ongoing) and the NASA/Dawn mission to Vesta and Ceres (launched in 2007 and ended in 2018). The discoveries of these missions have helped us to unveil the history of our Solar System and the physical mechanisms resulting from the interactions between planetary bodies and their surrounding environments.

Introduction

Solar System exploration is mainly driven by our need to better understand our planet and its surroundings as well as our curiosity to know the origins of life on Earth. Solar System exploration

si intende lo studio dell'intorno del nostro pianeta includendo il Sole, la Luna, i pianeti terrestri, i giganti gassosi, quelli ghiacciati e i piccoli corpi come i satelliti naturali, le comete, gli asteroidi e le polveri.

L'esplorazione dello Spazio si fa con l'uso di sonde robotiche progettate da scienziati e ingegneri, spesso attraverso cooperazioni internazionali. Un oggetto planetario può essere studiato con varie tecniche sia da lontano che *in situ*. Durante un rapido sorvolo di una sonda o facendola entrare in orbita attorno ad un oggetto planetario, la strumentazione scientifica può caratterizzare importanti proprietà della struttura interna, della superficie e dell'ambiente circostante il corpo in questione. *Lander* e *rover* permettono invece uno studio più dettagliato dei suoli combinata alla possibilità di avere dei mini-laboratori che conducono analisi scientifiche *in loco*. Nel corso degli anni, l'analisi di una enorme quantità di dati provenienti dalle missioni spaziali, sostenuta da quelli provenienti dalle osservazioni da Terra e dagli studi teorici, ha arricchito la conoscenza umana sui fenomeni atmosferici, geologici ed elettromagnetici di pianeti diversi dalla Terra. Questi studi hanno rafforzato il campo delle scienze planetarie, delle scienze della vita e dell'Eliofisica, spesso attraverso approcci sinergici che vanno oltre i confini delle varie discipline.

In questo articolo, discuteremo alcune recenti scoperte provenienti da missioni di esplorazione spaziale con partecipazione italiana. In particolare ci focalizzeremo su due missioni, la missione NASA/Juno verso Giove lanciata nel 2011 e la missione NASA/Dawn verso Vesta e Ceres lanciata nel 2007. Ne discuteremo le principali scoperte e le ricadute scientifiche in vista di future prospettive.

Principali ricadute dalla missione in corso NASA/Juno

La missione

Juno è una missione esplorativa planetaria fortemente innovativa, dedicata allo studio di Giove. L'obiettivo scientifico principale di Juno è quel-

refers to the observation and visitation of our planet's close or distant neighborhood, including the Sun, the Moon, terrestrial planets, gas and ice giants, as well as smaller bodies like satellites, comets, asteroids, and dust.

The robotic space exploration of the Solar System is performed by robotic spacecraft missions designed by scientists and engineers and organized and operated by various space agencies worldwide, often through international cooperation. Remote and *in situ* scientific observations of a planetary object may be carried out through different techniques. During spacecraft flybys or along a spacecraft orbit around a planetary object, remote-sensing and *in situ* instruments are able to reveal important properties characterizing the internal structure, surface and environment of the body in question. Landers, rovers and probes allow more detailed investigations of soils and near-surface environments as well as the opportunity to have mini-laboratories performing scientific analyses *ad hoc*. Over the years, the analysis of an enormous amount of data from space missions in the Solar System, supported by efforts based on both ground-based data exploitation and modelling, have enriched human knowledge about atmospheric, geological, and electromagnetic phenomena on planets other than the Earth, enforcing the fields of planetary and life sciences, as well as Heliophysics, often through synergetic approaches that go beyond the borders of single disciplines.

In this article we will discuss some recent insights from exploration missions with Italian participation. In particular, we will focus on two specific missions, the NASA/Juno mission to Jupiter (launched in 2011) and the NASA/Dawn mission to Vesta and Ceres (launched in 2007). We will discuss the main findings and key scientific returns also in view of future perspectives.

Main science returns from the ongoing NASA/Juno mission

The mission

Juno is an innovative planetary exploration mission dedicated to the study of Jupiter. The main goal of Juno is to answer questions about the

lo di contribuire a rispondere a diverse domande relative all'origine di Giove, fornendo misure chiave per la nostra comprensione dei pianeti giganti, anche al di fuori del Sistema Solare. Juno è stata lanciata il 5 Agosto 2011 ed ha raggiunto Giove il 4 Luglio 2016, dopo 5 anni di viaggio: la sonda è entrata in un'orbita polare di 53 giorni, estesa da appena sopra le nubi di Giove sino alle regioni più lontane della sua magnetosfera.

Dal 2016, Juno ha fornito dati che hanno rivoluzionato la nostra visione della struttura interna, del campo magnetico interno, dell'atmosfera, della magnetosfera, dei satelliti e degli anelli di Giove. Verso la fine della missione principale, nel giugno 2021, l'orbita della sonda è andata incontro ad una sostanziale evoluzione: il sorvolo ravvicinato di Ganimede, il 7 Giugno 2021, ha segnato la transizione di Juno verso una missione di completa esplorazione del sistema gioviano. Durante la sua missione estesa, programmata fino al 2025, Juno approfondirà diversi aspetti scientifici delle scoperte già fatte riguardo Giove - con speciale attenzione all'emisfero nord del pianeta - e si dedicherà anche ai suoi satelliti e sistema di anelli, tutte attività permesse dalla progressiva evoluzione dell'orbita. Questo consentirà alla sonda di raggiungere altezze ancora più basse al di sopra l'emisfero nord del pianeta e sondare, in modo ancora più accurato, la regione di manifestazione delle aurore e le parti più profonde dei cicloni circumpolari. Allo stesso tempo, Juno affronterà alcune nuove domande riguardanti l'*habitat* planetario. Dato che l'orbita di Juno continuerà ad evolvere, sono previsti altri sorvoli delle lune Europa ed Io, come il passaggio attraverso i loro tori, nubi a forma di ciambella composte di particelle cariche che circondano le orbite delle lune. I sorvoli delle lune costituiscono un'opportunità scientifica in sé, ma allo stesso tempo forniscono un aiuto gravitazionale, permettendo all'orbita di raggiungere latitudini più elevate e ottimizzare la geometria con la quale osserviamo il pianeta gigante.

Gli 11 esperimenti scientifici a bordo di Juno includono sensori per le osservazioni nelle regioni spettrali visibile, ultravioletta (UV), ed infrarossa (IR), due magnetometri, un *dual-frequency radio science*, sei radiometri a microonde e nove sensori di particelle cariche e onde elettromagnetiche. Questi strumenti hanno già fornito un

origin and evolution of Jupiter and our solar system, providing key measurements also for our understanding of giant planets across the Universe. Juno was launched on the 5th of August 2011 and arrived at Jupiter on the 4th of July 2016 after a 5-year journey; the spacecraft entered into a 53-day polar orbit stretching from just above Jupiter's cloud tops to the far away Jovian magnetosphere.

Since 2016, Juno has been providing data that revolutionized our view of Jupiter's interior structure, internal magnetic field, the atmosphere, the magnetosphere, the satellites and the rings. Near the end of the prime mission in July 2021, the spacecraft orbit evolved and it was the flyby of the moon Ganimede, on the 7th of June 2021, that marked the transition of Juno to a full Jovian system explorer. During its extended mission until 2025, Juno will expand several scientific aspects of the discoveries already made about Jupiter with special focus on the planet's northern hemisphere, satellite and ring systems, enabled from the northwards progression of the orbit's perijove. This will allow the spacecraft to reach also lower altitudes over Jupiter's northern hemisphere and to probe, even more efficiently, the aurora region and the roots of the circumpolar cyclones. At the same time Juno will address new science questions regarding, for instance, planetary habitats. As Juno's orbit will continue to evolve, additional flybys of the moons Europa and Io (also through their tori - these are doughnut-shaped clouds of charged particles that surround each moon's orbit) are also planned. Satellite flybys constitute a science opportunity themselves but at the same time they provide gravity assists and help the orbital period to reach higher latitudes and optimize the viewing geometry of the giant planet.

The 11 scientific payloads onboard Juno include visible, ultraviolet (UV), and infrared (IR) remote sensing sensors, two magnetometers, dual-frequency radio science, six microwave radiometers, and nine charged particle and electromagnetic wave sensors. These instruments have so far provided an important amount of data across

importante quantità di dati per diverse discipline scientifiche.

L'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) ha finanziato e coordinato gli sforzi per fornire due importanti contributi alla missione Juno: lo spettrometro di immagini infrarosse JIRAM (Jovian InfraRed Auroral Mapper), sviluppato da Finmeccanica (ora Leonardo) sotto la guida scientifica dell'Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali (IAPS) dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF), e lo strumento di radio scienza KaT (Ka-Band Translator), che rappresenta la porzione di Ka-band dell'esperimento della gravità, costruito dalla Thales Alenia Space-I sotto la guida scientifica dell'Università La Sapienza di Roma. Qui sotto presenteremo una breve, e certamente non esaustiva, rassegna delle scoperte di Juno, con un'attenzione particolare all'atmosfera di Giove ed alla sua interazione con la magnetosfera. Dato il rilevante contributo dei recenti dati IR per queste tematiche, discuteremo le scoperte di Juno principalmente dalla prospettiva di JIRAM.

L'esperimento JIRAM

Mentre nello spettro visibile misuriamo essenzialmente la luce solare riflessa da un pianeta, nell'infrarosso rileviamo principalmente la radiazione termica emessa dal corpo, radiazione che rivela molte delle sue caratteristiche (come ad esempio, la sua temperatura).

JIRAM ha fornito dati che hanno ampliato la nostra visione e comprensione dell'atmosfera di Giove e delle sue interazioni con la magnetosfera. JIRAM è stato progettato per catturare la radiazione infrarossa che emerge dall'interno profondo di Giove, sondando l'atmosfera fino a 50-70 km al di sotto della sommità delle nubi [1].

JIRAM consiste di una testa ottica principale e una contenitore metallico esterno per l'elettronica. Il sistema ottico è equipaggiato da un singolo telescopio e ospita una camera infrarossa e uno spettrometro: in sintesi JIRAM può produrre sia spetti sia immagini, quindi incorpora due strumenti in uno. La camera dispone di due filtri centrati a diverse lunghezze d'onda, ottimizzati per osservare rispettivamente le emissioni di aurora e quelle termiche del pianeta, su un campo complessivo di 3.5×6.0 gradi e con una risoluzione di appena un centesimo di grado. Lo

a wide range of scientific disciplines.

The Italian Space Agency (ASI) financed and coordinated the efforts for providing two important contributions for the Juno mission: the JIRAM infrared imaging spectrometer (Jovian InfraRed Auroral Mapper) developed by Finmeccanica (now Leonardo) under the scientific leadership of the Institute of Space Astrophysics and Planetology (IAPS) of the National Institute of Astrophysics (INAF) and the KaT radio science instrument (Ka-Band Translator), representing the Ka-band portion of the gravity experiment, manufactured by Thales Alenia Space-I under the scientific leadership of the Sapienza University of Rome. Below we provide a brief and not exhaustive list of Juno discoveries with special focus on the Jovian atmosphere and its interaction with the interior and the magnetosphere. Due the relevance of the mission's recent IR data to these topics, we discuss the Juno discoveries mainly from the JIRAM perspective.

The JIRAM experiment

While in the visible spectrum we essentially see sunlight reflected from a planet, in the infrared we see mainly the thermal radiation emitted by the planetary body itself, which reveals much of its characteristics (such as, for example, its temperature).

JIRAM has been providing data that broadened our view and understanding of the atmosphere of Jupiter and its interactions with the magnetosphere. JIRAM was designed to capture the infrared light emerging from deep inside Jupiter, probing the weather layer down to 50 to 70 kilometers below Jupiter's cloud tops [1].

JIRAM consists of an optical head and an electronics box. The optical system is equipped with a single telescope and houses both an infrared camera and a spectrometer: in summary, JIRAM can produce both spectra and images, so it incorporates two instruments in one. The camera has two color filters, optimized to observe both the auroral and thermal emissions of the planet for an overall field of view of 3.5×6.0 degrees and with a resolution of just one hundredth of a degree. The spectrometer covers wavelengths from 2 to 5 μm . The Jovian radiation environment is

Le scoperte mozzafiato di Juno

La visione rivoluzionaria del sistema di Giove basata sulle scoperte fatte da Juno.

- Il nucleo di Giove è diluito, senza bordi netti, parzialmente dissolto nell'involucro del mantello circostante.
- Il campo magnetico di Giove ha una dicotomia emisferica ed è influenzato dai moti profondi dell'atmosfera.
- È stata scoperta una regione di intenso campo magnetico sulla regione equatoriale di Giove (la Grande Macchia Blu).
- I vortici atmosferici si estendono a considerevole profondità nell'atmosfera del pianeta.
- Gruppi compatti di cicloni circondano entrambi i poli di Giove.
- Io genera una traccia aurorale doppia nell'atmosfera di Giove.

Juno's breathtaking discoveries

The revolutionary view of the Jupiter system based on the discoveries made so far by Juno.

- Jupiter's core is dilute, without discrete boundaries, partially resolved in the surrounding envelope.
- The magnetic field of Jupiter has a hemispheric dichotomy and is affected by the wind flows.
- An isolated feature of intense magnetic flux was found to exist over an equatorial region of Jupiter (the Great Blue Spot)
- Atmospheric vortices have roots in the planet's deep atmosphere
- Clusters of cyclones encircle Jupiter's both poles.
- Io generates a double auroral footprint on Jupiter's atmosphere

spettrometro copre le lunghezze d'onda da 2 a 5 μm . L'ambiente di radiazione di Giove è particolarmente ostile sia per la sonda Juno sia per lo strumento JIRAM, che quindi è stato progettato con specifici accorgimenti.

Juno ruota attorno al proprio asse alla velocità di 2 rotazioni per minuto; per operare una camera ottica su un satellite ruotante, JIRAM si avvale di uno specchio che compensa la rotazione della sonda durante la misura, mantenendo il puntamento dello strumento fisso per il tempo necessario all'acquisizione dell'immagine. Infine, il progetto di JIRAM è stato guidato dalla necessità di avere uno strumento di ridotti volumi e masse, con impatto minimo sulle sue prestazioni.

Lo scopo principale di JIRAM è di caratterizzare le aurore IR di Giove. Le aurore IR del pianeta sono dovute alla precipitazione di elettroni dalla sua magnetosfera all'alta atmosfera, al di sopra dei poli magnetici. La magnetosfera di Giove contiene plasma principalmente originato dalla luna Io, uno dei quattro satelliti Galileiani. Qui hanno luogo eruzioni vulcaniche che rilasciano grandi quantità di materiale nello spazio. A differenza delle aurore terrestri, che sono variabili, quelle di Giove hanno ovali che sono sempre visibili e brillanti. Sono accompagnati dalle tracce delle tre lune Io, Europa e Ganimede. In corrispondenza

particolarmente rischioso per entrambi la sonda Juno e lo strumento JIRAM, che quindi è stato progettato con caratteristiche uniche e veramente.

Juno is a spinning satellite, that is, it rotates around itself (2 rotations per minute); in order to operate an optical camera on a rotating satellite, JIRAM uses a particular despining mirror that compensates for the rotation of the probe during measurement, keeping the scene fixed for the time necessary to create an image. Finally, the design of JIRAM was driven by the need to have an instrument with the lowest possible volume and mass with minimum impact on its performance.

The principal scientific goal of JIRAM is to characterize the Jovian IR auroras. The IR auroras on Jupiter arise from the precipitation of electrons from its magnetosphere on the planet's upper atmosphere, above the magnetic poles. The magnetosphere of Jupiter contains plasma mainly originating from the moon Io, one of the four Galilean satellites where volcanic eruptions take place releasing big amounts of material into space. Unlike the terrestrial auroras, which are quite variable, those of Jupiter have ovals that are always visible and bright. They are accompanied by magnetic footprints of the three natu-

alle linee di forza del campo magnetico che passa attraverso ognuna di queste lune, un'ulteriore emissione di aurora si forma nell'atmosfera di Giove. JIRAM ha scoperto come queste tracce ricordino, nella loro forma, il moto di un ostacolo in un fluido, sebbene non ci sia ancora alcuna spiegazione di come questo accada [2].

ral satellites Io, Europa and Ganymede. In correspondence with the line of force of the magnetic field that passes through each of these moons, an additional auroral emission is formed in the ionosphere of Jupiter, which revolves around the main aurora as well as the corresponding moon revolves around Jupiter. JIRAM discovered that these footprints resemble, in shape, the motion of an obstacle in a fluid although there is still no clear explanation of how this happens [2].

Le importanti scoperte di Juno

Scienza dell'atmosfera: cicloni, composizione e dinamica dell'atmosfera

Juno Outstanding Discoveries

Atmosphere science: cyclones, atmospheric composition and dynamics

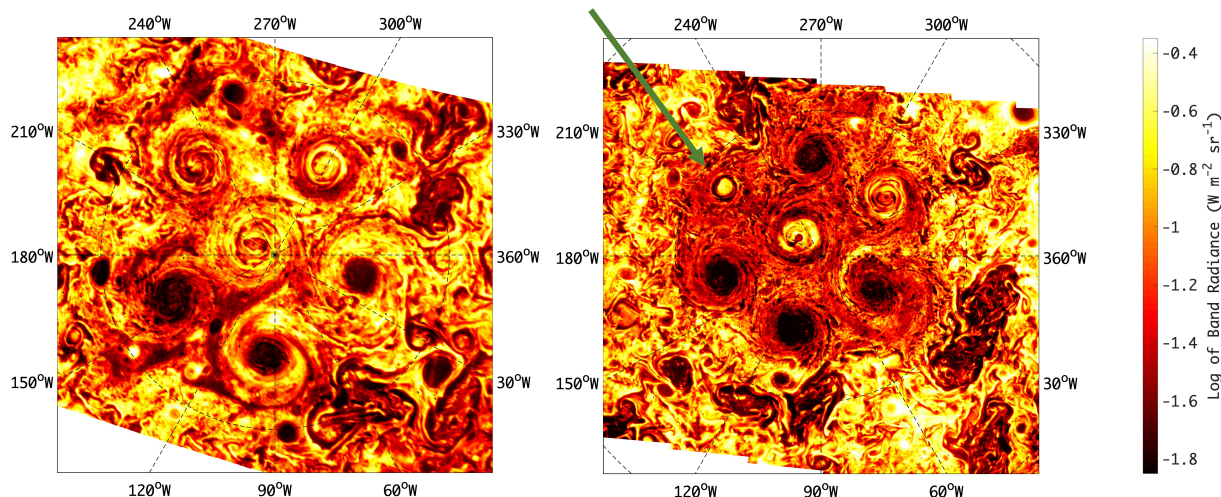


Figura 1: Cicloni circumpolari sul polo sud di Giove, nel luglio 2019 (pannello a sinistra) e nel novembre 2019 (pannello a destra), come visti da JIRAM. Il sesto ciclone, indicato dalla freccia verde nel pannello di destra, appare nell'Agosto 2019, dando luogo ad un quasi perfetto esagono nella disposizione dei cicloni. Nel novembre 2019 comincia a ridursi per scomparire completamente nel febbraio 2020. La scala dei colori, che offre una misura del segnale misurato, è logaritmica. Le regioni senza nubi appaiono più calde (colore più chiaro), cioè hanno maggiore segnale; le spesse nubi che ostruiscono la vista della parte più profonda dell'atmosfera sono in color rosso scuro. Immagine INAF/ASI/JIRAM (Data)/A. Mura (Processing). Si veda [4] per dettagli.

Circumpolar cyclones in the South Pole in July 2019 (left panel) and November 2019 (right panel) as seen by JIRAM. The sixth cyclone, indicated by a green arrow in right panel appears in August 2019, forms an almost perfect hexagon in November 2019, starts to vanish, and disappears completely in February 2020. The radiance color scale is logarithmic. Regions free of clouds will appear "hotter" (light red color), that is, with higher radiance; the polar cyclones have thick clouds (dark red color) that obstruct most of the view of the deeper atmosphere. Credit: INAF/ASI/JIRAM (Data)/A. Mura (Processing). See also [4] for details.

La nostra comprensione dell'atmosfera di Giove è progredita significativamente grazie a Juno. Le regioni polari di Giove non sono visibili dalla Terra a causa della scarsa inclinazione dell'asse polare del pianeta, e le missioni precedenti le hanno scarsamente caratterizzate. Il JIRAM ha qui ottenuto immagini visibili e infrarosse, rivelando persistenti disposizioni poligonali di grandi cicloni. Questo è sicuramente il risultato più importante ottenuto, ad oggi, da JIRAM.

In particolare, durante le prime orbite della missione, JIRAM ha osservato in prossimità del polo nord otto cicloni circumpolari, di uguali dimensioni, che circondano un singolo ciclone polare [3]. Nel sud, un ciclone polare era all'inizio attorniato da cinque cicloni circumpolari. Nel periodo dal Luglio a Novembre 2019 un sesto ciclone è apparso [4] formando un esagono quasi perfetto (si veda la Figura 1). Nei mesi seguenti il sesto ciclone ha iniziato a ridursi fino a sparire completamente nel Febbraio 2020.

Le dimensioni di questi cicloni sono enormi, se confrontate con il raggio del nostro pianeta: nel nord possono raggiungere un diametro di 4000 km e nel sud possono superare i 6000 km, da un'estremità all'altra. Anche le velocità del vento in queste formazioni sono notevoli e oscillano tra i 150 e 350 km all'ora. In osservazioni ripetute, condotte negli anni più recenti da JIRAM, abbiamo notato una sostanziale stabilità della configurazione dei vertici polari, al punto da stimare che ogni ciclone abbia una vita media di almeno 50 - 100 anni. Per l'effetto β di Coriolis i vortici ciclonici si muovono naturalmente verso il polo rotazionale. Tuttavia la configurazione osservata da JIRAM su Giove rimane priva di analoghi sugli altri pianeti (incluso Saturno).

I cicloni di Giove sono molto differenti dagli uragani della Terra, sia nella durata (nel pianeta gigante possono durare decine di anni) sia nell'intensità dei venti. Rispetto agli uragani terrestri, non abbiamo ancora identificato su Giove un livello di altezza al quale un ciclone comincia a formarsi. Questo perché non siamo ancora capaci di determinare con certezza la profondità sulla quale tali strutture si estendono. Una futura

Our understanding of Jupiter's atmosphere has increased significantly with Juno. The polar regions of Jupiter are not visible from Earth because of planet's low axial tilt and previous missions had only poorly characterized them. The Jupiter Infrared Imaging Spectrometer (JIRAM) obtained visible and infrared images of Jupiter's poles revealing persistent polygonal patterns of large cyclones. This has been undoubtedly the most important result obtained so far by JIRAM.

In particular, during the first orbits of the mission, JIRAM observed in the North eight circumpolar cyclones, of equal size, surrounding a single polar cyclone [3]. In the south, one polar cyclone was initially encircled by five circumpolar cyclones. In the period from July to November 2019 a sixth cyclone appeared [4] forming an almost perfect hexagon (see Figure 1). In the following months the sixth cyclone started to vanish and disappeared completely in February 2020.

The dimensions of these cyclones are enormous, comparable to those of the radius of our planet: in the north they can reach a diameter of 4,000 kilometers and in the south even exceed 6,000 kilometers from one extreme to the other. The wind speeds within these atmospheric structures are also remarkable and oscillate between 150 and 350 kilometers per hour. In the repeated observations, made in recent years by JIRAM, we have noticed a substantial stability of the configuration of the polar vortices on Jupiter, so much so that it is estimated that each cyclone has a life expectancy of at least 50-100 years. Due to the Coriolis β -effect cyclonic vortices naturally drift towards the rotational pole (beta-effect). However the configuration observed at Jupiter with JIRAM is without precedent on other planets (including Saturn's polar hexagonal features).

The cyclones at Jupiter are very different from the hurricanes at the Earth, in both duration (at the giant planet they can last for tens of years) and wind intensities. With respect to what we know for the Earth's hurricanes, at Jupiter we still have not determined a reference level at which the cyclone starts to form. This is because we are still not able to determine with certainty the depth of such cyclones. Future joint-analysis of

analisi combinata dei dati da JIRAM con quelli dei radiometri a microonde a bordo di Juno potranno essere capaci di fornire informazioni chiave per determinare la profondità dei cicloni e, più importante, il punto in cui inizia il moto convettivo ad essi associato. Al momento non è ancora chiaro perché questi cicloni persistano su tempi e come evolvano per ottenere la loro configurazione attuale.

Vari modelli sono stati proposti per spiegare la stabilità dei cicloni e la loro origine. Al momento, due principali ipotesi opposte vengono considerate: le strutture possono essere superficiali ed estendersi fino a poche decine di bar nell'atmosfera di Giove (si vedano gli studi delle referenze [5, 6, 7]) o, alternativamente, essere profonde e raggiungere il livello di alcune migliaia di bar (si veda [8] e le referenze incluse). Per verificare la validità di questi due principali tipologie di modelli, superficiale e profondo, ci sono almeno due quantità fisiche fondamentali da considerare: i venti e la loro relazione con i cicloni, e la variazione secolare delle strutture poligonali. I venti possono essere calcolati usando immagini delle stesse regioni separate da tempi molto brevi, nell'ordine di una decina di minuti [9]; dal campo dei venti, è possibile poi calcolare la mappa della distribuzione della vorticità (superficiale).

Juno ha scoperto come l'abbondanza di ammoniacca vari con la latitudine nei livelli profondi [10, 11, 12] suggerendo la possibilità che anche il contenuto di vapore acqueo possa cambiare secondo la latitudine. Questo è quanto emerso verificarsi anche al livello di pochi bar, come dedotto dai dati di JIRAM [13]. È di notevole importanza notare come le distribuzioni di NH_3 e H_2O sopra le nubi possano essere usati come traccianti dei moti verticali dell'atmosfera, il che permette valutazioni sulle relazioni tra chimica e dinamica su un ampio intervallo di latitudini e pressioni.

Scienza dell'interno: nucleo diluito, la Grande Macchia Blu e lo scenario della dinamo superficiale

La comprensione della formazione di Giove è uno degli scopi principali della missione Juno. In particolare, uno dei principali obiettivi scientifici

data from JIRAM and microwave radiometers on board Juno may be able to provide key information for determining the depth of the cyclones and, most important, the point at which the convective motion begins. For the current moment it is still not known why these cyclones persist without merging and how they evolved to obtain their current configuration.

Few modelling studies have been currently proposed for explaining the cyclones stability and origin. Among the proposed theories, there are currently two main opposite assumptions that can be considered: either that the structures are shallow and extend to few tens of bars into the Jovian atmosphere (see studies of Refs. [5, 6, 7]), or deep and reach well into tens of thousands of bars (see studies of Ref. [8] and references therein). To test the validity and accuracy of these two main classes of models, shallow and deep, there are at least two basic physical quantities to be considered: the winds and their relationship with the cyclones, and the secular variations of the polygonal structures. The winds can be calculated by using multiple images of the same regions at short time scale [9]; from the wind field, it is possible to calculate the (shallow) vorticity distribution they map onto.

Juno discovered that the ammonia abundance varies with latitude at deep levels [10, 11, 12] suggesting the possibility that also water varies. This is also true at moderate levels of few bars as inferred from the JIRAM data [13]. It's of significant importance to note that the distributions of NH_3 and H_2O above the clouds can be used as indirect tracers of vertical atmospheric motions allowing an assessment of the relationship between chemistry and dynamics over a broad range of latitudes and pressures.

Interior science: dilute core, the Great Blue Spot and a shallow dynamo scenario

The understanding of Jupiter's formation is one of the major goals of the Juno mission. In particular, one major science objective was to distin-

è discriminare tra due distinte teorie sulla formazione di Giove: il collasso diretto della nebulosa protosolare, o l'accumulazione di un involucro massivo di composizione simile a quella solare attorno ad un nucleo iniziale composto di elementi pesanti [14]. Il risultato dello studio del campo gravitazionale da parte di Juno suggerisce la presenza di un nucleo diluito senza confini ben limitati rispetto al mantello sovrastante. [15].

L'interpretazione dei dati gravitazionali di Juno in termini di un nucleo centrale diffuso è una vera sfida per gli attuali modelli di formazione [15]. Sono stati proposti diversi scenari, che spaziano da un impatto gigante nelle ultime fasi di formazione [16] ad un flusso di planetesimi di roccia e ghiacci appena prima del collasso dell'involucro gassoso sul protopianeta in crescita. [17, 18]. Sebbene la domanda sull'origine di Giove rimanga aperta, futuri dati gravitazionali, insieme alla determinazione dell'abbondanza globale di acqua ed altri gas in traccia, potranno fornire riscontri cruciali per permettere di discriminare tra i vari modelli. Basandosi sulle attuali scoperte di Juno, tuttavia, si può affermare che occorre considerare un quadro molto più complesso della formazione e della struttura del Giove primordiale rispetto a quanto proposto prima di questa missione.

Una delle scoperte più importanti di Juno è stata la dicotomia del campo magnetico fra i due emisferi: il campo al di sopra dell'emisfero sud si presenta sostanzialmente simile a quello di un dipolo, mentre a nord la situazione è molto più complessa. Qui, il campo appare concentrato a latitudini intermedie lungo una intensa banda che si estende quasi interamente attorno al pianeta. A latitudini più alte, troviamo un anello di intensità ridotta, anche con direzione del campo invertita. La dicotomia emisferica implica che la dinamo planetaria che, attraverso la rotazione del pianeta, genera il campo, si produca a livelli più superficiali di quanto ipotizzato sinora, non escludendo persino la possibilità che esista una dinamo generata in due o più livelli distinti [19].

Durante la sua prima orbita attorno a Giove, Juno è passato sopra una regione equatoriale di intenso campo magnetico che è stata successivamente denominata come la **Grande Macchia Blue** (GBS). Le orbite successive hanno mostrato che si tratta una caratteristica unica sul pianeta.

gush between two theories of Jupiter's formation: direct collapse of the gaseous solar nebula, or accumulation of a massive envelope of solar composition atop a core of heavy elements [14], a compact structure isolated from the well-mixed envelope. The gravity results suggested a dilute core without discrete boundaries that is partially resolved in the surrounding envelope [15].

The interpretation of Juno gravity data in terms of a diffuse central core is a real challenge for contemporary formation models [15]. There have been several models proposed so far, among which one appeals to a late giant impact [16] and one delivering an influx of planetesimals into Jupiter just prior to the collapse of the gas envelope onto the growing giant plane [17, 18]. Although the question on Jupiter's origin still remains open, future gravity data, together with the determination of the global water abundance, are likely to provide crucial feedback for distinguishing among the formation models. Based on the current Juno findings however one can say that a complex picture of the formation and early Jupiter evolution has to be considered.

One of the most important discoveries of Juno was the magnetic field hemispheric dichotomy: the southern hemisphere is strongly dipolar, but the northern hemisphere is not. In the northern hemisphere, the field is concentrated at midlatitudes into an intense flux band that stretches almost entirely around the planet. At higher latitudes, there is a ring of much reduced, even reversed flux, possibly due to the combined role of rapid rotation and deep interior structure on the magnetic field. The hemispheric dichotomy implies the existence of a shallow dynamo leaving at the same time also open the possibility of a two-layer dynamo [19].

During its first orbit around Jupiter, Juno passed over an equatorial region of intense magnetic flux that was subsequently named as the **Great Blue Spot** (GBS). Subsequent orbits showed this to be an isolated, solitary feature [19, 20].

[19, 20].

Accoppiamento di studi di atmosfera, campo magnetico e interno: vortici e atmosfera profonda

Già prima delle esplorazioni spaziali era noto come l'atmosfera di Giove sia organizzata in un sistema di bande orizzontali di colore differente (le zone, chiare, e le cinture, più scure) interrotte da vortici di varie dimensioni. Il maggiore di questi è la Grande Macchia Rossa (GRS), che persiste da diversi secoli. Non era noto tuttavia come queste caratteristiche cambiassero con la profondità. Le osservazioni dei vortici atmosferici da parte del radiometro a microonde (MWR) di Juno ha rivelato come le parti più profonde dei vortici si estendano ben al di sotto del livello in cui si presume che l'acqua e l'ammoniaca condensino [21]. Il risultato è di grande importanza, dato che fornisce dei vincoli per la struttura tridimensionale dei vortici, sulle loro origini e mette in luce una possibile connessione con l'atmosfera profonda. Misure gravitazionali raccolte durante il sorvolo di Juno sulla GRS hanno rivelato una perturbazione nel campo gravitazionale del pianeta causato dalla tempesta, non più in profondità di 500 km [22]. Questa scoperta ha ulteriormente dimostrato come la meteorologia di Giove sia legata alla sua profonda struttura interna.

Le osservazioni del magnetometro di Juno hanno mostrato come i flussi profondi dell'atmosfera influenzino il campo magnetico. In particolare, si è trovato come l'atmosfera non abbia una densità orizzontale uniforme ma una struttura variabile molto più profonda di quanto si ritenesse. Negli strati più alti risulta evidente l'influenza del campo gravitazionale nelle misure del magnetometro, che mostrano una variabilità nel tempo e nello spazio. Tuttavia, in aggiunta all'avvezione (trasporto) del campo magnetico dovuta ai venti di zona, le variazioni temporali nel campo magnetico possono essere legate a oscillazioni torcenti nella regione della dinamo di Giove.

Scienza della magnetosfera: reconnection, aurora e ambiente spaziale dei satelliti Galileiani

Prima di Juno si riteneva che connessione magnetica su grande scala, come quella presente sulla

Atmosphere– magnetic field–interior science coupling: vortices and deep atmosphere

Before Juno it was already known that Jupiter's atmosphere had a system of zones and belts interrupted by small and large vortices, the largest one being the well-known Great Red Spot, enduring more than a century. It was not known however how these features change with depth. The Juno spacecraft's Microwave Radiometer (MWR) observations of atmospheric vortices revealed that the vortex roots extend deeper than the altitude at which water and ammonia are expected to condense [21]. This result is of major importance since it provides constraints for the three-dimensional structure of the vortices and implies their possible connection with the deeper atmosphere. Gravity measurements taken while Juno flew over the GRS revealed a perturbation in the planet's gravitational field caused by the storm, no more than 500 kilometers deep [22]. This extraordinary finding demonstrated that Jupiter's meteorology should link to its deep interior.

The Juno magnetometer observations showed that the atmospheric wind flows influence the magnetic field. The atmosphere was found to be not well mixed having a variable structure that was much deeper than we thought. In the upper layers, the influence of the gravity field in the magnetometer measurements, which show a variability in space and time, is evident. However, in addition to advection of the magnetic field by deep zonal winds, time variations in the magnetic field may be related to torsional oscillations that may exist in Jupiter's dynamo region.

Magnetosphere science: reconnection, aurora and space environment at the Galilean satellites

Before Juno, we thought that large-scale reconnection as known at Earth was unlikely to exist

Terra fosse improbabile su Giove [23, 24]. Tuttavia, Juno ha osservato segnali di connessione magnetica sulla parte diurna e mattutina della magnetopausa [25]. Questo comporta che parte della regione magnetosferica polare può essere collegata con il vento solare.

A prima vista, le aurore di Giove appaiono simili a quella della Terra, ma esistono importanti differenze. Per ciò che concerne l'origine delle aurore: il Sole (e il meteo spaziale) rappresenta l'elemento chiave nel caso della Terra, mentre per Giove un ruolo speciale riveste l'attività vulcanica di Io. Juno ha scoperto un potenziale elettrico di circa 400 mila volt, al di sopra dell'aurora principale di Giove. Potenziali di questo tipo sulla Terra alimentano le aurore più intense. Juno ha trovato che un'ampia scala di accelerazioni di particelle domina le intensità dell'aurora e che le correnti di aurora sono più strutturate di quanto atteso. La sorgente delle aurore più intense di Giove rimane ancora un mistero [26].

Su Giove, le aurore vengono generate anche dall'interazione del gigante pianeta gassoso con le sue lune. Questo avviene attraverso le linee del campo magnetico: le lune (specialmente i tre satelliti galileiani più interni), lasciano una traccia magnetica - in forma di una macchia aurorale brillante - sull'atmosfera polare di Giove, mentre orbitano attorno al pianeta. Le strutture che sono create assomigliano a perturbazioni molto particolari, simili alle onde generate dall'impatto di un fluido su un corpo. Non siamo ancora stati capaci di interpretare completamente questo fenomeno, anche se i dati di JIRAM forniscono una unica opportunità di investigare processi legati all'interazione tra particelle e atmosfera all'interno della magnetosfera del pianeta gigante. L'accoppiamento tra la ionosfera di Giove e i satelliti è la chiave per comprendere questa interazione elettrodinamica anche per altri ambienti del nostro Sistema Solare.

Con Juno, è stata fornita un'unica opportunità per studiare le interazioni elettrodinamiche tra Io e l'atmosfera del pianeta. Questo è stato reso possibile attraverso l'investigazione del comportamento della parte terminale del tubo di flusso nella ionosfera [27, 28, 29] e lo studio della tracce magnetiche della luna, poste appena

at Jupiter [23, 24]. However, Juno observed signatures of magnetic reconnection on the dayside and dawn magnetopause [25]. This implies that part of the polar cap may indeed be connected to the solar wind.

At first glance, the auroras at Jupiter appear similar to those of the Earth, however, some important differences exist. Regarding the origin of the aurorae: the Sun (and space weather) is the driver for the Earth's case whereas for Jupiter, it is the volcanic activity of Io. Juno discovered electric potentials as high as 400,000 volts, aligned with the magnetic field over Jupiter's main aurora. Potentials like these power only the Earth's most intense aurora. Juno found that broadband acceleration dominates the auroral intensities and that the aurora currents are more structured than expected. Poleward of the main aurora, significant particle acceleration may occur below the observation altitudes, nevertheless, this scenario is still to be tested. The source of Jupiter's most intense aurora remains still a mystery [26].

At Jupiter, auroras result also from the interaction of the gas giant planet with its moons. This happens through the magnetic field lines: the moons (especially 3 of them) while orbiting the planet, leave a magnetic imprint (a footprint) on Jupiter's polar atmosphere. The structures that are created resemble very particular perturbations, similar to the waves generated by the impact of a fluid on a body. We have not yet been able to interpret this phenomenon completely nevertheless the JIRAM data provide us a unique opportunity to investigate processes related to particle-atmosphere interactions within the magnetosphere of a giant planet. The coupling between Jupiter's ionosphere and satellites is key for understanding such electrodynamic interactions also at other environments beyond our Solar System.

With Juno, a unique opportunity to study the electrodynamic interaction between Io and the planet's atmosphere has been provided. This has been made possible through the investigation of the behavior of the ionospheric end of the magnetic flux tubes [27, 28, 29] and the study of Io's bright spots just outside the main auro-

fuori dall'ovale dell'aurora principale di Giove [2]. Queste tracce sono state interpretate come il risultato di precipitazione di plasma da Io sulla ionosfera di Giove. In particolare, l'orbita di Io crea una perturbazione locale del plasma, che attiva fenomeni di accelerazione lungo le linee del campo magnetico che collega la luna con lo stesso Giove. Come risultato, appaiono tracce brillanti nella ionosfera alla base delle linee di campo magnetico che passano attraverso Io. L'analisi delle immagini di Juno/JIRAM evidenzia non solo una traccia da Io ma anche una scia di macchie chiare equispaziate che sono circa delle dimensioni della luna vulcanica. Queste macchie chiare ricordano una scia di vortici turbinosi ed appaiono in entrambi emisferi (Figura 2). Analogamente, è stato osservato come Ganimede generi una doppia traccia aurorale. Questi studi hanno dimostrato la complessità dell'interazione tra Giove e le sue lune.

ral oval of Jupiter [2]. Such bright spots have been interpreted as the result of Iogenic plasma precipitation on Jupiter's ionosphere. In particular, Io's orbit creates a local perturbation of the plasma triggering acceleration phenomena along the magnetic field line that connects the moon with Jupiter itself. As a result, bright spots appear in the ionosphere at the base of the magnetic field lines that sweep past the Galilean moon Io. The analysis of the Juno/JIRAM images evidenced not just one footprint from Io but a trail of evenly spaced bright spots that are roughly the size of the volcanic moon itself. They look like a trail of swirling vortices and they appear in both hemispheres, one that sometimes splits into two wing-shaped arcs (Figure 2). Similarly, it was found that also Ganymede generates a double auroral footprint. These studies have demonstrated the complexity of the interaction between Jupiter and its moons.

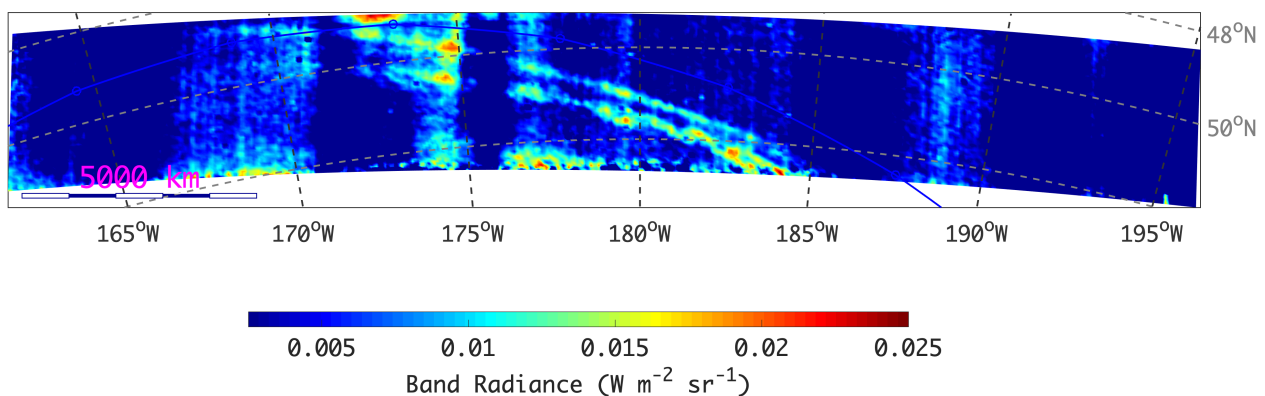


Figura 2: La coda della traccia di Io osservata a $\sim 100^\circ$ dietro la traccia principale. L'immagine è stata acquisita il 27 Agosto 2016. Si vede chiaramente come la coda consista in due archi separati. Gli artefatti verticali su questa immagine sono prodotti dalla routine procedura di elaborazione. Immagine di INAF/ASI/JIRAM (Data) / A. Mura (Processing). Si veda [2] per dettagli.

The Io footprint tail, observed $\sim 100^\circ$ behind the main spot. The image was taken on 27 August 2016. It is clearly seen that the tail consists of two separate arcs. The vertical artefacts on this image are produced by the noise-reduction routine. Local time is approximately dawn. Credits: INAF/ASI/JIRAM (Data) / A. Mura (Processing). See also [2] for details.

Ganimede è la sola luna nel sistema solare che possiede un campo magnetico intrinseco che scherma parzialmente la superficie equatoriale dagli ioni che vengono accelerati nella magnetosfera di Giove. La superficie ai poli di Ganimede rimane tuttavia esposta ed è costantemente bombardata dal plasma della magnetosfera gioviana. Il 7 ed il 20 Giugno 2021, Juno ha compiuto due sorvoli ravvicinati a Ganimede passando ad una distanza di mille e 50 mila km, rispettivamente, acquisendo immagini e spettri della luna ghiacciata. La particolare geometria osservativa di questi passaggi ha fornito l'opportunità di osservare per la prima volta la regione polare nord e di confrontare la composizione della superficie a basse e alte latitudini. Durante il sorvolo del Luglio 2021, JIRAM ha coperto le regioni dell'emisfero equatoriale / sud. L'analisi dei dati di JIRAM ha mostrato come le alte latitudini della superficie di Ganimede siano dominate da acqua ghiacciata con granularità fine. Questo risultato avvalorava uno scenario già previsto dai modelli teorici: le molecole di acqua ai poli di Ganimede sono più facilmente estratte dalla superficie per *sputtering* da parte degli ioni energetici rispetto alle altre regioni della luna [30].

Le basse latitudini sono schermate dal campo magnetico intrinseco della luna e conservano più della sua composizione chimica originale. In particolare tale composizione include componenti diverse dal ghiaccio d'acqua quali sali e sostanze organiche [31]. I dati infrarossi raccolti da Juno durante i sorvoli offrono pertanto informazioni di grande importanza anche per la comprensione dell'evoluzione della luna.

