
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 uniche.

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

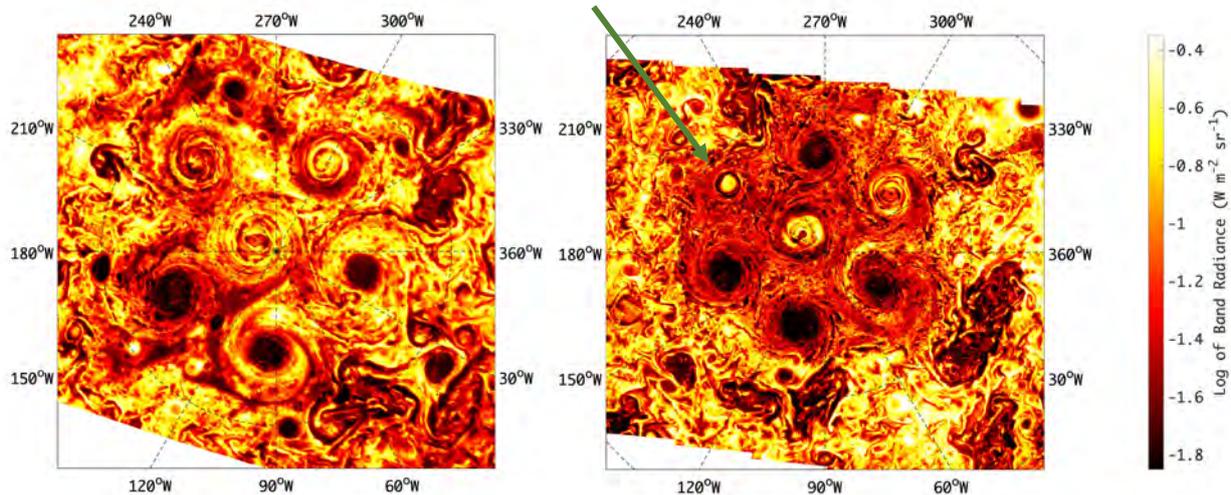


Figura 1: Cicloni circumpolari sul polo sud di Giove, nel luglio 2019 (pannello a sinistra) e nel novembre 2019 (pannello a destra), come visti da JIRAM. Il sesto ciclone, indicato dalla freccia verde nel pannello di destra, appare nell'Agosto 2019, dando luogo ad un quasi perfetto esagono nella disposizione 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 ammoniaca 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 NH₃ e H₂O 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 NH₃ and H₂O 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.

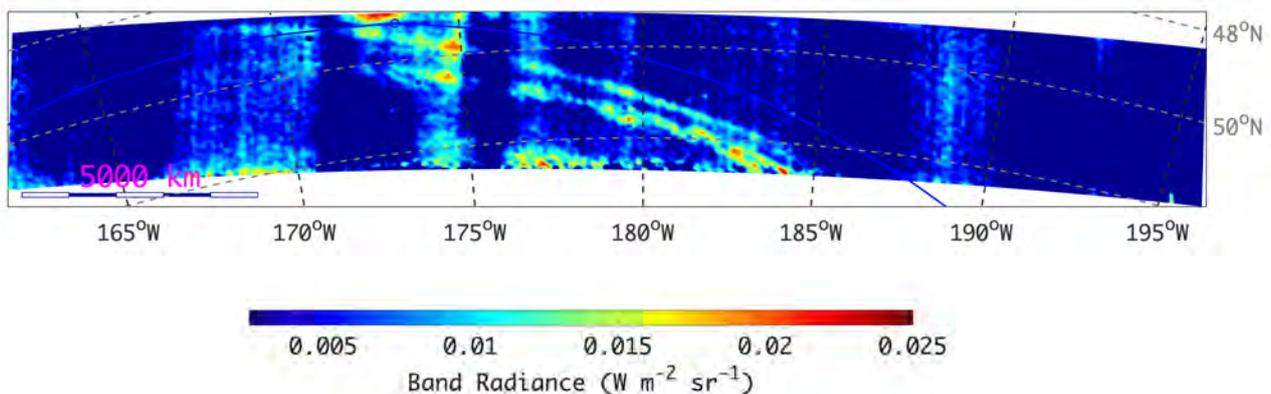


Figura 2: La coda della traccia di Io osservata a $\sim 100^\circ$ dietro la traccia principale. L'immagine è stata acquisita il 27 Agosto 2016. Si vede chiaramente come la coda consista in due archi separati. Gli artefatti verticali su questa immagine sono prodotti dalla routine procedura di elaborazione. 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