Note conclusive

Le scoperte di Juno hanno rivoluzionato la nostra visione di Giove, fornendo evidenze sperimentali chiave per rispondere alle domande di ormai lunga data riguardo l'origine di Giove e del nostro sistema solare. Le scoperte di Juno/JIRAM sui cicloni polari sono cruciali per valutare le ipotesi riguardanti la generazione dei cicloni, la loro struttura in atmosfere profonde, e la distribuzione chimica dei componenti dell'atmosfera di Giove. In aggiunta, i risultati delle analisi dei dati di JIRAM possono essere di aiuto per perfezionare i modelli che tentano di descrivere

Ganymede is the only moon in the solar system that possesses an intrinsic magnetic field which partially shields the equatorial surface from the Jovian magnetospheric ions. The surface at Ganymede's poles is constantly being bombarded by plasma from Jupiter's gigantic magnetosphere. On 7 June and 20 July 2021, Juno made two fly-by of Ganymede passing at a distance of 1000 km and 50,000 km, respectively, obtaining images and spectra of the icy moon. The particular observational geometry of these close passages provided the opportunity to see the north polar region for the first time and to compare the surface composition at low and high latitudes. During the July 2021 flyby, JIRAM covered regions of the equatorial / southern hemisphere. The JIRAM data analysis showed that the high latitudes of Ganymede's surface are dominated by water ice, with fine grain size. This result provided support to a previously proposed scenario: water molecules at the poles of Ganymede are more readily mobilized by sputtering than across the rest of the surface [30].

Low latitudes are shielded by the moon's magnetic field and contain more of its original chemical composition, consisting most notably of non-water ice constituents such as salts and organics [31]. The infrared data collected by Juno during the flybys contain information of paramount importance also for understanding the evolution of Jupiter's icy moon.

Concluding remarks

The Juno findings have revolutionized our view of Jupiter and provided fundamental feedback for answering long-standing open questions about the origin and evolution of Jupiter and our solar system. The Juno/JIRAM findings on polar cyclones are crucial for testing hypotheses regarding the cyclogenesis, the structure of the polar cyclones, as well as the elemental distribution of Jupiter's atmosphere. In addition, the results of the analyses of the JIRAM data can be of help when refining the modeling framework to explain these dynamic atmospheric structures.

queste strutture dinamiche dell'atmosfera di altri pianeti.

Le osservazioni di Juno/JIRAM (mappe spettrali e *imaging*) saranno fondamentali anche per definire strategie di osservazione delle future esplorazioni del sistema di Giove. La missione ESA/JUICE, che esplorerà le luna Galileiane ghiacciate con particolari enfasi su Ganimede, trarrà grandi benefici dalle osservazioni acquisite da Juno/JIRAM. Considerazioni analoghe valgono per la missione Europa Clipper della NASA, benché focalizzata sullo studio di Europa. Grazie al profilo della missione Juno, interessanti opportunità osservative per Ganimede verranno a crearsi anche nei prossimi anni. Questo offrirà in una grande base di dati che, per lungo tempo, ci aiuterà a comprendere meglio il sistema Giove e i complicati meccanismi fisici che avvengono al suo interno.

Principali risultati scientifici della missione NASA/Dawn

La missione

La sonda Dawn della NASA è stata lanciata da Cape Canaveral il 27 settembre 2007 iniziando così un viaggio ambizioso verso Vesta e Cere, due tra i proto-pianeti più grandi della fascia principale degli asteroidi. La fascia principale è una regione di spazio a forma di anello che si trova tra le orbite di Marte e di Giove ed è la più grande riserva di asteroidi nel Sistema Solare. Il nome di questa missione spaziale, dawn che in italiano significa alba, è stato scelto per comunicare immediatamente l'obiettivo scientifico principale: fare un viaggio nello spazio e nel tempo verso l'alba del Sistema Solare. Nelle primissime fasi del processo di formazione planetaria, infatti, la naturale evoluzione della fascia principale è stata disturbata dall'influenza gravitazionale dei pianeti giganti della parte esterna del Sistema Solare. Come risultato, in questa regione del Sistema Solare non si è mai formato un potenziale pianeta. Al contrario, è rimasta una regione complessa probabilmente popolata da una combinazione di materiale originario mai aggregatosi, di piccoli oggetti appena aggregati (planetesimi), embrioni planetari e frammenti di oggetti aggregatisi e poi distrutti dalle collisioni.

The Juno/JIRAM observations (spectral mapping and imaging) could prove fundamental also for defining future observation strategies. The ESA/JUICE mission, which will explore the icy Galilean moons with an emphasis on Ganymede, could greatly benefit from Ganymede observations acquired by Juno/JIRAM. Furthermore, NASA's Europa Clipper mission, while focused on Europa, will likely take advantage of opportunities to make measurements of Ganymede, benefitting from the observations with Juno/JIRAM. Because of Juno's mission profile, good observation opportunities for Ganymede will still be feasible in the next years. This will result in a large database that will help us to better understand the Jupiter system and the complex physical mechanisms taking place within.

Main science returns from the NASA/Dawn mission

The mission

The NASA Dawn spacecraft was launched from Cape Canaveral in 2007 starting an ambitious journey to Vesta and Ceres, the two most massive proto-planets in the main reservoir of asteroids in the Solar System, the Main Belt. The name of this space mission was chosen to immediately communicate its top level scientific objective: to execute a journey in space and time toward the dawn of the Solar System. Early in the planetary formation process, the evolution of the Main Belt was disturbed by gravitational influence of the giant planets in the outer Solar System. As result, in this region of the Solar System the accretion of a planet never occurred. Instead, we are left with a complex belt likely populated by a combination of pristine material, planetesimals, planetary embryos and fragments of disrupted objects.

Vesta e Cerere non sono state scelte come destinazioni per questa missione spaziale semplicemente perché sono i due oggetti di massa maggiore nella Fascia Principale. Prima che la sonda Dawn iniziasse il suo viaggio, sia Vesta che Cerere erano state osservate con telescopi dalla Terra e alcune delle loro caratteristiche erano note, quel tanto che basta per stimolare l'interesse. Vesta, scoperta da Olbers nel 1804, è un corpo tendenzialmente anidro (povero di acqua) e ha un diametro medio di 525 km. Ha una forma irregolare con un grande cratere da impatto vicino al polo sud [32]. Osservazioni fatte con telescopi sulla Terra [33] hanno mostrato che la superficie di Vesta è formata da minerali che ricordano molto quelli delle Howarditi Eucriti Diogeniti (HED), un gruppo di meteoriti che sembra provengano dalla crosta, e forse anche dal mantello, di un oggetto differenziato cioè con una struttura interna simile a quella della Terra con nucleo mantello e crosta. Ci si aspetta, quindi, che Dawn sia in grado di confermare il legame tra Vesta e le HED per approfondire la nostra comprensione della formazione ed evoluzione di Vesta. Cerere, scoperta nel 1801 da Piazzi, ha in diametro medio di 940 km ed è molto diversa da Vesta, anche se è molto vicina come distanza media dal Sole. Cerere, ad esempio, non ha similitudini forti con nessun gruppo di meteoriti e sembrava avere una superficie argillosa [34] quindi più ricca di acqua rispetto a Vesta fino ad ipotizzare l'emissione di vapore d'acqua verso lo spazio esterno [36]. Tutte queste informazioni su Vesta e Cerere ha stimolato l'interesse per questi due oggetti fino alla progettazione di una missione come Dawn dedicata alla loro esplorazione. Oggi sappiamo che le informazioni disponibili prima di Dawn non erano altro che la punta dell'iceberg di quello che questi due oggetti avevano in serbo per noi.

Le osservazioni dei telescopi o quelle delle meteoriti sono state usate per decidere i requisiti scientifici della missione Dawn, cioè quali misure fare: densità media, orientamento dell'asse di rotazione, campo gravitazionale, topografia, abbondanze degli elementi chimici che formano la superficie e quella dell'idrogeno, proprietà fotometriche e spettri infrarossi e nel visibile delle superfici dei due corpi. Queste misure sono state eseguite dagli strumenti scientifici e

Vesta and Ceres were not chosen just because they are the two most massive objects in the Main Belt. Prior to the Dawn launch, Earth-bound observations of these two objects revealed some of their intriguing features. Vesta, discovered by Olbers in 1804, is a water poor, differentiated body of mean diameter 525 km, with a large impact crater near its south pole [32]. Ground based telescopic observations [33] showed that the composition of the surface of Vesta resemble that of the Howardite Eucrite Diogenite (HED), a group of meteorites that appear to have been liberated from the crust - and possibly the mantle - of a small differentiated body. Confirmation of the connection between Vesta and the HEDs was expected to deepen our understanding of Vesta's formation and evolution. Ceres, discovered in 1801 by Piazzi, has a mean diameter of 940 km and it is quite different from Vesta, even though it is very close in mean distance to the Sun. It is not linked to any meteorite families and appears to have a clay-like surface [34]. Telescopic spectra were interpreted as showing hydrated materials covering Ceres' surface (e.g., [35]), with OH seen escaping at times above the poles [36]. This wealth of information on Vesta and Ceres has been perfect to stimulate the interest in these two objects and to justify a dedicated space mission to their exploration. Our preexisting knowledge, however, turned out to be only the tip of the iceberg of what Dawn discovered.

These telescopic and meteoritic observations were used to levy a set of observational requirements for Dawn to measure: density, spin axis orientation, gravity field, topography, abundances of rock forming elements and hydrogen, photometric properties, and visible and infrared spectra of the two bodies' surfaces. These observations were to be performed by the payload and spacecraft systems.

dai sotto-sistemi di bordo della sonda.

La sonda Dawn ha tre strumenti a bordo: due camere di cui una di scorta per ridondanza; uno spettrometro nel visibile e nell'infrarosso e uno spettrometro per raggi gamma e neutroni. La camera (FC) è stata fornita e gestita dal Max Planck Institute for Solar System Studies in Germania. La camera è dotata di una ruota porta filtri per fare misure in sette colori diversi oltre al canale neutro. Le informazioni fornite dalla camera sono state usate per fare mappe della superficie che hanno evidenziato le unità geologiche [37]. Lo spettrometro nel visibile e infrarosso (VIR-MS) è stato fornito dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) e gestito dall'Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF) a Roma. Questo strumento può identificare i minerali sulla superficie dell'oggetto che si sta osservando. Per fare questo costruisce immagini spettrali usando il moto della sonda (modalità spazzolone) e uno specchio interno [38]. Il rivelatore di raggi gamma e neutroni (GRaND) è stato costruito nei laboratori di Los Alamos (USA) ed è stato gestito dal Planetary Science Institute (USA). Questo strumento misura: (1) le abbondanze degli elementi chimici sulla superficie dell'oggetto che si sta osservando misurandone le emissioni di raggi gamma e (2) l'idrogeno misurando i neutroni termici ed epitermici [39].

L'esperimento VIR-MS

La spettroscopia in riflettanza nel visibile e nel vicino infrarosso è la tecnica principale per la caratterizzazione dei minerali presenti sulla superficie di oggetti privi di atmosfera come Vesta e Ceres. La natura dei composti solidi degli asteroidi come ad esempio silicati, ossidi, sostanze organiche e ghiacci possono essere identificati tramite l'uso della spettroscopia nel visibile e nel vicino infrarosso. Combinando poi questa tecnica con la possibilità di creare immagini spettrali permette di studiare la distribuzione dei composti e di generare vere e proprie mappe. La risoluzione spettrale e spaziale combinate, infatti, permettono di legare in modo disambiguo l'informazione sulla composizione con le caratteristiche morfologiche della superficie.

L'esperimento VIR-MS (acronimo di Visible and Infrared Mapping Spectrometer) a bordo

The Dawn spacecraft has three instruments on board: a pair of Framing Cameras (one for redundancy); a visible and infrared spectrometer; and a gamma ray and neutron spectrometer. In addition, the radio system was used for gravimetric tracking. The framing camera (FC) has been provided and operated by the Max Planck Institute for Solar System Studies in Germany. The camera has a filter wheel with seven color bands and one clear filter used to provide images in different wavelength ranges that revealed color variations that were used to map the geologic units [37]. The visible and IR mapping spectrometer (VIR-MS) has been provided by the Italian Space Agency (ASI) and operated by the Italian National Institute for Astrophysics (INAF) in Rome. This instrument can identify minerals on the surface of the target objects and to do so builds up spectral images using the motion of the spacecraft (pushbroom mode) and an internal scan mirror [38]. The gamma ray and neutron detector (GRaND) was developed by Los Alamos National Laboratory (USA) and operated by the Planetary Science Institute (USA). This instrument measures elemental abundances of material in the top meter of the soil by their gamma ray emissions, and hydrogen by detecting thermal and epithermal neutrons [39].

The VIR-MS experiment

Visible and near-IR reflectance spectroscopy is the principal technique for the characterization of the minerals present on the surface of air-less objects such as Vesta and Ceres. The nature of the solid compounds of the asteroids such as silicates, oxides, organics, and ices can be identified by visual and infrared spectroscopy using high spatial resolution imaging to map the heterogeneity on the surface and high spectral resolution spectroscopy to determine its composition. Simultaneous spectral and spatial resolution is needed to unambiguously link the information on the composition with the morphologic features on the surface.

The VIR-MS (Visible and Infrared Mapping Spectrometer) experiment aboard the Dawn space-

della sonda Dawn è uno spettrometro ad immagini molto sofisticato progettato specificamente per identificare i minerali presenti sulla superficie di Vesta e di Cerere. Il disegno di VIR-MS è stato derivato da quello dell'esperimento VIRTIS-M a bordo delle sonde Rosetta e Venus Express [40, 41] entrambe sviluppate dall'agenzia spaziale europea (ESA). Il disegno ottico di tutti questi strumenti è basato su quello di VIMS-V, un esperimento che ha volato a bordo della sonda NASA Cassini. VIR-MS è sensibile a fotoni nell'intervallo spettrale dal vicino UV ($0.25 \mu\text{m}$) fino al vicino IR ($5 \mu\text{m}$) e permette di combinare capacità spettrali e di *imaging*. Queste caratteristiche lo rendono uno strumento ideale per determinare la composizione globale della superficie di piccoli oggetti del sistema solare senza atmosfera.

Lo strumento VIR-MS consiste di un gruppo ottico sistemato in una struttura termomeccanica, una elettronica principale e una elettronica di prossimità. Il gruppo ottico, formato da un telescopio Shafer e un *relais* Offner, è unico mentre poco prima di raggiungere il *detector* la luce si separa in due canali: il canale VIS opera nell'intervallo spettrale tra $0.25\text{--}1.05 \mu\text{m}$ mentre il canale infrarosso opera nell'intervallo spettrale tra $1.0\text{--}5.0 \mu\text{m}$. Le buone prestazioni spaziali (IFOV = $250 \mu\text{rad/pixel}$, FOV = $64 \times 64 \text{ mrad}$) e spettrali ($\lambda_{\text{VIS}} = 1.8 \text{ nm/band}$, $\lambda_{\text{IR}} = 9.8 \text{ nm/band}$) permettono l'identificazione e la mappatura delle unità composizionali sulla superficie dell'oggetto che si sta osservando.

Le immagini sono acquisite usando uno specchio di scansione interno o usando il movimento della sonda rispetto alla superficie dell'oggetto che si sta osservando: la scena bidimensionale si ricostruisce acquisendo una linea alla volta attraverso la fenditura d'entrata dello spettrometro. Ogni linea è costruita da diversi pixel, ognuno ha uno spettro nell'intervallo spettrale tra $0.25 \mu\text{m}$ e $5.1 \mu\text{m}$. L'insieme di immagini adiacenti è quindi salvato in forma di cubo in cui due dimensioni sono spaziali e una spettrale. Per ciascun pixel spaziale del cubo di dati, quindi, è possibile visualizzare uno spettro cioè l'intensità della luce come una funzione della lunghezza d'onda. Allo stesso tempo, è possibile estrarre immagini monocromatiche dell'intera scena per ogni singola lunghezza d'onda. Ogni pixel rappresenta la radianza misurata ad un punto del terreno; parte

craft is an advanced imaging spectrometer specifically designed to measure the mineralogical composition of Vesta and Ceres. The VIR-MS experiment is derived from VIRTIS-M aboard Rosetta and Venus Express [40, 41]; all these instruments are based on the optical layout of the Cassini / VIMS-V. VIR-MS is sensitive to photons in the spectral range from the near UV ($0.25 \mu\text{m}$) through the near IR ($5 \mu\text{m}$) and couples high spectral resolution and imaging capabilities. These characteristics make it an ideal instrument for determining the global surface composition of air-less small bodies.

The instrument consists of an optical head, housed in a thermomechanical structure, a proximity electronics box and a main electronic box. VIR shares a Shafer telescope and an Offner relay between two spectral channels: the VIS channel operates in the $0.25\text{--}1.05 \mu\text{m}$ range while the IR between $1.0\text{--}5.0 \mu\text{m}$. The high spatial (IFOV = $250 \mu\text{rad/pixel}$, FOV = $64 \times 64 \text{ mrad}$) and spectral ($\lambda_{\text{VIS}} = 1.8 \text{ nm/band}$, $\lambda_{\text{IR}} = 9.8 \text{ nm/band}$) performances allow for the identification and mapping of the compositional units of the surfaces.

Images are acquired using an internal scanning mirror or using the S/C movement with respect to the body surface: the scene is scanned one line at a time through the entrance slit of the spectrometer. Each line is made up of several pixels, each having a spectrum in the overall $0.25\text{--}5.1 \mu\text{m}$ range. The set of adjacent images is then stacked to form a cube. Thus, it is possible to extract a spectrum from each pixel in the data cube, showing the intensity of light as a function of the wavelength for that specific pixel. At the same time, it is possible to extract monochromatic images of the entire scene for a specific wavelength. Each pixel represents the radiance measured at a location on the ground; part of the radiance is reflected sunlight, but at longer wavelengths, it also includes thermally emitted radiance and not only reflected light.

della radianza è luce solare riflessa, ma a lunghezze d'onda maggiori, include anche radianza termicamente emessa e non solo luce riflessa.

Una volta trasmessi sulla Terra, i dati sono stati calibrati e processati prima di analizzarli per ottenere informazioni sulla mineralogia. Gli spettri di Vesta e Ceres hanno un contributo dall'emissione termica dell'oggetto oltre circa $3 \mu\text{m}$ dipendendo dalla temperatura di corpo nero di ogni oggetto. Quindi, è stato implementato un algoritmo per rimuovere l'emissione termica. Questo è fatto modellizzando la radianza totale come somma della radianza solare riflessa dalla superficie e l'emissione termica della superficie stessa, e quindi sottraendo la seconda [42].

Nel prossimo paragrafo esamineremo alcune delle maggiori scoperte di Dawn su Vesta e Ceres con un'attenzione particolare sui risultati ottenuti da VIR-MS, lo strumento finanziato dall'ASI.

Le importanti scoperte di Dawn

Grazie all'esplorazione spaziale di Vesta (2011-2012) e Ceres (2015-2018) da parte della sonda Dawn, questi due piccoli mondi si sono guadagnati un posto tra gli oggetti più rilevanti del Sistema Solare soprattutto rispetto allo studio delle origini dei pianeti. Sono infatti emersi dettagli inimmaginabili sulle grandi collisioni che hanno scolpito la superficie di Vesta e contestualmente hanno liberato notevoli quantità di materiale all'interno della Fascia Principale diventando probabilmente la fonte di una importante famiglia di meteoriti recuperate sulla Terra. La complessa geologia di Ceres, d'altra parte, può competere con quella della Tessa e di Marte.

Dawn a Vesta

Quando Dawn è arrivata a Vesta, quest'ultima era considerata un protopianeta, un residuo dell'inizio della formazione del Sistema Solare. Era anche considerata la sorgente di meteoriti HED. Quando i dati spettroscopici di Vesta, immagini a colore, e dati gravitazionali sono arrivati alla Terra, è stato confermato che Vesta può essere considerata un quasi-pianeta.

Uno di principali motivi per cui Vesta è stata considerata una perfetta candidata per una missione spaziale nella fascia principale degli asteroidi è il legame con un gruppo specifico di

Once transmitted to Earth, the data were calibrated and processed to analyze them in terms of overall mineralogy. The spectra of both Vesta and Ceres have a contribution from the object thermal emission beyond roughly $3 \mu\text{m}$ depending on the black body temperature of each object. Therefore, it has been implemented a specific algorithm to remove the thermal emission. This is made by modeling the total radiance as the sum of the solar radiance reflected by the surface and the thermal emission of the surface itself, and then performing the removal of the latter [42].

In the next paragraph we review some of the major findings of Dawn at Vesta and Ceres with a specific focus on the results by the VIR-MS, the instrument provided by the Italian Space Agency.

Dawn Outstanding Discoveries

With Dawn exploration of Vesta (2011-2012) and Ceres (2015-2018), these two worlds came into focus. Breathtaking details emerged of how large collisions sculpted Vesta, liberating massive amounts of material in the inner Main Belt and providing the source of an important family of meteorites recovered on Earth. Ceres' complex geology, on the other hand, could rival that of the Earth and Mars.

Dawn at Vesta

When Dawn arrived at Vesta, it was considered to be a proto-planet, a remnant of the very beginning of formation of the Solar System. It was also considered the source of the HED meteorites. When Dawn's spectrometer data, color images, and gravity data arrived at Earth, it was clear that Vesta was indeed planet-like in many ways.

Most of the interest that made Vesta a perfect target candidate for a space mission in the asteroids main belt is its link with a specific group of meteorites, the HED. HEDs are mafic and ultra-

meteoriti, le HED. Le HED sono rocce ignee mafiche e ultramafiche che possono trovarsi anche sotto forma di breccie. Questo gruppo di meteoriti campiona molto bene la crosta di un asteroide differenziato formatosi cioè dal lento raffreddamento di un magma iniziale. Le caratteristiche dei minerali delle HED ci danno quindi informazioni importanti sulla composizione originaria del magma e dei processi che hanno portato alla formazione della crosta dell'asteroide da cui provengono. Si pensa che le eucriti si siano cristallizzate sulla superficie dell'asteroide mentre le diogeniti provengano dagli strati più profondi della crosta. Dopo la formazione della crosta di Vesta, gli impatti hanno scavato le rocce ignee da varie profondità della crosta. Tali frammenti di eucriti e diogeniti si sono poi ri-assemblati producendo delle breccie che prendono il nome di howarditi o eucriti polimitiche a seconda se hanno o meno inglobato frammenti di diogenite oltre a quelli più comuni di eucrite. Analisi spettroscopiche fatte sulla luce proveniente da Vesta condotte già da McCord e i suoi collaboratori [33] hanno evidenziato un forte assorbimento attorno ai $0.9 \mu\text{m}$ che è stato immediatamente attribuito ad una superficie ricca di proxene, quindi rivelando una natura basaltica di Vesta e una possibile relazione con gli HED. Questa possibilità si è rafforzata quando lo studio dei 500 maggiori asteroidi della Fascia Principale [43] ha mostrato che Vesta, e solo Vesta, offre una corrispondenza spettrale con gli HED. Sebbene tuttavia solo Vesta sembrava soddisfare tutti i requisiti per essere il corpo genitore delle HED, all'epoca non era possibile identificare delle orbite di trasferimento che portassero le meteoriti dalla superficie di Vesta fino alla Terra. Queste difficoltà sono state superate con la scoperta di numerosi asteroidi aventi un diametro di $< 10 \text{ km}$ chiamati **Vestoidi**, che sono dinamicamente legati a Vesta e che hanno spettri simili a quelli di Vesta e delle HED citebin93,vil00,bur01. Le orbite dei Vestoidi si trovano vicino a delle risonanze dinamiche che agiscono come vie di fuga per piccoli corpi della Fascia Principale e permettendogli di raggiungere la parte interna del sistema solare. Questa ipotesi è stata ulteriormente rafforzata quando il telescopio spaziale Hubble ha scoperto [32] un enorme cratere nell'emisfero sud di Vesta che davvero rappresenta l'ultimo tassello nel *puzzle*.

mafic igneous rocks and impact breccias derived from them. This set of meteorites provide the best sampling available for any differentiated asteroid since the minerals that crystallized from magmas provide insights into the compositions of the melts and the processes that attended their solidification to form the crust of the parent body. The eucrites are believed to have crystallized as lavas on the asteroid's surface or within relatively shallow-level dikes and plutons. The diogenites are coarse-grained cumulates that are traditionally believed to have originated from a plutonic layer deep in the crust. Following the formation of Vesta's igneous crust, impacts excavated igneous rocks from various crustal levels. Impact mixing of eucritic and diogenitic lithologies has produced a range of polymict breccias, including the polymict eucrites and the howardites. Early spectroscopic investigation of Vesta by McCord et al. [33] showed a strong absorption feature near $0.9 \mu\text{m}$ that was immediately recognized as being due to a pyroxene-rich surface, thus revealing the basaltic nature of Vesta and a possible relationship to HEDs. A spectroscopic survey of the 500 largest asteroids [43] showed that Vesta, and only Vesta, provided a spectral match to HEDs in the Main Belt. Therefore, only Vesta satisfied all the requirements as the HED parent body, even if at that time it couldn't be explained how to transfer debris from Vesta into Jovian and secular resonances and thence into Earth-crossing orbits. These difficulties have been overcome by the discovery of numerous $< 10 \text{ km}$ Vesta family asteroids (**Vestoids**, which are dynamically linked to Vesta) having spectra similar to HEDs [44, 45, 46]. The orbits of Vestoids extend between that of Vesta and both the 3:1 Jovian and ν_6 resonances, which can act as escape hatches for samples from the Main Belt and allow trajectories into the inner solar system. To further consolidate this hypothesis, the Hubble Space Telescope discovered [32] a large basin in the southern hemisphere of Vesta providing the last missing piece in the puzzle. The impact that created the basin, indeed, excavated a volume which exceeds the sum of all Vestoids by about two orders of magnitude. In this scenario, most HEDs were excavated and launched from the impact basin. With the diverse geochemistry of iron meteorites demonstrating many dozens of exam-

Si pensa infatti che l'impatto che ha creato questo cratere, ha anche creato i Vestoidi che sono i frammenti pi grandi della superficie di Vesta che hanno raggiunto lo spazio mentre la maggior parte degli HED sono i frammenti più piccoli.

Le immagini di Dawn ci hanno mostrato una superficie piena di crateri (si veda [48] e Fig. 3). L'enorme cratere visibile nell'emisfero sud anche nei dati disponibili prima di a Dawn è risultato essere una combinazione di due bacini. Veneneia, di 400 km di diametro, si è formato circa due miliardi di anni fa, Rheasilvia che si sovrappone a Veneneia con un diametro di 500 km, si è formato circa un miliardo di anni fa [49]. Un enorme picco centrale emerge per circa 25 km dal fondo del cratere ed è talmente alto la sola montagna più alta conosciuta nel Sistema Solare è il monte Olympus su Marte. La propagazione dell'energia liberata durante queste due collisioni hanno prodotto delle complesse strutture di compressione/depressione della crosta, le fosse Divalia e Saturnalia, che si sviluppano in due piani distinti ortogonali ai due impatti [50]. Queste osservazioni sostengono fortemente l'idea che Vesta sia un sopravvissuto dei primi giorni del Sistema Solare.

I modelli di formazione dei due enormi crateri di impatto di Vesta indicano una profondità di scavo di 60–100 km [51]. Questa profondità è molto più profonda di quello che si pensa sia lo spessore della crosta e, precedentemente all'arrivo di Dawn su Vesta, ci si aspettava che in prossimità dei bacini ci sarebbero state mineralogie indicative degli strati più profondi della crosta, ad esempio l-olivina. Tuttavia, lo spettrometro VIR non ha trovato abbondanza di olivina in questa zona [52], in parte perchè è difficile da vedere negli spettri quando è associata ai minerali di Vesta come i pirosseni ma concentrazioni importanti <30% si sarebbero viste [53]. Infatti l'olivina è stata identificata nell'emisfero nord [54] e Ruesch e collaboratori [55] hanno trovato una fascia della superficie ricca di olivina che si estenda da Rheasilvia verso nord. Tuttavia l'identificazione di olivina negli spettri di VIR

of differentiated asteroids, it is perhaps not surprising that a few other basaltic achondrite examples have been found in different parts of the Main Belt. Dawn's VIR-MS measurements of Vesta [47] confirm its long-established overlap with the spectral signatures of HEDs, centered on howardites.

Images from Dawn revealed an heavily cratered surface (see [48] and Fig. 3), and the basin visible in the southern hemisphere even in the pre-Dawn data, turned out to be a combination of two basins. The 400-km-diameter Veneneia was formed about two billion years ago, and the overlapping 500-km-diameter Rheasilvia was formed about one billion years ago [49]. A large central peak rises to about 25 km above the crater floor. The only known higher mountain in the Solar System is Olympus Mons on Mars. The propagation of the energy from the collisions that created the large southern basins produced more than 90 troughs, the Divalia and Saturnalia Fossae, in two distinct planes orthogonal to the two major impacts [50]. These observations strongly supports the idea that Vesta is a survivor from the earliest days of the Solar System.

Models of the formation of Vesta's huge overlapping impact basins indicate excavation to depths of 60-100 km [51]. This is much deeper than the crustal thickness, and, prior to Dawn's arrival at Vesta, it was expected that significant amount of olivine from the mantel would be exposed in deep basins. However, VIR spectra of Rheasilvia curiously revealed little or no olivine [52], although it is challenging to recognize <30% olivine in the presence of pyroxene in diogenite spectra [53]. Olivine has been identified spectrally elsewhere on Vesta. Ammannito et al. [54] reported some olivine occurrences in the northern hemisphere, and Ruesch et al. [55] mapped a swath of olivine extending from Rheasilvia northward. However, the interpretation of olivine from VIR spectra is ambiguous and still debated, as other interpretations exist. There is clearly a dearth of olivine in

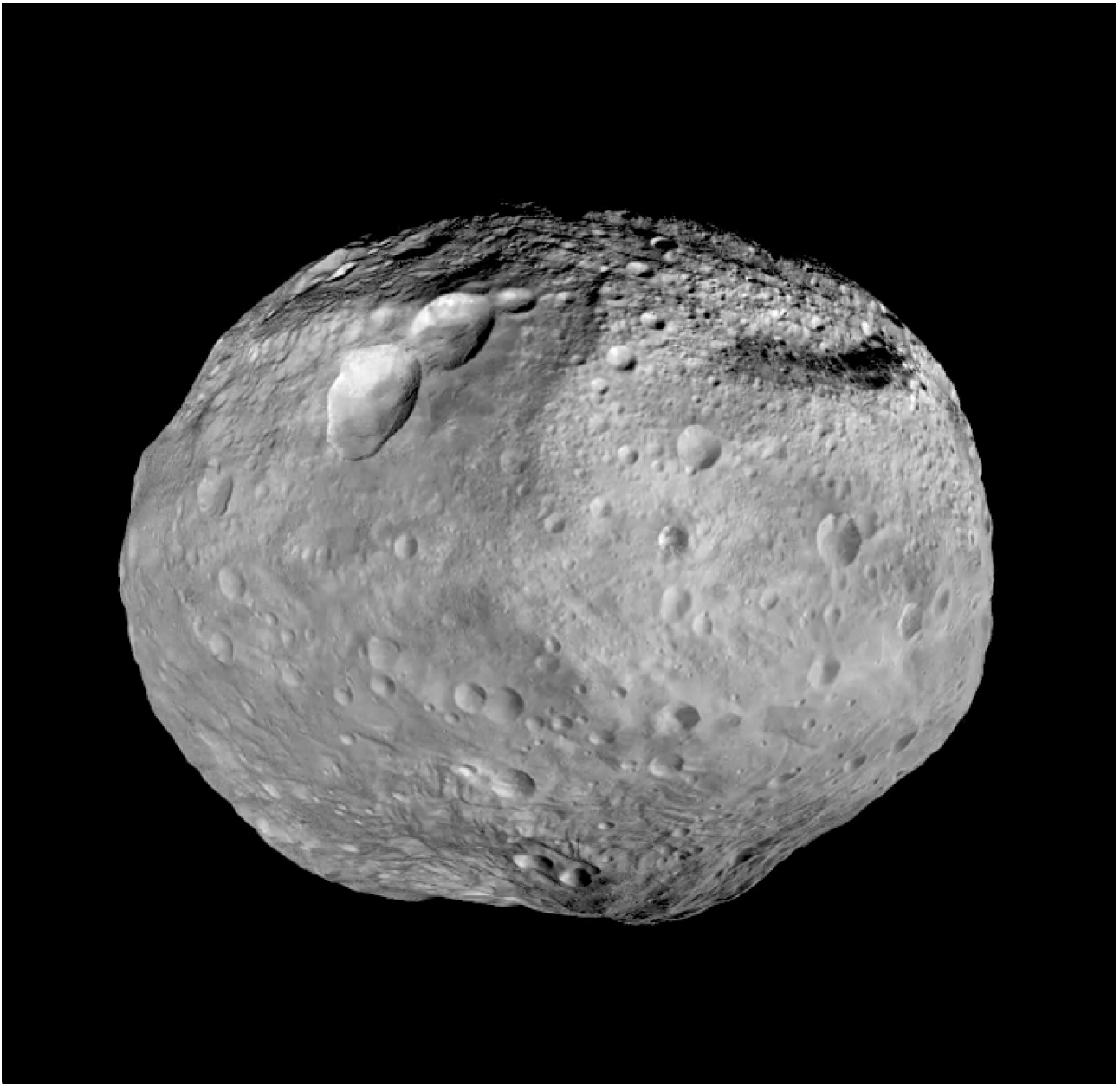


Figura 3: Visione globale di Vesta rilevata dall'astronave Dawn durante il passaggio nel 2012. Immagine da: NASA/JPL-Caltech/UCAL/MPS/DLR/IDA.

Global view of Vesta imaged by the Dawn spacecraft during departure in 2012. Image credit: NASA/JPL-Caltech/UCAL/MPS/DLR/IDA.

è ambigua e ancora dibattuta, dato che esistono altre interpretazioni. C'è ad esempio scarsità di olivina in quella che dovrebbe essere la regione scavata più in profondità cioè i bacini dell'emisfero sud ma c'è poca olivina anche nei vestoidi espulsi da Vesta.

Un'altra scoperta inaspettata di Dawn è l'identificazione di significativa quantità di materiale contenente idrogeno nella regione più scura di Vesta. Lo strumento GRaND ha mappato idrogeno (come equivalente di acqua) usando l'assorbi-

Vesta's deeply excavated surface and ejecta.

Another unexpected findings by Dawn was the discovery of significant hydrogen-bearing materials in a low-albedo region on Vesta. GRaND mapped hydrogen (as water equivalents) by neutron absorption [56], and VIR provided

mento di neutroni [56], e VIR ha fornito un'analogia distribuzione di OH basata sull'assorbimento della banda di 2.8 μm [57, 58]. Il materiale contenente idrogeno, che si trova vicino alla regione equatoriale, è stato interpretato come il deposito da parte di impatti di materiale simile a quello che compone le condriti carbonacee, una classe di meteoriti formate dal materiale più antico del Sistema Solare. Il trasporto di questo materiale è probabilmente è avvenuto ai tempi dell'impatto che ha creato il bacino Veneneia anche se parte di questo materiale scuro su Vesta potrebbe essere della polvere proveniente dallo spazio e raccolta in tempi successivi [58].

Inoltre, lo studio del campo gravitazionale di Vesta ha mostrato una struttura interna consistente con un nucleo di ferro, come previsto dai modelli di evoluzione geochimica delle meteoriti HED [59]. Il raggio del nucleo è di 110 ± 3 km se si assume una densità di $7100\text{--}7800$ kg/m^3 (valore preso da quello delle meteoriti di ferro) anche se un nucleo ricco di zolfo avrebbe una densità inferiore e un raggio maggiore. La stima della massa del nucleo implica una densità media della frazione dei silicati di Vesta (mantello + crosta) di 3100 kg/m^3 . Questo valore è basso rispetto alla densità combinata delle meteoriti HED e dell'olivina. Quindi, lo strato mantello + crosta deve avere porosità dell'ordine del 10% [60]. Il campo gravitazionale misurato da Dawn contiene delle anomalie rispetto a quello che ci si aspetterebbe per una struttura della forma di Vesta e con densità omogenea. Si conferma quindi l'esistenza di 'strati': una crosta spessa circa 22 km, con una densità di 2970 kg/m^3 [61]. La densità calcolata è maggiore di quella delle sole eucriti si pensa, quindi, che la crosta sia una mistura di eucriti (2800 kg/m^3) e diogeniti ($3,050$ kg/m^3). Per il mantello si trova una densità più bassa di quella dell'olivina ($3,300$ kg/m^3). Come per le anomalie gravitazionali, zone della crosta con valori di densità più bassa si trovano in corrispondenza dei grandi bacini da impatto dell'emisfero sud e nelle depressioni del nord, cioè, in regioni fortemente affette da crateri da impatto e fratture. Al contrario, nelle zone della crosta con valori di densità più alta si pensa che ci siano rilevanti quantità di materiale del mantello che risalendo dal basso si sia poi incastrato nella crosta (plutoni) [60].

an analogous distribution of OH based on the 2.8 μm absorption band [57, 58]. The hydrogen-bearing material, occurring near the equatorial eucrite region, has been interpreted to be exogenic carbonaceous chondrite delivered by impact. Delivery of this material was tentatively identified with formation of the Veneneia basin, although some dark material might be exogenic dust [58].

Furthermore, Dawn's gravity data showed an internal structure consistent with an iron core, as predicted by HED geochemical evolution models [59]. The core radius is 110 ± 3 km for an assumed density of $7,100\text{--}7,800$ kg/m^3 (as in iron meteorites) although a sulfur-rich core would have lower density and a larger size. The estimated core mass implies an average density for Vesta's silicate fraction (mantle + crust) of $3,100$ kg/m^3 . This value is low relative to grain densities for mixtures of eucrite, diogenite, and olivine, implying that the mantle + crust layer must have porosity on the order of 10% [60]. The gravity field mapped by Dawn contains anomalies relative to the field calculated assuming a homogeneous density structure and using Vesta's shape model. The internal structure has been estimated as well: data from Dawn are compatible with a crust that is 22.4 km thick, with a density of $2,970$ kg/m^3 [61]. Such a crust is denser than eucrites and suggests a mixture of eucrite ($2,800$ kg/m^3) and diogenite ($3,050$ kg/m^3). The derived mantle density of $3,160$ kg/m^3 is low, considering that it should contain appreciable olivine ($3,300$ kg/m^3). As for the anomalies in the gravity field, low-density anomalies occur in association with large impact basins and the northern troughs, that is, regions affected by impact excavation and fracturing. While high-density anomalies are interpreted to reflect plutons of ultramafic composition emplaced within the crust [60].

Nell'insieme, questi risultati confermano che Vesta ha sperimentato una fase iniziale nella quale il materiale che la compone era completamente fuso. Questo fatto implica che la differenziazione sia una storia comune per i grandi planetesimi, i progenitori dei pianeti terrestri. Per ottenere questa fase iniziale con completa fusione del materiale è importante che i planetesimi si formino prima che gli elementi radioattivi a breve vita, che sono quelli che producono calore, decadano. Il processo di formazione planetaria, quindi, è iniziato nelle primissime fasi del Sistema Solare

Dawn a Ceres

Con una densità media di 2100 kg/m^3 , anche prima di Dawn, si sapeva che Ceres fosse più ricco di elementi volatili, ad esempio l'acqua, rispetto a Vesta. In effetti, le osservazioni di Dawn hanno mostrato che ghiaccio di acqua si trova anche in superficie in corrispondenza di alcuni crateri come ad esempio Oxo [57]. Tuttavia, il ghiaccio di acqua sublima velocemente alle temperature tipiche della superficie di Cerere. Per questa ragione, il ghiaccio trovato in superficie deve essere geologicamente molto recente. Una stima esatta è difficile perchè dipende dalla quantità di ghiaccio esposta, dalla latitudine e dalla geometria dell'illuminazione. Nel caso di Oxo si può ipotizzare non più di qualche decina di migliaia di anni. Un altro esempio è il cratere Juling dove la variabilità nel quantitativo di ghiaccio esposto è stata misurata da VIR [42] quindi è apprezzabile nel tempo scala di un anno. La maggior parte del ghiaccio è stato trovato alle alte latitudini quindi in regioni con un basso livello di illuminazione solare oppure in aree che hanno avuto recenti frantumazioni e rimescolazioni della superficie. Queste osservazioni, insieme alle misure di GRAND [62], suggeriscono la presenza di grandi quantità di ghiaccio di acqua appena sotto la superficie che può essere portata in superficie da eventi come ad esempio gli impatti. Questo è consistente con l'identificazione di ghiaccio di acqua intrappolata nelle zone permanentemente in ombra dell'emisfero nord di Ceres [63] poichè le molecole di acqua che sublimano dalla superficie possono venire intrappolate in queste aree più fredde [66]. Questo tipo di meccanismi potrebbero anche spiegare le osservazioni

Together, these results confirm that Vesta experienced pervasive, perhaps even global, melting, implying that differentiation may be a common history for large planetesimals that condensed before short-lived heat-producing radioactive elements had decayed away.

Dawn at Ceres

With a bulk density of about $2,100 \text{ kg/m}^3$, even before Dawn, Ceres was expected to be a more volatile-rich body than Vesta. Indeed, Dawn's observations showed that water ice is also exposed on the surface in few locations such as Oxo crater [57]. However, water ice quickly sublimates at Ceres' surface temperatures. For this reason, ice exposures must be geologically very young, perhaps 10–1000 s of years, depending on the amount exposed and latitude and illumination geometry. Indeed, the water ice exposed on the surface at Juling crater has short scale variability that could be detected by the VIR instrument [42]. Most of the ice patches found so far are located at higher latitudes, in regions that experience low levels of solar illumination, and in areas that appear to have had recent surface disruptions. These observations along with GRAND measurements [62] point to abundant water ice just below the surface that can be exposed by events such as impacts. This is also consistent with the reports of water ice trapped in permanently shadowed regions of Ceres' northern hemisphere [63], suggesting that water molecules volatilized from the surface, including perhaps by solar wind ion sputtering [64] and impacts [65], can be trapped in these colder areas [66]. This process also could explain the pre-Dawn telescope observations of temporal OH and H₂O outgassing [36, 67].

da telescopio pre-Dawn di emissione di gas OH e H₂O.

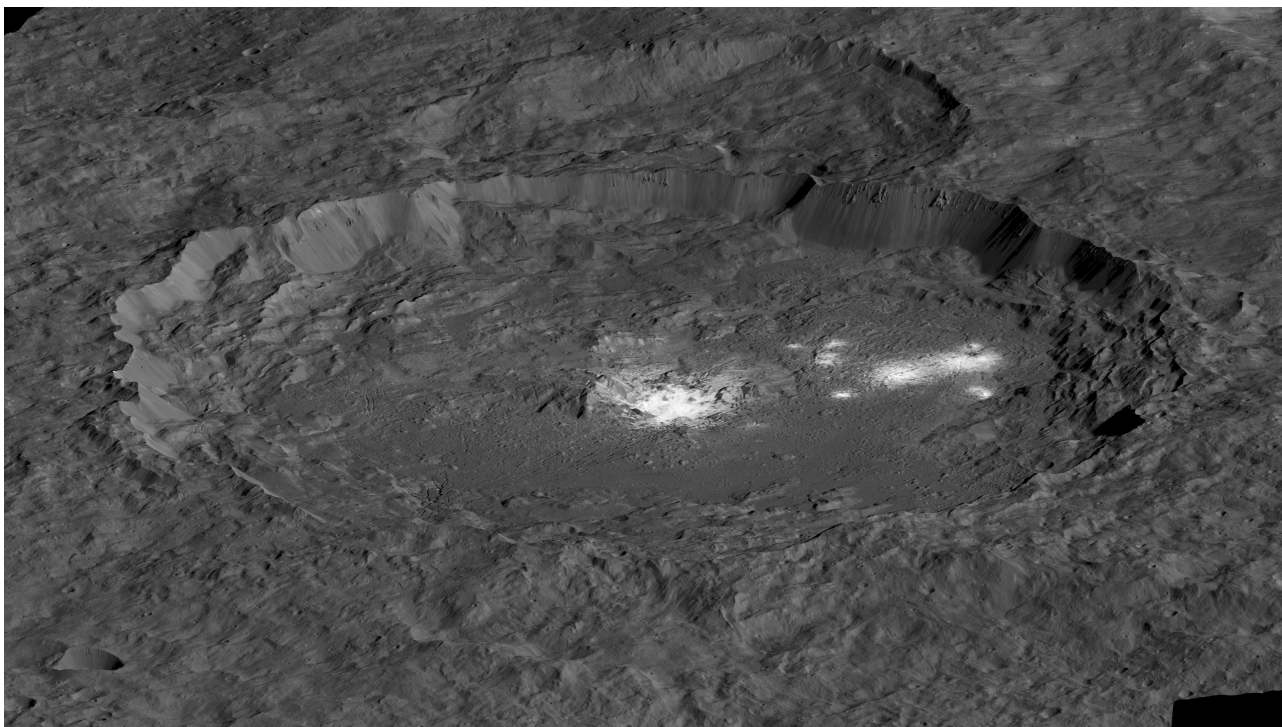


Figura 4: Una immagine del cratere Occator proiettata su un terreno digitale che dà una prospettiva in 3D della struttura dell’impatto. Si vedono molte aree chiare nel cratere. La parte interna del cratere forma un tipo di cratere nel cratere che misura circa 10 km di diametro e 0.5 km in profondità, e contiene il materiale più chiaro di tutta Ceres. Occator ha un’ampiezza di 90 km. Immagine di: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA.

An image of Occator Crater draped over a digital terrain model provides a 3-D-like perspective view of the impact structure. Several bright areas can be seen in this crater. The inner part of the crater forms a type of crater within a crater measuring about 10 km in diameter and 0.5 km in depth, and contains the brightest material on all of Ceres. Occator measures about 90 km wide. Image Credit: NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA.

Infatti, Le misure di Dawn hanno mostrato che la composizione media di Ceres sembra essere un assemblaggio di fillosilicati arricchiti di ammonio (come serpentino e smectite) e carbonati ([68]) che è una composizione indicativa di una superficie pesantemente alterata dal contatto con l’acqua. Queste misure sono in accordo con le osservazioni telescopiche fatte prima di quelle di Dawn. La conferma di di fasi che portano la presenza dell’ammonio su Ceres è significativa perché implica la disponibilità di ammoniaca durante l’evoluzione del pianeta nano. L’ammoniacca è probabilmente derivata da ghiacci che oggi sono stabili solo nella parte esterna del sistema solare quindi ben oltre l’orbita di Cerere. Quindi,

Indeed, Ceres’ average surface composition as mapped by Dawn appears to be an assemblage of Mg- and ammoniated (NH₄)-phyllosilicates (such as serpentines and smectites) and carbonates (e.g., [68]) which means a surface heavily aqueously altered, in general agreement with the pre-Dawn telescopic global observations. The confirmation of NH₄ bearing phases on Ceres is significant because it implies the availability of ammonia during its evolution and ammonia is most likely derived from ices stable today only in the outer solar system. Thus, the discovery of ammoniated species on Ceres and deciphering their origins is key to understanding Ceres’ history including accretion, differentiation, and its

la scoperta di specie ammoniate su Ceres e lo studio della loro origine è la chiave per capire la storia evolutiva di Cerere. Più in generale, comprendere i meccanismi che hanno arricchito la superficie di Ceres di ammonio fornisce importanti informazioni sulla distribuzione dell'acqua nelle varie fasi evolutive del Sistema Solare così come sull'origine e sulla storia dinamica della Fascia Principale degli asteroidi. Per giustificare il basso albedo di Cerere, in aggiunta a quelli elencati precedentemente, ci deve essere qualche materiale scuro non ancora identificato come ad esempio la grafite, la magnetite o i solfiti Fe-Ni. In base alle informazioni ricavate dalle misure di VIR, i fillosilicati si trovano ovunque sulla superficie di Cerere e hanno una composizione chimica uniforme su scala globale anche se localmente la loro abbondanza relativa può cambiare [69]. Queste proprietà suggeriscono che durante l'evoluzione di Cerere sono avvenuti processi attivi su scala globale o che comunque ne hanno omogeneizzato la composizione. Tuttavia, ci sono alcune deviazioni da questa caratteristica generale che suggeriscono una eterogeneità della sottosuperficie. Oltre ai fillosilicati, anche il carbonato, sotto forma di magnesite, è presente ovunque sulla superficie di Cerere. Tuttavia, in corrispondenza delle zone chiare è stato identificato un diverso tipo di carbonato, la natrite (Na_2CO_3) che è stato interpretato come una evaporazione di brine recentemente esposte [68]. I depositi più abbondanti nelle Faculae di Cerealia and Vinalia nel cratere Occator e nei crateri Haulani e Oxo sono principalmente carbonati di sodio, mentre la maggior parte delle altre regioni chiare sono prevalentemente carbonati di sodio e calcio, suggerendo una origine da regimi chimici diversi.

Un risultato che non ci si aspettava è l'identificazione di materiale organico alifatico vicino al cratere Ernutet [70]. Ancora non è chiaro se questo materiale sia endogeno di Cerere o se sia invece arrivato in seguito ad un impatto, ci sono validi argomenti a favore di entrambe le possibilità. In ogni caso, questo materiale si trova solo in una regione molto limitata su Cerere e rimane un vero enigma. Ad oggi non possiamo escludere che il materiale organico, anche in altre forme rispetto a quella identificata, si trovi anche in altre zone vista la difficoltà per uno

dinamica history. More broadly, understanding the processes that led to the presence of ammonium on Ceres provides important information on the aqueous environments in the early solar system and the origins and dynamical histories of the large outer Main Belt asteroids. To match the low albedo, there must be some unidentified absorbing dark materials such as graphite, magnetite, and Fe-Ni sulfides. According to VIR mapping efforts, the Mg- and ammoniated (NH_4)-phyllosilicates have a uniform chemical composition at global scale and are ubiquitous [69] although locally their relative abundance can vary. These properties suggest homogenizing global and extensive alteration processes operating in the presence of H_2O during Ceres' evolution. However, surface composition does vary in places in association with crust disruptions, suggesting subsurface heterogeneity, such as from material upwelling and impacts. Carbonates, specifically magnesite, have been found in association with phyllosilicates on a global scale. However, Na-carbonate (natrite - Na_2CO_3) was identified in the high albedo areas on Ceres' surface and was interpreted as an evaporite from recently exposed brines [68]. The most abundant deposits in the Cerealia and Vinalia Faculae in Occator crater and at Haulani and Oxo craters are primarily sodium carbonates, whereas most other bright regions are mostly magnesium and calcium carbonates, suggesting sourcing from different chemical regimes.

Surprisingly, aliphatic organic matter was reported near Ernutet crater [70]. There is uncertainty as to whether this material is endogenic or from infall, as there are arguments for both possibilities. In any case, this material has limited exposures on Ceres and remains an enigma. Organic compounds may be widespread on the global subsurface outside of Ernutet, given the low sensitivity of Dawn instruments to this compounds.

strumento come VIR di fare identificazioni per concentrazioni molto basse.

Il campo gravitazionale è consistente con una compensazione idrostatica delle concentrazioni di massa della crosta (modello di Airy). Rispetto ad una ideale idrostaticità è stata rilevata una deviazione di circa il 3% [73] probabilmente è dovuta al fatto che in seguito ad un impatto, la velocità di rotazione è più bassa di quanto non fosse in passato [74]. La crosta ha uno spessore compreso tra 27 e 43 km [71, 72] mentre la densità sembra essere compresa tra 1200 e 1600 kg/m³ (da confrontare con la densità media globale di circa 2000 kg/m³). Le anomalie gravitazionali misurate sono compatibili con la presenza di eccessi locali di materiale meno denso rispetto alla media di Ceres [71, 75, 76]. Queste scoperte suggeriscono l'esistenza di grandi riserve di brina sotto la crosta di Ceres e di altre eterogeneità nel mantello più profondo. La brina sottosuperficiale può essere stata mobilizzata dal rilascio di energia avvenuto durante gli impatti [75]. In questo scenario, strutture tettoniche pre-esistenti potrebbero essere state usate come canali dalle brine presenti in profondità per migrare attraverso la crosta verso la superficie. Il volume di crosta influenzato dagli impatti sarebbe quindi più esteso in profondità di quanto si pensasse e gli impatti stessi sarebbero uno dei meccanismi per la creazione di eterogeneità nella densità e nella composizione dell'intera zona dell'impatto. Raymond et al. [75] hanno fatto dei modelli di impatto considerando anche l'evoluzione termica della materiale fuso e hanno trovato che gli impatti possono fluidificare la crosta in una colonna di circa 20 km di diametro che in alcuni casi potrebbe essere termicamente collegata con lo strato di brina fino ad una profondità di ~30 km. A supporto di tutto ciò, in prossimità delle faculae di Occator, che sono probabilmente l'estremità in superficie di una di questi condotti di risalita, è stata identificata la presenza di hydrohalite [77], un minerale che, essendo instabile nelle condizioni della superficie di Ceres, fa pensare che la riserva di di brina di Ceres sia ancora attiva.

The gravity field is found to be mostly consistent with Airy isostatic compensation (crust-mantle adjustments for surface feature mass imbalances) and the crustal density is reported to be between 1,200 and 1,600 kg/m³ (compared to a global bulk density of about 2000 kg/m³) and the crustal thickness between 27 and 43 km [71, 72]. The small 3% deviation from perfect hydrostaticity [73] may be explained by a slightly higher spin rate in the past, perhaps altered by large impacts [74]. According to the Dawn measurements, the interior appears to be heterogeneous as indicated by local excess of material less dense than the average Ceres in the form of negative gravity anomalies [71, 75, 76]. This finding led to the suggestion of large brine reservoirs beneath the crust of Ceres and heterogeneity in the deeper mantle. That brine can be mobilized by the heating and deep fracturing produced by crater forming impacts [75]. In this scenario, pre-existing tectonic cracks could have provided pathways for deep brines to migrate within the crust, increasing the area affected by the impact and creating density and compositional heterogeneities beneath the entire region. Raymond et al. [75] modeled the impact and the thermal evolution of the resulting melt to suggest a resulting column of melt roughly 20 km in diameter that could thermally connect with a deep brine layer at a depth of ~35 km. Finally, the detection of hydrohalite [77], an unstable mineral under Ceres' surface conditions, near what could be an active vent at the top of Cerealia Facula suggests Ceres brine network is still active.

Considerazioni conclusive

I risultati scientifici di Dawn nel corso della sua missione a Vesta e Ceres sono stati largamente superiori a quelli attesi in fase di programmazione della missione. Questo è stato ottenuto grazie all'eccezionale manovrabilità della sonda e le dedizioni delle persone che l'hanno gestita. La possibilità di orbitare attorno a due diversi oggetti con una sola missione spaziale ha fornito un enorme ritorno scientifico soprattutto se confrontato con l'investimento iniziale. Con la grande quantità di dati acquisiti per ognuno dei due corpi, Dawn ha spostato Vesta e Ceres dal dominio di studio degli astronomi a quello dei geologi e dei geofisici. Osservazioni telescopiche avevano mostrato differenze tra Vesta e Ceres ma Dawn ha focalizzato ulteriormente queste differenze. In termini più ampi, Vesta è visto come più simile a un pianeta terrestre – un corpo fortemente differenziato che ha sperimentato un passato caldo – piuttosto che uno dei tanti piccoli corpi che formano la Fascia Principale degli asteroidi. Ceres, il più grande corpo celeste ghiacciato che sia mai stato studiato orbitandoci attorno, è stato geologicamente attivo in tempi recenti (e forse lo è tuttora).

Non c'è alcun dubbio che con le capacità tecniche dimostrate da Dawn, e con gli affascinanti risultati ottenuti ad entrambe le due destinazioni, ci siano grandi aspettative per i futuri studi della Fascia Principale. Più esploriamo questa regione del Sistema Solare, più ci rendiamo conto che la parte migliore rimane da immaginare, da esplorare, ed eventualmente da scoprire. Le missioni pianificate, come Lucy della NASA (lanciata il 16 Ottobre 2021) and Psyche (lanciata il primo Agosto 2022) forniranno sicuramente altri elementi di un puzzle in continua evoluzione. Psyche si concentrerà nell'esplorazione di un asteroide metallico (Psyche, appunto) che ad oggi non sono mai stati visitati da una missione spaziale, mentre Lucy studierà gli inesplorati asteroidi Troiani, una classe di oggetti che condivide l'orbita con quella di Giove ma precedono o seguono il pianeta in prossimità di punti di equilibrio gravitazionale del sistema Sole-Giove detti punti lagrangiani. Entrambe le missioni forniranno nuove e dettagliate informazioni sulla formazione del Sistema Solare, come ad esempio

Concluding Remarks

During the course of its mission at Vesta and Ceres, Dawn's scientific return far exceeded the proposed observation program. The exceptional capability of the spacecraft and the operations team made this mission as productive as it was. The capability to orbit two contrasting bodies with a single space mission provided tremendous scientific return in particular when compared to the investment. With the wealth of data acquired at each body, Dawn has shifted Vesta and Ceres from principally residing in the domain of astronomers to that of geologists and geophysicists. Even telescopic observation showed differences between Vesta and Ceres, but Dawn brought those differences into sharper focus. In broad terms, Vesta is now seen in some ways to be more similar to terrestrial planets—strongly differentiated bodies that experienced a hot past—than it is to many of the smaller bodies in the Main asteroid Belt. Ceres, the largest icy body that has been studied from orbit, is now recognized to have been active in geologically very recent times (and perhaps even in the present).

There is no doubt that with the technical capability Dawn demonstrated, and the fascinating results obtained at its two destinations, the future investigation of the Main Belt holds great promise. The more we explore this region of the Solar System, the more we realize that the best part is still left for us to imagine, explore, and eventually discover. Planned missions such as NASA's Lucy (launched on Oct 16th 2021) and Psyche (launched on Aug 1st 2022) will surely provide additional colorful strokes to our ever-evolving portrait of the Main Belt. Psyche will expand Main Belt asteroid exploration to the uncharted territory of metal-rich objects, while Lucy will study unexplored Trojan asteroids, a class of objects orbiting the Sun in Jupiter's stable Lagrangian points. Both missions will provide new detailed information about the formation of the Solar System, including asteroid migration and implantation processes that could have been important for the Main Belt. These missions will hopefully prepare the way for a new generation of bold Main Belt-oriented missions

i processi di migrazione e di spostamento degli asteroidi che possono essere importanti nella Fascia Principale. Queste missioni prepareranno, si spera, la strada per una generazione di importanti missioni orientate allo studio della Fascia Principale non più limitate all'osservazione remota da orbita o durante passaggi ravvicinati ma che potranno campionare le loro superfici con analisi chimiche e mineralogiche *in situ* o addirittura possa riportare questi campioni sulla Terra come JAXA Hayabusa2 Osiris-REX. della NASA.

Uno sguardo al futuro

Grazie ai programmi di esplorazione del Sistema Solare, la scienza planetaria ha avuto un impressionante sviluppo in termini di nuove conoscenze. La cooperazione internazionale ha permesso uno scambio efficace delle competenze scientifiche e tecnologiche all'interno dei *team* delle missioni spaziali, questo è stato di fondamentale importanza per ottenere risultati ambiziosi e per conoscere meglio il mondo in cui viviamo.

Le scoperte di Juno e Dawn hanno fornito importanti informazioni per la nostra comprensione della storia del nostro Sistema Solare e dei meccanismi fisici che interessano le interazioni tra i corpi studiati e l'ambiente che li circonda. Nei prossimi anni, se si continuerà ad investire nell'esplorazione spaziale, i nuovi programmi potrebbero permettere l'esplorazione sempre più dettagliata degli vari oggetti del Sistema Solare offrendo la possibilità ai ricercatori di svolgere le proprie attività in modo fortemente interdisciplinare. Ad esempio, le lune ghiacciate con i loro oceani sotterranei offrono uno degli obiettivi più promettenti per la ricerca di ambienti planetari extraterrestri abitabili nel nostro Sistema Solare. Il Sistema Solare esterno dove risiedono le lune ghiacciate ospita un'incredibile diversità di fenomeni, il cui studio può aiutare a capire i processi planetari fondamentali.

Va sottolineato che un approccio sinergico nella ricerca, basato, per quanto possibile, su metodologie trans-disciplinari, possono risultare di particolare importanza per la scienza spaziale e gli sviluppi dell'esplorazione. In questo contesto, la progettazione di una nuova concezione per le missioni spaziali che consideri nuove, e innovative, strumentazioni è un'importante strada da

which should not be limited to remotely observing asteroids (flybys or rendezvous) but should also sample their surfaces for in-situ chemical and mineralogical analysis or bring those samples back to Earth such as JAXA Hayabusa2 and NASA Osiris-REX.

Looking Ahead

Thanks to the Solar System exploration programs, planetary science has seen a tremendous growth in new knowledge. The international cooperation has allowed an efficient exchange in scientific and technological expertise within space mission teams, that has been of fundamental importance for achieving ambitious goals and getting to know better the world we live in.

The discoveries by Juno and Dawn have provided important information for our understanding of the history of our Solar System and the physical mechanisms resulting from the interactions of the bodies under study and their surrounding environments. In the years to come, if the budget dedicated to the exploration is augmented worldwide, future programs may allow in-depth exploration of a variety of planetary bodies in the Solar System offering the possibility of comparative science at large. For instance, the icy moons with their subsurface oceans offer one of the most promising target for the search of extra-terrestrial habitable environments in our Solar System. The Outer Solar System in which icy moons reside hosts an astonishing diversity of phenomena, illuminating fundamental planetary processes.

It is stressed that a synergetic approach in research, based on trans-disciplinary methodologies, where applicable, may result of particular importance for space science and exploration developments. In this context, the design of new space mission concepts considering new innovative instrumentation is certainly an important pathway.

percorre.

Ringraziamenti

Ringraziamo Alessandro Mura e Maria Cristina De Sanctis, rispettivamente Responsabili Scientifici degli esperimenti Juno/JIRAM e Dawn/VIRMS per averci fornito materiale utile per questo articolo.

Acknowledgements

We would like to thank Alessandro Mura and Maria Cristina De Sanctis, Scientific Responsible respectively for the Juno/JIRAM and Dawn/VIRMS experiments for providing useful material for this article.



- [1] A. Adriani et al.: *JIRAM, the Jovian Infrared Auroral Mapper*, *Space Science Reviews*, 213 (2017) 393. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0094-y>
- [2] A. Mura et al.: *Juno observations of spot structures and a split tail in Io-induced aurorae on Jupiter*, *Science*, 361 (2018) 774.
- [3] A. Adriani et al.: *Clusters of cyclones encircling Jupiter's poles*, *Nature*, 555 (2018) 216. <https://doi.org/10.1038/nature25491>
- [4] A. Mura, et al.: *Oscillations and stability of the Jupiter polar cyclones*, *Geophysical Research Letters*, 48 (2021) e2021GL094235. <https://doi.org/10.1029/2021GL094235>
- [5] J. N. Reinaud: *Three-dimensional quasi-geostrophic vortex equilibria with m-fold symmetry*, *Journal of Fluid Mechanics*, 863 (2019) 32. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.989>
- [6] J. N. Reinaud, D. G. Dritschel: *The stability and nonlinear evolution of quasi-geostrophic toroidal vortices*, *Journal of Fluid Mechanics*, 863 (2019) 60. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.1013>
- [7] C. Li et al.: *The water abundance in Jupiter's equatorial zone*, *Nat. Astron.*, 4 (2020) 609. <https://doi.org/10.1038/s41550-020-1009-3>
- [8] T. Cai, K. L. Chan, H. G. Mayr: *Deep, closely packed, long-lived cyclones on Jupiter's poles*, *The Planetary Science Journal*, 2 (2021) 81. <https://doi.org/10.3847/PSJ/abedbd>
- [9] D. Grassi, D., et al.: *First estimate of wind fields in the Jupiter polar regions from JIRAM-Juno images*, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123 (2018) 1511. <https://doi.org/10.1029/2018JE005555>
- [10] S. J. Bolton et al.: *Jupiter's interior and deep atmosphere: The initial pole-to-pole passes with the Juno spacecraft*, *Science*, 356 (2017) 821.
- [11] C. Li et al.: *The distribution of ammonia on Jupiter from a preliminary inversion of Juno microwave radiometer data*, *Geophysical Research Letters*, 44 (2017) 5317.
- [12] A. P. Ingersoll et al.: *Implications of the ammonia distribution on Jupiter from 1 to 100 bars as measured by the Juno microwave radiometer*, *Geophysical Research Letters*, 44 (2017) 7676.
- [13] G. Grassi et al.: *On the spatial distribution of minor species in Jupiter's troposphere as inferred from Juno JIRAM data*, *JGR-Planets*, (2020) DOI: 10.1029/2019JE006206.
- [14] D. J. Stevenson: *Jupiter's Interior as Revealed by Juno*, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48 (2020) 465.
- [15] S. M. Wahl et al.: *Comparing Jupiter interior structure models to Juno gravity measurements and the role of a dilute core*, *Geophys. Res. Lett.*, 44 (2017) 4649.
- [16] S. F. Liu et al.: *The formation of Jupiter's diluted core by a giant impact*, *Nature*, 572 (2019) 355.
- [17] Y. Alibert et al.: *The formation of Jupiter by hybrid pebble-planetesimal accretion*, *Nature Astronomy*, 2 (2018) 873.
- [18] J. Venturini et al.: *Setting the stage: planet formation and volatile delivery*, *Space Science Reviews*, 216 (2020) 1.
- [19] K. M. Moore et al.: *A complex dynamo inferred from the hemispheric dichotomy of Jupiter's magnetic field*, *Nature*, 561 (2018) 76.
- [20] J. E. P. Connerney et al.: *A New Model of Jupiter's Magnetic Field From Juno's First Nine Orbits*, *Geophysical Research Letters*, 45 (2018) 2590.
- [21] S. Bolton et al.: *Microwave observations reveal the deep extent and structure of Jupiter's atmospheric vortices*, *Science*, 374 (2021) 968.
- [22] M. Parisi et al.: *The depth of Jupiter's Great Red Spot constrained by Juno gravity overflights*, *Science*, 374 (2021) 964.
- [23] M. Desroche et al.: *Conditions at the expanded Jovian magnetopause and implications for the solar wind interaction*, *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 117 (2012) 18.

- [24] A. Masters: *Model-Based Assessments of Magnetic Reconnection and Kelvin- Helmholtz Instability at Jupiter's Magnetopause*, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 122 (2017) 154.
- [25] D. J. Gershman et al.: *Juno observations of large-scale compressions of Jupiter's dawnside magnetopause*, Geophysical Research Letters, 44 (2017) 7559.
- [26] B. H. Mauk et al.: *Discrete and broadband electron acceleration in Jupiter's powerful aurora*, Nature, 549 (2017) 66.
- [27] C. Paranicas et al.: *Io's Effect on Energetic Charged Particles as Seen in Juno Data*, Geophysical Research Letters, 46 (2019) 13615.
- [28] J. R. Szalay et al.: *In Situ Observations Connected to the Io Footprint Tail Aurora*, Journal of Geophysical Research-Planets, 123 (2018) 3061.
- [29] J. R. Szalay et al.: *Proton Acceleration by Io's Alfoenic Interaction*, Journal of Geophysical Research-Space Physics, 125 (2020) 20.
- [30] K.K. Khurana, R.T. Pappalardo, N. Murphy, T. Denk: *The origin of Ganymede's polar caps*, Icarus, 191 (2007) 193. <http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2007.04.022>
- [31] A. Mura et al.: *Infrared observations of ganymede from Juno/Jovian infrared auroral mapper*, Journal of Geophysical Research: Planets, 125 (2020) e2020JE006508. <https://doi.org/10.1029/2020JE006508>
- [32] P. C. Thomas et al.: *Vesta: Spin Pole, Size, and Shape from HST Images*, Icarus, 128 (1997) 88.
- [33] T. B. McCord et al.: *Asteroid Vesta: Spectral Reflectivity and Compositional Implications*, Science, 168 (1970) 1445.
- [34] A. S. Rivkin et al.: *The Surface Composition of Ceres*, Space Sci. Rev., 163 (2011) 95.
- [35] R. E. Milliken, A. S. Rivkin: *Brucite and carbonate assemblages from altered olivine-rich materials on Ceres*, Nature Geoscience, 2 (2009) 258.
- [36] M. F. A'Hearn, P. D. Feldman: *Water vaporization on Ceres*, Icarus, 98 (1992) 54.
- [37] H. Sierks et al.: *The Dawn Framing Camera*, Space Sci. Rev., 163 (2011) 263. <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9745-4>
- [38] M. C. De Sanctis et al.: *The VIR Spectrometer*, Space Sci. Rev., 163 (2011) 329. <https://doi.org/10.1007/s11214-010-9668-5>
- [39] T. H. Prettyman et al.: *Dawn's Gamma Ray and Neutron Detector*, Space Sci. Rev., 163 (2011) 371. <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9862-0>
- [40] F. M. Reininger et al., *VIRTIS: Visible infrared thermalimaging spectrometer for the Rosetta mission*, in Imaging Spectrometry II, ed. by M.R. Descour, J.M. Mooney. Proc. SPIE, vol. 2819 (1996), 66.
- [41] A. Coradini et al.: *VIRTIS: An imaging spectrometer for the Rosetta mission*, Planet. Space Sci., 46 (1998) 1291.
- [42] A. Raponi et al.: *Variations in the amount of water ice on Ceres' surface suggest a seasonal water cycle*, Science Advances, 4 (2018) eaao3757. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao3757>
- [43] B. Zellner et al.: *The eight-color asteroid survey: Results for 589 minor planets*, Icarus, 61 (1985) 355.
- [44] R. P. Binzel et al.: *Discovery of a Main-Belt Asteroid Resembling Ordinary Chondrite Meteorites*, Science, 262 (1993) 1541.
- [45] F. Vilas et al.: *Vesta and the Vestoids: A New Rock Group?*, Icarus, 147 (2000) 119.
- [46] T. H. Burbine et al.: *Vesta, Vestoids, and the howardite, eucrite, diogenite group: Relationships and the origin of spectral differences*, Meteoritics & Planetary Science, 36 (2001) 761.
- [47] M. C. De Sanctis et al.: *Spectroscopic characterization of mineralogy and its diversity across Vesta*, Science, 336 (2012) 697.
- [48] R. Jaumann et al.: *Vesta's shape and morphology*, Science, 336 (2012) 687.
- [49] S. Marchi et al.: *The violent collisional history of asteroid 4 Vesta*, Science, 336 (2012) 690.
- [50] D. L. Buczkowski et al.: *Large-scale troughs on Vesta: A signature of planetary tectonics*, Geophysical Research Letters, 39 (2012) 18.
- [51] M. Jutzi et al.: *The structure of asteroid 4 Vesta as revealed by models of planet-scale collisions*, Nature, 494 (2013) 207.
- [52] H. McSween et al.: *Composition of the Rheasilvia basin, a window into Vesta's interior*, Journal of Geophysical Research, 118 (2013) 335.
- [53] A. Beck et al.: *Challenges in detecting olivine on the surface of 4 Vesta*, Meteoritics & Planetary Science, 48 (2013) 2155.
- [54] E. Ammannito et al.: *Olivine in an unexpected location on Vesta's surface*, Nature, 504 (2013) 122.
- [55] O. Ruesch et al.: *Detections and geologic context of local enrichments of olivine on Vesta with VIR/Dawn data*, Journal of Geophysical Research, 119 (2014) 2078.
- [56] T. H. Prettyman et al.: *Elemental composition and mineralogy of Vesta and Ceres: Distribution and origins of hydrogen-bearing species*, Icarus, 318 (2019) 42.

- [57] J.-P. Combe et al.: *Composition of the northern regions of Vesta analyzed by the Dawn mission*, *Icarus*, 259 (2015) 53.
- [58] M. C. De Sanctis et al.: *Detection of widespread hydrated materials on Vesta by the VIR imaging spectrometer on board the Dawn mission*, *Astrophysical Journal*, 758 (2012) L36.
- [59] C. T. Russell et al.: *Dawn at Vesta: Testing the protoplanetary paradigm*, *Science*, 336 (2012) 684.
- [60] C. A. Raymond, C. T. Russell, H. Y. McSween; (2017) *Dawn at Vesta: Paradigms and paradoxes*. In Elkins-Tanton, L., & Weiss, B. (eds.), *Planetesimals*. Cambridge University Press, (2017) 321.
- [61] A. I. Ermakov et al.: *Constraints on Vesta's interior structure using gravity and shape models from the Dawn mission*, *Icarus*, 240 (2014) 146.
- [62] T. H. Prettyman et al.: *Extensive water ice within Ceres' aqueously altered regolith: Evidence from nuclear spectroscopy*, *Science*, 355 (2017) 55.
- [63] T. Platz et al.: *Surface water-ice deposits in the northern shadowed regions of Ceres*, *Nature Astronomy*, 1 (2016) 0007.
- [64] M. N. Villarreal et al.: *The dependence of the cerean exosphere on solar energetic particle events*, *Astrophysical Journal*, 838 (2017) L8.
- [65] M. E. Landis et al.: *Conditions for Sublimating Water Ice to Supply Ceres' Exosphere*, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122 (2017) 1984.
- [66] N. Schorghofer et al.: *The permanently shadowed regions of dwarf planet Ceres*, *GRL*, 43 (2016) 6783.
- [67] M. Küppers et al.: *Localized sources of water vapour on the dwarf planet (1) Ceres*, *Nature*, 505 (2014) 525.
- [68] M. C. De Sanctis et al.: *Bright carbonate deposits as evidence of aqueous alteration on (1) Ceres*, *Nature*, 536 (2016) 54.
- [69] E. Ammannito et al.: *Distribution of phyllosilicates on the surface of Ceres*, *Science*, 353 (2016) aaf4279.
- [70] M. C. De Sanctis et al.: *Localized aliphatic organic material on the surface of Ceres*, *Science*, 355 (2017) 719.
- [71] A. I. Ermakov, et al.: *Constraints on Ceres' internal structure and evolution from its shape and gravity measured by the Dawn spacecraft*, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122 (2017) 2267.
- [72] A.S. Konopliv et al. : *The Ceres gravity field, spin pole, rotation period and orbit from the Dawn radiometric tracking and optical data*, *Icarus*, 299 (2018) 411.
- [73] R. S. Park et al. : *A partially differentiated interior for (1) Ceres deduced from its gravity field and shape*, *Nature*, 537 (2016) 515.
- [74] X. Mao, X., W. B. McKinnon: *Faster paleospin and deep-seated uncompensated mass as possible explanations for Ceres' present-day shape and gravity*, *Icarus*, 299 (2018) 430.
- [75] C. A. Raymond et al.: *Impact-driven mobilization of deep crustal brines on dwarf planet Ceres*, *Nature Astronomy*, 4 (2020) 741.
- [76] R. S. Park et al.: *Evidence of non-uniform crust of Ceres from Dawn's high-resolution gravity data*, *Nature Astronomy*, 4 (2020) 748.
- [77] M. C. De Sanctis et al.: *Fresh emplacement of hydrated sodium chloride on Ceres from ascending salty fluids*, *Nature Astronomy*, 4 (2020) 786.



Eleonora Ammanito: è ricercatrice presso l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). È una planetologa che studia le proprietà delle superfici dei corpi minori e pianeti terrestri del Sistema Solare attraverso l'analisi di dati spettroscopici nell'intervallo spettrale visibile e infrarosso. È *ASI Project Scientist* di strumentazione scientifica per l'esplorazione del Sistema Solare come ad esempio VIR-MS su Dawn, Ma_MISS e Cassis su ExoMars, Envis e DISC su Comet Interceptor, SimbioSYS su BepiColombo. Rappresenta l'ASI nel Panel COSPAR sulla Planetary Protection e nell'International Mars Exploration Working Group (IMEWG).

Eleonora Ammanito: is researcher at the Italian Space Agency (ASI). She is a planetary scientist focusing on the study of surface properties of small bodies and Terrestrial Planets in the Solar System using spectroscopic data in the visual and near-infrared range. She is ASI Project Scientist for payloads for the exploration of Solar System such as VIR on Dawn, Ma_MISS and Cassis on ExoMars, Envis and DISC on Comet Interceptor, SimbioSYS on BepiColombo. She is the ASI representative in the Planetary Protection Panel of COSPAR and in the International Mars Exploration Working Group (IMEWG).

Christina Plainaki: si è dottorata in Fisica presso l'Università di Atene (Grecia) nel 2007. È ricercatrice presso l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Ha un profilo interdisciplinare portando avanti attività di ricerca nel settore dello space weather circum-terrestre e circum-planetario, con particolare attenzione allo sviluppo di modelli teorici per la interpretazione dei dati ottenuti dallo spazio e da Terra. Per il progetto JIRAM/Juno ha il ruolo di ASI Project Scientist.

Christina Plainaki: she earned her PhD in Physics in 2007 from the University of Athens (Greece). She is a researcher at the Italian Space Agency (ASI). Her research activity is in the field of circumterrestrial and planetary space weather, focusing on the development of theoretical models for the interpretation of both ground-and space-based data. Her work is characterized by interdisciplinarity. She is the ASI Project scientist for the JIRAM/Juno project.

LISA: un osservatorio per le onde gravitazionali nello spazio

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

Introduzione

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

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

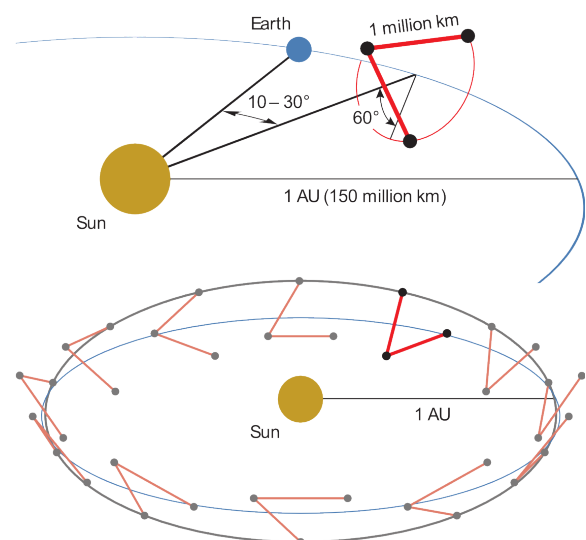


Figura 1: Schema dell'orbita di LISA attorno al Sole ad una distanza di 1 AU. I tre satelliti sono ciascuno su un piano orbitale con un'inclinazione differente rispetto al piano dell'eclittica [2].

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

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

La missione LISA Pathfinder

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



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

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

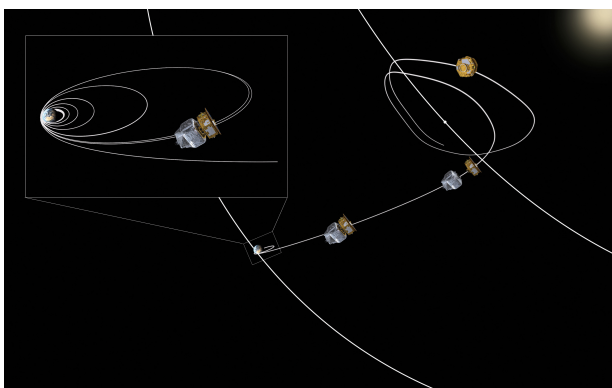


Figura 3: Traiettoria seguita da LPF per raggiungere il punto di Lagrange L1 (credit ESA).

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

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

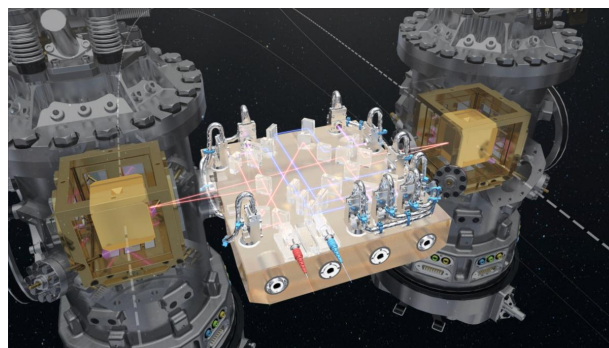


Figura 4: Schema che mostra nell'LPF le due masse di test e in mezzo il banco ottico con il sistema LASER per determinarne la posizione relativa (credit ESA).

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

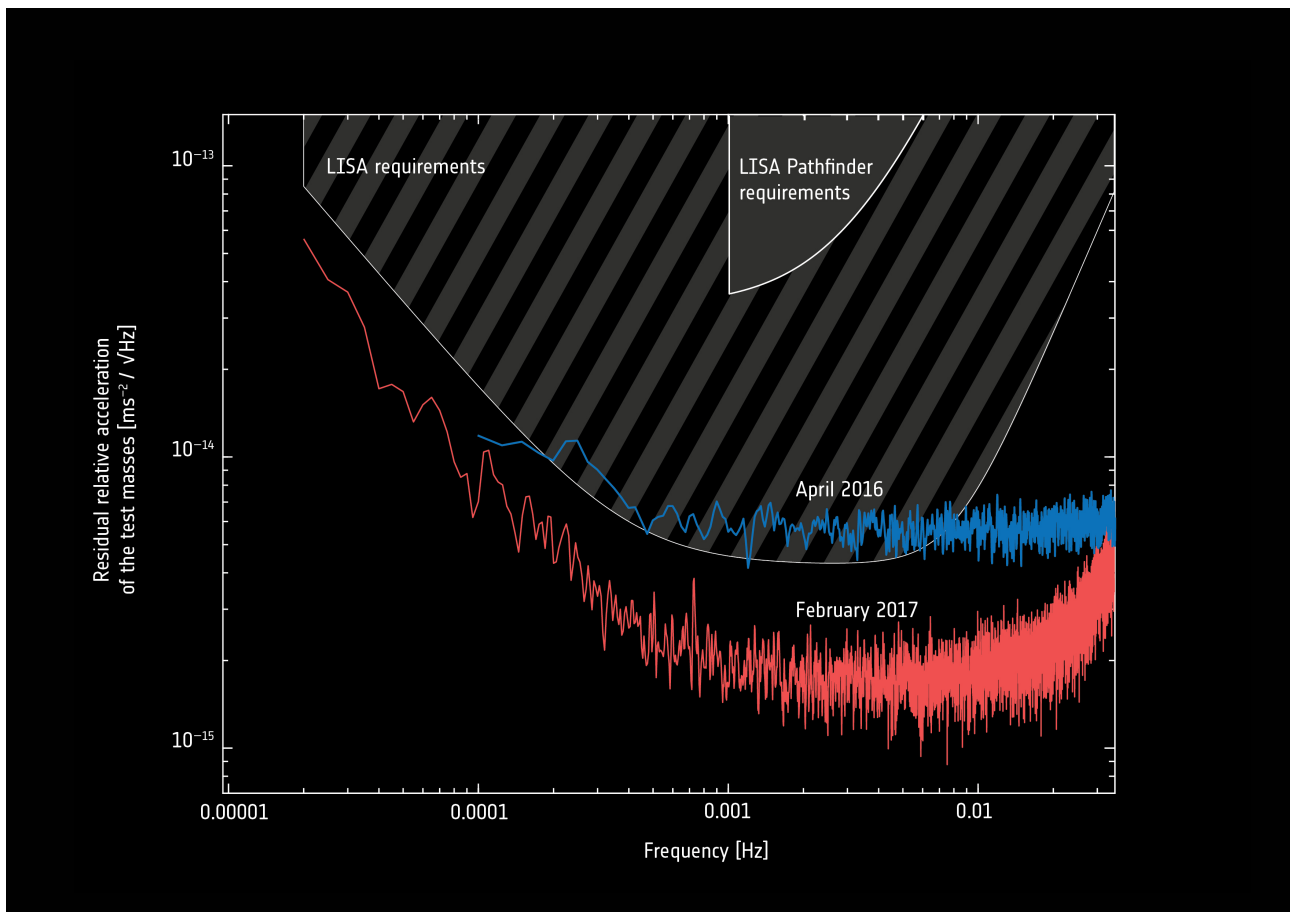


Figura 5: La figura mostra l'accelerazione residua in funzione della frequenza. Questi dati sono stati pubblicati già nell'aprile del 2016 dalla collaborazione LPF [5].

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

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

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

LISA

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

The Gravitational Wave Spectrum

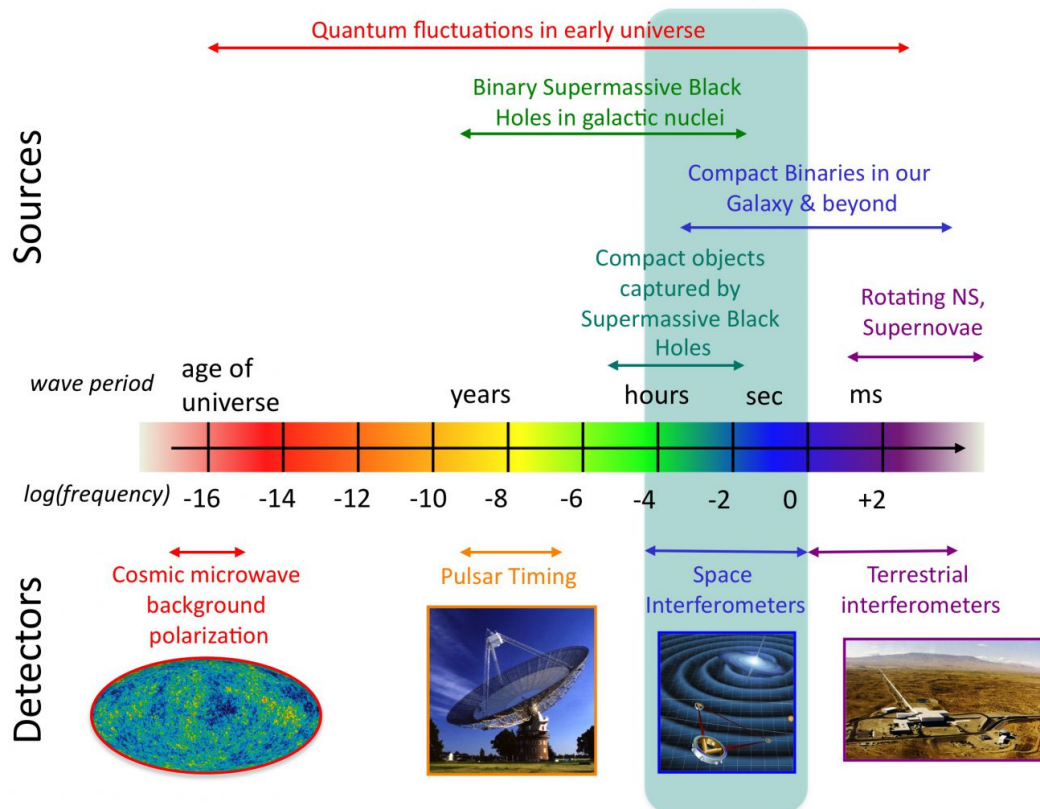


Figura 6: Schema che illustra la dipendenza della frequenza con quale strumentazione potranno essere osservate le onde gravitazionali e la loro sorgente (credit NASA).

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

strumentazione.

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

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

a distanze cosmologiche (Fig. 7).

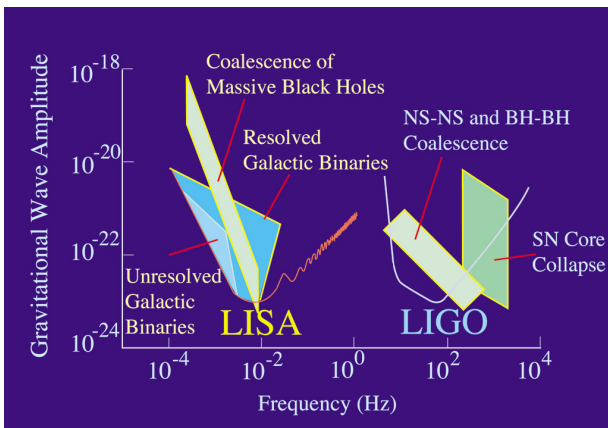


Figura 7: La figura riassume schematicamente le varie sorgenti di onde gravitazionali osservabili con LISA (credit NASA).

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

Obiettivi scientifici di LISA

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

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

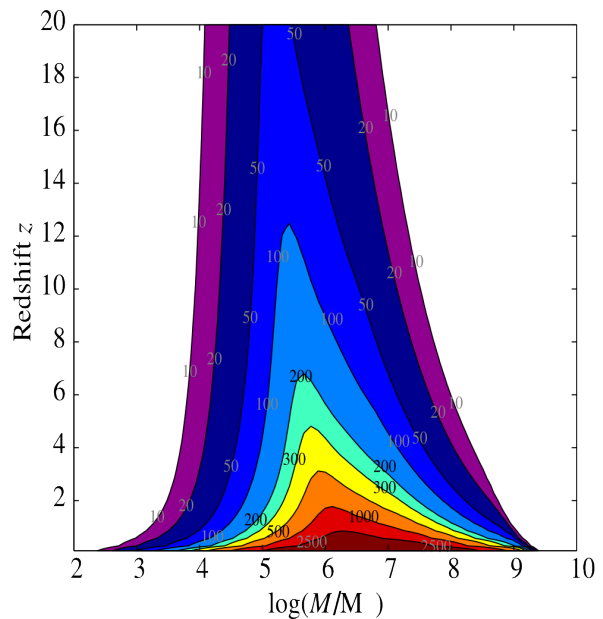


Figura 8: La figura mostra la distanza (espressa in termini di *phase-shift* z) alla quale sono osservabili da LISA le fusioni di buchi neri massicci in dipendenza della loro massa. I diversi contorni corrispondono ad un valore diverso di segnale su rumore [6].

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

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

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

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

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

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

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

da Terra.



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



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

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

A caccia di antimateria nello spazio

Roberto Battiston

Dipartimento di Fisica, Università di Trento,
Trento Institute for Fundamental Physics and Applications (TIFPA)

Ginevra, estate 1993. Studio di Sam Ting al CERN, premio Nobel nel 1976 per la scoperta della particella J/Psi, la famosa *november revolution* in cui i quark, componenti elementari dei protoni e dei neutroni, le particelle elementari che formano il nucleo atomico, passarono da tre a quattro aprendo la strada allo *Standard Model* delle particelle elementari e delle interazioni fondamentali, basato su famiglie di coppie di particelle elementari, nel caso dei quark up-down, strange-charm e, in seguito, bottom-top, e su quattro forze, quella elettromagnetica, quella forte, quella debole e quella gravitazionale.

Dopo la laurea, avvenuta proprio nel gruppo di Ting alla fine degli anni '70, avevo lasciato il gruppo di ricerca di Sam e avevo scelto di partecipare a due diversi esperimenti, ciascuno a modo suo importante: con il primo, UA2, avevo partecipato alla scoperta dei bosoni intermedi Z^0 e W^\pm , risultato per cui Carlo Rubbia e Simon van der Meer ricevettero il Nobel nel 1984. Il secondo era SLD (Stanford Large Detector), presso il centro di ricerca SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) negli USA, dove si cercava di produrre, adattando un'acceleratore già esistente, grandi quantità dei nuovi bosoni Z^0 puntando ad arrivare prima del LEP (Large Electron-Positron Collider), il super acceleratore dedicato a questo tipo di ricerca che nel frattempo veniva costruito al CERN.

Nel campo della ricerca di frontiera, decidere quale direzione prendere è un po' come fare un

sorpasso in una gara di Formula 1, può andare bene o andare male: se la scelta di partecipare a UA2 si rivelò un successo per i risultati ottenuti, lo stesso non si può dire dell'esperienza americana, visto che la modifica dell'acceleratore di SLAC fu molto lenta e faticosa, e si concluse ben dopo la partenza del LEP al CERN verso la fine degli anni Ottanta.

Alla fine di quel decennio, ripresi a collaborare con Sam, che nel frattempo aveva formato un grande gruppo di ricerca, la Collaborazione L3, e realizzato il più imponente fra i quattro esperimenti del LEP. Sam mi propose di coordinare la realizzazione di un innovativo rivelatore al silicio. Si trattava di uno strumento ultra preciso, la cui realizzazione mi occupò completamente per i quattro anni seguenti. Nel 1993 L3 era ormai entrato nella fase in cui avrebbe preso dati senza modifiche sostanziali fino agli anni Duemila. Sam ed i suoi più stretti collaboratori erano dunque già alla ricerca di nuove idee e nuove sfide. Proprio in quel periodo, Sam aveva dedicato i suoi sforzi alla creazione di una enorme collaborazione internazionale con l'obiettivo di mettere a punto un colossale esperimento tramite il quale sfruttare il nuovo super acceleratore di protoni in costruzione negli Stati Uniti, SSC (Superconducting Super Collider). Ma anche lì le cose non erano andate nel verso giusto; nell'autunno del 1993 il progetto SSC fu cancellato dal Congresso americano. Sam aveva anche cercato di proporre al CERN un esperimento derivato

per il nuovo acceleratore LHC (Large Hadron Collider) in corso di realizzazione con l'obiettivo di scoprire il bosone di Higgs. Il CERN, diretto dal neo premio Nobel Carlo Rubbia aveva però bocciato la proposta.

Gli esperimenti in fisica delle particelle richiedono lunghe pianificazioni.

Per prima cosa bisogna elaborare una proposta scientifica da sottoporre alle agenzie di finanziamento, poi occorre formare una **Collaborazione**, vale a dire un gruppo di scienziati, composto da centinaia, a volte da migliaia di ricercatori e ingegneri, a cui spetterà il compito di realizzare i sofisticati strumenti da utilizzare nell'esperimento.

La costruzione, calibrazione e messa in opera di un esperimento in un acceleratore di particelle è infatti un'attività decisamente complessa: occorre posizionare e collegare decine di chilometri di cavi, realizzare stanze piene di elettronica per l'acquisizione dei segnali e di computer per l'elaborazione dei dati. Ecco perché si comincia a lavorare almeno cinque - sette anni prima del momento in cui si raccolgono i dati e inizia l'analisi.

È un po' come se Galileo, per studiare il moto del pendolo nel Duomo di Pisa, avesse dovuto costruire prima la cattedrale: non avrebbe potuto lavorare da solo e avrebbe in ogni caso potuto fare pochissimi esperimenti nel corso della sua vita¹. Se non si voleva disperdere il tesoro di competenze rappresentato dalla Collaborazione internazionale L3, comprendente circa 600 ricercatori estremamente capaci, che lavoravano a stretto contatto da decine d'anni, era necessario muoversi per tempo ed individuare una prospettiva scientifica interessante e stimolante. Nell'estate del 1993 la discussione nel nostro gruppo di lavoro si era spostata rapidamente dalla fisica delle particelle a quella delle astroparticelle, e dalla fisica a terra a quella nello spazio.

In quegli anni molti dei settori di ricerca fondamentale che oggi sono affermati muovevano i primi passi. Valutammo di procedere nel campo

¹In realtà Galileo non effettuò alcun esperimento nel Duomo di Pisa. Fece solo un'osservazione, mentre era casualmente lì, osservazione resa pubblica anni dopo da Vincenzo Viviani.

dei raggi gamma di alta energia nello spazio e a terra, ma capimmo che l'ambito astrofisico ci avrebbe allontanato dal settore della fisica fondamentale. La ricerca delle onde gravitazionali con interferometri LASER era ancora molto lontana da traguardi significativi, senza contare che richiedeva una tecnologia estremamente complessa. Alla fine, ci indirizzammo verso la ricerca dell'antimateria nei raggi cosmici, un obiettivo ambizioso e affascinante, perfettamente coerente con il nostro settore di ricerca.

Le leggi della natura, per quanto le conosciamo, sono simmetriche tra materia e antimateria. Allo stesso tempo, materia e antimateria non possono convivere senza distruggersi reciprocamente. Sulla Terra la poca antimateria che viene prodotta naturalmente nei decadimenti radioattivi o nelle interazioni con i raggi cosmici con l'atmosfera, è composta per lo più da positroni, da pochissimi antiprotoni e da particelle instabili, come i muoni positivi e i pioni. Quando in un ospedale si fa una PET (*Positron Electron Tomography*) si usa proprio l'antimateria, ossia i positroni emessi da isotopi radioattivi: solo così si possono realizzare molecole presenti nella fisiologia umana, e creare l'immagine di certi tipi di tumore.

Nello spazio la questione è però sostanzialmente diversa.

Particelle elementari di antimateria, eventualmente presenti nei raggi cosmici possono vivere e viaggiare molto a lungo; la densità media della materia interstellare è bassissima, dell'ordine di un atomo di idrogeno per centimetro cubo. Sappiamo che esiste nei raggi cosmici una piccola quantità di antiparticelle prodotte dagli urti casuali con la materia interstellare: stiamo parlando di una parte su 200 di positroni, e una parte su 10.000 di antiprotoni. Gli antineutroni sono instabili, come i neutroni, e non vivono più di pochi minuti, per questo non sono presenti nel flusso dei raggi cosmici.

L'obiettivo del nuovo *team* era quello di realizzare un rivelatore di particelle nello spazio in grado di analizzare il flusso di raggi cosmici cercando componenti ultrarare a livello di parti per 10 miliardi. La scoperta di antiparticelle pesanti, come l'antielio quattro, sarebbe stata completa-

mente inaspettata, in quanto avrebbe richiesto l'esistenza di processi di nucleosintesi possibili solo all'interno di una antistella.

L'esperimento fu battezzato Alpha Magnetic Spectrometer (AMS), in riferimento alla Stazione Spaziale che a quel tempo si chiamava ancora Alpha e non era ancora stata costruita. Nel corso di numerose riunioni al CERN e al MIT vennero definiti i dettagli dell'esperimento.



Figura 1: Foto di gruppo del team AMS del Dipartimento di Fisica e Sezione INFN di Perugia (fine anni '90).

L'idea era quella di usare le stesse tecnologie sviluppate agli acceleratori e adattarle allo spazio. Per cercare l'antimateria una misura essenziale era quella della carica elettrica: particelle e antiparticelle hanno carica elettrica opposta. Per questo, occorre osservare la curvatura della traccia di ogni singolo raggio cosmico che passa nel rivelatore, utilizzando un magnete e un rivelatore tracciante [1]. Per tutti noi si trattava di una nuova sfida: adattare, a un lancio sullo Shuttle e all'operazione nello spazio, rivelatori di particelle elementari che avevamo sempre utilizzato a terra. Molti aspetti ancora non erano chiari, per cui ci lasciammo delle alternative. Per esempio, furono ipotizzati due tipi di rivelatori traccianti: uno tradizionale, proposto dal MIT e basato su un grande volume pieno di gas, in grado di fare molte misure di posizione, ciascuna con precisione limitata, e uno proposto dal mio *team* dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) di Perugia (figura 1), sulla base dello sviluppo fatto per l'esperimento al LEP, e basato su pochi piani di rivelatori a silicio, ciascuno capace di fornire una misura di posizione di altissima precisione. Dopo una lunga serie di verifiche, risultò che la mia proposta era sensibilmente più adatta all'utilizzo nello spazio e fu approvata: si trattava

del primo grande rivelatore al silicio che avrebbe operato in un ambiente diverso dalla Terra.

Il contributo italiano alla progettazione e realizzazione dei rivelatori a bordo di AMS è stato fondamentale: la collaborazione italiana comprendeva oltre al gruppo di Perugia, Pisa, Bologna, Milano, Roma e, in seguito, Trento.

Una volta completata la proposta dell'esperimento AMS, la sottoponemmo alla NASA (National Aeronautics and Space Administration), all'INFN, all'ASI e agli altri enti di ricerca e agenzie spaziali di sedici diversi paesi. L'idea piacque molto a Daniel Goldin, amministratore della NASA, che approvò un volo di prova sullo Shuttle, da realizzarsi nel 1998. Dopo l'approvazione della NASA, in rapida sequenza tutte le agenzie ed enti di ricerca internazionali approvarono la loro partecipazione a questo esperimento.

Era il 1994 e avevamo meno di quattro anni a disposizione!

Sembrava proprio un'impresa impossibile per un *team* che, per quanto esperto in rivelatori di particelle, non aveva alcuna esperienza nel settore spaziale. Goldin ci fornì il supporto di un'eccellente squadra di ingegneri della NASA e della Lockheed Martin, in particolare ricordo Trent Martin e Ken Bollweg con i quali ho poi collaborato per 30 anni, che risultarono decisivi.

Furono quattro anni indimenticabili: un'intensità di lavoro, ma anche un entusiasmo mai visti prima. Stavamo entrando in un mondo nuovo, sia per gli obiettivi scientifici sia per le tecnologie da sviluppare. Il 2 giugno 1998 AMS-01, la versione di prova di AMS, fu lanciato con la missione STS-91 e operò con successo per nove giorni in orbita, raccogliendo centinaia di milioni di raggi cosmici e verificando che la quantità di antielio era meno di una parte per milione.

Il successo di AMS-01 ci permise di continuare nella realizzazione della versione definitiva, AMS-02, che avrebbe avuto la capacità di raccogliere 10.000 volte più statistica operando per tre anni sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS) (figura 2). Nel 1998 però non potevamo sapere che nel 2003 ci sarebbe stato il disastro dello Space Shuttle Columbia, il tragico incidente che

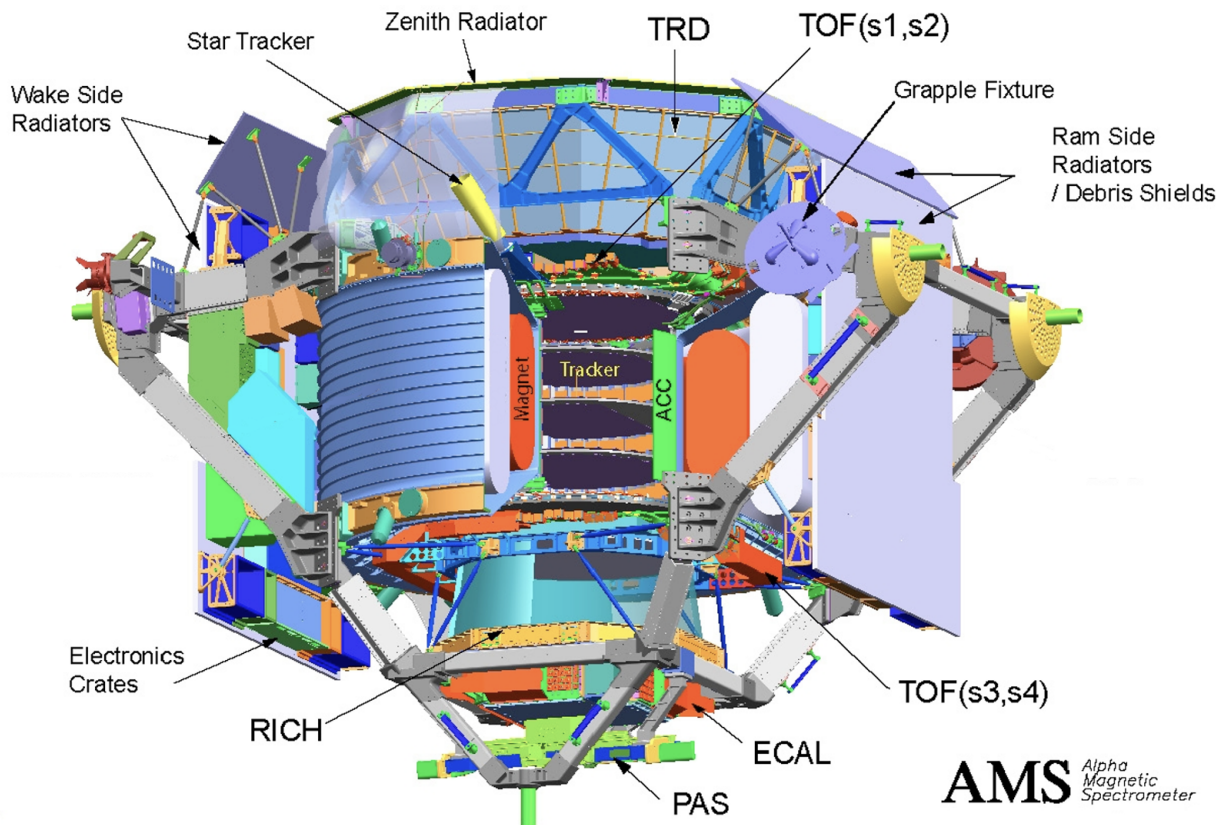


Figura 2: L'architettura strumentale della versione definitiva dell'esperimento AMS-02 sulla ISS.



Figura 3: Maggio 1998, Kennedy Space Center (Florida): la Collaborazione AMS, di fronte allo Shuttle Endeavour che trasporterà AMS-01 per la prima missione di 12 giorni nello spazio

disintegrò la navicella durante il volo di rientro nell'atmosfera terrestre causando la morte dei sette astronauti a bordo. Di conseguenza, il lancio di AMS-02 si sarebbe realizzato solo tredici anni dopo. Iniziò un periodo molto complicato.

Nel 2003 la NASA, per ridurre al minimo indispensabile il numero di missioni necessarie a completare la Stazione Spaziale Internazionale,

su richiesta della Commissione di inchiesta sul disastro del Columbia, tolse AMS-02 dal programma dello Shuttle. Ci trovammo in una situazione paradossale: impegnati a costruire un rivelatore che non avrebbe mai volato.

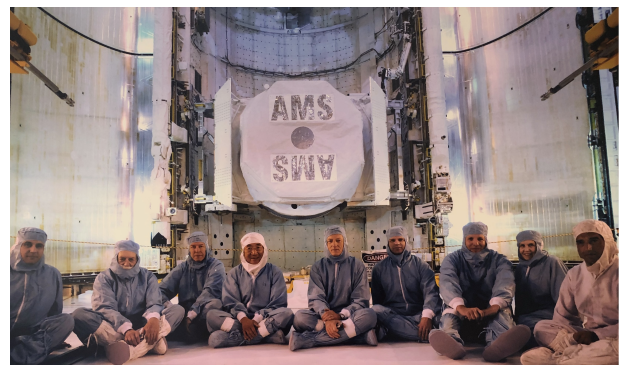


Figura 4: Marzo 2011, Kennedy Space Center (Florida): foto di gruppo davanti alla area di carico (*bay area*) dello Shuttle Discovery che porterà sulla ISS AMS-02. Da sinistra: S. Gonzales, J. Bingham, K. Bollweg, S.C.C. Ting, R. Battiston, T. Martin, S. Schael, S. Ting, C. Gargiulo.

A quel tempo ero diventato viceresponsabile di AMS-02: iniziammo, con Sam, una sistematica



Figura 5: AMS-02 dopo l'installazione sul braccio principale della ISS, il 20 maggio 2011.

azione di *lobbying* presso il Congresso americano allo scopo di essere reinseriti. Fu l'occasione, altamente istruttiva, per verificare come funziona, nel concreto, il sistema politico americano: nell'incontrare i principali senatori e deputati democratici e repubblicani che si occupavano di questo tema, rimasi impressionato dalla competenza, dall'attenzione e dal rispetto che avevano nei nostri confronti. Per loro lo spazio, la ricerca scientifica, la collaborazione internazionale erano argomenti da sostenere in modo bipartisan, senza inutili o pretestuosi conflitti ideologici. La decisione fu presa: il nuovo amministratore della NASA, Michael Griffin, ricevette dal Congresso precise istruzioni per reinserire AMS-02 nel programma dello Shuttle.

A differenza del piano iniziale, in base al quale AMS-02 sarebbe tornato a terra ogni tre anni per essere rifornito di elio liquido, strategia necessaria per far funzionare il nuovo magnete superconduttore che stavamo sviluppando, nel nuovo schema saremmo stati installati sulla Stazione Spaziale Internazionale senza possibilità di ritorno. Questo portò alla decisione di riutilizzare il magnete permanente usato con successo per AMS-01. Il 19 maggio del 2011, AMS-02 fu lanciato nell'ambito della penultima missione dello Shuttle, la STS124 (figura 4). A bordo della navicella c'era un astronauta italiano, Roberto Vittori, che avrebbe operato il braccio robotico della ISS durante la delicata fase di installazione di AMS-02 sulla struttura principale della Stazione, dove ad attenderlo c'era un altro astronauta italiano, Paolo Nespoli, impegnato nella sua prima missione di lunga durata.

Ma la partecipazione degli astronauti ESA

italiani alle operazioni di AMS non finisce qui.



Figura 6: Dicembre 2019 - gennaio 2020: nel corso di una serie di quattro storiche EVA Luca Parmitano (ESA) e Drew Morgan (NASA) sostituiscono il cuore del sistema di raffreddamento del tracciatore al silicio di AMS-02, garantendo all'esperimento altri 10 anni di vita.

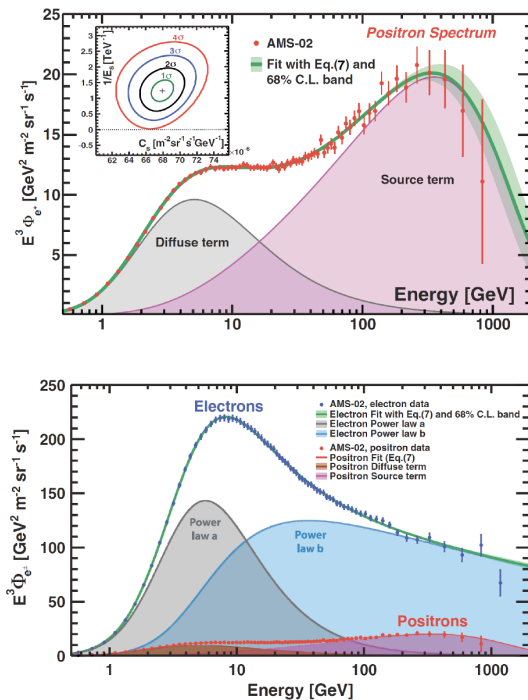


Figura 7: Sopra: spettro di energia degli elettroni nei Raggi Cosmici, confrontato con lo spettro di positroni. Sotto: l'ingrandimento dello spettro di positroni mette in evidenza la presenza di un termine di sorgente che mostra un picco a circa 350 GeV.

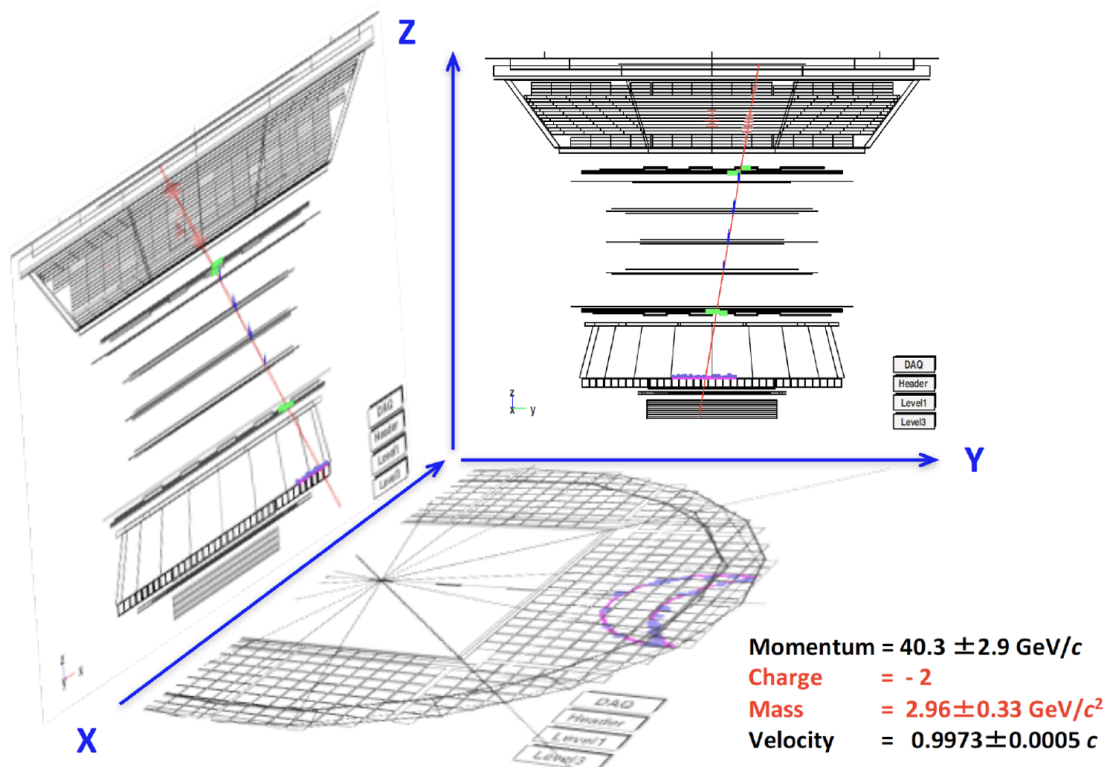


Figura 8: Evento candidato di anti- ^4He raccolto da AMS-02 [3].

Dopo quasi 10 anni di operazione, nonostante una progettazione che prevedeva una forte ridondanza, verso la fine del 2019, il sistema di raffreddamento del tracciatore al silicio ha mostrato dei segni di malfunzionamento che ne hanno richiesto la sostituzione. AMS non è stato progettato per essere riparato in orbita, ma la NASA, grazie ad uno straordinario sforzo di ingegneria a cui hanno collaborato anche gli ingegneri del CERN guidati dall'italiano Corrado Gargiulo, ha sviluppato una tecnica di intervento e una speciale strumentazione per potere sostituire sistema di pompe di raffreddamento di AMS-02.

La pianificazione dei voli ha voluto che l'astronauta che ha guidato l'intervento fosse un altro italiano, Luca Parmitano, astronauta del corpo europeo e primo comandante italiano della ISS. Nel corso della sua missione di lunga durata del 2019 - 20, durata ben 201 giorni, @astro_luca ha svolto quattro storiche *extraveicular activities* (EVA), assieme all'americano Drew Morgan, intervenendo impeccabilmente, per sostituire il sistema di raffreddamento (figura 6). Si è trattato di una sorta di intervento a cuore aperto, in cui otto piccoli tubi di metallo operanti in condizioni normali a pressione di più di 100 atmosfere,

sono stati tagliati e riconnessi proprio come si trattasse della sostituzione di un cuore meccanico: una sorta di idraulica di precisione ad alta quota. Tutto è andato bene, anche se il serraggio dell'ottavo tubo si è rivelato più complesso del previsto. Grazie al lavoro di Luca, AMS-02 ha ripreso a funzionare agli inizi del 2020 e potrà continuare a raccogliere dati per almeno altri dieci anni.

Oggi, a distanza di dieci anni dal lancio del 2012, AMS-02 ha raccolto più di 180 miliardi di raggi cosmici, studiando con un dettaglio mai raggiunto prima la composizione della pioggia di particelle di alta energia che colpiscono la Terra provenendo dalle profondità del cosmo. Sono stati trovati numerosi nuovi effetti relativi alle proprietà dei raggi cosmici [2]. Ad esempio, per quanto riguarda l'antimateria, si è scoperto un inatteso eccesso di positroni di alta energia, che forma un picco a una energia di circa quattrocento volte la massa del protone e la cui sorgente è, al momento, misteriosa (figura 7). Potrebbe trattarsi di un fenomeno astrofisico mai osservato in precedenza (positroni prodotti da pulsar) o addirittura di un segnale collegabile all'osservazione indiretta di particelle di grande massa di

materia oscura.

Per quanto riguarda l'antimateria nucleare, invece, finora sono stati riportati otto eventi di anti-elio, 5 di anti- ^3He e 3 di anti- ^4He . Si tratta di eventi ultrarari, raccolti al ritmo di due eventi di anti-He ogni 100 milioni di nuclei di He, tipicamente un evento all'anno (figura 8).

Come abbiamo discusso in precedenza, l'osservazione indiscutibile di pochi antinuclei di ^4He avrebbe profonde conseguenze sulla nostra comprensione dell'universo. È il motivo per cui i risultati dell'analisi di questi eventi non sono stati ancora pubblicati. Questi dati vengono studiati con la massima attenzione da parte dei ricercatori di AMS-02, per capire se ci possano essere sorgenti di fondo strumentale non capite. Come diceva Carl Sagan:

"Scoperte straordinarie richiedono una evidenza straordinaria."

Stay tuned.

Questo testo è stato adattato dall'autore dal libro *La prima alba del cosmo*. Rizzoli, Milano (2019).



- [1] R. Battiston, S. C. C. Ting et al.: *Antimatter Study Group*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 350 (1994) 351.
- [2] AMS Collaboration, M. Aguilar, R. Battiston, S. C. C. Ting et al.: *The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II—Results from the first seven years*, Physics Reports, 894 (2021) 1.
- [3] R. Battiston: *High precision cosmic ray physics with AMS-02 on the International Space Station*, La Rivista del Nuovo Cimento, 43 (2020) 319.



Roberto Battiston: è professore ordinario di fisica sperimentale presso l'Università di Trento. È stato presidente dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) dal 2014 al 2018 e presidente della Commissione Nazionale INFN per la Fisica Astroparticellare dal 2009 al 2014. Fisico sperimentale, specializzato nel campo della fisica fondamentale e delle particelle elementari, è uno dei maggiori esperti di raggi cosmici. Ha coordinato assieme

al premio Nobel Samuel C. C. Ting la realizzazione dello spettrometro magnetico alfa (AMS), operante sulla Stazione Spaziale Internazionale dal 2011 e dedicato alla ricerca dell'antimateria e della materia oscura. Ha pubblicato circa 550 articoli scientifici sulle più importanti riviste internazionali. Editorialista della Stampa, Repubblica, Corriere della Sera e dell'Adige svolge una intensa attività come saggista e divulgatore. Ha pubblicato di recente *L'Alfabeto della Natura* (2022, Rizzoli), *Fare Spazio* (2019, La Nave di Teseo) e *La prima alba del Cosmo* (2019, Rizzoli).

Drain Brain: monitorare il drenaggio cerebrale negli astronauti per prevenire problemi cardiovascolari

The Earth is the cradle of humanity, but mankind cannot stay in the cradle forever.

Konstantin Tsiolkovsky

S. Mari, G. Valentini, G. Mascetti

S. Pignataro

A. Taibi, A. Proto, E. Menegatti, P. Zamboni

Agenzia Spaziale Italiana

Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale

Università degli studi di Ferrara

Un importante obiettivo della ricerca spaziale internazionale, in preparazione all'esplorazione umana della Luna e di Marte, è quello di tutelare la salute degli astronauti. Il volo spaziale induce importanti alterazioni a carico di diversi sistemi fisiologici e queste risposte adattative inducono un generale decondizionamento dell'organismo. I programmi di ricerca medica hanno lo scopo di assicurare la salute degli astronauti che affronteranno viaggi spaziali oltre l'orbita bassa, permetterne la pronta operatività

una volta arrivati a destinazione e consentire un sicuro recupero al rientro sulla Terra. Fra i programmi messi in campo dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), gli esperimenti denominati Drain Brain, svolti in collaborazione con l'Università di Ferrara, sono particolarmente esemplificativi da questo punto di vista. Il progetto, iniziato con la collaborazione di Samantha Cristoforetti nel 2014, ha permesso di dimostrare il funzionamento di un pletismografo per lo studio del circolo cerebrale ed il ritorno venoso dall'encefalo al cuo-

re in condizioni di microgravità. Nei prossimi due anni, grazie al progetto Drain Brain 2.0, gli equipaggi della Stazione Spaziale Internazionale verranno studiati con una nuova versione del sensore pletismografico, sincronizzato con l'elettrocardiogramma, per valutare l'efficienza cardiaca ed il drenaggio cerebrale in rapporto a sintomi come vista offuscata, intorpidimento, annebbiamento o il temuto insorgere di una trombosi giugulare, legata al rallentamento del flusso per assenza del gradiente gravitazionale. Drain Brain 2.0 genererà anche importanti ritorni a Terra, chiudendo il circolo virtuoso dell'applicazione terrestre della ricerca condotta nello Spazio. La nuova strumentazione è di fatto ideale per un uso in telemedicina su pazienti cardiopatici o con problemi cognitivi.

Presente e futuro dell'esplorazione umana dello spazio

L'esplorazione dello spazio, umana e robotica, è uno dei grandi obiettivi delle agenzie spaziali internazionali, che dal 2006 si riuniscono nell'ambito dell'International Space Exploration Coordination Group (ISECG), con il fine di scambiarsi informazioni su interessi, piani e attività relativi all'esplorazione spaziale e coordinare gli sforzi nazionali per aumentare la solidità, la sicurezza e l'efficacia degli obiettivi di esplorazione nazionali e multilaterali. Nell'ambito delle proprie attività, l'ISECG, di cui l'ASI fa parte, ha redatto, e mantiene aggiornata, la Global Exploration Roadmap, nella quale viene dichiarato l'interesse delle agenzie spaziali di espandere la presenza umana nel Sistema Solare, con la superficie di Marte come obiettivo comune [1]. La Roadmap riflette uno sforzo internazionale per preparare le missioni di esplorazione spaziale, partendo dalla Stazione Spaziale Internazionale (ISS) e proseguendo con le missioni in orbita lunare, poi sulla superficie della Luna e infine su Marte. Gli occhi di tutte le agenzie spaziali sono dunque puntati su Marte; ma quanto siamo vicini dal poter garantire il mantenimento di un buono stato di

salute per le donne e gli uomini che andranno sul pianeta rosso?

I rischi e le sfide dei viaggi verso Marte

Dal primo volo nello spazio, che ha visto come protagonista Yuri Gagarin nel 1961, molteplici missioni sono state condotte a bordo di diversi veicoli spaziali e piattaforme orbitanti, in particolare sulla Stazione Spaziale Internazionale. È ormai noto che il volo spaziale induce importanti alterazioni a carico di diversi sistemi fisiologici e che queste risposte adattative comportano un generale decondizionamento dell'organismo, più o meno comparabile ad un accelerato processo di invecchiamento sulla Terra, con impatti negativi sulla *performance* e sulla salute dell'astronauta. Fortunatamente questo processo è parzialmente reversibile dopo il rientro a Terra, sebbene il recupero possa richiedere un lasso temporale che va da qualche mese ad anni. Le alterazioni pato-fisiologiche indotte dall'ambiente spaziale, finora studiate nell'ambito di missioni relativamente brevi condotte in bassa orbita terrestre (400 km dalla superficie terrestre), potrebbero divenire ancora più rilevanti in missioni di lunga durata verso lo spazio profondo (Luna e Marte).

In particolare, la NASA ha identificato 5 categorie di rischi per la salute umana che gli astronauti incontreranno in una missione verso Marte [2]. Questi rischi, strettamente legati alle caratteristiche dell'ambiente e del viaggio spaziale, agiscono in maniera sinergica, producendo un effetto combinato sul corpo umano.

Innanzitutto, vanno considerate le radiazioni: al di fuori dello schermo protettivo esercitato dal campo magnetico terrestre, l'uomo è infatti esposto a una dose elevata di radiazioni, dannose per il sistema nervoso centrale e per il DNA, provocando quindi un aumento del rischio di sviluppare tumori ed una possibile riduzione delle funzioni motorie e alterazioni comportamentali.

Un altro fattore rilevante è la gravità percepita: sulle stazioni orbitanti, come la ISS, gli astronauti sono soggetti alla condizione di microgravità, ovvero sperimentano la sensazione di assenza di peso, determinata dal moto in caduta libera.

The Global Exploration Roadmap

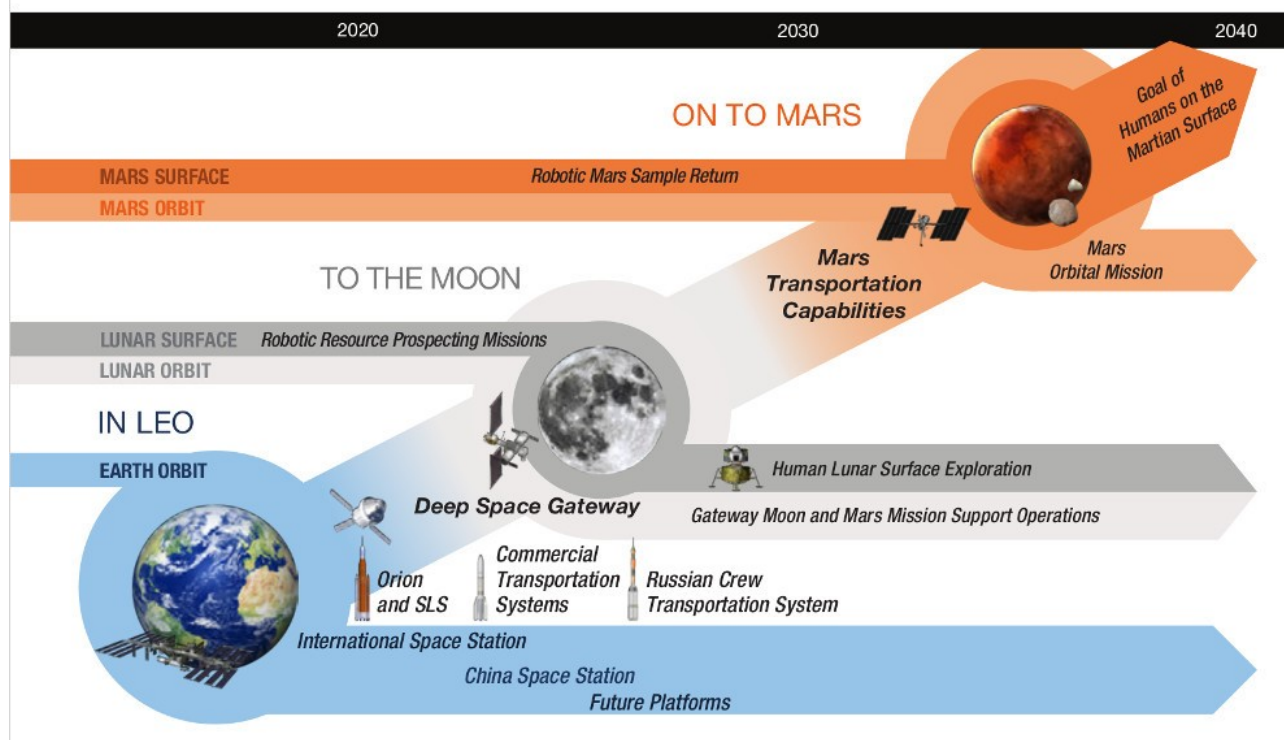


Figura 1: Rappresentazione grafica del piano per l'esplorazione umana dello spazio elaborato dalle agenzie spaziali facenti parti dell'ISECG.

Sulla Luna, invece, l'intensità del campo gravitazionale è pari a 1/6 di quello terrestre e su Marte circa 1/3. Inoltre, nel passare da un campo gravitazionale all'altro, i veicoli di trasporto affrontano accelerazioni importanti, che, seppur per periodi limitati, esercitano un notevole stress per l'individuo. Le ossa, i muscoli e il sistema cardiovascolare subiscono importanti alterazioni a causa dell'apparente assenza di peso; al loro rientro a Terra, gli astronauti della ISS, la cui permanenza a bordo dura generalmente sei mesi, sono sottoposti a un lungo percorso riabilitativo, nel quale vengono seguiti da un'equipe di specialisti. Ma quando l'astronauta, approdando su Marte dopo un viaggio di circa sei mesi in condizioni di assenza di peso, si troverà ad affrontare un campo gravitazionale certamente più basso di quello terrestre, ma non nullo, riuscirà ad essere operativo e svolgere prontamente i compiti della sua missione? Come si farà a contrastare il deterioramento a carico del sistema muscolo-scheletrico, riducendo o minimizzando l'esigenza di un percorso riabilitativo? Queste sono solo alcune delle grandi sfide a cui le agenzie spaziali stanno cercando una soluzione.

Bisogna poi considerare che la condizione di confinamento e di isolamento, a cui gli astronauti sono sottoposti, può determinare alterazioni degli aspetti comportamentali, che unitamente alla perdita di sonno, all'alterazione dei ritmi circadiani, al sovraccarico lavorativo, possono influenzare negativamente la *performance* e la salute psico-fisica dell'astronauta.

Nei viaggi verso lo spazio profondo, inoltre, la distanza da Terra comporta sia una complicazione nella gestione delle emergenze (mediche, operative, ecc.), dovuta principalmente ai ritardi nelle comunicazioni, sia l'impossibilità di avere rifornimenti continui da Terra, con ovvie implicazioni di natura sia tecnica che psicologica.

Infine, occorre sottolineare che l'ecosistema all'interno dei veicoli gioca un ruolo importante nel benessere dell'astronauta. L'ambiente deve essere controllato in termini di composizione dell'aria, temperatura, pressione, umidità, illuminazione, livelli di rumore, concentrazione di composti volatili e contaminazione microbica.

La combinazione di tutti questi fattori a cui si è brevemente accennato, anche detta **Space Exposome**, unitamente alle caratteristiche indivi-

duali dell'astronauta, ne determina il rischio per la salute. Atrofia muscolare, demineralizzazione ossea, decondizionamento cardiovascolare, alterazioni immunologiche, problematiche a livello cerebrovascolare e dei processi cognitivi, nutrizionali nonché alterazioni del metabolismo sono le principali modificazioni indotte dall'ambiente spaziale.

In questo scenario appare dunque chiaro che la ricerca nei settori della biomedicina e delle scienze della vita, il cui scopo è la comprensione degli effetti indotti da una permanenza prolungata nello spazio sugli organismi viventi e l'identificazione delle relative contromisure, è fondamentale per abilitare l'esplorazione umana dello spazio profondo.

Sebbene l'utilizzo di contromisure nutrizionali e farmacologiche e l'esecuzione di ferrei programmi di attività fisica abbiano consentito di attenuare fortemente gli effetti prodotti dalla permanenza in orbita, c'è ancora molto lavoro da svolgere per rendere sostenibili missioni umane di lungo termine oltre la bassa orbita terrestre. La ricerca in questo campo necessita dei cosiddetti **analoghi spaziali**, ovvero ambienti abitabili che consentano di riprodurre, almeno in parte, le caratteristiche dell'ambiente spaziale verso cui è orientato l'interesse scientifico. Gli analoghi possono essere situati sulla Terra, come nella maggior parte dei casi, o anche nello Spazio: è il caso della Stazione Spaziale Internazionale che, orbitando a bassa quota, permette più facilmente di studiare i fenomeni che potrebbero manifestarsi nelle missioni verso lo Spazio profondo.

La ISS: un laboratorio orbitante per la ricerca scientifica

La Stazione Spaziale Internazionale (ISS) è un laboratorio orbitante intorno alla terra a circa 400 km di altezza. Vi si alternano astronauti di diverse nazionalità, che ogni giorno svolgono esperimenti in microgravità nei settori della biologia, della fisiologia umana, della fisica e chimica e dell'osservazione della Terra. Inoltre validano nuove tecnologie e conducono attività divulgative e didattiche.

Oltre al fatto che gli esperimenti vengono svolti in microgravità, l'ambiente spaziale all'inter-

no della ISS ha anche la caratteristica di essere soggetto a un livello di radiazioni maggiore di quello della superficie terrestre; infatti, sebbene la Stazione si trovi ancora all'interno del campo magnetico terrestre, che mitiga l'esposizione alle radiazioni rispetto allo spazio profondo, è comunque assente l'effetto schermante dovuto all'atmosfera terrestre. Pertanto, a bordo della ISS, gli scienziati hanno la possibilità di studiare il comportamento degli organismi, le contromisure alle problematiche indotte dalla microgravità e dalle radiazioni e nuove tecnologie per facilitare le attività umane in vista di missioni di lunga durata come quelle verso la Luna e verso Marte.

Nell'ambito del programma ISS, l'ASI gode di una posizione di privilegio rispetto agli altri paesi europei. Infatti, oltre a essere parte dell'European Space Agency (ESA), e dunque avere accesso alle risorse sperimentali di stazione in virtù della propria partecipazione quale *partner* europeo al programma ISS, l'ASI ha anche stipulato con la statunitense National Aeronautics and Space Administration (NASA), nel 1997, un accordo (Memorandum of Understanding) di partecipazione alla ISS che consente all'Italia di accedere alle risorse della ISS per fini di ricerca scientifica e tecnologica e di usufruire di opportunità di voli di breve e lunga durata per astronauti di nazionalità italiana.

È nel quadro di questo accordo che nel 2014-2015 l'ASI ha composto un pacchetto di sette esperimenti per la missione italiana Futura di Samantha Cristoforetti. Gli esperimenti, tra gli altri, vertevano sul monitoraggio dello stato di salute dell'astronauta (Drain Brain e Wearable Monitoring), sullo studio di specifici fenomeni biologici in assenza di gravità (NATO, Cytospace, Bone/Muscle Cell) e infine sulla validazione di particolari tecnologie per lo spazio (ISSpresso).

Monitorare il ritorno venoso cerebrale

La circolazione sanguigna all'interno del nostro organo pensante è progettata per assicurare la migliore perfusione possibile di ossigeno e per garantire il più efficace drenaggio di sostanze tossiche e di metaboliti. Essendo il cervello alloggiato all'interno della scatola cranica, che non può

evidentemente espandersi, la legge di Monroe-Kelly stabilisce che il volume di sangue arterioso che vi entra deve eguagliare, nell'unità di tempo, quello che ne esce attraverso il sistema venoso. E in effetti, per un bipede come l'uomo vivere con la testa posta al di sopra del cuore in presenza della forza di gravità è una vera pacchia. Il sangue venoso a favore di gravità corre veloce verso il cuore come l'acqua di un torrente verso valle. Già, ma in condizione di microgravità il gradiente favorevole scompare, dunque cosa accade agli astronauti? Questo è il *focus* degli esperimenti Drain Brain, proposti dall'Università di Ferrara all'ASI: un percorso scientifico difficile e stimolante, iniziato con Samantha Cristoforetti nel suo lungo volo dal novembre 2014 al giugno 2015.

La mancanza di una metodologia comprovata per indagare il ritorno venoso cerebrale aveva in precedenza generato una notevole controversia scientifica, costringendo i ricercatori spaziali a ripartire dalle certezze. Mediante l'utilizzo di apparecchiature ultrasonografiche è possibile infatti ottenere informazioni su una serie di grandezze legate al flusso sanguigno, in particolare la velocità del sangue [3, 4]. *Test di screening* non invasivi come l'ecografia Doppler sono frequentemente utilizzati per indagini di *routine* per rilevare il flusso nei singoli vasi. I metodi pletismografici, invece, misurano il flusso nell'intera sezione o volume anatomico in esame [5].

La **pletismografia** è una tecnica non invasiva per registrare le variazioni di volume in un tessuto che, a differenza dell'ecografia, supera la dipendenza dall'operatore. Recentemente è stata sviluppata con successo anche la **pletismografia cervicale**, in grado di misurare indirettamente il volume di sangue venoso cervicale e valutare il ritorno venoso cerebrale in relazione al cambiamento della postura [6, 7].

Il diametro e la forma delle vene subiscono variazioni significative legate alla pressione transmurale e alla capacità dei vasi di dilatarsi per effetto di tale pressione (oltre che alle compressioni dall'esterno ad opera dei muscoli circostanti e di eventuali strumenti di misura) che producono oscillazioni di interesse. Il drenaggio cerebrale e l'efficienza cardiaca nell'essere umano possono essere studiati attraverso una di queste oscillazioni, chiamata **polso venoso giugulare** (*Jugular Venous Pressure JVP*) [8], la cui forma d'onda è un

indicatore della funzionalità cardiaca ed un fattore prognostico nell'insufficienza cardiaca cronica [9, 10]. La vena giugulare interna (*Internal Jugular Vein, IJV*) è l'unica vena del corpo umano che visibilmente pulsa ad occhio nudo. Questo fenomeno si verifica perché la giugulare si può assimilare ad un manometro idealmente infilato nell'atrio destro del cuore. Ogni variazione di pressione cardiaca si trasforma in un'onda che viaggia e si propaga in direzione retrograda, rendendo la vena pulsatile e dando vita al JVP, un segnale circolatorio carico di informazioni emodinamiche preziosissime. Il JVP è dunque dovuto alla variazione della tensione delle pareti della vena causata dalla propagazione dell'onda pressoria, originata dalla pressione atriale destra nel corso della rivoluzione cardiaca, e determina la caratteristica pulsatilità della IJV [9, 11]. Il JVP è un parametro fisiologico di importanza

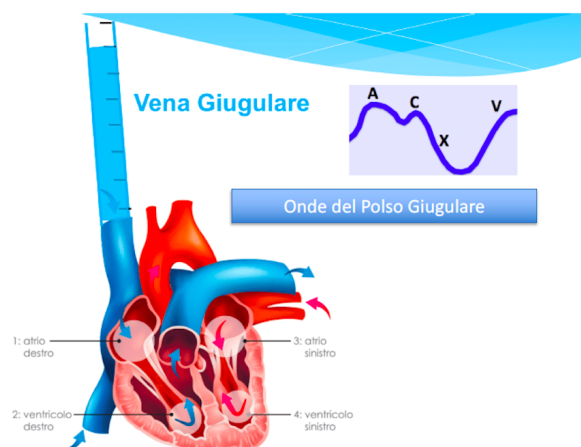


Figura 2: La vena giugulare riflette le pressioni dell'atrio destro del cuore sotto forma di onde pulsanti che si ripetono ad ogni battito cardiaco e che compongono il polso giugulare. Idealmente la vena diviene una sorta di naturale manometro visibile, palpabile, e misurabile al collo.

centrale per valutare il riempimento cardiaco, la funzione di pompa del cuore, il ritorno venoso e il drenaggio cerebrale. Possiamo probabilmente considerarlo il parametro principe del cosiddetto asse cuore-cervello.

Attualmente il JVP viene valutato qualitativamente nella pratica clinica, ma la sua quantificazione può avvenire solo con un approccio invasivo, attraverso la misura della pressione con cateterismo venoso centrale. Recentemente, il gruppo di ricerca dell'Università di Ferrara ha

compiuto importanti passi in avanti nella direzione della corretta valutazione del JVP e dei parametri ad esso correlati. Si è scoperto, ad esempio, che il JVP può essere estrapolato da clip ultrasonografiche delle vene giugulari interne [11, 12]. Non solo, ma l'analisi della successione di circa 40 diverse aree della giugulare per ogni battito cardiaco permette una stima non invasiva molto affidabile della pressione venosa [13]. Inoltre, è stata sviluppata una particolare applicazione della tecnica pletismografica che, mediante l'utilizzo di estensimetri, può rilevare le variazioni del volume di sangue nel sistema venoso umano [6, 14]. Poiché la variazione nel tempo di questi volumi sanguigni è strettamente collegata alle oscillazioni cardiache in generale, e al JVP in particolare, la pletismografia rappresenta un'ottima metodologia da eseguire in parallelo con la scansione ultrasonografica.

L'esperimento Drain Brain

Come già descritto, il ritorno venoso cerebrale è fortemente influenzato dal gradiente gravitazionale in posizione eretta mentre, in posizione supina, esso è legato alla pompa toracica respiratoria. Poco si sa dei meccanismi che garantiscono il deflusso del sangue dal cervello in condizione di microgravità. I proficui sforzi del gruppo di ricerca dell'Università di Ferrara sono stati valorizzati nell'ambito del progetto Drain Brain, eseguito con successo nel quadro della missione Futura a bordo della ISS. Nel corso di Drain Brain è stata infatti valutata la funzionalità del sistema circolatorio di un membro dell'equipaggio della ISS sia sulla Terra che in condizioni di microgravità.

Il progetto è stato gestito e finanziato dall'ASI e l'esperimento scientifico è stato coordinato dal *Principal Investigator* Paolo Zamboni dell'Università di Ferrara. Il sistema pletismografico sviluppato dal *team* di ricerca, basato su un estensimetro strain-gauge, è stato sperimentato da Samantha Cristoforetti, astronauta dell'ESA, durante la sua prima missione di lunga durata sulla ISS e da soggetti volontari a Terra [11, 13, 14]. Gli esperimenti sono stati condotti misurando il JVP da *clip* di ultrasonografia vascolare ad altissima risoluzione, attraverso ecografie eseguite su sé stessa dall'astronauta, con contemporanea

acquisizione di dati volumetrici con pletismografia, eseguita in differenti condizioni respiratorie, posturali e di esercizio fisico. La **pletismografia strain-gauge** è una tecnica non invasiva che, per mezzo di un sensore che circonda il collo, registra variazioni di parametri elettrici (es. capacità) determinati dalle deformazioni indotte sul sensore dalle variazioni di volume della IJV. Questa metodologia di misura è ideale in quanto non è operatore-dipendente e non è invasiva.



Figura 3: Samantha Cristoforetti nel modulo Columbus della ISS esegue il primo esperimento Drain Brain, nel corso della missione Futura. In cintura è visibile la centralina elettronica del pletismografo mentre l'astronauta dell'ESA sta scegliendo il sensore da indossare al collo.

La novità dell'apparato è data dalla sua potenzialità di rilevare le oscillazioni delle vene del collo con sensibilità sufficiente da essere utile per studi riguardanti le oscillazioni cardiache. Ciò è possibile grazie a sensori estensimetrici alimentati da una corrente costante, che permette al sistema elettronico di rilevare le variazioni di lunghezza del sensore misurando il tempo di carica della sua capacità.

È stato già dimostrato dal gruppo di ricerca dell'Università di Ferrara che tale sistema può rilevare variazioni di area con sufficiente sensibilità da poter registrare anche le oscillazioni di vasi sanguigni di interesse [15]. Nel corso di studi pletismografici su soggetti sani è stato dimostrato che un cambiamento di postura da eretto a supino produce un aumento del perimetro del collo, confermando così che la vena giugulare interna rappresenta la principale via di deflusso per il cervello in posizione supina. Inoltre, è stato rilevato un aumento della pulsatilità per tutti i

soggetti in posizione supina, risultato in accordo con studi di risonanza magnetica che hanno dimostrato che il deflusso venoso dal cervello è molto meno pulsante in posizione eretta [16]. Poiché tale pulsatilità è intimamente collegata alla struttura del vaso e al battito cardiaco, essa rappresenta un segnale molto caratteristico da studiare e correlare ad altri segnali riconosciuti in fisiologia.

L'evoluzione di Drain Brain 2.0

La chiave di volta dello studio Drain Brain si è avuta quando i ricercatori, analizzando a Terra i dati ottenuti, si sono resi conto che il segnale pletismografico contiene anche la traccia del JVP che, come spiegato in precedenza, contemporaneamente veniva ottenuta dall'astronauta con l'ecografo di bordo. Continuando gli esperimenti a Terra, l'affidabilità del rilievo pletismografico del JVP rispetto a quella ultrasonografica si è dimostrata così soddisfacente da indurre i ricercatori a proporre di condurre i successivi esperimenti con il solo pletismografo, sia pure tecnologicamente evoluto.

Il progetto Drain Brain 2.0, selezionato dall'ASI a seguito di un bando di ricerca e avviato nel marzo 2022, propone di sviluppare un nuovo sistema di pletismografia strain-gauge a ingombro minimo con sincronizzazione elettrocardiografica (ECG) e utilizzarlo nello Spazio sia per studiare il ritorno venoso cerebrale in condizioni di microgravità che per comprendere i meccanismi di adattamento fisiologico. La sincronizzazione con la traccia ECG è indispensabile per almeno tre ragioni: i) la variabile tempo del grafico JVP viene normalizzata alla frequenza cardiaca di ogni singolo soggetto esaminato; ii) l'interpretazione della curva del JVP viene facilitata dalla corrispondenza temporale dei picchi della traccia JVP con quelli della traccia ECG; iii) in prospettiva, il *test* rappresenta la base per la costruzione di modelli dell'asse circolatorio cuore-cervello in condizioni di microgravità o nel corso di lunghi viaggi spaziali.

Le caratteristiche del nuovo strumento consentono di rilevare altri problemi che gli astronauti potrebbero sviluppare a causa dell'assenza di gravità, come ad esempio lo sviluppo di trombosi causate dalla combinazione di un rallentamento

del flusso, dovuto alle condizioni gravitazionali non terrestri, con uno stato di riduzione del volume del sangue circolante per disidratazione che si registra nel corso di lunghi voli spaziali.

Un recente studio condotto su undici astronauti della ISS ha consentito di osservare un flusso di sangue stagnante o retrogrado nella IJV su sei di essi, mentre un settimo aveva sviluppato una trombosi a livello della IJV [17]. Questo grave rischio associato al volo spaziale ha serie implicazioni sulla salute degli astronauti e richiede urgenti misure di monitoraggio ed eventuale terapia in volo. Così, la disponibilità di un nuovo strumento diagnostico per il monitoraggio sistematico dei parametri cardiovascolari dei membri dell'equipaggio diventa fondamentale. Il JVP consente molto altro. Ad esempio, è noto che la ridotta efficienza della pompa cardiaca nel corso di lunghe missioni spaziali si traduce in una difficoltà di smaltimento del sangue che ritorna al cuore. Ciò causa delle modificazioni delle aree di sezione del vaso che sono misurabili dalla pletismografia JVP. Altri possibili campi di applicazione riguardano lo studio delle correlazioni fra il ritorno venoso cerebrale e lo sviluppo di sintomatologia visiva o cognitiva negli astronauti nel corso dei voli di lunga durata: offuscamento della vista, sensazione di intorpidimento e di annebbiamento cerebrale.

L'integrazione dei dati provenienti da esperimenti effettuati sia a Terra che sullo Spazio sarà fondamentale per ottenere informazioni sulla fisiologia umana. Con il progetto Drain Brain 2.0 verrà sviluppato e sperimentato sulla ISS un dispositivo diagnostico innovativo. Lo sviluppo e il collaudo spaziale del nuovo strumento rappresentano un caso di accelerazione tecnologica concettualmente analogo a quanto avviene nel settore automobilistico, dove le innovazioni tecnologiche sperimentate in F1 sono trasferite successivamente al settore automobilistico rivolto al grande pubblico. Il progetto Drain Brain 2.0 si propone infatti di utilizzare lo stesso dispositivo sulla Terra per un utilizzo clinico in Telemedicina, trattandosi di uno strumento che nasce già con dimensioni e portabilità ideali per la cosiddetta medicina di prossimità. Rispetto a oggi, l'innovazione spaziale potrebbe aiutare in tempi rapidissimi e in modo decisivo le necessità dei pazienti sulla Terra, fornendo quindi assisten-

za a popolazioni con difficoltà di movimento e per le quali è disagiata recarsi presso presidi ospedalieri per un consulto.

Le ricadute economiche e sociali di queste opportunità sono immediate, ad esempio in termini di alleggerimento del carico assistenziale per i *caregivers* che non dovranno più essere distolti dalle attività produttive e lavorative per accompagnare periodicamente famigliari affetti da patologie croniche. Ricadute positive si possono avere anche in termini di miglioramento del *fitness* cardiovascolare, con una più ampia platea di soggetti interessati, che per cause diverse sono costretti alla riduzione della mobilità e dell'esercizio fisico. Lo strumento può infatti essere facilmente usato sul campo e monitorare i progressi di terapie basate su programmi di esercizio fisico strutturati a scopo preventivo o riabilitativo. Il prodotto che si andrà a sviluppare per i bisogni Terrestri è un sistema non invasivo e *verde* poiché non espone alle radiazioni della radiologia tradizionale. Il nuovo dispositivo sarà in grado di fornire informazioni spendibili per lo studio delle malattie cardiovascolari a costi estremamente contenuti. Come è stato anticipato sopra, ideali candidati campi di applicazione, che si sommano a quello spaziale, saranno lo scompenso cardiaco [13] o i problemi cognitivi dell'anziano.

Il nuovo dispositivo potrebbe in futuro anche essere utilizzato per lo studio di malattie neurodegenerative. Uno studio pilota, presentato dal gruppo di ricerca dell'Università di Ferrara all'International Society for Neurovascular Diseases (ISNVD), ha infatti evidenziato che la forma d'onda del polso giugulare presenta aree di picco significativamente diverse in pazienti nelle fasi di esordio della malattia di Alzheimer rispetto ai soggetti di controllo.



- [1] https://www.globalspaceexploration.org/wordpress/wp-content/isecg/GER_2018_small_mobile.pdf
- [2] <https://www.nasa.gov/hrp/5-hazards-of-human-spaceflight>
- [3] P.R. Hoskins: *A review of the measurement of blood velocity and related quantities using Doppler ultrasound*, Proc. Inst. Mech. Eng. H, 213 (1999) 391.
- [4] F. Sisini, M. Tessari, E. Menegatti, M. E. Vannini, S. Ganesini, V. Tavoni, G. Gadda, M. Gambaccini, A. Taibi, P. Zamboni: *Clinical applicability of assessment of jugular flow over the individual cardiac cycle compared with current ultrasound methodology*, Ultrasound Med. Biol., 42 (2016) 1750.
- [5] A.N. Nicolaides: *Investigation of chronic venous insufficiency: a consensus statement*, Circulation, 102 (2000) E126.
- [6] A. Taibi, M. Andreotti, C. Cibinetto, A. Cotta Ramusino, G. Gadda, R. Malaguti, L. Milano, P. Zamboni: *Development of a plethysmography system for use under microgravity conditions*, Sens Actuators A Phys, 269 (2018) 249.
- [7] P. Zamboni, E. Menegatti, P. Conforti, S. Shepherd, M. Tessari, C. Beggs: *Assessment of cerebral venous return by a novel plethysmography method*, J. Vasc. Surg., 56 (2012) 677.
- [8] Y. C. Fung: *Biomechanics: Circulation. 2nd edition*, Springer-Verlag, New York (1997).
- [9] M. M. Applefeld: *The jugular venous pressure and pulse contour. Clinical Methods: The History, Physical, and Laboratory Examinations. 3rd edition*, Butterworth Publishers, a division of Reed Publishing, New York (1990).
- [10] I. F. S. Mackay: *An experimental analysis of the jugular pulse in man*, J. Physiol., 106 (1947) 113.
- [11] P. Zamboni, F. Sisini, E. Menegatti, A. Taibi, G. Gadda, V. Tavoni, A. M. Malagoni, M. Tessari, S. Ganesini, M. Gambaccini: *Ultrasound monitoring of jugular venous pulse during space missions: proof of concept*, Ultrasound Med. Biol., 44 (2018) 726.
- [12] F. Sisini, M. Tessari, G. Gadda, G. Di Domenico, A. Taibi, E. Menegatti, M. Gambaccini, P. Zamboni: *An ultrasonographic technique to assess the jugular venous pulse: a proof of concept*, Ultrasound Med. Biol., 41 (2015) 1334.
- [13] P. Zamboni, A. M. Malagoni, E. Menegatti, R. Ragazzi, V. Tavoni, M. Tessari, C.B. Beggs: *Central venous pressure estimation from ultrasound assessment of the jugular venous pulse*, PLoS One, 15 (2020) e0240057.
- [14] A. Taibi, G. Gadda, M. Gambaccini, E. Menegatti, F. Sisini, P. Zamboni: *Investigation of cerebral venous outflow in microgravity*, Physiol. Meas., 38 (2017) 1939.
- [15] https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/explorer/Investigation.html?id=1143 (Accessed: 21/07/2022).
- [16] N. Alperin, S. H. Lee, S. G. Sivaramakrishnan, S.G. Hushek: *Quantifying the effect of posture on intracranial physiology in humans by MRI flow studies*, J. Magn. Reson. Imaging, 22 (2005) 591.
- [17] K. Marshall-Goebel, S. S. Laurie, I. V. Alferova, P. Arbeille, S. M. Aunon-Chancellor, D. J. Ebert, S. M. C. Lee, B. R. Macias, D. S. Martin, J. M. Pattarini, R. Ploutz-Snyder, L. R. Ribeiro, W. J. Tarver, S. A. Dulchavsky, A. R. Hargens, M. B. Stenger: *Assessment of jugular venous blood flow stasis and thrombosis during spaceflight*, JAMA Network Open, 2 (2019) e1915011.

Silvia Mari: è Project Manager di Drain Brain 2.0 per l’Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Laureata nel 2010 in Ingegneria Medica, dal 2010 al 2014 ha lavorato a diversi progetti di ricerca nell’ambito della biomeccanica, analisi del movimento, neuroscienze ed ergonomia conseguendo il Dottorato di Ricerca in Neuroscienze Clinico-Sperimentali. Dal marzo 2014 lavora presso ASI, ove dal 2017 si occupa della gestione e del coordinamento di progetti di ricerca e sviluppo nel campo del Volo Umano Spaziale.

Gabriele Mascetti: è attualmente responsabile ufficio volo umano e unità coordinamento scientifico dell’ASI; delegato italiano al program board ESA Human Spaceflight, Microgravity and Exploration; *program manager* per l’Italia per la Stazione Spaziale Internazionale; professore a contratto per il Master di secondo livello in Space Missions Science, Design and Application dell’Università di Bologna; ha un’esperienza di oltre vent’anni nell’ambito dello *human spaceflight*, iniziata con un incarico come rappresentante italiano al Johnson Space Center NASA di Houston dal 2002 al 2004. Prima di approdare al settore spaziale ha lavorato in importanti aziende italiane negli ambiti dell’energia e dei trasporti ferroviari ad alta capacità. Esploratore per lavoro e nella vita per passione, ha pubblicato un libro di itinerari per *mountain bike*.

Erica Menegatti: è Ph.D. in Scienze Biomediche e Ricercatrice del Dipartimento dell’Ambiente e della Prevenzione dell’Università di Ferrara. Ha partecipato come *co-investigator* al progetto ASI DrainBrain, 2013-2015, ed attualmente fa parte del *team* di ricerca del progetto DrainBrain 2.0.

Salvatore Pignataro: è addetto alle questioni spaziali presso la Rappresentanza Permanente d’Italia presso l’Unione Europea. Ha una laurea in ingegneria aeronautica, un master di ricerca in fluidodinamica numerica e un master di II livello in sistemi e servizi spaziali. Ha lavorato nell’industria aeronautica come progettista e *team leader* degli impianti motore degli elicotteri. Dal 2001, è dipendente dell’Agenzia Spaziale Italiana (ASI), dove è dirigente tecnologo. In ASI ha lavorato per quindici anni alla gestione di programmi nel

settore dell’esplorazione spaziale e del volo degli astronauti, assumendo ruoli di rilievo nel Programma della Stazione Spaziale Internazionale. Dal 2015 al 2019, è stato esperto nazionale distaccato a Bruxelles presso l’Ufficio di politiche spaziali e ricerca della Commissione Europea, dove si è occupato di finanziamento di tecnologie spaziali critiche, in relazione all’indipendenza strategica della Unione Europea nel settore spazio, e di sorveglianza satellitare. Ha collaborato alla stesura della Comunicazione della Commissione sulla Strategia spaziale per l’Europa. Da settembre 2019, è l’Addetto alle questioni spaziali del corpo diplomatico della Rappresentanza Permanente d’Italia presso l’Unione Europea e il rappresentante nazionale al Gruppo di lavoro Spazio del Consiglio dell’Unione Europea.

Antonino Proto: si è laureato in Ingegneria Biomedica presso l’Università Campus Bio-Medico di Roma nel 2013, e ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Elettronica Applicata presso l’Università Roma Tre nel 2017. Dal 2017 al 2021 è stato *Research Fellow* presso il Dipartimento di Cibernetica e Ingegneria Biomedica dell’Università Tecnica di Ostrava in Repubblica Ceca, e dal 2022 è *Assistant Professor* presso il Dipartimento di Neuroscienze e Riabilitazione dell’Università di Ferrara. La sua esperienza copre vari aspetti della Fisica applicata alla Medicina e della Bioingegneria, con particolare interesse per lo sviluppo di dispositivi indossabili per diagnostica.

Angelo Taibi: è Professore Ordinario all’Università di Ferrara ed insegna Fisica Medica presso il Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra. Laureatosi in Fisica all’Università di Ferrara nel 1992, presso lo stesso ateneo ha ottenuto nel 1997 il dottorato di ricerca in Fisica Medica. La sua esperienza è principalmente nel campo della radiologia diagnostica, medicina nucleare e biofisica della circolazione sanguigna. Project Manager per l’Università di Ferrara degli esperimenti Drain Brain e Drain Brain 2.0.

Giovanni Valentini: si è laureato in Ingegneria Aeronautica presso l’università La Sapienza di Roma nel 1996. Ha avuto diverse esperienze lavorative nel settore aeronautico e spaziale italiano, principalmente nel campo della dinamica del volo e della navigazione satellitare. Dal

2006 è impiegato presso l'Agazia Spaziale Italiana, dove, tra le altre cose, è stato membro del Project Office di COSMO SkyMed, *mission manager* di AGILE, responsabile Operazioni Orbitali e Manutenzione delle Stazioni di Terra al Broglio Space Center (BSC) di Malindi. Dal 2015 lavora nel settore del volo umano spaziale e, oltre ad essere *program manager* di diversi contratti per la sperimentazione in microgravità, ha il ruolo di responsabile ASI dell'utilizzo delle risorse della Stazione Spaziale Internazionale.

Paolo Zamboni: è Professore ordinario di chirurgia vascolare e direttore del centro malattie vascolari dell'Università degli studi di Ferrara. *Principal Investigator* dei progetti ASI di fisiologia del volo umano spaziale DrainBrain, 2013-2015, e DrainBrain 2.0, attualmente in corso di svolgimento.

Spazzatura spaziale: origine, pericoli, che fare

Nel momento in cui svuoto la pattumiera piccola nella grande e trasporto questa sollevandola per i due manici fuori dal nostro ingresso di casa, pur ancora agendo come umile rotella del meccanismo domestico, già m'investo d'un ruolo sociale, mi costituisco primo ingranaggio di una catena d'operazioni decisive per la convivenza collettiva, sancisco la mia dipendenza dalle istituzioni senza le quali morrei sepolto dai miei stessi rifiuti nel mio guscio d'individuo singolo.

Italo Calvino, *La poubelle agrée*

Giulio Avanzini

Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento

L'accumulo dei residui delle attività spaziali, particolarmente densi nelle orbite più utili dal punto di vista operativo, costituisce una seria minaccia al futuro sviluppo delle missioni spaziali. Il rischio che un effetto domino porti alla successiva frammentazione di un numero crescente di satelliti, molti dei quali inoperativi da anni, è concreto e comporterebbe un ostacolo di fatto insormontabile a qualunque futura missione spaziale, abitata o meno.

Come si è arrivati a questo punto? Quali sono le prospettive realistiche per il futuro? Possiamo solo limitare i danni o è possibile ripulire lo spazio? Sono queste alcune delle (difficili) domande cui si tenterà di dare una risposta tecnicamente motivata nella pagine che seguono.

Introduzione, ovvero chi ha sporcato lo spazio?

Le parole di Italo Calvino riportate in esergo avrebbero dovuto suonare da monito per chi ha progettato, condotto e gestito le missioni spaziali che, a partire dal 1957, con il lancio del primo satellite artificiale, lo Sputnik 1, effettuato dall'Unione Sovietica, si sono succedute con frequenza crescente nei 75 anni successivi. La gestione dei residui di ogni attività umana è sempre (o diviene presto) un problema e - come suggerito da Calvino - ciascun individuo dovrebbe agire nell'ambito di prassi istituzionalizzate, per evitare di finire sepolti dai propri stessi rifiuti.

Purtroppo, per quanto riguarda le attività spaziali, tale sensibilità si è sviluppata solo in tempi relativamente recenti. Complici le distanze in gioco, per lungo tempo si è (erroneamente) assunto che fosse statisticamente improbabile che due oggetti potessero scontrarsi nello spazio. Ma l'aumento costante delle attività, soprattutto in

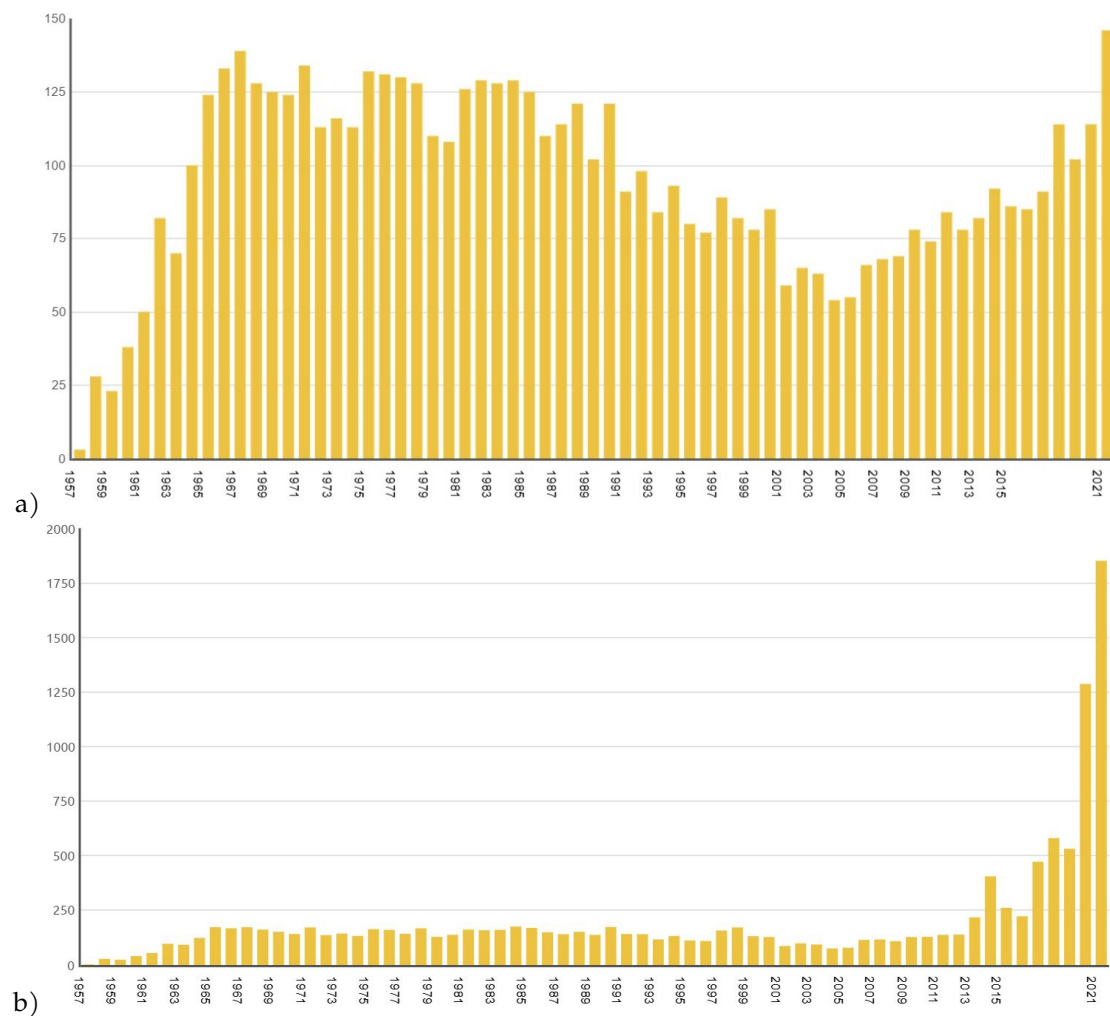


Figura 1: Numero annuale di lanci (a) e di satelliti messi in orbita (b) [2].

orbita bassa (*Low Earth Orbit* o LEO), ha portato a un accumulo di oggetti passivi, che orbitano senza controllo e rappresentano un rischio per i satelliti operativi.

Il 24 luglio del 1996 fu registrata la prima collisione accidentale fra due oggetti orbitanti catalogati [1]: un frammento del terzo stadio di un lanciatore Ariane urtò, rompendola, la trave di stabilizzazione a gradiente di gravità del microsatellite militare francese *Cerise*, di massa pari a 50 kg, dimezzandone la lunghezza da circa 6 a meno di 3 m. Il satellite rimase operativo, anche se con capacità di controllo dell'assetto degradate, e la collisione generò un solo frammento, per cui le conseguenze dell'evento furono relativamente modeste. Tuttavia, da quel momento in avanti, ci si rese conto che lo spazio, per quanto grande, era divenuto decisamente affollato.

Il 10 febbraio 2009 si verificò invece la prima collisione fra due veicoli spaziali operativi, un sa-

tellite per telecomunicazioni americano Iridium e un satellite militare russo Kosmos, che vennero distrutti dall'impatto a una velocità relativa di 11,7 km/s, producendo una nuvola di detriti formata da più di 2 300 frammenti rilevabili da terra. Il naturale decadimento orbitale ha portato molti di questi frammenti a rientrare in atmosfera, dove le temperature raggiunte durante il rientro li hanno bruciati, ma data la quota a cui si verificò la collisione, alcuni di essi sono ancora in orbita.

Il numero annuo di lanci, dopo una rapidissima crescita nel primo decennio della corsa allo spazio, che portò al picco di 139 lanci nel 1967, ha subito fluttuazioni, con un trend medio in calo, fino a un minimo di soli 55 lanci nel 2004, per poi riprendere a crescere in modo quasi costante, fino al nuovo record di 149 lanci nel 2021 (Fig. 1.a). Fino ai primi anni del nuovo millennio, il numero di oggetti messi in orbita all'anno si discostava poco dal numero di lanci effettuati, ma

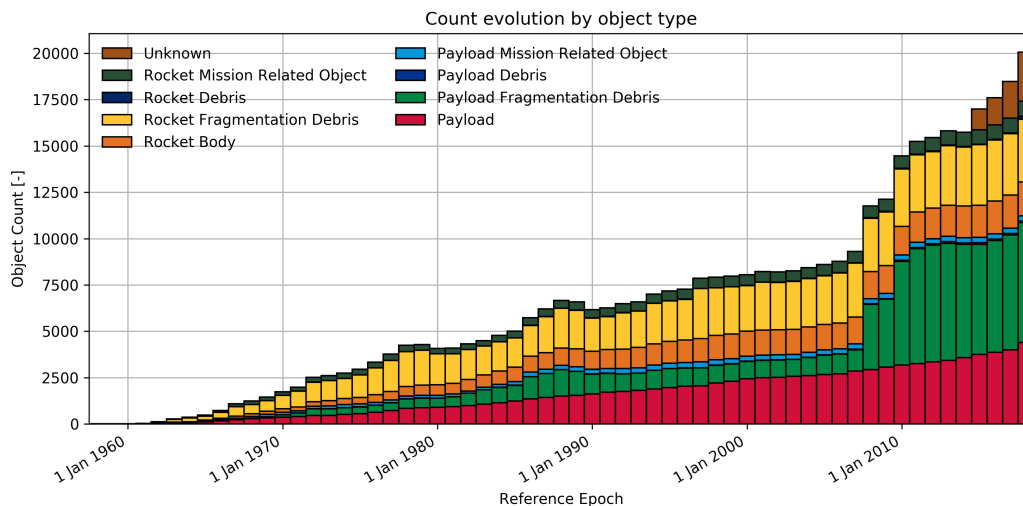


Figura 2: Numero di debris catalogati [3].

negli ultimi 15 anni il loro numero è cresciuto in modo esponenziale, fino a toccare l'incredibile record, raggiunto sempre nel 2021, di ben 1851 satelliti, che segna un incremento del 44% rispetto all'anno precedente (Fig. 1.b).

Viceversa, il numero di oggetti in orbita intorno alla Terra catalogati come spazzatura spaziale è cresciuto inizialmente a un tasso quasi costante, per presentare poi vere e proprie discontinuità (Fig. 2). Nel corso del 2021 è stato superato il numero di 20 000 oggetti catalogati. A questi frammenti tracciati vanno aggiunti tutti quegli oggetti troppo piccoli per essere visibili da Terra anche con gli strumenti più sofisticati, e che quindi rappresentano, stanti le velocità in gioco, un ulteriore (e imprevedibile) pericolo per le missioni spaziali presenti e future. Le fonti che hanno portato a questo numero così elevato sono diverse, alcune legate alle operazioni spaziali, alcune accidentali, altre collegate ad attività deliberate.

Fra le fonti operative di *debris* ci sono i satelliti a fine vita (*decommissioned*) e gli ultimi stadi dei lanciatori che collocano i satelliti in orbita, per poi rimanere loro stessi in orbita anche per molti anni. Questi oggetti sono noti e facilmente rilevabili. Altre fonti operative di *debris* sono gli oggetti rilasciati durante le missioni (alcuni dei quali sotto la soglia di tracciabilità a Terra). Viceversa, episodi di frammentazione accidentale o deliberata creano un gran numero di pezzi. Le discontinuità nell'andamento della curva dei pezzi di *debris* catalogati visibili in Fig. 2 sono tutte dovute a episodi di frammentazione.

La frammentazione accidentale può avvenire a causa di una collisione, come nel caso dei due satelliti Iridium e Kosmos, o quando, a causa del deterioramento delle strutture, residui di carburante non bruciato nei serbatoi di un satellite decommissionato o dell'ultimo stadio di un lanciatore vengono in contatto con un ossidante e provocano un'esplosione.

Alle frammentazioni accidentali, vanno aggiunte quelle provocate deliberatamente per testare sistemi d'arma anti-satellite (ASAT). Fra gli episodi più eclatanti vi è quello del test cinese di un missile anti-satellite che nel gennaio del 2007 ha distrutto un satellite meteorologico cinese da 750 kg, della famiglia FengYun, in orbita polare, a una quota di circa 865 km, provocando un aumento dei pezzi di detriti orbitanti di ben il 25%. L'ultimo test noto di un sistema ASAT è stato condotto dall'India nel Marzo del 2019. Il test ha utilizzato come bersaglio un satellite in orbita bassa, a circa 300 km di quota, cosa che ha permesso un decadimento orbitale relativamente rapido di quasi tutti i frammenti generati. L'ultimo frammento è rientrato in atmosfera nel Giugno 2022.

Pericoli

Le velocità relative di due corpi orbitanti che dovessero scontrarsi in orbita sono, come visto sopra, nell'ordine dei 10 km/s. Questo fa sì che anche un frammento relativamente piccolo, colpendo un satellite operativo, lo può danneggiare.

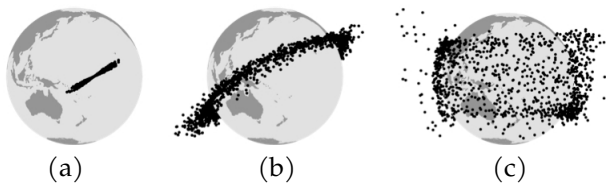


Figura 3: Evoluzione del debris formato a seguito di frammentazione: ellissoide (a); anello (b); banda (c). [4].

re in modo estremamente serio e, nei casi più sfortunati, può provocarne la distruzione. In caso di frammentazione si crea una nuova nuvola di frammenti che va ad arricchire la già troppo numerosa popolazione di *debris* catalogati.

Sia l'esplosione che la frammentazione da impatto distribuiscono i frammenti in orbite diverse da quella di partenza. La nuvola tende ad allargarsi, dapprima intorno al punto nominale dell'orbita originaria, sotto forma di un ellissoide di frammenti (Fig. 3.a). A causa delle lievi differenze nei periodi orbitali dei diversi frammenti, l'ellissoide si allunga fino a creare un anello di frammenti (Fig. 3.b). Su una scala temporale più lunga, la perturbazione dovuta allo schiacciamento ai poli dell'ellissoide terrestre (il cosiddetto effetto J_2) provoca la lenta rotazione del piano orbitale dell'orbita di ciascun frammento. Piccole discrepanze iniziali nella posizione del piano orbitale tenderanno così ad aumentare fino a quando i frammenti occupano tutta la fascia di orbite caratterizzate approssimativamente dalla stessa inclinazione.

Questa situazione evidenzia i pericoli legati alla formazione di un numero crescente di frammenti in orbita. Il potenziale distruttivo della nube di frammenti sparpagliati su orbite diverse è infatti enorme. Nell'ambito della letteratura divulgativa riguardante la spazzatura spaziale, ha avuto molto successo (soprattutto al di fuori della ristretta comunità di specialisti interessati al problema del *debris*) la definizione della sindrome di Kessler [5]. Lo scenario è quello di un effetto domino in cui un primo episodio di frammentazione ne induce a cascata una successione, fino al punto da danneggiare seriamente un numero sempre crescente di satelliti già in orbita. Lo spazio circumterrestre, popolato di un numero sterminato di frammenti, diventerebbe di fatto non più accessibile e le attività spaziali verrebbero inevitabilmente interrotte per lunghissimo

tempo.

Se da un lato questo scenario apocalittico appare al momento improbabile, il lancio di costellazioni di satelliti in numero sempre crescente potrebbe presto portare a una densità di oggetti orbitanti tale da rendere la sindrome di Kessler una minaccia potenziale ben più concreta. La sola costellazione Starlink di prima generazione, dell'americana SpaceX, dovrebbe contare fra i 1 600 e i 2 200 satelliti in orbita bassa (500 km circa). L'aumento repentino nel numero di lanci e di oggetti immessi in orbita è legato infatti, oltre che all'intensificarsi delle attività spaziali cinesi, proprio al dispiegamento in orbita della costellazione di SpaceX, che ha l'ambizione di garantire una copertura internet globale all'intero pianeta senza bisogno di infrastrutture terrestri.

Contromisure e buone pratiche

Molti frammenti di spazzatura spaziale (soprattutto quelli in orbita bassa) prima o poi rientrano in atmosfera a causa del decadimento orbitale e si fondono durante il rientro. Si osservi però che tale fenomeno non è privo di conseguenze e seri rischi, anche solo potenziali. Innanzi tutto alcuni satelliti contengono materiali fortemente inquinanti e/o tossici, che vengono dispersi nell'aria durante la fase di rientro. Inoltre, soprattutto per i frammenti di *debris* di dimensioni maggiori, la nebulizzazione dei componenti non sempre è completa e frammenti più o meno grandi possono raggiungere il suolo, con conseguenze facilmente immaginabili, qualora tali frammenti colpissero un centro abitato.

La curva crescente del numero di frammenti in orbita testimonia chiaramente che lo smaltimento dei rifiuti spaziali legato al decadimento orbitale non compensa in alcun modo il rateo con cui nuovo *debris* viene creato. Con poche eccezioni, la curva del numero di frammenti catalogati cresce costantemente da un anno all'altro.

Le contromisure che consentono, al momento, di garantire la sicurezza operativa dei mezzi orbitanti sono legate alla conoscenza esatta della posizione dei frammenti e al calcolo della probabilità di collisione. Quando la previsione della posizione relativa di un frammento rispetto al satellite considerato, basato su accurate tecniche di propagazione orbitale, porta a una stima di una

probabilità di impatto maggiore di una soglia giudicata di rischio accettabile, il satellite effettua una manovra orbitale per correggere la sua traiettoria e riportare la probabilità di impatto al di sotto della soglia di rischio prescelta.

Stante l'accuratezza con cui la posizione relativa dei diversi oggetti orbitanti catalogati, operativi e non, può essere prevista su orizzonti temporali piuttosto lunghi, le manovre correttive, effettuate quando la distanza fra i due corpi in potenziale rotta di collisione è ancora sufficientemente grande, sono di piccola entità. La Stazione Spaziale Internazionale, che al momento è il veicolo in orbita più grande mai realizzato, deve effettuare tali manovre di *collision avoidance* in media una volta l'anno. Tuttavia, nel 2020, tali manovre sono state ben tre. L'ultima, quella effettuata il 22 settembre 2020, è stata la più impegnativa, in quanto in questo caso il frammento in rotta di collisione con la ISS non era catalogato, e la situazione di pericolo era stata identificata solo nel corso della giornata precedente. Per ragioni di sicurezza gli astronauti si erano trasferiti nella capsula di rientro Soyuz, mentre gli operatori di terra russi e statunitensi lavoravano congiuntamente per spostare la ISS su un'orbita di 5 km più elevata.

Chiaramente gli oggetti non catalogati costituiscono un pericolo maggiore, ma è chiaro che per tutti i satelliti queste manovre rappresentano un costo aggiuntivo non indifferente, in termini di consumo di carburante. Questo riduce inevitabilmente la loro vita operativa. In molti casi, inoltre, se il mantenimento esatto dell'orbita prevista è un aspetto rilevante della missione, è chiaro che durante la fase in cui il satellite considerato si allontana da tale orbita, le sue capacità operative possono risultare ridotte o addirittura temporaneamente compromesse.

Per evitare, o quanto meno limitare, la crescita del numero di oggetti passivi orbitanti, occorre risolvere il problema di cosa fare dopo il *decommissioning* dei satelliti (ovvero dopo la fine della loro vita operativa). Le procedure che tentano di risolvere questo problema sono dette *post mission disposal* (PMD), ovvero smaltimento dopo la missione. L'efficacia delle procedure di PMD è chiaramente di cruciale importanza per garantire la sostenibilità presente e futura delle missioni spaziali. Purtroppo, ogni soluzione individuata

fino a oggi presenta controindicazioni. Alcune buone prassi di PMD prevedono che parte del carburante a bordo venga risparmiato per effettuare un'ultima manovra di trasferimento orbitale che porti il satellite su un'orbita che deve garantire il rientro in atmosfera (e la conseguente distruzione del satellite) in un lasso temporale ragionevolmente breve. In alternativa è possibile trasferire il satellite su un'orbita di parcheggio, detta *graveyard orbit* (ovvero orbita cimitero) che non interferisca con le orbite su cui si trovano satelliti operativi.

Quando si opera in orbite basse, è possibile ridurre la quantità di carburante necessario a decommissionare il satellite equipaggiandolo con appositi sistemi di *de-orbiting* passivo, basati sull'aumento della resistenza attraverso l'apertura di una vela o il *deployment* di un *tether* elettrodinamico [4]. Nel primo caso, l'apertura della vela aumenta la sezione resistente del satellite nella direzione della velocità orbitale, incrementando la resistenza e accelerando così il decadimento orbitale (Fig. 4). Nel secondo caso il *tether* elettrodinamico, costituito da un nastro conduttore che viene rilasciato nello spazio e messo in debolissima tensione dal gradiente di gravità, genera una forza di Lorenz in verso opposto al moto orbitale, tramite l'interazione del materiale conduttore di cui è fatto il *tether* con il campo magnetico terrestre. In tutti i casi, il peso, la complessità e l'affidabilità di tali sistemi sono da confrontare con il costo del carburante aggiuntivo necessario per una manovra di *deorbiting* effettuata con l'apparato propulsivo.



Figura 4: La vela per il satellite Techdemosat-1. [7].

Purtroppo molte orbite operative non consentono l'uso di sistemi di *deorbiting* passivo, in quanto al di sopra dei 1000 km la densità del-

l'atmosfera ha ormai effetti totalmente trascurabili sul moto orbitale. Per orbite ancora più alte, e in particolare per quelle geostazionarie (*Geostationary Earth Orbit*, o GEO), la quantità di carburante necessaria a effettuare una manovra di *deorbiting* che si concluda con un rientro in atmosfera è troppo grande. In tali casi la strategia di rimozione dall'orbita operativa prevede di spostare il satellite su un'orbita inutile, dal punto di vista operativo, e sufficientemente lontana da tutte le orbite operative, riducendo la probabilità di impatto con altri corpi orbitanti al di sotto di un valore giudicato accettabile.

Tuttavia, se da un lato la *graveyard orbit* non comporta rischi connessi alla dispersione di inquinanti in atmosfera o a impatti a terra, le perturbazioni orbitali non garantiscono che, in lassi di tempo pluridecennali, i satelliti ivi collocati non si ritrovino prima o poi su orbite che incrociano quelle di veicolo spaziali ancora operativi. In seconda istanza, la stessa *graveyard orbit* che accogliesse un numero crescente di satelliti ormai passivizzati potrebbe diventare a sua volta sorgente di frammenti di *debris* a seguito di collisione, se la densità dei satelliti decommissionati diventasse troppo alta. Quindi, al momento, nessuna buona prassi appare come risolutiva per garantire la sostenibilità di lungo e lunghissimo periodo delle attività spaziali.

Spazzini nello spazio

Appare chiaro dalle considerazioni precedenti che, come per molte altre attività umane, il problema della sostenibilità è divenuto fondamentale anche per quelle spaziali. Dato che nonostante il ricorso a buone prassi per il *post mission disposal* il numero di frammenti, già elevato, risulta comunque crescente nel tempo, da diversi anni si stanno studiando possibili soluzioni per il cosiddetto *active debris removal* (ADR), ovvero la rimozione attiva dei frammenti e dei satelliti decommissionati.

Tuttavia, se da un lato appare indispensabile identificare strategie efficaci per ridurre il numero di frammenti orbitanti, dall'altro le tecnologie per l'ADR soffrono delle stesse limitazioni e problematiche che affliggono le tecniche di PMD, legate allo smaltimento in atmosfera o in un'orbita cimitero degli eventuali pezzi di *debris* cat-

turati dal satellite spazzino (chiamato più nobilmente *chaser*, in inglese, ovvero cacciatore). A tali limitazioni e problematiche si sommano poi specifiche difficoltà tecniche per le missioni di ADR, per cui si è ancora lontani dall'identificare una strategia adeguata e sostenibile, sia dal punto di vista dell'ambiente spaziale che da quello economico.

Gli aspetti da tenere in considerazione sono diversi. Uno dei più rilevanti riguarda la necessità di evitare tassativamente qualunque rischio di creare nuovi frammenti di *debris* nel tentativo di rimuoverne uno. Questo porta a escludere qualunque tecnica di *deorbiting* basata su impatto. La maggior parte dei metodi di ADR attualmente presi in considerazione sono quindi basati su procedure di cattura del frammento, in cui il *chaser* deve agganciare in qualche modo il suo bersaglio (*target*). Tuttavia le difficoltà, già notevoli quando la navigazione di prossimità, l'approccio e l'aggancio (*docking*) avvengono fra veicoli spaziali cooperanti (ovvero in grado di manovrare in modo coordinato), diventano enormi, quando si tratta di agganciare un *target* non cooperativo, spesso dotato di un moto di *spin* incontrollato.

Per la cattura, uno dei metodi più promettenti sembra essere quello della rete (*net*), in cui il *chaser* lancia una rete che avvolge il frammento e lo aggancia, in modo indipendente dal suo stato di moto di assetto. Fra gli aspetti più critici vi è il fatto che il sistema di aggancio deve gestire lo scambio di momento angolare fra il *target* catturato e il *chaser* che, almeno durante la prima fase dopo la cattura, saranno collegati. La gestione dell'assetto dei due corpi non è banale, soprattutto quando il frammento catturato è di grandi dimensioni e/o la sua velocità angolare elevata.

Una volta agganciato, occorre procedere con lo smaltimento del frammento, secondo una delle due procedure identificate nel paragrafo precedente, ovvero il suo *deorbiting* (che può essere attivo, con l'intervento di un propulsore, o passivo, attraverso l'apertura di un sistema di aumento della dissipazione, che lo inserisca su una traiettoria che comporti il rientro e, quindi, la sua distruzione in atmosfera), oppure il suo trasferimento verso un'orbita cimitero (con tutte le difficoltà e i costi energetici di questa seconda opzione). A complicare ulteriormente lo scenario c'è però l'aspetto economico.

L'accesso allo spazio è estremamente costoso e chiaramente non si può pensare a missioni di ADR che rimuovano un unico pezzo di *debris*. Stante il numero di frammenti da rimuovere i costi di una campagna di rimozione di frammenti diventano sostenibili solo se ogni *chaser* è in grado di rimuovere un numero elevato di frammenti di *debris*. Questo comporta la necessità di progettare missioni di ADR che consentano al *chaser* di raggiungere uno dopo l'altro diversi frammenti. Il numero di frammenti che il satellite spazzino potrà rimuovere sarà inevitabilmente limitato dalla quantità di carburante disponibile per effettuare le manovre orbitali necessarie a passare da un pezzo di *debris* al successivo, cui va sommato quello necessario per le manovre di avvicinamento e cattura.

Per questa ragione sono in corso, anche presso l'Università del Salento [8], studi che ottimizzano la missione dei satelliti spazzini, studiando la sequenza di manovre orbitali che consentono di raggiungere la massima efficacia della missione per una data quantità di carburante imbarcato. A ogni elemento di *debris* può essere assegnato un punteggio, che ne misura la pericolosità, e un costo per raggiungerlo, associato alla quantità di carburante necessaria per manovrare verso l'orbita del frammento stesso a partire da quella del frammento catturato precedentemente. Il punteggio è legato non solo alla massa del frammento (chiaramente oggetti più massivi possono infliggere danni maggiori, date le velocità relative in gioco), ma anche alla sua dimensione e, soprattutto, alla probabilità di entrare in collisione con altri corpi, aspetto che dipende da quanto le orbite prossime a quelle del frammento considerato siano più o meno densamente popolate. L'algoritmo di ottimizzazione deve fornire la sequenza di frammenti da catturare, massimizzando il punteggio complessivo della missione, nel rispetto del vincolo sul carburante totale disponibile per effettuare tutte le manovre necessarie.

Il problema può essere affrontato come una variante del problema del commesso viaggiatore (*Traveling Salesman Problem*, o TSP). Nella sua versione base, il problema del TSP è quello di identificare il percorso di lunghezza minima che consentirebbe a un commesso viaggiatore di visitare N città diverse, attraversandole tutte una

sola volta. Già in questa sua formulazione elementare il problema presenta notevoli difficoltà per la sua soluzione numerica. Nel caso della missione di un satellite spazzino si aggiungono diverse difficoltà. La prima è che, mentre la distanza fra ogni coppia di città (che per un dato percorso determina il valore finale dell'indice da minimizzare, ovvero la distanza totale percorsa) è costante, nel caso in esame il costo del trasferimento da un frammento di *debris* al successivo varia nel tempo. Stante quindi una data quantità di carburante disponibile, ogni trasferimento orbitale necessario per avvicinare uno dei frammenti dipenderà non solo dall'orbita su cui si trova il cacciatore di *debris*, ma anche dal momento in cui parte.

Inoltre, stante l'oggettiva impossibilità di raggiungere tutti i frammenti dispersi in orbita con un singolo satellite spazzino, occorre scegliere quali siano i frammenti da catturare fra tutti quelli che si trovano in quella regione dello spazio. Da questo punto di vista la situazione risulta particolarmente critica per le orbite geostazionarie e per quelle eliosincrone, dove il numero di frammenti e satelliti non più operativi presenti è particolarmente elevato. Le orbite eliosincrone, in particolare, sono orbite quasi polari in cui la perturbazione dovuta allo schiacciamento ai poli dell'ellissoide terrestre induce una rotazione del piano orbitale con un periodo pari a un anno solare. Questo fa sì che il piano orbitale mantenga una giacitura con angolo costante rispetto alla direzione di provenienza dei raggi solari. Tale caratteristica è particolarmente importante per i satelliti per l'osservazione della Terra, in quanto le condizioni di illuminazione della superficie terrestre sono costanti nel tempo. La conseguenza è che molti satelliti per telerilevamento vengono collocati su queste orbite, e quindi la densità di corpi orbitanti risulta più elevata che per altre famiglie di orbite. Eliminare in tali regioni dello spazio gli elementi più pericolosi della popolazione di *debris* è dunque cruciale per consentire la prosecuzione delle attività spaziali.

Qualche conclusione

Il quadro sopra presentato appare poco promettente per il futuro delle missioni spaziali. La situazione, già seria, appare in peggioramento,

stante il numero crescente di frammenti in orbita. Tuttavia il primo - e fondamentale - passo per risolvere il problema è stato compiuto: l'intera comunità di chi opera nell'ambito delle attività spaziali è consapevole del problema e, quindi, progetta missioni che minimizzino il rischio di peggiorarlo. Inoltre, tutte le principali agenzie spaziali del mondo soprattutto occidentale (la NASA negli USA, l'ESA in Europa, la JAXA in Giappone) hanno lanciato o stanno per lanciare missioni sperimentali per testare tecniche di *Active Debris Removal*. Accanto a questi soggetti istituzionali, anche molte compagnie private, nell'ambito delle iniziative legate alla cosiddetta *Space Economy*, stanno valutando la possibilità di investire importanti capitali per supportare lo sviluppo di flotte di mezzi per ADR, da usare come servizio da vendere a coloro che intendono utilizzare lo spazio per iniziative di tipo commerciale (e.g. le telecomunicazioni), scientifico o tecnologico. Quindi, ci sono fondate speranze che la sindrome di Kessler rimanga confinata ai film di fantascienza. O almeno questo è l'auspicio.



- [1] N. Johnson: *First Natural Collision of Catalogued Earth Satellites*, *Orbital Debris Quarterly News* Vol. 1 (2 Settembre 1996) NASA Johnson Space Centre. Consultato il 4 ottobre 2022.
- [2] D. Todd: *2021 Launch Year: A new record for both orbital rocket and satellite launch totals*, *Seradata News*(6 gennaio 2022). Consultato il 5 ottobre 2022.
- [3] https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/About_space_debris (Consultato il 5 ottobre 2022)
- [4] R. Jehn: *Dispersion of debris clouds from In-orbit fragmentation events*, *ESA Journal*, 15 (1991) 63.
- [5] D. J. Kessler, B. G. Cour-Palais: *Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt*, *Journal of Geophysical Research*, 83 (1978) 2637.
- [6] G. Sánchez-Arriaga, J.R. Sanmartín, E.C. Lorenzini: *Comparison of technologies for deorbiting spacecraft from low-earth-orbit at end of mission*, *Acta Astronautica*, 138 (2017) 536.
- [7] S. Hobbes et al. : *De-Orbit Sail Design for Techdemosat-1* Sixth European Conference on Space Debris. Darmstadt (Germany), 22-25 April 2013.
- [8] D. Zona, G. Avanzini, L. Federici, A. Zavoli: *Optimization of chaser trajectory for active debris removal missions*. 73th International Astronautical Congress (IAC) Paris (France), 18-22 September 2022.

Giulio Avanzini: è professore di Meccanica del Volo presso l'Università del Salento. Ha lavorato all'Istituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale (ora INSEAN-CNR) e al Politecnico di Torino come ricercatore. È stato *visiting professor* alla University of Glasgow (UK) e alla University of Illinois at Urbana-Champaign (USA). I suoi interessi di ricerca più recenti includono problemi fondamentali di meccanica orbitale, la dinamica e il controllo di assetto di satelliti, soprattutto in condizioni di attuazione incompleta, il volo autonomo, i velivoli elettrici e ibrido-elettrici e il loro progetto, i mezzi autonomi sottomarini.

Siamo soli nell'universo?

Paolo Saraceno

Istituto di Astrofisica e Planetologia spaziali di Roma,
Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF)

1. Gli UFO attorno a noi

Nel maggio 2022, per la prima volta in cinquant'anni, il Congresso degli Stati Uniti ha discusso degli UFO (gli oggetti volanti non identificati). L'occasione è stata la consegna del rapporto sugli *Unidentified Aerial Phenomena*, preparato dal Pentagono in risposta ad una richiesta presentata 3 anni prima dal presidente Trump. Il rapporto documentava l'avvistamento di 144 oggetti non identificati sul cielo degli Stati Uniti avvenuto nel periodo 2004-2019: troppi per essere ignorati. Nel corso dell'audizione, Ronald Moultrie, responsabile dell'*intelligence* del Pentagono, e Scott Bray, vicedirettore dell'*intelligence* navale, dichiararono che i dati esaminati non fornivano elementi che permettessero di affermare una natura extraterrestre di quegli oggetti. Affermazione poco rassicurante che lasciava spazio all'ipotesi di nemici esterni che potevano violare i cieli USA senza essere avvistati dai sistemi di difesa. Nonostante queste dichiarazioni, gli avvistamenti di UFO crebbero, (uno anche a Terni) e nel luglio 2022 il Congresso, nel tentativo di eliminare ogni dubbio, ha chiesto alla NASA di esprimere un parere sul rapporto. È stato quindi formato un gruppo di lavoro costituito da fisici dell'atmosfera, planetologi, astrofisici, mai coinvolti in studi sugli UFO che, sotto la guida dell'astrofisico David Spergel, dovranno dare una risposta entro il 2023.

I progressi delle tecnologie spaziali degli ultimi 50 anni hanno fornito argomenti a favore di possibili presenze extraterrestri sulla Terra. Siamo stati sulla Luna, presto ci torneremo, probabilmente sbarcheremo su Marte, estrarremo minerali dagli asteroidi e, nei prossimi secoli, do-

vremmo poter intraprendere viaggi interstellari. Viaggi senza ritorno, ma possibili. Pertanto, se noi possiamo concepire viaggi simili, perché gli abitanti di mondi lontani non dovrebbero averlo fatto ed essere qui a disturbarci con i loro UFO?

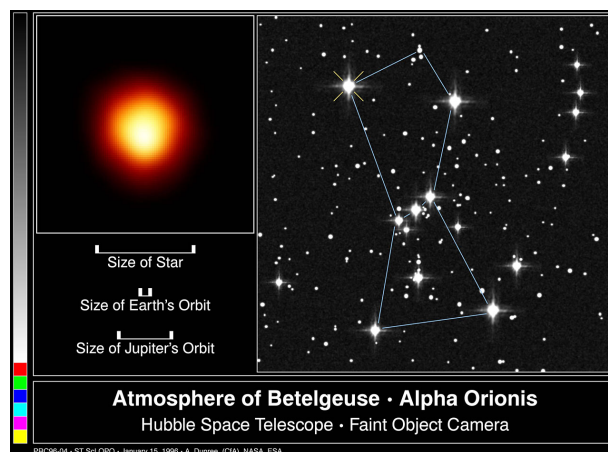


Figura 1: Sinistra: Betelgeuse, una stella gigante rossa nella costellazione di Orione (rappresentata a destra) a 420 anni luce dalla Terra, fotografata da HST. Il diametro della stella è superiore all'orbita di Giove (riportata in figura assieme all'orbita della Terra) è talmente grande che lo si può misurare direttamente da una foto. Betelgeuse ha una massa 10 volte superiore a quella del Sole, concluderà la sua vita esplodendo come supernova e, come vedremo, ha vissuto troppo poco per aver potuto ospitare extraterrestri intelligenti nei suoi pianeti. Il Sole, che ospita una specie come la nostra, quando diverrà una gigante rossa avrà un diametro 5 volte più piccolo, ma sufficiente a distruggere la Terra. (Foto HST, gennaio 1996. ©NASA, ESA & A. Dupree CfA)

Vita intelligente e vita delle stelle

Affermare che servono 5 miliardi di anni per produrre specie intelligenti pone dei limiti sulle masse delle stelle. Il volume in cui esse raggiungono le temperature necessarie alla fusione nucleare è proporzionale a M^4 (dove M è la massa della stella) pertanto la luminosità di una stella e la velocità con cui essa consuma combustibile sono anch'essi proporzionali a M^4 . Poiché il combustibile a disposizione è la massa M della stella, la sua vita è proporzionale $M/M^4 = 1/M^3$. Da cui si ricava che stelle del 25% più massicce del Sole vivono troppo poco perché sui loro pianeti possano esservi extraterrestri intelligenti. (La vita di una stella come il Sole è di 10 miliardi di anni, la vita di una stella del 25% più massiccia è: $10/(1.25)^3 = 5.1$ miliardi di anni). Va poi considerato che nella nostra galassia non esistono nemmeno stelle del 20-25% più piccole del Sole, perché su di esse la materia condensa così lentamente che nei 10 miliardi di vita della galassia non hanno avuto il tempo di nascere come stelle (bruciare idrogeno al centro). Pertanto forme di vita intelligente possono esistere solo attorno a stelle come il Sole, o del 20-25% più o meno massicce, che concludono la loro vita come le nebulose planetarie di Figura 2. Per una discussione più approfondita del tema si vedano le referenze [1, 2].

2. Il paradosso di Fermi

Negli anni '50 del secolo scorso Enrico Fermi si pose la stessa domanda ed arrivò alla conclusione che, se la vita intelligente fosse stata un fatto comune nell'Universo, gli extraterrestri avrebbero dovuto essere qui. Il fatto che non ci fossero (sempre che il gruppo di lavoro NASA non provi la loro esistenza) era un paradosso che è passato alla storia come il **paradosso di Fermi**. Per intelligente, egli intendeva forme di vita capaci d'intraprendere viaggi interstellari, il livello tecnologico che noi dovremmo presto raggiungere.

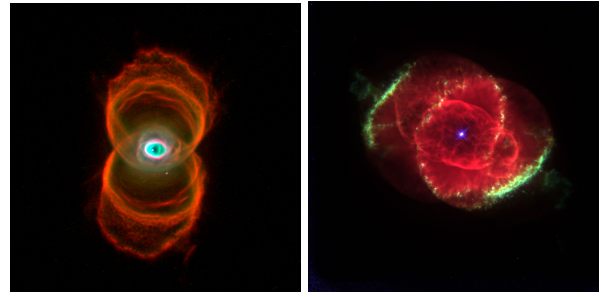


Figura 2: Due nebulose planetarie fotografate da HST che mostrano cosa ci sarà al posto del sistema solare tra circa 5 miliardi di anni. I cerchi sono sfere di materia espulsa nella fase di gigante rossa che scompare dopo 10.000 anni circa. Il puntino luminoso al centro è una nana bianca, quello che resta di una stella come il Sole. Un oggetto delle dimensioni della terra, ma molto più denso. Sinistra: nebulosa MyCn18, detta a clessidra (Foto HST, gennaio1996. ©NASA & R Sahai and J. Trauger (JPL)) Destra: nebulosa NGC 6543, detta a occhio di gatto (Foto HST, gennaio1995 ©NASA, & J. P. Harrington, K.J. & Borkowsky (University of Maryland)).

Il suo ragionamento si basava sul fatto che le stelle, quando finiscono di bruciare l'idrogeno al loro centro si contraggono, aumentano la temperatura e bruciano contemporaneamente elio nel nucleo e idrogeno negli strati esterni, facendo crescere enormemente l'energia prodotta. La stella aumenta il suo diametro, diventa una gigante rossa ed ingloba nella sua atmosfera infuocata i pianeti vicini (Fig. 1); questa sarà la fine della Terra tra 5 miliardi di anni. Pertanto, Fermi osservava che, se attorno a quelle stelle ci fossero stati pianeti abitati da esseri intelligenti, essi avrebbero lasciato il loro mondo prima di morire con esso. Da quei pianeti sarebbero partite centinaia di astronavi (le partenze sarebbero cominciate migliaia di anni prima della fine del pianeta) e qualcuna di esse avrebbe dovuto arrivare sulla Terra e lasciare una traccia nella nostra storia biologica; una traccia di cui non c'è evidenza.

Perché forme di vita intelligente possano svilupparsi attorno alle stelle, esse devono avere il tempo di nascere, cioè iniziare a bruciare idrogeno al centro, come sta facendo il Sole, e poi vivere abbastanza da permettere alla vita di evolvere ed arrivare a specie come la nostra. Nel

sistema solare, dal momento in cui il Sole è nato, ci sono voluti 5 miliardi di anni per arrivare alla nostra specie. Come vedremo, è difficile immaginare che specie intelligenti possano comparire su di un pianeta in tempi molto inferiori mentre è possibile che non compaiano mai od impieghino più tempo. Pertanto solo stelle come il Sole o al massimo del 25% più grandi o più piccole (si veda riquadro) possono ospitare extraterrestri intelligenti, stelle che nella nostra galassia sono numerosissime.

Perché su di un pianeta ci sia una forma di vita simile alla nostra, la sola della cui esistenza siamo certi, nella sua atmosfera deve esserci ossigeno. Un elemento che, pur essendo tra i più abbondanti dell'universo, non esiste allo stato atomico o molecolare lontano dalla Terra, come hanno mostrato i satelliti lanciati per cercarlo e che non lo hanno trovato. La ragione per cui non lo si è trovato è che l'ossigeno ha una forte affinità ad ossidare, a legarsi cioè con gli altri elementi per formare delle molecole per cui, se non c'è un meccanismo che lo produce di continuo, in poco tempo scompare. Sulla terra questo meccanismo è la fotosintesi¹.

Poiché la fotosintesi è una caratteristica dei viventi, misurare ossigeno nell'atmosfera di un pianeta testimonia che su quel pianeta c'è la vita. Una vita forse primordiale, che può però evolvere in qualcosa di complesso. Noi siamo indotti a pensare che sia l'ossigeno a rendere possibile la vita sulla terra, ma è il contrario: è la vita che produce di continuo l'ossigeno che si trova nella nostra atmosfera. Se oggi fermassimo la fotosintesi l'ossigeno scomparirebbe in poco tempo dall'atmosfera (milioni di anni) ma non scomparirebbe la vita che continuerebbe con i batteri anaerobi che non lo usano. Questi, come vedremo, sono stati i primi abitanti della Terra che hanno lasciato una traccia arrivata sino a noi.

A differenza dei tempi di Fermi, oggi sappiamo che è possibile misurare la presenza di ossi-

¹Nella fotosintesi clorofilliana, la luce del Sole è usata per rompere le molecole d'acqua (H_2O) in ossigeno e idrogeno che poi si combinano con l'anidride carbonica (CO_2) dell'aria per produrre glucosio, ($C_6H_{12}O_6$) con cui i batteri allora e piante e plancton oggi, si nutrono e crescono. Poiché il glucosio ha 6 atomi di C, 12 di H e solo 6 di O, nel processo si libera 3 volte più ossigeno di quanto il glucosio ne utilizzi. L'ossigeno in eccesso viene emesso nell'atmosfera.

Misurare l'ossigeno nei pianeti extrasolari

Oggi sappiamo come misurare l'ossigeno nell'atmosfera di un pianeta sino a distanze di qualche decina di anni luce; ESA e NASA avevano programmi di questo tipo che sono stati cancellati perché troppo costosi. Per misurare l'ossigeno su di un pianeta si deve costruire uno strumento capace di separare la luce proveniente dal pianeta da quella della stella attorno a cui esso ruota che è milioni di volte più luminosa. Per farlo si deve costruire un interferometro funzionante nell'infrarosso (dove il rapporto tra luce pianeta e stella è più favorevole) costituito da un cluster di satelliti raffreddati a $-250^\circ C$ che orbitano più di 100 metri l'uno dall'altro controllando le distanze reciproche con una precisione inferiore al decimillesimo di millimetro (Fig. 3). Una missione del genere costa più di 100 miliardi di dollari, troppo per ESA e NASA. Con il procedere dei voli spaziali i costi dovrebbero ridursi (le misure potrebbero essere anche fatte dalla Luna quando vi metteremo basi fisse) e presto potremo sapere se attorno a noi ci sono dei pianeti su di cui potremmo vivere. Per una discussione più approfondita del tema si vedano le referenze [1, 2].



Figura 3: Schema ottico del cluster di satelliti della missione Darwin dell'ESA che si proponeva di scoprire l'esistenza pianeti extrasolari con atmosfera ricca di ossigeno.

geno atomico o molecolare nell'atmosfera di un pianeta fino a distanze di circa 30 anni luce dalla Terra (si veda riquadro). Nella nostra galassia,

Cosa è la vita

Nell'accezione più semplice, la vita è la capacità di un organismo di riprodursi. In quella più complessa, in cui si riconosce la maggior parte degli scienziati, la vita è un organismo [3]:

- che contiene informazioni,
- capace di riprodursi,
- capace di evolvere.

Si parla di organismo perché la vita è anche organizzazione tra componenti che funzionano assieme; una proprietà globale, non riducibile alle proprietà dei singoli componenti e nemmeno alla somma delle singole proprietà. La morte è la perdita di questa proprietà; i componenti, la materia di cui è fatto un organismo, sono gli stessi che c'erano un istante prima, quando l'organismo era vivo; quello che è scomparso è l'organizzazione che permetteva loro di funzionare.

La vita nasce per il passaggio della materia inanimata, che non ha le proprietà sopra elencate, in materia animata, che invece le ha. Non ci sono alternative a questa affermazione, a meno d'ipotizzare che il primo batterio comparso sulla Terra sia nato per intervento divino, nel qual caso la questione non è di competenza della scienza. Affermare che la vita venga dalla trasformazione di materia inanimata in animata non nega (né dimostra) l'esistenza di un disegno divino. Chi lo cerca, lo può trovare nelle leggi della natura, che rendono possibile questa trasformazione. Per lo scienziato, il problema è capire cosa è successo nei 300 milioni d'anni passati, dal momento in cui la terra era una massa di lava incandescente a quello in cui è comparso il primo batterio in cui era racchiusa una molecola di DNA.

In queste pagine parlando di vita abbiamo ipotizzato qualcosa di simile alla nostra, la sola della cui esistenza abbiamo certezza. Una forma di vita che consuma ossigeno, basata sul carbonio, un atomo che, come discusso nelle referenze [1, 2], nei suoi legami con altri atomi soprattutto ad H, O, N produce un numero elevatissimo di molecole ed è quindi adatto a rappresentare la complessità dei viventi. Oggi si conoscono più di 500 mila molecole organiche (il DNA che, pur essendo diverso per ciascun vivente, è contato come una singola molecola) a cui si aggiungono le numerose molecole sintetiche che si realizzano ogni giorno (medicinali come Aspirina, Veronal, le materie plastiche, i colori all'anilina, gli esplosivi come la nitroglicerina). Nessun altro elemento ha una simile varietà di composti. Quello che più si avvicina è il silicio (omologo al carbonio nel sistema periodico) che forma un'ampia famiglia di composti (i siliconi) che per le ragioni discusse in [1, 2], è poco adatto a codificare i viventi, anche se ipotizzato nei racconti di fantascienza.

entro quella distanza, ci sono 40 stelle simili al Sole che potrebbero ospitare dei pianeti su di cui noi potremmo vivere, (se si riduce la distanza a 15 anni luce i candidati si riducono a 4). Pertanto, se toccasse a noi fuggire dalla Terra, non ci muoveremmo a caso ma andremmo verso una stella attorno cui c'è un pianeta con un'atmosfera ricca di ossigeno.

Gli extraterrestri intelligenti, quelli capaci d'intraprendere viaggi interstellari, dovevano essere anche loro in condizione di fare misure simili, sapevano quindi in che direzione andare e la Terra da 2 miliardi di anni era una delle mete. Pertanto, se attorno alle stelle morenti del passato ci sono state forme di vita intelligente,

da esse devono essere partite centinaia se non migliaia di astronavi e qualcuna di loro avrebbe dovuto essere arrivata qui ed aver cambiato la nostra evoluzione. Ma di presenze aliene nella nostra storia biologica non c'è traccia. A meno, ovviamente, che la NASA certifichi l'esistenza di extraterrestri timidi che vivono di nascosto sulla Terra evitando d'entrare in contatto con noi. Se si scarta questa ipotesi la domanda di Fermi è ancor più vera. Perché gli extraterrestri non sono qui?

Per chi cercasse una risposta ipotizzando che molte stelle potrebbero non avere pianeti, si fa presente che le stelle per nascere hanno bisogno dei pianeti. Le nubi di polvere e gas da cui esse

provengono devono ridurre il loro diametro milioni di volte e per farlo devono perdere momento angolare; all'inizio lo fanno frantumandosi in più parti (per questo la maggior parte delle stelle nasce in ammassi), poi lo immagazzinano nei pianeti. Nel sistema solare, ad esempio, il 98% del momento angolare è contenuto nei 4 pianeti giganti.

E se la vita esistesse attorno a tutte le stelle come il Sole?

Oggi non sappiamo come sia nata la vita sulla terra, ma sappiamo situare con discreta precisione il momento in cui questo è avvenuto. La vita (si veda riquadro "Cosa è la vita") non poteva nascere durante la fase d'accrescimento, quando la terra era una palla di roccia fusa, quindi invivibile. Sappiamo però quando essa si è raffreddata, è nata la crosta terrestre ed è divenuto possibile la sua esistenza. La data è stabilita dai campioni di roccia prelevati dai **mari lunari**: le grandi pianure di roccia fusa dal calore rilasciato dalla materia che cadeva sulla Luna (e sulla Terra) durante la fase di accrescimento. Le misure dei materiali radioattivi contenuti in quei campioni dicono che quei mari si sono solidificati 3.8 miliardi di anni fa; quella data può quindi essere assunta come fine del bombardamento dei meteoriti sulla Luna e quindi sulla Terra. Una data confermata dalle rocce più vecchie che si trovano sul nostro pianeta che hanno un'età simile, (alcune arrivano a 4 miliardi d'anni). Si può quindi affermare che prima di 3.8 miliardi di anni la temperatura della Terra era troppo alta perché la vita potesse esistere.

La data della comparsa della vita sulla Terra è invece stabilita con precisione dall'età delle stromatoliti scoperte negli scogli semisommersi della Baia degli Squali di Warrawoona, in Australia vecchi di 3.5 miliardi di anni (Fig. 4). Le stromatoliti sono rocce sedimentarie che si formano per l'azione di batteri che da vivi trasformano il bicarbonato di calcio, disciolto nell'acqua, in carbonato di calcio un solido che, precipitando, li cattura al suo interno formando rocce costituite da strati di sostanza organica e sedimenti (Fig. 4, a destra). Le stromatoliti sono qualcosa di simile alle isole coralline, che sono costituite anch'esse

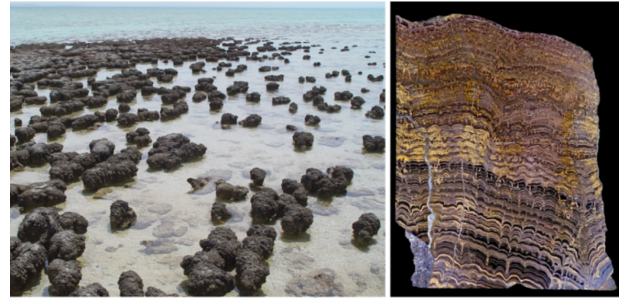


Figura 4: Sinistra: gli stromatoliti scoperti nella Baia degli Squali nell'Australia Nord occidentale la cui età è di 3.5 miliardi di anni. Destra: sezione di stromatoliti in cui si identifica la successione di livelli alternati di sostanza organica e sedimenti. Rocce di questo tipo sono poi state trovate in altri siti dell'Australia, dell'Africa e della Groenlandia (Foto Didier Descouens).

da carbonato di calcio, prodotto in quel caso da polpi lunghi 2 millimetri.

Nessuno mette in dubbio queste date. Quindi in quei 300 milioni di anni si è formata la crosta terrestre, si sono creati gli oceani, e al loro interno è nata la vita. I primi viventi erano dei batteri procarioti anaerobici (che vivono in ambienti privi di ossigeno), le più semplici strutture biologiche che possiamo immaginare (Fig. 5). Essi erano costituiti da una cellula con all'interno una singola molecola di DNA, le più semplici strutture biologiche che possiamo immaginare (Fig. 5) che però avevano tutto quello che serviva per arrivare sino a noi. L'atmosfera era priva d'ossigeno, ed i principali composti erano: vapore d'acqua, anidride carbonica, metano ed ammoniaca, i gas che si possono fare con gli atomi più abbondanti dell'universo (H, C, N, O); un'atmosfera in cui noi non potremmo vivere. Il metabolismo di quei batteri era basato sullo zolfo ed il metano prodotti dai vulcani. I loro discendenti sono i batteri estremofili psicofili che, ancor oggi, si riproducono nei fanghi roventi delle solfatare, (si trovano in quella di Pozzuoli) e nelle profondità della terra e dei mari a temperature che possono superare i 120° C. Vivono in ambienti privi d'ossigeno che per molti di loro è un veleno.

I primi 1.5 miliardi di anni hanno visto l'evoluzione dei batteri procarioti anaerobi, in altri più complessi formati da una cellula eucariota,

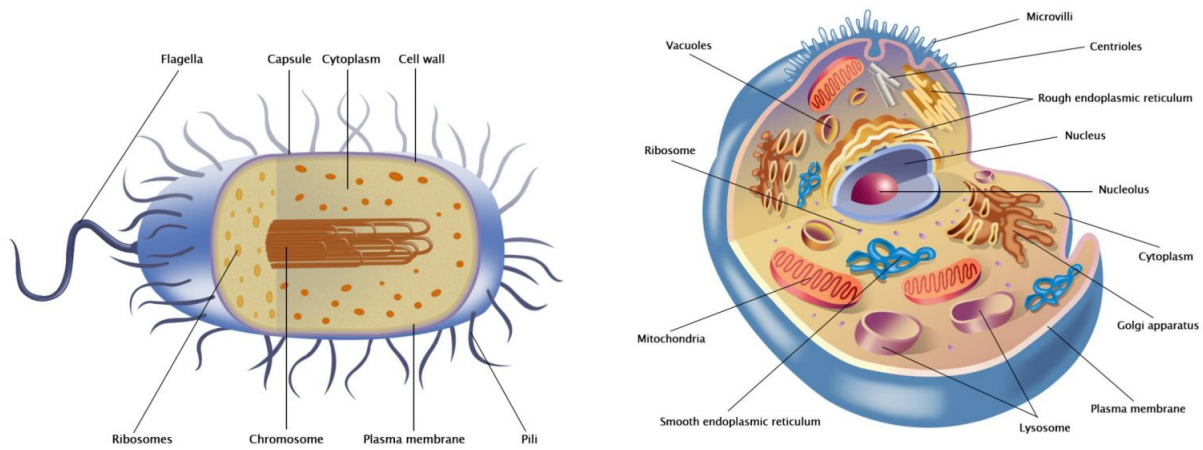


Figura 5: Sinistra: un batterio Prokaryota: dal greco *pro*-prima e *karyon*-nucleo. Sono i più semplici viventi esistenti in natura, i primi comparsi sulla Terra. Organismi monocellulari con cellule senza nucleo con un'unica catena di DNA che riempie gran parte della cellula. Queste cellule si riproducono per scissione binaria (producono un gemello). Le loro dimensioni sono inferiori ai 5 millesimi di millimetro. Molti di questi batteri sono anaerobi, non hanno bisogno di ossigeno per vivere che per molti di loro è un veleno. Destra: un batterio Eukaryota; dal greco *eu*-buono e *káryon*-nucleo. Sono le cellule di cui siamo fatti, hanno strutture molto più complesse, un nucleo ben definito che contiene gran parte del DNA, impacchettato all'interno dei cromosomi, mentre una parte si trova esternamente al nucleo nei mitocondri assieme ad altri organi che svolgono le numerose funzioni che queste cellule svolgono. Molti degli organismi che le possiedono si riproducono per meiosi (riproduzione sessuata) che accelera l'evoluzione. Hanno dimensioni superiori ai 10 millesimi di millimetro, alcune arrivano alle decine di centimetri, come le uova di struzzo. (Figura tratta da <https://wauniversity.it/la-cellula-animale/>)

le cellule di cui noi siamo composti, con un nucleo al centro (Fig. 5). A questi batteri evoluti si deve la scoperta della fotosintesi e la produzione d'ossigeno che ha formato l'atmosfera in cui viviamo. Alla nascita dell'ossigeno si deve la prima estinzione di massa della storia, di cui abbiamo traccia. La maggior parte dei batteri anaerobi per cui l'ossigeno è un veleno, scompare.

Nel successivo miliardo di anni, i batteri scoprono il vantaggio dell'unirsi in colonie, in cui ciascun batterio si specializza in una particolare funzione, un passo verso gli organismi multicellulari. Un esempio, sopravvissuto sino ai nostri giorni, sono i sono Volvox (Fig. 6).

A 2.8 miliardi di anni, dalla nascita dei batteri di Fig. 4 nascono le spugne, organismi pluricellulari che non hanno ancora le simmetrie destra e sinistra degli organismi evoluti e neanche le differenze alto e basso (bocca e ano) ma sono capaci di riproduzione sessuata. A circa 3 miliardi di anni dalla nascita della vita, 541 milioni di anni fa, all'inizio del Cambriano, negli oceani avviene un fatto unico nella nostra storia biologica, che non si è mai ripetuto, ed è ancor oggi spiegato con difficoltà: l'esplosione di vita, che in poco



Figura 6: Volvox: colonie di cellule simili tra loro, che raggiungono le dimensioni di alcuni millimetri sino ad essere visibili ad occhio nudo. Le cellule si differenziano nei ruoli: alcune dirigono il gruppo verso sorgenti di luce e cibo, altre si occupano del movimento, della riproduzione che in alcuni casi è sessuata. Sono gli antecedenti degli organismi pluricellulari. Per passare dai batteri di Fig. 5 ai Volvox ci sono voluti 2 miliardi di anni.

tempo produce le phyla di tutte le specie che oggi esistono sulla Terra (più di quelle esistenti oggi, perché nel tempo alcune sono scomparse).

La Panspermia

Questa teoria ipotizza che i semi della vita siano ovunque in un Universo, che non solo ha la capacità di farla nascere ma anche di determinarne l'evoluzione. Una teoria che ha avuto nel filosofo Anassagora il primo sostenitore, è stata poi riproposta nel 1800 da lord Kelvin (secondo cui la materia morta non può rianimarsi senza quella viva) e nel secolo scorso da scienziati d'alto livello come il chimico premio Nobel svedese Svante Arrhenius e da Francis Crick, Nobel per la scoperta della struttura DNA secondo cui il DNA era troppo complesso per venire da un'evoluzione naturale (casuale [5]). La panspermia è stata difesa con grande energia sino agli inizi di questo secolo da Fred Hoyle [6] e Chandra Wickramasinghe secondo cui solo un'inseminazione dall'esterno poteva spiegare i tempi brevi con cui la vita era nata, l'isomorfismo (Fig. 7), l'esplosione di vita del cambriano avvenuta 541 milioni di anni fa, e i numerosi anelli mancanti nei fossili che testimoniano una evoluzione avvenuta per salti. Fatti facili da spiegare se si ipotizza un'inseminazione dall'esterno. La teoria ha perso vigore alla fine del secolo scorso quando al di là di ogni dubbio si è provata l'esistenza del Big Bang. La Panspermia non spiega, infatti, come nasce la vita, si limita a spostare il problema ad un altro punto dell'Universo, per cui, se non si capisce come sia nata la vita su una Terra vecchia di 4 miliardi di anni, ancor meno si capisce come, in un tempo 3 volte maggiore, essa possa essere nata in un altro punto dell'Universo ed arrivata qui. L'ipotesi sopravvive solo ipotizzando un Universo che esiste da un tempo quasi infinito e non con uno di soli 13.7 miliardi di anni. Un fatto curioso è che la prima prova dell'esistenza del Big Bang è stata data da Fred Hoyle che, nel tentativo di vanificare la teoria, ha dimostrato che solo il Big Bang poteva produrre l'abbondanza d'elio che si osserva nell'Universo.



Figura 7: L'Isomorfismo si ha in natura quando specie diverse presentano strutture corporee identiche. Nel caso in figura (a sinistra un camaleonte, a destra una mantide) in specie appartenenti a regni diversi (animale e vegetale). La panspermia spiega le identiche strutture corporali sostenendo che la mutazione è stata indotta dall'esterno su due specie che si trovavano nello stesso luogo.

A cento milioni di anni da quell'evento unico ed eccezionale [1, 2], inizia la colonizzazione delle terre emerse. Le piante sono le prime a lasciare gli oceani 440 milioni di anni fa (la data è stabilita dai pollini sopravvissuti sino alla nostra epoca); seguite dopo 40 milioni di anni dagli insetti e dopo 20 milioni di anni dagli anfibi (date stabilite dai fossili). I rettili compaiono 300 milioni di anni fa, con loro gli animali si allontanano dagli oceani perché non devono più deporre le

uova in acqua. I dinosauri compaiono 200 milioni di anni or sono, quando la frammentazione della Pangea negli attuali continenti era già iniziata, e scompaiono 54 milioni di anni fa, con la quinta ed ultima estinzione di massa, causata dall'impatto di un meteorite. La loro scomparsa permette ai mammiferi (la cui evoluzione era bloccata alle dimensioni di un topo dalla predazione dei dinosauri) di crescere e diversificarsi negli ordini che oggi li caratterizzano ed arrivare

a dominare il mondo con la nostra specie che è quasi intelligente.

L'evoluzione che ha trasformato i batteri procaroti negli attuali abitanti del pianeta, ha richiesto grandi cambiamenti, che non si ritiene possano essere avvenuti in meno di 5 miliardi di anni. È invece possibile che serva più tempo o che non si arrivi mai a specie intelligenti. Se, ad esempio, 54 milioni di anni fa, non fosse caduto il meteorite che ha provocato l'estinzione dei dinosauri, i mammiferi non si sarebbero sviluppati e i dinosauri, che in 150 milioni di anni non avevano prodotto specie intelligenti, difficilmente l'avrebbero fatto nei successivi 54 milioni di anni. Si può addirittura affermare che se noi esistiamo questo è avvenuto per effetto di un evento casuale, un fatto che porta a molte riflessioni [3].

A differenza dell'evoluzione, che ha richiesto 3.5 miliardi di anni per arrivare sino a noi, il processo che ha portato alla nascita della vita sulla Terra è stato invece velocissimo, di fatto la vita è nata appena possibile, quando la crosta terrestre era abbastanza fredda da permetterlo. Questo fa ipotizzare che i fenomeni che l'hanno resa possibile, anche se sconosciuti, siano altamente probabili [3]. Una tesi sostenuta da molti ricercatori, tra questi il Nobel Christian De Duve che sottolinea un aspetto importante del processo che ha portato la materia inanimata a divenire animata. Egli scrive [4]:

"La vita è un processo chimico perché l'informazione biologica, codificata nelle molecole, si decodifica, si replica e si esprime attraverso processi chimici. . . Migliaia di reazioni chimiche si occupano della manutenzione, della crescita e della riparazione delle cellule, controllano tutte le attività biologiche e, prima fra tutte, trasformano in energia il nutrimento che prendiamo dall'ambiente. La vita è chimica, una parola che deve essere presa nel suo senso più ampio includendo la chimica minerale, quella organica, la biochimica, l'elettrochimica, la chimica fisica e la termodinamica".

De Duve prosegue dicendo che, se tutti i processi biologici sono processi chimici, la sola ipotesi che si può fare, sul processo che ha generato la

vita sulla Terra, è che sia anch'esso un processo chimico e come tale deterministico.

In altri termini, De Duve osserva che il processo che sulla Terra ha trasformato la materia inanimata in animata è stato un processo chimico-fisico, anche perché questi sono i soli processi che trasformano la materia sul nostro pianeta. Pertanto, se non si possono ipotizzare altri processi per l'origine della vita, a parte la Panspermia che non funziona (si veda riquadro), si deve concludere che per l'ineludibilità delle leggi della chimica e della fisica, (date certe condizioni, un fenomeno chimico fisico deve necessariamente verificarsi) la vita deve essere nata in ogni punto dell'Universo in cui si sono verificate le condizioni che c'erano sulla Terra quando essa è apparsa. Questa è la ragione per cui tanti *rover* punzecchiano la superficie di Marte alla ricerca di batteri. Quel pianeta ha avuto un'atmosfera e dei mari con acqua liquida pertanto, se De Duve ha ragione, la vita deve essere nata anche lì. Poi, quando il pianeta ha perso i suoi oceani e gran parte dell'atmosfera, i batteri potrebbero essersi rifugiati nel sottosuolo (dove la temperatura è sufficientemente alta da permettere all'acqua di restare liquida).

Queste considerazioni portano ad affermare che la vita è un fatto comune attorno a noi, perché il 90% delle stelle è simile al Sole e tutte le stelle simili al Sole hanno pianeti. Quello che non sappiamo è se ci sono pianeti ad una distanza dalla stella, da permettere l'esistenza d'acqua liquida sulla loro superficie, una condizione necessaria per la vita che conosciamo. Si può però ipotizzare che, in un sistema planetario, i pianeti si disporranno come nel sistema solare, a varie distanze dalla stella, per cui è alta la probabilità che uno sia alla distanza giusta per avere acqua liquida sulla sua superficie. Pertanto, se De Duve ha ragione, la vita è ovunque attorno noi. Se questo è vero perché gli extraterrestri non sono qui?

Perché gli extraterrestri non sono qui?

Se De Duve ha ragione, allora nelle centinaia di stelle simili al Sole che sono morte attorno a noi negli ultimi 2 miliardi di anni doveva esserci la

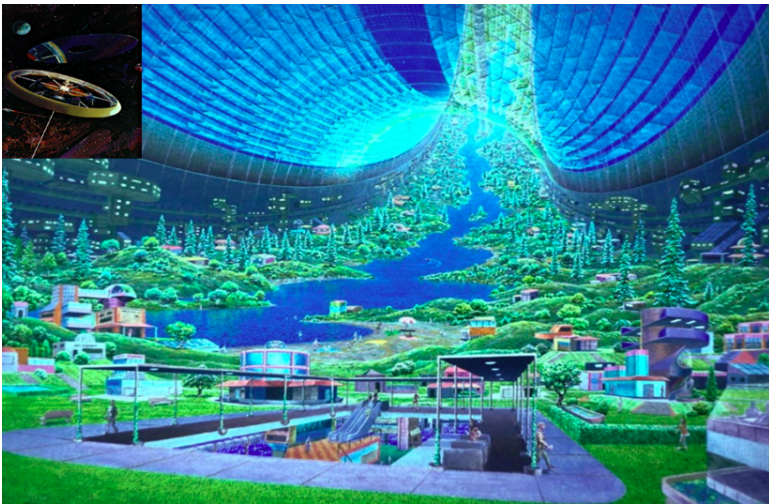


Figura 8: Visione artistica di come potrebbe essere l'interno dell'immensa astronave con cui alcuni ardimentosi potrebbero tentare un viaggio verso le stelle, un viaggio che durerà secoli, se non millenni. La forma è quella di una grande ciambella (in alto a sinistra) che ruota mantenendo al suo interno una gravità artificiale simile a quella della Terra.

vita. Perché gli extraterrestri non sono qui? Le risposte alla domanda di Fermi sono tre.

La prima è che la vita, anche se nasce subito, non arriva facilmente a forme intelligenti. La Terra è stata dominata per 150 milioni di anni dai dinosauri senza che essi diventassero intelligenti. Mentre i mammiferi, che si sono sviluppati quando i dinosauri si sono estinti, sono diventati intelligenti in 50 milioni di anni. Se i dinosauri non si fossero estinti, per un evento casuale come la caduta di un meteorite, la vita intelligente, probabilmente, non esisterebbe sul nostro pianeta perché l'evoluzione culturale che caratterizza la nostra specie è stata resa possibile da strutture corporee che noi abbiamo ed i dinosauri non avevano, come l'apparato vocale che ha permesso lo sviluppo di linguaggi complessi o gli arti prensili che hanno permesso di costruire degli utensili. Se al posto delle mani noi avessimo avuto degli zoccoli il nostro destino non sarebbe stato diverso da quello delle mucche.

La seconda ipotesi è legata alla possibilità di sopravvivere a viaggi che durano secoli con astronavi enormi (Fig. 8), capaci di trasportare un gran numero di persone (migliaia?) quelle che servono a garantire le diversità genetiche dei discendenti. Le astronavi devono essere una replica del pianeta di provenienza, con tutte le specie vegetali e animali (sane ed in gran numero) che ci sono sul pianeta per assicurare la biodiversità necessaria alla sopravvivenza di quel microcosmo, dove la gente nasce e muore per secoli senza mai scendere su di un pianeta.

Astronavi così grandi devono essere costruite nello spazio (come lo è stata la Stazione Spaziale Internazionale) e non possono entrare nell'atmosfera di un pianeta senza distruggersi. Dovranno, inoltre, essere in continua rotazione per avere una gravità artificiale simile a quella terrestre, perché il sistema osseo e muscolare dei suoi abitanti non si atrofizzi e li renda incapaci di sopravvivere alla gravità di un pianeta quando, un giorno, dovessero arrivarci. L'energia dovrà essere fornita da una o più centrali nucleari, le sole che possono immagazzinare il combustibile necessario ad un viaggio così lungo.

Un simile microcosmo corre molti rischi: l'astronave potrebbe essere colpita da meteoriti (scontri devastanti vista l'elevata velocità con cui viaggia); i suoi abitanti potrebbero soffrire per le radiazioni che, fuori dal campo magnetico terrestre, arrivano a 500 - 700 mSy/anno (il massimo accettato per i lavoratori di un impianto nucleare è 20 mSy/anno); l'ambiente chiuso e le piccole dimensioni (rispetto a quelle di un pianeta) rende facile la diffusione di malattie. Saranno anche pericolosi i guasti che dovessero avvenire nei sistemi di depurazione delle acque e dell'aria, di regolazione del clima e di produzione dell'energia. Chiunque ha avuto un acquario sa bene quanto sia difficile mantenere, in un ambiente piccolo, le condizioni che la natura garantisce senza problemi in un ambiente esterno, più grande. Ognuno di questi fenomeni può distruggere quel mondo quindi milioni di astronavi potrebbero essere partite e nessuna essere riuscita a mantenere in vita l'equipaggio per un tempo così lungo.

La terza ipotesi nasce dalla constatazione che

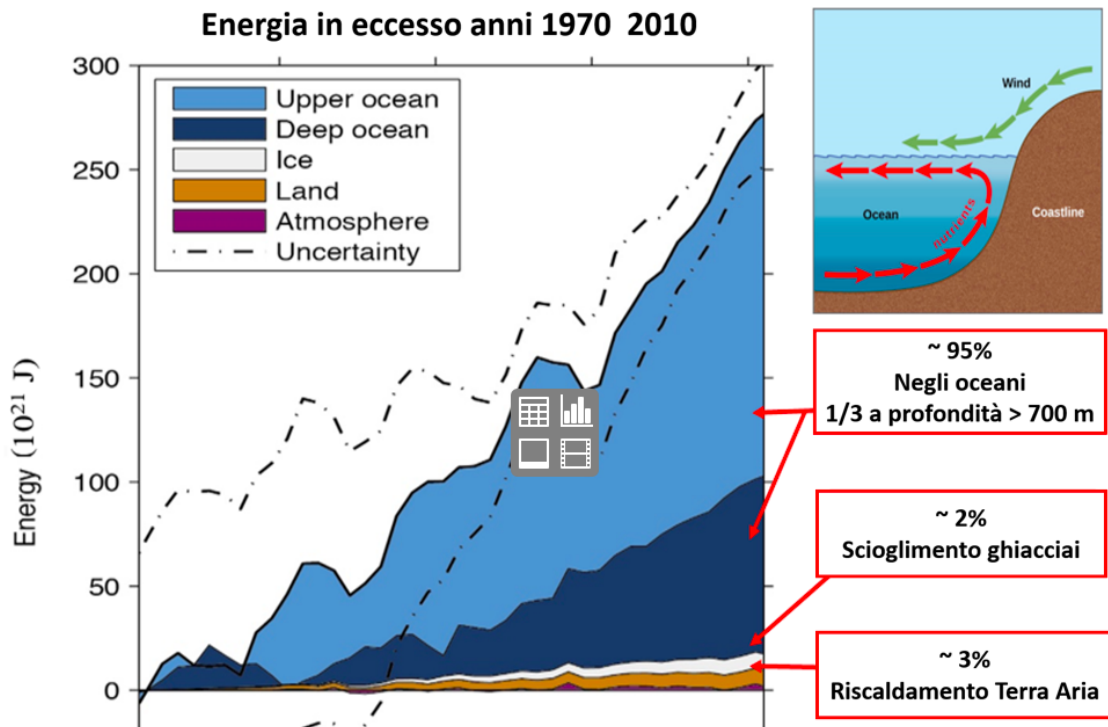


Figura 9: Distribuzione dell'energia prodotta in eccesso nel periodo 1970-2010. Il calore in eccesso prodotto in quei 42 anni è stato assorbito per il 95% dagli oceani, dove risiede la capacità termica superficiale della Terra; di questo 1/3 è stato trasferito a profondità superiori ai 700 m per l'interazione di venti e correnti con le coste (in alto a destra). Del 5% restante, il 2% circa è stato utilizzato per sciogliere i ghiacciai e sta causando il sollevamento degli oceani; il 3% circa per riscaldamento del suolo e dell'atmosfera [7].

quando una specie diventa intelligente acquista anche grandi capacità distruttive. Può auto-estinguersi con guerre nucleari e batteriologiche; può avvelenare l'atmosfera del pianeta, oppure causare cambiamenti climatici catastrofici; tutti fenomeni che possono distruggere una popolazione o farla regredire ad un livello tecnologico insufficiente ad affrontare un viaggio interstellare.

Tutte queste cose stanno avvenendo sulla Terra. Non c'è mai stato sul nostro pianeta un così elevato numero di nazioni che possiedono armi nucleari e batteriologiche; alcune di queste con governi instabili, ed infiltrazioni Jihadiste nelle forze armate (Pakistan) che potrebbero far finire quelle armi nelle mani di terroristi. Quanto al rischio climatico, esso non è mai stato così elevato. Le emissioni di gas serra sono 100 volte superiori a quelle naturali e rendono l'uomo l'irresponsabile controllore del clima. Per di più l'uomo è così stupido da non capire che i cambiamenti climatici che sta causando sono irreversibili e che se, domani, spaventato, volesse rimediare agli errori commessi non potrà farlo perché gran parte del calore prodotto è immagazzinato negli

oceani che non sappiamo come raffreddare (Fig. 9).

Secondo l'ultimo rapporto dell'IPCC (del 2022 reperibile in rete) se volessimo raffreddare gli oceani e riportare il ghiaccio ai poli e tornare alla situazione preindustriale servirebbero 1000 anni dal momento in cui riusciremo ad azzerare le emissioni. In altre parole tutto quello che stiamo perdendo lo è per tempi talmente lunghi rispetto alla durata della nostra vita che potremmo dire per sempre.

La risposta al paradosso di Fermi potrebbe quindi essere che le specie quando diventano intelligenti, commettono errori così stupidi da estinguersi o da dover restare per sempre sul pianeta in cui si trovano. Una considerazione che dovrebbe farci riflettere su quello che stiamo facendo. Dovrebbe far riflettere chi nega il riscaldamento globale, ma, soprattutto, quei movimenti ambientalisti che suggeriscono soluzioni sbagliate o insufficienti. Dobbiamo capire che se non eliminiamo i combustibili fossili in tempi brevissimi per il nostro pianeta non c'è futuro e che le rinnovabili da sole non possono risolvere il problema. Un fatto capito da una giovane don-

na come Greta Thunberg che ci ha avvertito, se vogliamo salvare il pianeta dobbiamo adottare al più presto ogni forma d'energia che non usi combustibili fossili, incluso il nucleare. Ciononostante, molti paesi continuano a basare una parte consistente della loro produzione elettrica sul carbone che, oltre a contribuire all'effetto serra, è il più letale dei combustibili e la maggior parte degli altri paesi basano la produzione elettrica sul metano, che ha un effetto serra 30 volte maggiore della CO₂. C'è solo da sperare che i terrestri non scoprano troppo tardi, quale delle risposte al paradosso di Fermi si applica al loro caso.



- [1] P. Saraceno: *Il caso Terra: l'origine del nostro pianeta e la ricerca della vita nell'Universo*, Mursia, Milano (2007).
- [2] P. Saraceno: *Beyond the stars*, World Scientific, Singapore (2013).
- [3] P. L. Luisi: *Sull'origine della vita e della biodiversità*, Mondadori, Milano (2013).
- [4] C. De Duve: *Astronomical and biochemical origins and the search for life in the Universe* Eds. C.B. Cosmovici, S. Bouyer and D. Werthimer. Editrice Compositori, Bologna (1997)
- [5] F. Crick: *Life its origin and nature*, Simon & Shuster, New York (1981).
- [6] F. Hoyle: *The intelligent Universe*, Michael Joseph Ltd., London (1983).
- [7] IPCC *Climate Change 2014 Synthesis Report pag. 42* reperibile nel web. (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf)



Paolo Saraceno: laureato in fisica alla Sapienza di Roma nel 1968, dirigente di ricerca dell'Istituto Nazionale di Astronomia ed Astrofisica, fisico sperimentale ha partecipato negli anni '70 alla realizzazione dei primi strumenti per astronomia infrarossa costruiti in Italia. Si è occupato di osservazioni astronomiche da terra e da satellite. Negli anni '80 e '90 ha coordinato lo sforzo italiano per la realizzazione del satellite ISO (Infrared Space Observer) dell'ESA, lanciato nel 1995 e del satellite per astronomia infrarossa e sub millimetrica Herschel lanciato nel 2009. La sua attività scientifica ha riguardato soprattutto

lo studio dei processi con cui nascono le stelle e i pianeti, ha contribuito a pubblicare più di 200 lavori su riviste internazionali. Negli ultimi anni si è occupato di questioni energetiche ed ambientali e ha studiato i meccanismi che hanno reso possibile l'esistenza della vita sulla terra e quelli che possono distruggerla; ha pubblicato i libri "Il caso Terra" Mursia 2007; "Beyond the Stars" World Scientific 20123. È stato membro del consiglio scientifico del "Festival dell'Energia", della Associazione Tuscolana di Astronomia e del CdA di Galileo 2001 per la dignità e libertà della scienza. Dal dicembre 2011 al 2020 è stato membro della commissione di valutazione d'impatto ambientale del Ministero dell'Ambiente.

È possibile comprendere la Meccanica Quantistica?

Claudio Garola

Dipartimento di Matematica e Fisica "E. De Giorgi", Università del Salento, Lecce

1. Introduzione

Nonostante sia trascorso quasi un secolo dalla sua nascita, e nonostante il suo enorme successo esplicativo e predittivo, la meccanica quantistica è tuttora ritenuta una teoria fisica sconcertante, e il dibattito sulle sue possibili interpretazioni è ancora in corso. La maggioranza dei fisici accetta l'interpretazione detta di Copenhagen (o standard). Tuttavia da questa interpretazione conseguono numerosi paradossi, alcuni dei quali sono abbastanza noti anche fra i non addetti ai lavori: ad esempio, il paradosso del gatto di Schrödinger (un povero gatto si trova in uno stato ambiguo in cui non può essere né vivo né morto finché non è guardato da un osservatore dotato di coscienza); il paradosso dell'amico di Wigner (in cui nuovamente entra in gioco il ruolo della coscienza dell'osservatore: in questo caso quella dell'amico che osserva il gatto di Schrödinger e quella di Wigner che osserva l'amico); il paradosso di Einstein, Podolski e Rosen (non proposto, in realtà, da questi autori) in cui compare quella "spettrale azione a distanza" che tanto infastidiva Einstein. Chi ha più familiarità con la meccanica quantistica sa bene, poi, che ancora oggi non è chiaro come la descrizione del mondo microscopico che essa fornisce possa conciliarsi con la descrizione del mondo macroscopico fornita

dalla fisica classica. Inoltre, la meccanica quantistica sembra possedere, secondo alcuni autori, una sua propria logica, diversa dalla logica classica, e la probabilità quantistica ha struttura e proprietà diverse da quelle della probabilità classica. Per queste ragioni la meccanica quantistica è ritenuta anche da molti fisici una disciplina di difficile, se non impossibile, comprensione. È famosa, in particolare, un'affermazione di Richard Feynman (premio Nobel per la fisica nel 1965) risalente all'anno in cui ricevette il premio Nobel [1]:

"... I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics"

"... credo di poter dire con sicurezza che nessuno capisce la meccanica quantistica".

In tempi più recenti Steven Weinberg (premio Nobel per la fisica nel 1979) ha raccontato in una conversazione con Sabine Hossenfelder [2]:

"I've had a whole career without knowing what quantum mechanics is. I tell this story in one of the books that my colleague Philip Candelas was referring to a graduate student whose career essentially disintegrated, and I asked what went wrong, and he said, 'He

tried to understand quantum mechanics'. He could have a perfectly good career without it. But getting into the fundamentals of quantum mechanics is a losing game."

"Io ho fatto un'intera carriera senza sapere che cos'è la meccanica quantistica. Racconto questo fatto in uno dei libri che il mio collega Philip Candelas stava citando a uno studente laureato la cui carriera era stata fondamentalmente distrutta. Io gli chiesi che cosa fosse andato storto, ed egli disse 'ha provato a capire la meccanica quantistica'. Avrebbe potuto avere un'ottima carriera se lo avesse evitato. Ma entrare nel campo dei fondamenti della meccanica quantistica costituisce un gioco perdente."

Non avendo preso atto in tempo di queste autorevoli testimonianze, intorno al 1980 si è formato presso l'Università di Lecce un gruppo di ricerca sui fondamenti della fisica dedicato, in particolare, a studiare i problemi sollevati dalla meccanica quantistica.

Ma che cosa significa veramente capire una teoria? Molti ricercatori sembrano pensare che una teoria sia comprensibile quando è possibile costruirne un modello in cui le entità fondamentali siano rappresentate da entità geometriche intuitivamente accessibili, come le traiettorie dei punti materiali in meccanica classica o le onde in elettromagnetismo. Tuttavia, secondo l'opinione dominante modelli di questo tipo sono vietati in meccanica quantistica da espliciti teoremi, e quindi essa non può essere capita in questo modo.

D'altronde, anche se si intende la comprensibilità in un modo meno restrittivo, rinunciando a costruire modelli di tipo classico, molte previsioni della meccanica quantistica contrastano con l'intuizione fisica ordinaria (brevemente, la teoria è **controintuitiva**), come i paradossi citati sopra mettono bene in evidenza. È quindi ragionevole ritenere che un'analisi delle premesse implicite nella formazione di un'immagine intuitiva del mondo fisico possa permettere di riconoscere quali di esse siano rifiutate dalla mec-

canica quantistica, chiarendo in questo modo le ragioni della controintuitività di questa teoria e permettendo, almeno in questo senso, di capirla.

Nella prima parte del presente lavoro (Sezioni 2-8) si cerca pertanto di fornire un'analisi di questo tipo in un modo accessibile al lettore non specialista, individuando le scelte fondamentali che rendono controintuitiva la meccanica quantistica attraverso un costante confronto con la meccanica classica e mostrando poi come queste scelte siano all'origine anche delle cruciali differenze esistenti fra la probabilità quantistica e la probabilità classica. Basandosi principalmente sui risultati ottenuti dal gruppo di Lecce, l'analisi in questione presenta numerose novità rispetto alle trattazioni reperibili nella letteratura su temi simili. In particolare, lo studio dei presupposti epistemologici sottesi alla meccanica quantistica e alla nozione quantistica di probabilità è effettuato utilizzando strumenti elementari di logica formale e di statistica, al fine di analizzare il linguaggio della teoria sia da un punto di vista sintattico che da un punto di vista semantico. Si introduce in questo modo una prospettiva interdisciplinare che aiuta notevolmente a chiarire gli argomenti trattati.

La comprensione della meccanica quantistica così ottenuta, comunque, non ne elimina gli aspetti controintuitivi (anche se uno specialista potrebbe asserire di essere in grado di ristrutturare la propria intuizione fisica primaria adattandola alla teoria), le cui conseguenze negative non devono essere sottovalutate perché gran parte della creatività della nostra mente dipende da intuizioni che sono accettate e sistematizzate dalla parte cosciente della mente stessa. Anche per questo molti dei fisici che si sono occupati di fondamenti della meccanica quantistica si sono dedicati al problema di cercarne interpretazioni alternative o di modificarne alcuni aspetti tecnici per renderla più conforme all'intuizione, e quindi più comprensibile. Nella seconda parte del lavoro (Sezioni 9 e 10) si discutono pertanto alcune analisi effettuate dal gruppo di Lecce, da cui segue in particolare che esistono alternative logiche al punto di vista standard che non sono state individuate da altri autori e che possono ripristinare entro certi limiti l'intuitività della teoria.

Per concludere, conviene osservare che il pre-

sente lavoro rappresenta un complemento ideale di un precedente articolo su Ithaca [3], poiché ne amplia la prospettiva interdisciplinare, ne riprende alcuni temi approfondendoli e completandoli, e introduce ulteriori analisi ed esempi. Tuttavia esso è autosufficiente, e la sua lettura non richiede la conoscenza dell'articolo precedente.

2. Il linguaggio della meccanica classica e della meccanica quantistica.

Sia in meccanica classica sia in meccanica quantistica si introduce nel linguaggio teorico (vedi l'inserto) la nozione primitiva di **sistema fisico** (di cui sono esempi il punto materiale, il corpo rigido, ecc., in meccanica classica, e l'elettrone, l'atomo di idrogeno, ecc., in meccanica quantistica). Dato un sistema fisico, si introduce poi la nozione teorica di **stato** del sistema. Comunque tale nozione sia definita (esistono in proposito punti di vista diversi), uno stato di un sistema fisico può essere interpretato empiricamente su una classe di apparati macroscopici tra loro fisicamente equivalenti (brevemente, **preparazioni**), atti a preparare esemplari individuali del sistema fisico (brevemente, **oggetti fisici**) [10, 11]. Dato uno stato S , scegliendo una o più preparazioni ad esso associate e attivandole ripetutamente si produce un insieme di oggetti fisici che "sono nello stato S ". Questo insieme costituisce una **popolazione** dal punto di vista degli studiosi di statistica. Ovviamente si può produrre un numero arbitrario di insiemi (popolazioni) di oggetti fisici nello stato S , su cui si possono effettuare tutte le misure che si desiderano, e questa procedura può essere ripetuta per ogni stato del sistema fisico.

Sia in meccanica classica sia in meccanica quantistica, per ogni sistema fisico si introducono poi ulteriori entità teoriche fondamentali: la nozione di **grandezza fisica** (in meccanica classica) e di **osservabile** (in meccanica quantistica), la nozione di **valore** di una grandezza fisica/osservabile e la nozione di **insieme di valori** che una data grandezza fisica/osservabile può assumere. Queste nozioni corrispondono alle nozioni statistiche di **carattere**, **modalità** e **spazio campionario**, rispettivamente. Ogni grandez-

za fisica/osservabile A può essere interpretata empiricamente su una classe di apparati macroscopici tra loro fisicamente equivalenti, atti ad effettuare misure che hanno come risultato valori (o insiemi di valori) di A .

Una classe particolarmente importante di grandezze fisiche/osservabili di un sistema fisico è quella costituita da tutte le grandezze fisiche/osservabili **dicotomiche** (quelle, cioè, che possono assumere due soli valori: convenzionalmente, 0 e 1). Infatti, si considerino per semplicità solo grandezze fisiche/osservabili il cui insieme di possibili valori (spazio campionario) è finito o numerabile (grandezze fisiche/osservabili **discrete**: se una grandezza fisica/osservabile non è discreta intervengono complicazioni matematiche che non interessano ai fini della presente discussione). Se A è una grandezza fisica/osservabile discreta e Δ è un sottoinsieme di valori di A , la coppia $E = (A, \Delta)$ può essere interpretata come la **proprietà** "avere valore di A in Δ ". A questa proprietà si associa allora una grandezza fisica/osservabile dicotomica, denotata per brevità ancora con E , interpretata da un punto di vista empirico su una classe di equivalenza di apparati che misurano A e assegnano a E un valore (in genere, 1) quando il risultato appartiene a Δ , un altro valore (in genere, 0) in caso contrario. Effettuando su un oggetto fisico a una misura di questo tipo si potrà controllare empiricamente se a possiede la proprietà E (risultato 1) o se a non la possiede (risultato 0). La proprietà E è quindi una proprietà **misurabile**. Variando Δ è poi possibile associare a ogni grandezza fisica/osservabile A una famiglia \mathcal{E}_A di proprietà (misurabili) della forma (A, Δ) , ed è facile riconoscere che \mathcal{E}_A individua a sua volta univocamente la grandezza fisica/osservabile A . L'unione di tutte le famiglie di questo tipo costituisce allora l'insieme \mathcal{E} di tutte le proprietà (misurabili) associate al sistema fisico considerato. Questa definizione di \mathcal{E} permette di introdurre una formalizzazione elementare degli elementi di base del linguaggio teorico di una teoria fisica. Infatti, data una costante individuale a che denota un oggetto fisico e utilizzando per brevità lo stesso simbolo per denotare una proprietà e il predicato che la esprime, l'insieme \mathcal{E} può essere associato biunivocamente all'insieme di enunciati $\mathcal{E}(a) = \{E(a) | E \in \mathcal{E}\}$, dove $E(a)$ esprime

Il linguaggio di una teoria

Secondo la concezione sintattica delle teorie, o punto di vista ricevuto [4, 5, 6] (vedi anche [3], Sezione 3) si devono distinguere nel linguaggio di una teoria fisica un linguaggio osservativo L_O , interpretato tramite regole di assegnamento su un dominio empirico, e un linguaggio teorico L_T connesso con L_O tramite regole di corrispondenza. L'interpretazione empirica di L_T è allora ottenuta combinando i due tipi di regole, osservando che essa è in genere solo indiretta (perché possono esistere in L_T termini teorici primitivi che sono interpretati empiricamente solo tramite l'interpretazione empirica di termini teorici derivati) e incompleta (perché può accadere che non tutti i valori possibili delle entità teoriche abbiano interpretazione empirica). Questa concezione epistemologica è divenuta standard nella prima metà del secolo scorso, ma è stata duramente contestata nella seconda metà del secolo e molti filosofi della scienza ritengono che essa debba essere sostituita da una concezione semantica delle teorie [7]. Anche quest'ultima posizione, peraltro, è stata messa in discussione in tempi relativamente recenti [8]. Indipendentemente da questi sviluppi, vi sono distinzioni proposte dal punto di vista ricevuto che possono essere ritenute ancora utili se si fa riferimento a una ricostruzione razionale delle teorie prese in esame e non alla loro realtà storica concreta, in cui le varie distinzioni si confondono e si mischiano. Esse possono quindi essere adottate per facilitare la comprensione dei diversi livelli concettuali che intervengono nella formulazione di una teoria fisica.

In particolare, si può ritenere che ogni teoria fisica matura proponga tramite il suo linguaggio teorico L_T modelli teorici di parti del mondo da cui conseguono in genere anche ipotesi su distribuzioni di probabilità. Queste corrispondono alle ipotesi nulle degli statistici, cioè alle ipotesi iniziali sulla probabilità da cui si parte in un'analisi statistica per confrontarle con i dati sperimentali ed eventualmente modificarle di conseguenza [9]. La nozione di frequenza (introdotta nel linguaggio osservativo L_O) specifica infatti come effettuare controlli empirici che possono confermare o falsificare tali ipotesi. Quando si ottiene una falsificazione l'intera descrizione è messa in dubbio e occorre rivedere non solo le ipotesi sulle distribuzioni di probabilità ma anche l'apparato teorico e interpretativo che le ha generate.

formalmente l'enunciato **elementare** (o **atomico**) "l'oggetto fisico a possiede la proprietà E ". Si può quindi convenire che all'enunciato $E(a)$ sia assegnato valore di verità vero (V) quando a possiede la proprietà E , e valore di verità falso (F) quando non la possiede. Da un punto di vista epistemologico l'enunciato $E(a)$ è quindi **osservativo**, nel senso che il suo valore di verità è suscettibile di controllo empirico tramite la misura dicotomica associata a E . Tenendo conto del fatto che un controllo di questo tipo può avvenire in situazioni fisiche molto diverse (**contesti di misura nel seguito**), si può scegliere una delle due opzioni seguenti.

OP1 Si può assumere che ogni proprietà possibile per un dato oggetto fisico sia o posseduta o non posseduta dall'oggetto indipendentemente da ogni misura che possa essere eseguita su di esso. In questo caso, per ogni

oggetto fisico a esiste un assegnamento di valori di verità $\sigma_a : \mathcal{E}(a) \rightarrow \{V, F\}$ e, data una proprietà E , una sua misura su a ha il solo scopo di far conoscere allo sperimentatore se a la possiede, e quindi di informarlo sul valore di verità dell'enunciato $E(a)$.

OP2 Si può assumere che una proprietà possibile per un oggetto fisico a sia posseduta o non posseduta dall'oggetto solo in seguito a una sua misura effettuata in uno specifico contesto di misura, contesti diversi potendo condurre a risultati diversi e non necessariamente determinati in modo univoco dai contesti stessi. In questo caso non può esistere un'assegnazione di valori di verità a enunciati di $\mathcal{E}(a)$ che sia indipendente da processi di misura, e questi ultimi assumono un ruolo attivo nella determinazione della

realtà fisica invece di portare a conoscenza dello sperimentatore un'informazione su una situazione fisica preesistente.

L'opzione OP1 esprime in termini fisici una concezione della realtà materiale che è radicata nell'intuizione comune e nel linguaggio naturale, che è fatta propria dalla meccanica classica (e, più in generale, dalla fisica classica) e che è coerente con la nozione della verità come corrispondenza introdotta in logica classica, secondo cui la verità di un enunciato dipende dallo stato delle cose e non dalla conoscenza che è possibile ottenerne tramite indagine empirica [12].

L'opzione OP2 esprime una concezione **globalistica** secondo cui le proprietà degli oggetti fisici dipendono dall'intera situazione fisica considerata, e quindi anche dagli apparati di misura impiegati per studiarle. Una prospettiva di questo tipo è controintuitiva, ma è logicamente consistente ed è fatta propria dall'interpretazione standard della meccanica quantistica. Essa implica in particolare che non si possa assegnare un valore di verità a un enunciato $E(a)$ se non dopo una misura di E in un contesto opportuno, coerentemente con una identificazione della nozione di verità con la nozione di verifica su cui si ritornerà nella Sezione 6.

3. Stati puri e miscele.

Sia in meccanica classica sia in meccanica quantistica l'insieme S di tutti gli stati è costituito dall'unione di due sottoinsiemi disgiunti, \mathcal{P} (sottoinsieme degli **stati puri**) e \mathcal{M} (sottoinsieme degli **stati miscela** o, brevemente, delle **miscele**). Ogni stato puro è interpretato su una classe di preparazioni che, se attivate, preparano esemplari del sistema fisico fra loro identici dal punto di vista della teoria adottata. Si tratta tuttavia di una idealizzazione, che prescinde dal margine di incertezza intrinseco ad ogni procedura empirica. In genere, una preparazione reale, quando è attivata, prepara un oggetto fisico in uno stato puro, ma un'attivazione successiva della stessa procedura prepara un nuovo oggetto fisico in uno stato puro che può essere diverso dal precedente a causa di fattori casuali incontrollabili nella preparazione stessa. Per tener conto delle preparazioni di questo tipo si introducono nel-

l'apparato teorico della meccanica classica e della meccanica quantistica gli stati miscela, ognuno dei quali è associato a una distribuzione di probabilità sull'insieme degli stati puri. In particolare, se la distribuzione è tale che il valore della probabilità è diverso da zero solo su un sottoinsieme discreto \mathcal{Q} di stati puri, allora la miscela può essere descritta assegnando \mathcal{Q} e associando a ogni stato in \mathcal{Q} un peso. Una miscela di questo tipo è interpretata su una classe di preparazioni che, se attivate, preparano oggetti fisici in uno stato puro appartenente a \mathcal{Q} con probabilità pari al peso che tale stato ha nell'espressione della miscela.

4. La struttura dell'insieme delle proprietà in meccanica classica e in meccanica quantistica.

Ognuna delle entità teoriche introdotte nelle Sezioni 2 e 3 ha una rappresentazione matematica che ovviamente varia con la teoria che si adotta. In particolare, gli stati puri sono rappresentati in meccanica classica da punti di uno spazio delle fasi \mathcal{F} associato al sistema fisico, mentre in meccanica quantistica essi sono rappresentati da vettori di modulo uno di uno spazio di Hilbert \mathcal{H} associato al sistema (o, in presentazioni più avanzate, da operatori di proiezione ortogonale monodimensionali su \mathcal{H}).

Si consideri ora l'insieme \mathcal{E} di tutte le proprietà di un sistema fisico in meccanica classica, dove si esercita l'opzione OP1. Ogni proprietà è rappresentata in questo caso da un sottoinsieme dello spazio \mathcal{F} . La relazione di inclusione fra i sottoinsiemi che rappresentano proprietà è ovviamente una relazione d'ordine (parziale), ed è possibile dimostrare che essa dota \mathcal{E} di una struttura d'ordine particolare, detta di **reticolo distributivo**. Poiché per ogni oggetto fisico a esiste una corrispondenza biunivoca fra \mathcal{E} ed $\mathcal{E}(a)$ (vedi Sezione 2), anche $\mathcal{E}(a)$ è dotato della stessa struttura, e tale struttura è identica (a meno di una relazione di equivalenza logica di cui non ci si occuperà qui per ragioni di brevità) a quella che è posseduta dall'insieme delle proposizioni di una logica classica (algebra di Boole). Questo fatto ha portato alcuni autori ad asserire che la logica classica è la logica della meccanica classica. È importante però notare

che la struttura di \mathcal{E} deriva dalle relazioni fra proprietà stabilite dalla meccanica classica. In particolare, dato un insieme di proprietà, esiste sempre in meccanica classica un insieme di misure che permette di stabilire quali proprietà sono possedute e quali sono non possedute dall'oggetto fisico considerato: tutte le proprietà sono cioè **congiuntamente misurabili**. Conseguentemente, sia la negazione di una proprietà che la congiunzione e la disgiunzione di due o più proprietà appartengono a \mathcal{E} , nel senso che esse equivalgono logicamente a proprietà (misurabili) di \mathcal{E} ¹. Quindi la struttura di \mathcal{E} consegue dai postulati di una teoria empirica. La struttura di reticolo distributivo della logica classica dipende invece solo dal senso attribuito ai connettivi fondamentali (negazione, congiunzione, disgiunzione), e non dall'interpretazione di predicati e costanti elementari. Per questo motivo la logica classica può essere intesa come formalizzazione di una modalità fondamentale di ragionamento indipendente dal contenuto dei temi trattati. I rapporti fra logica e meccanica classica non sono quindi ovvi, e sono stati studiati in particolare dal gruppo di Lecce [13].

Si consideri poi l'insieme \mathcal{E} di tutte le proprietà in meccanica quantistica. Ogni proprietà è rappresentata in questo caso da un sottospazio (chiuso) di \mathcal{H} (equivalentemente, da un operatore di proiezione ortogonale su \mathcal{H}). La relazione di inclusione fra sottospazi che rappresentano proprietà è una relazione d'ordine (parziale), ed è possibile dimostrare che essa dota \mathcal{E} di una struttura d'ordine particolare, detta di **reticolo ortomodulare** (più debole di quella di **reticolo distributivo**). Come in meccanica classica, la corrispondenza biunivoca esistente fra \mathcal{E} e $\mathcal{E}(a)$ implica che $\mathcal{E}(a)$ sia dotata della stessa struttura. Inoltre, anche in questo caso tale struttura deriva dalle relazioni fra proprietà stabilite dalla teoria fisica. In particolare, esistono in meccanica quantistica coppie di proprietà che non sono congiuntamente misurabili perché le misure necessarie per determinare se una di esse è posseduta o non

¹Ad esempio, una scatola nera entro cui avvengono congiuntamente una misura di una proprietà $E = (A, \Delta)$ e quella di una proprietà $F = (B, \Gamma)$, producendo in uscita risultato 1 se entrambe le misure hanno dato risultato 1 e risultato 0 negli altri casi, rappresenta un apparato che misura una proprietà logicamente equivalente alla congiunzione di E e di F .

posseduta dall'oggetto fisico considerato non sono compatibili con le misure necessarie per effettuare la stessa indagine sull'altra. Per tener conto di questo fatto si introduce una relazione binaria di **compatibilità** su \mathcal{E} che raccoglie tutte e sole le coppie formate da proprietà congiuntamente misurabili. Poiché alle proprietà in \mathcal{E} è richiesto di essere misurabili, possono esistere proprietà logicamente equivalenti alla congiunzione e alla disgiunzione classiche di più proprietà solo se queste ultime sono a due a due compatibili. Per questo la struttura di \mathcal{E} in meccanica quantistica è diversa dalla struttura di \mathcal{E} in meccanica classica: tuttavia anch'essa consegue dai postulati di una teoria empirica e non da un senso attribuito ai connettivi fondamentali indipendentemente dall'interpretazione dei predicati e delle costanti elementari [13].

Conviene rilevare, comunque, che le proprietà in \mathcal{E} sono anche chiamate in meccanica quantistica **proposizioni** [14], e il reticolo non Booleano delle proposizioni è chiamato da alcuni autori **logica quantistica** [15, 16]. Conseguentemente le operazioni che vi compaiono sono interpretate come connettivi logici non classici, esprimenti le proprietà di una nozione tipicamente quantistica di verità che non coincide né con la nozione classica né con la nozione della verità come verifica-zione. A tale posizione possono essere mosse alcune obiezioni. In particolare, si è visto sopra che in meccanica quantistica la struttura di **reticolo ortomodulare** dell'insieme \mathcal{E} ha natura empirica e non caratterizza quindi una ipotetica modalità di ragionamento alternativo che sarebbe tipica della meccanica quantistica. Inoltre, se si accetta l'interpretazione *standard*, non sembra possibile definire una nozione di verità adeguata in base alle sole caratteristiche algebriche del reticolo, poiché tali caratteristiche, essendo stabilite una volta per tutte, non possono tener conto delle variazioni dei valori di verità al variare dei contesti di misura.

5. Verità e probabilità in meccanica classica e in meccanica quantistica.

Le nozioni di verità e di probabilità in meccanica quantistica hanno interpretazione e caratteristi-

che formali diverse da quelle che esse hanno in meccanica classica.

In meccanica classica, dato un oggetto fisico a preparato in uno stato puro S , si assume che lo stato determini univocamente quali proprietà siano possedute da a , indipendentemente da ogni processo di misura, coerentemente con la scelta dell'opzione OP1. Lo stato S determina quindi univocamente un'assegnazione di verità su $\mathcal{E}(a)$, che è la stessa per ogni oggetto fisico in S . Non compare invece in meccanica classica alcun riferimento esplicito alla probabilità quando si considerano solo preparazioni ideali associate a stati puri. Da un punto di vista fisico, comunque, l'assunzione fatta equivale a supporre che S assegni un valore della probabilità uguale a 0 oppure a 1 a ogni enunciato di $\mathcal{E}(a)$ (equivalentemente, a ogni proprietà di \mathcal{E}). Se poi si considera una miscela M , a ogni proprietà E sarà associata una probabilità data dalla somma dei pesi di tutti gli stati puri che compaiono in M e in cui la probabilità di E è pari a 1. Poiché $\mathcal{E}(a)$ ha una struttura di reticolo distributivo, è possibile dimostrare che entrambe queste assegnazioni di probabilità soddisfano gli assiomi della teoria classica della probabilità.

In meccanica quantistica, invece, se si adotta l'interpretazione standard si può assegnare un valore di verità a un enunciato $E(a)$ di $\mathcal{E}(a)$, dove a denota un oggetto fisico qualsiasi, solo dopo una misura, e tale valore dipende non solo da E e da a ma anche dal contesto di misura, coerentemente con la scelta dell'opzione OP2. Inoltre, se a' denota un oggetto fisico diverso da a , il valore di verità di $E(a')$ dopo una misura può essere diverso dal valore di verità di $E(a)$ anche se a e a' sono nello stesso stato e se si adotta per entrambi lo stesso contesto di misura. Se poi si considera una proprietà F diversa da E , si potrà assegnare un valore di verità anche a $F(a)$ solo se F è compatibile con E (vedi Sezione 4): pertanto, solo assegnazioni parziali di verità su $\mathcal{E}(a)$ sono possibili in meccanica quantistica secondo l'interpretazione standard. Ciò nonostante, dato uno stato puro S , si assume che S assegni a ogni proprietà E un valore $P_S(E)$ appartenente all'intervallo $[0, 1]$ che rappresenta la probabilità che E risulti posseduta da un qualsiasi oggetto fisico nello stato S quando se ne esegue una misura, indipendentemente dal contesto di misura

adottato e dall'oggetto fisico considerato (tecnicamente tale probabilità è assegnata dalla legge di Born, che fa parte dello schema teorico della meccanica quantistica). Poiché \mathcal{E} ha ora una struttura di reticolo ortomodulare, questa assegnazione di probabilità non soddisfa gli assiomi della probabilità classica. La meccanica quantistica introduce così un nuovo tipo di probabilità, la probabilità quantistica, la cui struttura matematica e la cui interpretazione richiedono uno studio specifico (vedi Sezione 7). Per quanto riguarda poi le miscele, è evidente che anch'esse introducono un'assegnazione di probabilità non classica su \mathcal{E} , e quindi su $\mathcal{E}(a)$, e che in tale assegnazione le probabilità descritte dai pesi e quelle assegnate dagli stati puri che compongono la miscela compaiono congiuntamente.

Da un punto di vista statistico, infine, per ogni stato S (puro o miscela) la misura di probabilità su \mathcal{E} può essere considerata (per generalizzazione) l'ipotesi nulla associata a S (vedi l'inserito). In meccanica quantistica, in particolare, i controlli empirici sulle distribuzioni di frequenza delle proprietà nelle popolazioni di oggetti fisici, effettuati su un numero enorme di stati e di oggetti fisici, hanno sempre mostrato la correttezza delle ipotesi nulle associate agli stati. Le previsioni della meccanica quantistica sono così state confermate e le ipotesi nulle in questione accettate come predittive delle frequenze che si otterrebbero se si effettuassero ulteriori esperimenti.

6. La contestualità della meccanica quantistica.

Si è osservato nella Sezione 2 che la scelta dell'opzione OP2 per quanto riguarda l'assegnazione di valori di verità a enunciati elementari della forma $E(a)$ effettuata dall'interpretazione standard della meccanica quantistica è controintuitiva. Pertanto, molti fisici si sono chiesti se esistano interpretazioni alternative della teoria che permettano di evitarla. Infatti, se la meccanica quantistica, essendo una teoria probabilistica, fosse in realtà una teoria incompleta [17], un suo completamento potrebbe permettere di ritornare all'opzione OP1 evitando numerose difficoltà concettuali e paradossi (nascono da questa idea, in particolare, i tentativi di completare la meccanica quantistica

introducendo variabili nascoste). La maggioranza dei fisici ritiene tuttavia che l'opzione OP1 sia inconsistente con le altre assunzioni della meccanica quantistica. Come si è già visto in [3], esistono infatti alcuni teoremi risalenti alla seconda metà del secolo scorso (in particolare i teoremi di Bell [18] e di Bell-Kochen-Specker [19, 20]) i quali, opportunamente riformulati in tempi successivi [21, 22] dimostrano, secondo l'opinione corrente, che il formalismo matematico della meccanica quantistica implica che si possa assegnare una proprietà E a un oggetto fisico a (equivalentemente, un valore di verità a un enunciato della forma $E(a)$) solo in seguito a una misura di E effettuata in un contesto in cui si misurano unicamente proprietà compatibili fra loro e con E , e che tale assegnazione (equivalentemente, il valore di verità di $E(a)$) dipende dall'insieme di tali proprietà, cioè, brevemente, dal contesto di misura scelto. Questi teoremi costituirebbero quindi una prova del fatto che in meccanica quantistica la scelta dell'opzione OP2 è inevitabile. Si riassume usualmente questo risultato affermando che la meccanica quantistica è una teoria secondo cui una possibile proprietà di un oggetto fisico non può essere né posseduta né non posseduta dall'oggetto prima di una misura che stabilisca il contesto entro cui la proprietà è considerata. Questa **contestualità** implica quindi che le proprietà di un oggetto fisico siano **non-oggettive**: esse cioè non sono indipendenti dall'osservazione. Inoltre, il teorema di Bell mostra che in un sistema fisico composto da più parti una misura su una parte del sistema può influenzare l'esito di una misura su un'altra parte che si trova a distanza arbitraria dalla prima. La dipendenza dal contesto di misura delle proprietà possedute da un oggetto fisico, quindi, non ha solo carattere locale, e questo fatto la rende particolarmente difficile da accettare da un punto di vista intuitivo.

I teoremi di Bell e Bell-Kochen-Specker, comunque, sono molto posteriori alla data di nascita della meccanica quantistica. È opportuno ricordare, pertanto, che la contestualità e la conseguente non-oggettività delle proprietà hanno fatto parte dell'interpretazione della meccanica quantistica fin dalle origini, ben prima che esse fossero supportate in modo analitico dai teoremi in questione. Una ragione profonda di questo

fatto risiede nell'adozione implicita di una nozione della verità come verifica, di stampo neopositivistico, secondo la quale un enunciato ha significato, e quindi valore di verità, se e solo se è "verificabile in linea di principio tramite l'esperienza" [23]. Una concezione del significato e della verità di questo tipo non comporta modifiche rilevanti del linguaggio della meccanica classica poiché in questa teoria sia gli enunciati atomici che gli enunciati molecolari (gli enunciati, cioè, composti mediante enunciati atomici e connettivi come non, e, o, ecc.) sono suscettibili di controllo empirico (osservativi), almeno in linea di principio.

In meccanica quantistica, invece, esistono proprietà incompatibili, come si è visto al termine della Sezione 4. Secondo la concezione della verità come verifica questo fatto impedisce di attribuire simultaneamente valori di verità a tutti gli enunciati atomici della forma $E(a)$, ed esistono in meccanica quantistica enunciati molecolari che non hanno valore di verità e che i fisici hanno spesso classificato come "privi di senso" (ad esempio la nota asserzione "la particella che si considera ha coordinata q e momento p all'istante t "). Quindi solo assegnazioni parziali di verità su $\mathcal{E}(a)$ sono possibili, l'opzione OP1 non è accettabile, ed è necessario scegliere l'opzione OP2, come fa l'interpretazione standard, da cui derivano la contestualità della teoria e la non-oggettività delle proprietà. Heisenberg sintetizzò questa posizione sostenendo che ogni proprietà di un oggetto fisico dovesse essere considerata potenziale prima di una sua misura, e che essa potesse diventare attuale solo in seguito alla misura stessa [24]. Questa terminologia è stata a volte criticata come metafisica perché sembra far riferimento a una realtà che trascende ogni controllo empirico diretto o indiretto, ma può anche essere intesa semplicemente come espressione sintetica di quanto dimostrato dai teoremi di Bell e di Kochen e Specker.

Esiste infine un famoso esperimento ideale, detto esperimento delle due fenditure, la cui versione concreta è stata più volte realizzata in laboratorio, e che è ancor oggi utilizzato a scopi didattici in alcuni manuali di meccanica quantistica, il quale sembra dimostrare che la non-oggettività delle proprietà nel caso di sistemi fisici microscopici è inevitabile, anche in-

dipendentemente dalla descrizione del mondo fornita dalla meccanica quantistica. Se questo fosse vero, si tratterebbe di un risultato molto importante perché proverebbe che la scelta dell'opzione OP2 è una condizione che deve essere imposta a priori a ogni teoria del mondo microscopico. L'esperimento delle due fenditure sarà perciò descritto e analizzato nella Sezione 9.1.

7. Contestualità e probabilità.

La scelta fra le opzioni OP1 e OP2 in Sezione 2 è rilevante anche agli effetti della comprensione del ruolo della probabilità nella teoria che si considera. Se ci si pone in una prospettiva di **realismo scientifico** secondo cui le entità teoriche e le leggi delle teorie descrivono entità e relazioni realmente esistenti in un mondo esterno a noi e si sceglie l'opzione OP1, come in meccanica classica, la probabilità è introdotta per tener conto della mancanza di conoscenza di alcuni aspetti del mondo ed è interpretata come misura indiretta di tale carenza. Per questo motivo essa è usualmente detta **epistemica**.

Se invece ci si pone nella stessa prospettiva ma si sceglie l'opzione OP2, come accade in meccanica quantistica quando si adotta l'interpretazione standard, la probabilità assume un ruolo di entità primaria, costitutiva del mondo stesso, poiché la contestualità implica che non vi siano proprietà oggettive di cui non si ha conoscenza antecedentemente alla loro misura, ma solo probabilità di oggettivazione di proprietà quando si effettuano misure. In questo caso la probabilità è usualmente detta **ontica**.

Questa terminologia può anche essere intesa in senso puramente semantico, evitando di accettare una posizione di realismo scientifico, se si tiene conto di quanto detto nella Sezione 2. Una distribuzione di probabilità può infatti essere detta epistemica quando si riferisce a un insieme di enunciati su cui è definibile un'assegnazione di verità indipendente da ogni processo di misura, ontica nel caso contrario. Comunque essa sia intesa, la distinzione fra i due tipi di probabilità è importante in meccanica quantistica quando si considerano miscele, poiché in una miscela la probabilità descritta dai pesi deve essere considerata epistemica (essa esprime la mancanza di

conoscenza dello stato effettivo di un dato oggetto fisico, vedi Sezione 3) mentre le probabilità associate agli stati puri debbono essere considerate ontiche (vedi sezione 5). Il fatto che nelle formule questi due tipi di probabilità compaiano congiuntamente crea seri problemi interpretativi quando si considerano le diverse espressioni matematiche che descrivono la stessa miscela [25].

In lavori recenti, comunque, è stato proposto di accettare la contestualità della meccanica quantistica incorporandola nel linguaggio di base della teoria [26, 27]. Su questo linguaggio è allora possibile definire assegnazioni di verità consistenti con la meccanica quantistica e ottenere la probabilità quantistica come media pesata di probabilità classiche. Si può recuperare in questo modo un'interpretazione epistemica (misura indiretta di ignoranza) della probabilità quantistica, e così dimostrare che la contestualità della meccanica quantistica non implica che la probabilità quantistica debba necessariamente essere considerata ontica.

8. Contestualità e non-oggettività: problemi e paradossi.

Nonostante i risultati esposti al termine della sezione precedente, la contestualità resta una caratteristica controintuitiva della meccanica quantistica. Si è visto infatti in Sezione 2 che l'opzione OP2 è incompatibile con l'opzione OP1 che è implicitamente (e di solito inconsapevolmente) adottata quando ci si riferisce alle proprietà di oggetti macroscopici della vita quotidiana nel linguaggio naturale. Una prima conseguenza della contestualità, in particolare, è l'impossibilità di costruire un modello geometrico-intuitivo del mondo simile a quello proposto dalla meccanica classica e dalla relatività generale, perché in un modello di questo tipo tutte le possibili proprietà di un sistema fisico sono o possedute o non possedute dal sistema indipendentemente da ogni processo di misura: il modello non è cioè contestuale.

Fin dalla nascita della meccanica quantistica questa impossibilità ha problematizzato scienziati e filosofi, specialmente quelli che tendevano a

interpretare i modelli come descrittivi di entità e relazioni realmente esistenti nel mondo, coerentemente con una prospettiva di realismo scientifico (vedi Sezione 7), dando origine al tradizionale dilemma riguardante la natura dei sistemi fisici microscopici: onde o particelle? Ed è forse per questa stessa impossibilità che Feynman asseriva di non capire la meccanica quantistica (vedi Sezione 1). Se così fosse, tuttavia, l'affermazione di Feynman confonderebbe la comprensione di una teoria con la costruzione di un modello intuitivamente soddisfacente della teoria stessa.

Un secondo problema tradizionale della meccanica quantistica, derivante anch'esso dalla contestualità, è il problema della **macrooggettivazione**, che sorge se si assume che la meccanica quantistica sia una teoria generale, applicabile all'intero universo fisico [28]. Infatti, quando si introduce questa assunzione epistemologica e si considera un processo di misura su un oggetto fisico microscopico, anche l'apparato di misura che interagisce con l'oggetto deve essere descritto come un sistema quantistico e la non-oggettività delle proprietà si estende dalle proprietà dell'oggetto microscopico a quelle dell'apparato macroscopico. Non si comprende allora come possa avvenire un processo di attualizzazione che permetta di osservare proprietà oggettive dell'apparato di misura da cui risalire a proprietà dell'oggetto fisico, anch'esse attualizzate. L'eventuale introduzione di un ulteriore apparato che osservi il sistema formato dall'oggetto microscopico e dall'apparato di misura non risolve il problema ma lo ripropone per quanto riguarda il nuovo apparato, e la ripetizione di questa procedura produce una successione di apparati (la "catena di von Neumann") che può procedere all'infinito se non interviene un processo di attualizzazione che la interrompe. Secondo alcuni autori, l'interruzione avverrebbe quando nella catena si inserisce un osservatore cosciente [29, 30] al posto di un apparato di misura: un osservatore di questo tipo si sottrarrebbe quindi alla descrizione del mondo fornita dalla meccanica quantistica e la coscienza contribuirebbe in modo sostanziale all'attualizzazione del mondo fisico. Questa posizione è ben illustrata dai paradossi del gatto di Schrödinger e dell'amico di Wigner citati in Sezione 1. In tempi più recenti sono stati fatti numerosi tentativi di risolvere

il problema della macrooggettivazione evitando l'intervento della coscienza, come la teoria della riduzione spontanea [31], la teoria della decoerenza [32], ecc. Tuttavia nessuno di essi ha ricevuto finora un consenso generalizzato.

Non tutti gli autori, comunque, hanno accettato l'idea che la meccanica quantistica costituisca una teoria universalmente applicabile a tutto il mondo fisico. Fin dalle origini della meccanica quantistica molti fisici hanno ritenuto che il mondo microscopico e il mondo macroscopico richiedessero descrizioni diverse, il primo essendo descritto dalla meccanica quantistica, il secondo dalla fisica classica [24, 33]. Tuttavia anche questa prospettiva è problematica. Non è chiaro infatti se esista una linea di confine fra i due mondi e, se non esiste, come debbano essere trattati i fenomeni fisici che, secondo i punti di vista, possono appartenere sia all'uno che all'altro. L'esistenza, poi, di fenomeni macroscopici che ammettono solamente una spiegazione in termini quantistici mette ulteriormente in discussione posizioni di questo tipo.

Infine, la contestualità della meccanica quantistica (che si ritrova nei suoi sviluppi più evoluti, come la teoria quantistica dei campi) costituisce almeno una delle ragioni profonde delle difficoltà incontrate nella costruzione di una teoria più ampia che comprenda sia la relatività generale che la meccanica quantistica. Essa implica infatti che una unificazione delle due teorie deve comportare modifiche rilevanti dall'apparato teorico e/o dell'interpretazione di almeno una di esse.

9. Un'analisi critica della contestualità.

Le difficoltà causate dalla contestualità e illustrate nella sezione precedente suggeriscono che sia opportuno effettuare un'analisi critica dei modi in cui essa è dimostrata, per verificare se essa sia, come comunemente si crede, una conseguenza ineludibile del formalismo della meccanica quantistica, o se non sia invece possibile, almeno in linea di principio, evitarla, reinterpretando la meccanica quantistica ed eventualmente immergendo la meccanica quantistica stessa in una teoria più generale e non-contestuale.

9.1. L'esperimento delle due fenditure.

Come anticipato nella Sezione 6, l'esperimento delle due fenditure ha un ruolo importante nella storia e nella didattica della meccanica quantistica, poiché sembra fornire a questa teoria sia un supporto empirico preliminare, sia una corroborazione empirica a posteriori. In particolare, secondo un punto di vista diffuso esso mostra che la non-oggettività delle proprietà fisiche è deducibile da risultati sperimentali che sono indipendenti dalla meccanica quantistica e che giustificano la sua introduzione nell'apparato interpretativo di questa teoria anche prescindendo dai teoremi di Bell e di Bell-Kochen-Specker (vedi Sezione 6). Tuttavia le argomentazioni che conducono a questa conclusione sono problematiche. Per individuarne correttamente le criticità è allora opportuno discuterle brevemente.

Nell'esperimento delle due fenditure si considera un flusso di oggetti fisici microscopici (nel seguito, per semplicità, elettroni), su cui per il momento non si fanno ipotesi. Gli elettroni sono tutti preparati in uno stato S_0 (essi formano quindi una popolazione associata allo stato S_0) e incidono su uno schermo con due fenditure, 1 e 2, che li riprepara in un nuovo stato. Quando 1(2) è aperta e 2(1) è chiusa gli elettroni incidenti che superano lo schermo hanno la proprietà di passare da 1(2) e sono ripreparati nello stato $S_1(S_2)$. Quando 1 e 2 sono entrambe aperte gli elettroni hanno la proprietà di passare da 1, o da 2, o da entrambe, e sono ripreparati nello stato $S_{1&2}$.

Esiste poi un secondo schermo che funge da osservabile evidenziando le zone di impatto degli elettroni passati attraverso il primo schermo. Se si effettuano esperimenti sulla popolazione di elettroni negli stati S_1 , S_2 e $S_{1&2}$ si ottengono tre diverse distribuzioni di frequenze sullo spazio campionario costituito dalle coordinate dei punti del secondo schermo (che è lo stesso nei tre casi; si noti che l'insieme dei valori delle coordinate ha formalmente la potenza del continuo, e che tuttavia a livello empirico esso può essere discretizzato suddividendo il secondo schermo in areole sufficientemente piccole, in ognuna delle quali è posto un rivelatore). Effettuando gli esperimenti con elettroni che giungono sugli schermi in successione e fortemente distanziati fra loro,

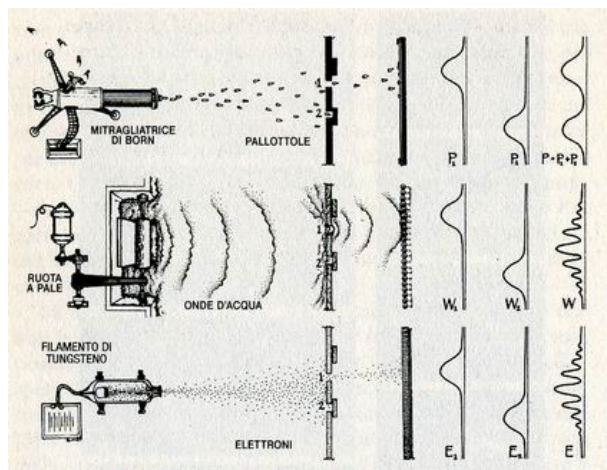


Figura 1: L'esperimento delle due fenditure può essere effettuato su sistemi fisici di tipo diverso: nella figura, dall'alto, particelle classiche, onde in un liquido ed elettroni. Schematicamente esso è composto, in sequenza, da una sorgente, da uno schermo piano in cui sono praticate due fenditure rettilinee parallele, ognuna delle quali può essere chiusa o aperta, e da un insieme di rivelatori, posti in un piano parallelo allo schermo, che misurano in ogni punto del piano il numero di particelle che giungono in quel punto o l'intensità dell'onda incidente. I tre diagrammi che seguono il piano dei rivelatori nella figura rappresentano, nell'ordine, i risultati ottenuti, in un dato intervallo di tempo e lungo una retta ortogonale alle due fenditure, con la sola fenditura superiore aperta, con la sola fenditura inferiore aperta e con entrambe le fenditure aperte. Nel caso in cui la sorgente emette particelle classiche ogni particella fa scattare un singolo rivelatore, ma se il numero di particelle è molto grande il terzo diagramma è semplicemente la somma dei due diagrammi precedenti. Nel caso in cui la sorgente emette onde in un liquido compare nel terzo diagramma una figura di diffrazione. Nel caso in cui la sorgente emette elettroni ogni elettrone fa scattare un singolo rivelatore, come nel primo caso, ma se il numero di particelle è molto grande il terzo diagramma mostra una figura di diffrazione, come nel secondo caso.

in modo da escludere perturbazioni nel moto dovute a interazioni reciproche, si ottiene per ogni elettrone un punto di impatto, almeno da un punto di vista macroscopico, e non un'area estesa. Ciò suggerisce che ogni elettrone debba essere descritto come una particella puntiforme e non come una carica distribuita in modo continuo

nello spazio.

Si considera allora la popolazione di elettroni nello stato $S_{1\&2}$, e si introduce l'ipotesi che segue, apparentemente ovvia.

HP. Ogni elettrone che arriva sul primo schermo deve passare dalla fenditura 1 oppure dalla fenditura 2, e gli elettroni che hanno la proprietà di passare dalla fenditura 1(2) costituiscono una sottopopolazione nello stato $S_1(S_2)$ della popolazione nello stato $S_{1\&2}$.

Sinteticamente, l'ipotesi HP equivale a supporre che lo stato $S_{1\&2}$ sia una miscela degli stati S_1 e S_2 (vedi Sezione 3). In genere si suppone anche, per motivi di simmetria, che i pesi relativi p_1 e p_2 dei due stati siano identici e uguali a $1/2$, ma questa condizione non è rilevante ai fini delle conclusioni finali ed è sufficiente supporre che p_1 e p_2 siano entrambi diversi da zero e tali che $p_1 + p_2 = 1$ ².

Segue da HP che la popolazione nello stato $S_{1\&2}$ costituisce una mescolanza delle due sottopopolazioni, e che quindi la distribuzione di frequenze sullo spazio campionario deve essere una semplice sovrapposizione, con pesi p_1 e p_2 , delle distribuzioni ottenute effettuando esperimenti sulle popolazioni negli stati S_1 e S_2 . I dati sperimentali mostrano invece una figura di interferenza, cioè una distribuzione completamente diversa e coerente con una descrizione di ogni singolo elettrone come onda. Questa descrizione, d'altronde, è inaccettabile, perché contrasta con il fatto che gli elettroni appaiono sullo schermo come particelle puntiformi. Pertanto si ritiene usualmente che l'ipotesi HP debba essere respinta e che non sia possibile assumere che ogni elettrone abbia la proprietà di passare dalla fenditura 1 oppure la proprietà di passare dalla fenditura 2 quando entrambe le fenditure sono aperte. A sua volta però questa conclusione sembra in conflitto con i risultati che si ottengono quando si

²La trattazione dell'esperimento delle due fenditure esposta qui è simile a quella proposta da Feynman nelle sue famose lezioni [34], spesso citata e utilizzata a livello didattico. Nella sua lezione Feynman omette però i pesi p_1 e p_2 , sommando direttamente le distribuzioni di frequenza (probabilità) ottenute effettuando esperimenti sulle popolazioni di elettroni negli stati S_1 e S_2 e creando un possibile paradosso (in alcuni punti la frequenza totale potrebbe risultare maggiore di uno). Le conclusioni di Feynman, comunque, sono indipendenti da tale omissione, e non risultano modificate se si inseriscono nelle formule pesi p_1 e p_2 non nulli.

effettuano misure sul passaggio degli elettroni attraverso le fenditure, poiché tali misure mostrano che per ogni elettrone si realizza sempre una e una sola delle due possibili alternative. Tenendo conto del fatto che le misure producono un effetto sulla figura di interferenza, che scompare per essere sostituita dalla semplice sovrapposizione prevista dall'ipotesi HP, l'unico modo per non entrare in conflitto con i dati sperimentali sembra essere quello di concludere che la proprietà di passare dalla fenditura 1 e la proprietà di passare dalla fenditura 2 sono non-oggettive nell'esperimento con le due fenditure aperte, e che per ogni elettrone una misura che determina la fenditura attraversata attualizza una di esse, ripreparando l'elettrone e modificando irreversibilmente il suo stato. L'esperimento sembra perciò corroborare la tesi della non-oggettività delle proprietà dei sistemi fisici microscopici indipendentemente da ogni teoria sulla costituzione della materia a livello microscopico.

La conclusione esposta sopra appare paradossale dal punto di vista della fisica classica, specialmente se si mantiene l'ingenua alternativa corpuscolo/onda per quanto riguarda le particelle elementari. Anche se non si rivendica una qualche forma di descrizione classica per i sistemi fisici microscopici, comunque, essa è criticabile, come accennato all'inizio di questa sezione. L'ipotesi HP è infatti la congiunzione delle due ipotesi che seguono.

- HP1. Ogni elettrone che arriva sul primo schermo deve passare dalla fenditura 1 oppure dalla fenditura 2.
- HP2. Gli elettroni che hanno la proprietà di passare dalla fenditura 1(2) costituiscono una sottopopolazione nello stato $S_1(S_2)$ della popolazione nello stato $S_{1\&2}$.

Il fatto che i risultati empirici siano incompatibili con HP non chiarisce se tale incompatibilità sia da attribuire a HP1, o a HP2 o a entrambe.

Nelle argomentazioni riportate sopra si assume, senza rilevarlo esplicitamente, che il conflitto con i risultati ottenuti sia dovuto ad HP1: tuttavia tale assunzione deriva da una scelta arbitraria fra le alternative che sono logicamente possibili. Inoltre HP1 è supportata dai risultati che si ottengono quando si collocano apparati che misurino il passaggio di elettroni attraverso le fenditure 1

e 2 (si è visto sopra che la scomparsa delle figure di interferenza in questo caso può essere spiegato come dovuto a cambiamenti di stato prodotti dalle misure stesse).

Se si considera invece l'ipotesi HP2 si vede che essa è discutibile, perché identifica la proprietà "passare dalla fessura 1(2)" nel caso in cui entrambe le fenditure sono aperte con "essere nello stato $S_1(S_2)$ ": identificazione legittima, data la differenza fra l'interpretazione della nozione di stato e quella della nozione di proprietà, solo in un modello elementare di tipo classico con traiettorie definite e rettilinee degli elettroni.

Da un punto di vista statistico, poi, l'ipotesi che una popolazione di oggetti fisici nello stato $S_{1\&2}$ sia costituita da una semplice mescolanza di sottopopolazioni di oggetti fisici negli altri due stati, e quindi che $S_{1\&2}$ sia una miscela di S_1 e S_2 , è arbitraria, poiché le preparazioni associate ai tre stati sono fisicamente diverse. È quindi logicamente possibile che HP sia incompatibile con i risultati empirici a causa dell'inattendibilità di HP2, e che HP1 sia invece accettabile. Tuttavia in questo caso l'esperimento perde la sua rilevanza concettuale, perché non fornisce più un supporto alla non-oggettività delle proprietà fisiche [35].

9.2. Le teorie della verità come verificaazione.

Una nozione di verità che identifichi la verità con la verificaazione è discutibile e controversa [5, 36, 37]. Vi sono almeno due argomenti intuitivi che suggeriscono di evitare tale identificazione [23]. Il primo consiste nell'osservare che la nozione (pragmatica) di verificaazione presuppone la nozione (semantica) di verità, poiché la verifica di un enunciato consiste nel provare che il suo valore di verità è vero. Il secondo può essere sintetizzato notando che è ragionevole richiedere che un enunciato possa essere vero (o falso) indipendentemente dalla nostra capacità di riconoscerlo come tale: infatti è ben noto che, secondo la nozione classica di verità, esistono enunciati, sia fattuali che logico-matematici, che sono dotati di valore di verità ma sono indecidibili, cioè non passibili di verificaazione (un esempio di enunciato fattuale indecidibile è fornito dal famoso enunciato di Poincaré, il quale asserisce che nel corso di una notte tutte le dimensioni

dell'universo diventano mille volte più grandi: infatti questo enunciato è dotato di significato e di valore di verità da un punto di vista classico ma è impossibile da controllare empiricamente a causa della crescita simultanea degli oggetti fisici e delle unità di misura delle lunghezze [23]). Pertanto, non sembra convincente concludere che le proprietà fisiche sono non-oggettive in meccanica quantistica se questa conclusione è basata su una teoria della verità come verificaazione.

9.3. I teoremi di Bell e Bell-Kochen-Specker.

Il gruppo di Lecce ha proposto a suo tempo un'analisi dei teoremi di Bell e di Bell-Kochen-Specker (vedi Sezione 6) in diversi lavori, mostrando che le dimostrazioni di questi teoremi, pur essendo corrette da un punto di vista formale, si basano su un'ipotesi implicita di tipo epistemologico che può essere messa in discussione [38, 39]. Per chiarire questo punto evitando una trattazione tecnica conviene osservare preliminarmente che esistono in ogni teoria fisica **leggi teoriche** e **leggi empiriche**. Le leggi teoriche contengono termini teorici interpretati empiricamente in modo indiretto (vedi l'inserto), e sono suscettibili di controllo solo tramite le leggi empiriche da esse deducibili. Le leggi empiriche stabiliscono invece relazioni fra proprietà di un dato sistema fisico e sono espresse da enunciati complessi nei quali compaiono soltanto enunciati atomici osservativi, cioè associati a procedure di controllo empirico. Queste leggi possono essere di due tipi diversi. Un primo tipo è quello delle **leggi empiriche (direttamente) controllabili** che stabiliscono relazioni suscettibili di controllo empirico diretto tramite gli apparati di misura associati alle proprietà che in esse compaiono (vedi Sezione 2). Un secondo tipo è quello delle **leggi empiriche (solo) indirettamente controllabili**, che stabiliscono relazioni che non possono essere controllate direttamente a causa di incompatibilità esistenti fra i contesti di misura richiesti per effettuare il controllo³, e che quindi sono su-

³Un esempio di legge empirica indirettamente controllabile è costituito in fisica classica da leggi che correlano proprietà **disposizionali**, il cui controllo implica la distruzione o la trasformazione dell'oggetto fisico considerato (come combustibilità, tossicità, fragilità, ecc.).

scettibili solo di un controllo empirico indiretto tramite leggi controllabili da esse deducibili.

Si considerino ora le teorie della fisica classica. In queste teorie la scelta dell'opzione OP1 (vedi Sezione 2) implica che le relazioni stabilite da leggi empiriche debbano sussistere indipendentemente dal contesto di misura che si sceglie al fine di acquisire conoscenza dei valori di verità degli enunciati atomici che compaiono nelle leggi. In altre parole, in queste teorie vale il seguente Principio Metateorico Classico [38, 39].

MCP. Una legge empirica controllabile della fisica è valida in ogni possibile contesto di misura.

Il principio MCP è un principio epistemologico che stabilisce l'ambito e i limiti di validità di leggi della fisica. Esso è talmente radicato nella concezione epistemologica tradizionale da essere applicato in ogni argomentazione fisica, e quindi anche nel caso di teorie non classiche, senza enunciarlo esplicitamente. Questo è quanto accade, in particolare, nel caso dei teoremi di Bell e di Bell-Kochen-Specker. Per comprenderlo conviene esaminare alcune riformulazioni più recenti di tali teoremi (vedi Sezione 6), in cui le ipotesi implicite possono essere individuate con maggior chiarezza (analisi simili possono essere effettuate, comunque, anche nel caso delle versioni originarie). L'esame mostra allora che nelle dimostrazioni di queste riformulazioni si considerano innanzitutto leggi teoriche della meccanica quantistica relative a un sistema di più particelle (ad esempio la conservazione dello spin totale) e se ne deducono alcune leggi empiriche controllabili, ognuna delle quali stabilisce correlazioni tra i valori di osservabili dicotomiche fra loro compatibili. Si ipotizza poi che, quando si considera un particolare sistema, tutte le osservabili dicotomiche in questione abbiano valore definito indipendentemente da ogni contesto di misura (scegliendo così l'opzione OP1), e si prova che questa ipotesi conduce a contraddizioni con le correlazioni previste. Se ne conclude che l'ipotesi fatta (e quindi l'opzione OP1) è stata confutata, e che la scelta dell'opzione OP2 effettuata dall'interpretazione standard è giustificata.

Nell'argomentazione riportata sopra, che è quasi universalmente accettata, non compare alcun riferimento al principio MCP. Un'analisi più accurata prova invece che esso è utilizzato nelle

dimostrazioni dei teoremi, che dovrebbero essere schematicamente rappresentate come segue.

- (i) Adozione del principio MCP in meccanica quantistica.
- (ii) Scelta dell'opzione OP1.
- (iii) Prova (tramite individuazione di un insieme opportuno di leggi empiriche controllabili) che da (i) e (ii) conseguono contraddizioni con le previsioni della meccanica quantistica.
- (iv) Attribuzione delle contraddizioni alla scelta dell'opzione OP1.
- (v) Conclusione che la meccanica quantistica impone la scelta dell'opzione OP2.

Lo schema che precede mostra tuttavia che è inevitabile attribuire le contraddizioni rilevate alla scelta dell'opzione OP1 solo se si ignora l'uso implicito del principio MCP nel corso delle dimostrazioni. Quando invece tale uso è reso esplicito si presenta un'alternativa logica: quella di considerare il principio MCP inadeguato alla meccanica quantistica e di attribuire le contraddizioni a tale principio piuttosto che alla scelta dell'opzione OP1.

Se si sceglie questa alternativa occorre individuare un nuovo principio che sostituisca il principio MCP nello stabilire l'ambito e i limiti di validità delle leggi empiriche controllabili. Per quanto precede, il nuovo principio dovrà soddisfare due condizioni. In primo luogo esso dovrà risultare equivalente al principio MCP quando si considera la fisica classica, in cui la validità del principio MCP non è contestabile. In secondo luogo essa non dovrà generare contraddizioni quando si sceglie l'opzione OP1 e si considerano leggi empiriche controllabili della meccanica quantistica.

10. Un nuovo principio epistemologico.

Anche tralasciando la critica ai teoremi di Bell e di Bell-Kochen-Specker avanzata nella sezione precedente, esistono ragioni che suggeriscono che in meccanica quantistica il principio MCP

debba essere messo in discussione e che forniscono utili indicazioni sul modo in cui esso dovrebbe essere modificato. Si è visto infatti nella Sezione 4 che la meccanica quantistica introduce una relazione binaria di compatibilità sull'insieme \mathcal{E} di tutte le proprietà, tale che proprietà incompatibili non possono essere misurate congiuntamente. Una legge empirica, pertanto, sarà controllabile solo se stabilisce relazioni fra proprietà a due a due compatibili. Inoltre, dato un oggetto fisico a e un contesto in cui si misura una proprietà E su a , non è possibile controllare su a la validità di una legge empirica controllabile quando nella legge compaiono proprietà incompatibili con E .

Se si considera quindi una legge empirica controllabile, i contesti di misura possibili si dividono in contesti di misura in cui si può effettuare un controllo della legge (brevemente, contesti di misura in cui la legge è **epistemicamente accessibile**) e in contesti di misura in cui il controllo della legge è impossibile. Inoltre, se si considerano leggi empiriche controllabili diverse fra loro, in alcune delle quali compaiono proprietà che non sono compatibili con proprietà che compaiono in alcune delle altre, non esiste alcun contesto di misura in cui tutte le leggi considerate possano essere controllate congiuntamente (la congiunzione di tutte le leggi empiriche controllabili in questione sarà quindi una legge empirica indirettamente controllabile, che ovviamente non è epistemicamente accessibile in alcun contesto di misura).

Sembra pertanto opportuno evitare di impegnarsi sulla validità di leggi empiriche controllabili in contesti di misura in cui esse non sono epistemicamente accessibili (in termini Popperiani queste leggi non sono né verificabili né falsificabili), come vorrebbe il principio MCP. Occorre quindi individuare un nuovo principio epistemologico che generalizzi il principio MCP tenendo conto dell'esistenza di teorie in cui sussiste una relazione non banale di compatibilità. Questa condizione suggerisce di sostituire il principio MCP con il seguente **principio metateorico generalizzato** [38, 39].

MGP. Una legge empirica controllabile è valida in ogni contesto di misura in cui la legge è epistemicamente accessibile.

Il principio MGP asserisce la validità delle leggi

empiriche controllabili della fisica nei soli contesti di misura in cui tali leggi possono effettivamente essere controllate, senza impegnarsi sulla loro validità in contesti di misura in cui il controllo non è possibile. Tuttavia esso è equivalente al principio MCP in fisica classica, poiché in questo caso tutte le proprietà sono fra loro compatibili e ogni legge empirica controllabile è epistemicamente accessibile in ogni contesto di misura (esso soddisfa quindi la prima delle condizioni enunciate al termine della sezione precedente).

In meccanica quantistica, invece, l'adozione del principio MGP, pur non pregiudicando la correttezza delle previsioni della teoria, conduce a considerare gli enunciati delle leggi empiriche come non necessariamente dotati di valore di verità vero in ogni contesto di misura.

Se in particolare si sostituisce il principio MCP con il principio MGP nello schema presentato nella sezione precedente, è facile provare che la contraddizione che compare nel punto (iii) non può più essere dimostrata (il principio MGP soddisfa quindi anche la seconda delle condizioni enunciate al termine della stessa sezione). Pertanto l'opzione OP1 non risulta più incompatibile con la meccanica quantistica, anche se nessun assegnamento di valori di verità a tutti gli enunciati di $\mathcal{E}(a)$ è empiricamente controllabile, poiché un controllo richiederebbe l'effettuazione di procedure di misura fra loro incompatibili. Conseguentemente, la non-oggettività delle proprietà non appare più come una caratteristica inevitabile della teoria e il problema della macrooggettivazione discusso nella Sezione 8 può essere evitato, insieme con i paradossi che lo illustrano⁴.

È importante notare, comunque, che il recupero dell'opzione OP1 in meccanica quantistica non costituisce un ritorno a una concezione classica delle teorie fisiche, poiché il principio MGP introduce un nuovo tipo di contestualità, la contestualità della validità delle leggi empiriche controllabili. In altre parole, un contesto di misura stabilisce, secondo il principio MGP, qua-

⁴È interessante osservare che, se si sostituisce il principio MGP al principio MCP, i teoremi di Bell e di Bell-Kochen-Specker, opportunamente riformulati, dimostrano che vi sono effettivamente, in meccanica quantistica, leggi empiriche indirettamente controllabili da cui sono deducibili leggi empiriche controllabili, quindi valide, ma che non sono esse stesse valide in alcun contesto di misura.

li leggi empiriche controllabili siano valide nel contesto stesso, in una prospettiva globalistica (vedi Sezione 2) che vede le relazioni fra le proprietà degli oggetti fisici dipendere dall'intera situazione fisica considerata.

Da un punto di vista intuitivo questa caratterizzazione epistemologica delle leggi può essere compresa ricordando che esistono in fisica classica casi ben noti in cui le misure perturbano necessariamente i valori delle grandezze fisiche misurate (un esempio elementare è costituito dalle misure di corrente e di differenza di potenziale mediante amperometri e voltmetri, rispettivamente). Si può infatti ritenere, per analogia, che le leggi della meccanica quantistica stabiliscano le relazioni fra i valori perturbati delle osservabili che in esse compaiono in un contesto in cui se ne effettua una misura, non le relazioni che valgono quando non si effettua alcuna misura.

La differenza fondamentale fra le due meccaniche sarebbe allora costituita dal fatto che nel caso della meccanica classica è possibile risalire ai valori non perturbati mediante calcoli opportuni, mentre nel caso della meccanica quantistica non esiste alcuna procedura che permetta di effettuare tale operazione. Tuttavia il recupero di OP1 permetterebbe di non escludere, almeno da un punto di vista logico, la possibilità che esistano interpretazioni non standard della meccanica quantistica compatibili con una teoria più ampia in cui tutte le leggi empiriche siano valide in ogni contesto fisico, e che riproduca le leggi della meccanica quantistica tramite un'opportuna teoria della misura. Un primo passo in questa direzione è stato fatto dal gruppo di Lecce, il quale ha suggerito una reinterpretazione della probabilità quantistica che ripristina, sotto certe condizioni, l'oggettività delle proprietà [40, 41].

Ringraziamenti.

L'autore ringrazia Giampaolo Co', Domenico Costantini, Antonio Negro, Carlo Penco e Jochen Rau per la pazienza dimostrata nel leggere il manoscritto originale e per i suggerimenti che hanno contribuito a migliorarne la qualità e la comprensibilità.

APPENDICE

Due esempi semplici possono servire a illustrare alcuni dei concetti di base discussi nelle Sezioni 2 e 3, mettendo in evidenza, in particolare, il ruolo fondamentale degli stati miscela quando lo stato degli oggetti fisici considerati è noto solo in modo approssimato.

A1. Caso classico: il lancio di un dado.

Per semplicità, si considera qui uno spazio degli stati iniziali finito. La trattazione è quindi puramente indicativa, poiché una discussione più precisa richiederebbe un passaggio al continuo, con ovvie complicazioni matematiche.

1. Spazio campionario: $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$.
2. Stato del dado dopo un lancio: miscela S di tutti gli stati puri iniziali possibili.
3. N : numero totale degli stati puri iniziali possibili.
 $n(j)$: numero degli stati puri iniziali che producono esito j ($j = 1, 2, \dots, 6$).
 $S_k(j)$: stato puro iniziale che produce esito j ($k = 1, 2, \dots, n(j)$).
 $p_k(j)$: peso dello stato puro iniziale $S_k(j)$ nell'espressione dello stato miscela S .
4. Espressione dello stato miscela S , ottenuta raggruppando gli stati puri che producono lo stesso esito:

$$S = \{(p_1(1), S_1(1)); (p_2(1), S_2(1)); \dots, (p_{n(1)}(1), S_{n(1)}(1))\} \cup \dots \cup \{(p_1(6), S_1(6)); (p_2(6), S_2(6)); \dots; (p_{n(6)}(6), S_{n(6)}(6))\}$$

$$\text{con } n(1) + n(2) + \dots + n(6) = N.$$

5. Popolazione: insieme di tutti i lanci (stesso dado in sequenza, o lancio simultaneo di un gran numero di dadi identici; il secondo esperimento è più costoso ...).
6. Probabilità $P(j)$ di ottenere esito j :

$$P(j) = p_1(j) + p_2(j) + \dots + p_{n(j)}(j).$$

7. Caso particolare:

- a) tutti gli stati iniziali possibili sono equiprobabili (lancio ideale);
- b) il numero di stati iniziali che producono un dato esito è identico per tutti gli esiti (dado ideale).



Si ha, per a),

$$p_1(1) = p_2(1) = \dots = p_{n(1)}(1) = \dots = p_1(6) = p_2(6) = \dots = p_{n(6)}(6) = \frac{1}{N}.$$

Si ha poi, per b),

$$n(1) = n(2) = \dots = n(6) = \frac{N}{6}.$$

Ne segue

$$P(1) = \dots = P(6) = \frac{1}{N} \frac{N}{6} = \frac{1}{6}.$$

Si ritrova così la probabilità matematica con un metodo che pone in evidenza le astrazioni che essa comporta da un punto di vista fisico.

A2. Caso quantistico: particella di spin 1/2.

Esperimento di Stern-Gerlach lungo l'asse z , successiva riunione dei due fasci e misura di spin lungo una direzione u .

1. Spazio campionario: $\{+1/2, -1/2\}$.
2. Stato S di una particella del fascio: miscela dei due stati puri possibili. Con ovvio significato dei simboli si ha:

$$S = \{(p_+, |+\rangle_z); (p_-, |-\rangle_z)\}$$

e S è descritto dall'operatore densità

$$\rho_S = p_+ |+\rangle_z \langle +| + p_- |-\rangle_z \langle -|.$$

3. Popolazione: insieme di tutte le particelle del fascio.
4. Probabilità dei valori dello spazio campionario:

$$P(1/2) = p_+ |u \langle +|+\rangle_z|^2 + p_- |u \langle +|-\rangle_z|^2,$$

$$P(-1/2) = p_+ |u \langle -|+\rangle_z|^2 + p_- |u \langle -|-\rangle_z|^2.$$

- [1] R. P. Feynman: *The Character of Physical Laws*, The MIT Press, Cambridge (MA) (1965).
- [2] S. Hossenfelder: *Lost in Math*, Basic Books, New York (2018).
- [3] C. Garola: *Problemi epistemologici in meccanica quantistica*, Ithaca: Viaggio nella Scienza, XIII (2019) 21.
- [4] R. B. Braithwaite: *Scientific Explanation*, Cambridge University Press, Cambridge (1953).
- [5] C. G. Hempel: *Aspects of Scientific Explanation*, Free Press, New York (1965).
- [6] R. Carnap: *Philosophical Foundations of Physics*, Basic Books Inc., New York (1966).
- [7] F. Suppe: *Understanding scientific theories: an assessment of developments. 1969-1998*, Philosophy of Science, 67, supplement (2000) S102.
- [8] H. Halvorson: *What scientific theories could not be*, Philosophy of Science, 79 (2012) 183.
- [9] D. Costantini: *Verso una rappresentazione probabilistica del mondo*, EMMEBI, Firenze (2011).
- [10] E. Beltrametti, G. Cassinelli: *The Logic of Quantum Mechanics*, Addison-Wesley, Reading (MA) (1981).
- [11] G. Ludwig: *Foundations of Quantum Mechanics I*, Springer, New York (1983).
- [12] A. Tarski: *The concept of truth in formalized languages*. In *Logic, Semantics, Metamatematics*, J. M. Woodger ed., Oxford University Press, Oxford (1956).
- [13] C. Garola, S. Sozzo: *Recovering quantum logic within an extended classical framework*, Erkenntnis, 78 (2013) 399.
- [14] G. Birkhoff, J. von Neumann: *The logic of quantum mechanics*, Ann. Math., 37 (1936) 823.
- [15] N. Redei: *Quantum Logic in Algebraic Approach*, Kluwer, Dordrecht (1998).
- [16] M. L. Dalla Chiara, R. Giuntini, R. Greechie: *Reasoning in Quantum Theory*, Kluwer, Dordrecht (2004).
- [17] A. Einstein, B. Podolski e N. Rosen: *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, Phys. Rev., 47 (1935) 777.
- [18] J. S. Bell: *On the Einstein-Podolski-Rosen paradox*, Physics, 1 (1964) 195.
- [19] J. S. Bell: *On the problem of hidden variables in quantum mechanics*, Rev. Mod. Phys., 38 (1966) 447.
- [20] S. Kochen, E. P. Specker: *The problem of hidden variables in quantum mechanics*, J. Math. Mech., 17 (1967) 59.
- [21] D. M. Greenberger, M. A. Horne, A. Shimony, A. Zeilinger: *Bell's theorem without inequalities*, Am. J. Phys., 58 (1990) 1131.
- [22] N. D. Mermin: *Hidden variables and the two theorems of John Bell*, Rev. Mod. Phys., 65 (1993) 803.

- [23] C. Dalla Pozza, A. Negro: *Come Distinguere Scienza e Non-Scienza*, Carocci, Roma (2017).
- [24] W. Heisenberg: *Physics and Philosophy: the Revolution in Modern Science*, Harper, New York (1958).
- [25] C. Garola, S. Sozzo: *The physical interpretation of partial traces: two non standard views*, *Theoretical and Mathematical Physics*, 152 (2007) 1087.
- [26] C. Garola: *An epistemic interpretation of quantum probability via contextuality*, *Found. Sci.*, 19 (2020) 105.
- [27] C. Garola: *Kolmogorovian versus non-Kolmogorovian probabilities in quantum theories*, *Entropy*, 23 (2021) 121.
- [28] S. Weinberg: *Einstein's mistakes*, *Phys. Today*, 58 (2005) 11.
- [29] J. von Neumann: *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton (1955).
- [30] E. P. Wigner: *Remarks on the mind-body question*. In *Symmetries and Reflections*, Indiana University Press, Bloomington and London (1967).
- [31] G. C. Ghirardi: *I fondamenti concettuali e le implicazioni epistemologiche della meccanica quantistica*. In *Filosofia della Fisica*, G. Boniolo ed., Bruno Mondadori, Milano (1997).
- [32] M. Schlosshauer: *Decoherence: And The Quantum-To-Classical Transition*, Springer Nature, Berlin (2007).
- [33] N. Bohr: *On the notion of causality and complementarity*, *Dialectica*, 2 (1948) 312.
- [34] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands *The Feynman Lectures on Physics* California Institute of Technology (1964) <https://www.feynmanlectures.caltech.edu/>
- [35] C. Garola, S. Sozzo: *Realistic aspects in the standard interpretation of quantum mechanics*, *Humana.Mente-Journal of Philosophical Studies*, 13 (2010) 81.
- [36] B. Russell: *An Inquiry into Meaning and Truth*, Allen & Unwin, London (1940).
- [37] K. Popper: *Conjectures and Refutation*, Routledge and Kegan Paul, London (1969).
- [38] C. Garola: *Against paradoxes: a new quantum philosophy for quantum mechanics* In *Quantum Structures and the Nature of Reality*, D. Aerts and J. Pykacz ed., Kluwer, Dordrecht (1999).
- [39] C. Garola, M. Persano: *Embedding quantum mechanics into a broader noncontextual theory*, *Found. Sci.*, 19 (2014) 217.
- [40] C. Garola: *A survey of the ESR model for an objective interpretation of quantum mechanics*, *Int. J. Theor. Phys.*, 54 (2015) 4410.
- [41] C. Garola, S. Sozzo, J. Wu: *Outline of a generalization and a reinterpretation of quantum mechanics recovering objectivity*, *Int. J. Theor. Phys.*, 55 (2016) 2500.

Claudio Garola: è stato professore associato di Istituzioni di Fisica Teorica e professore ordinario di Logica e Filosofia della Scienza presso il Dipartimento di Fisica dell'Università del Salento, ed è attualmente in pensione. Durante il periodo di servizio ha tenuto corsi di Fisica Generale, Algebra, Istituzioni di Fisica Teorica e Fondamenti di Meccanica Quantistica. La sua attività di ricerca ha riguardato argomenti di fisica teorica, di elettromagnetismo, di algebra e di fondamenti della fisica. In particolare, nel settore dei fondamenti ha introdotto una metodologia non convenzionale, consistente nell'analizzare le strutture sintattiche e le proprietà semantiche dei linguaggi delle teorie fisiche per individuare i punti problematici e le assunzioni implicite che ne condizionano lo sviluppo. Dopo il pensionamento, nel 2011, ha continuato a collaborare con riviste internazionali e ha proseguito le ricerche iniziate nel periodo in cui era in servizio. I suoi lavori più recenti riguardano la logica quantistica, la probabilità quantistica e (in collaborazione) una generalizzazione della meccanica quantistica che ne modifica l'interpretazione standard, evitando, sotto certe condizioni, noti paradossi.



Numero XX Anno 2022

Viaggio nella Scienza

Ithaca



Missioni Spaziali