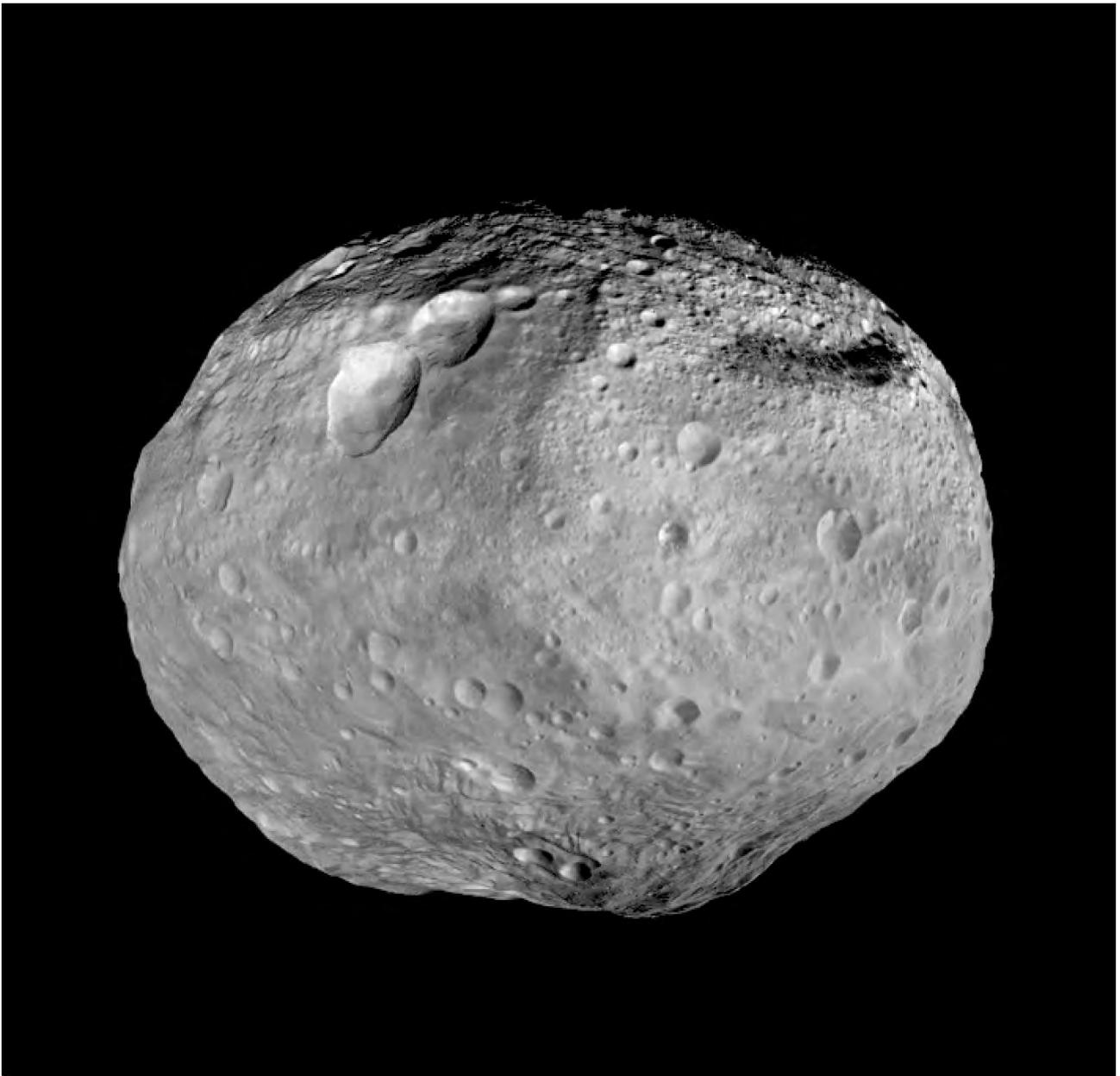


Figura 3: Visione globale di Vesta rilevata dall'astronave Dawn durante il passaggio nel 2012. Immagine da: NASA/JPL-Caltech/UCAL/MPS/DLR/IDA.

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 $2.8 \mu\text{m}$ [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 $7100\text{--}7800 \text{ kg/m}^3$ (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 ($3,050 \text{ kg/m}^3$). Per il mantello si trova una densità più bassa di quella dell'olivina ($3,300 \text{ kg/m}^3$). 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 $2.8 \mu\text{m}$ 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 $7,100\text{--}7,800 \text{ kg/m}^3$ (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 $3,100 \text{ kg/m}^3$. 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 $2,970 \text{ kg/m}^3$ [61]. Such a crust is denser than eucrites and suggests a mixture of eucrite ($2,800 \text{ kg/m}^3$) and diogenite ($3,050 \text{ kg/m}^3$). The derived mantle density of $3,160 \text{ kg/m}^3$ is low, considering that it should contain appreciable olivine ($3,300 \text{ kg/m}^3$). 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.

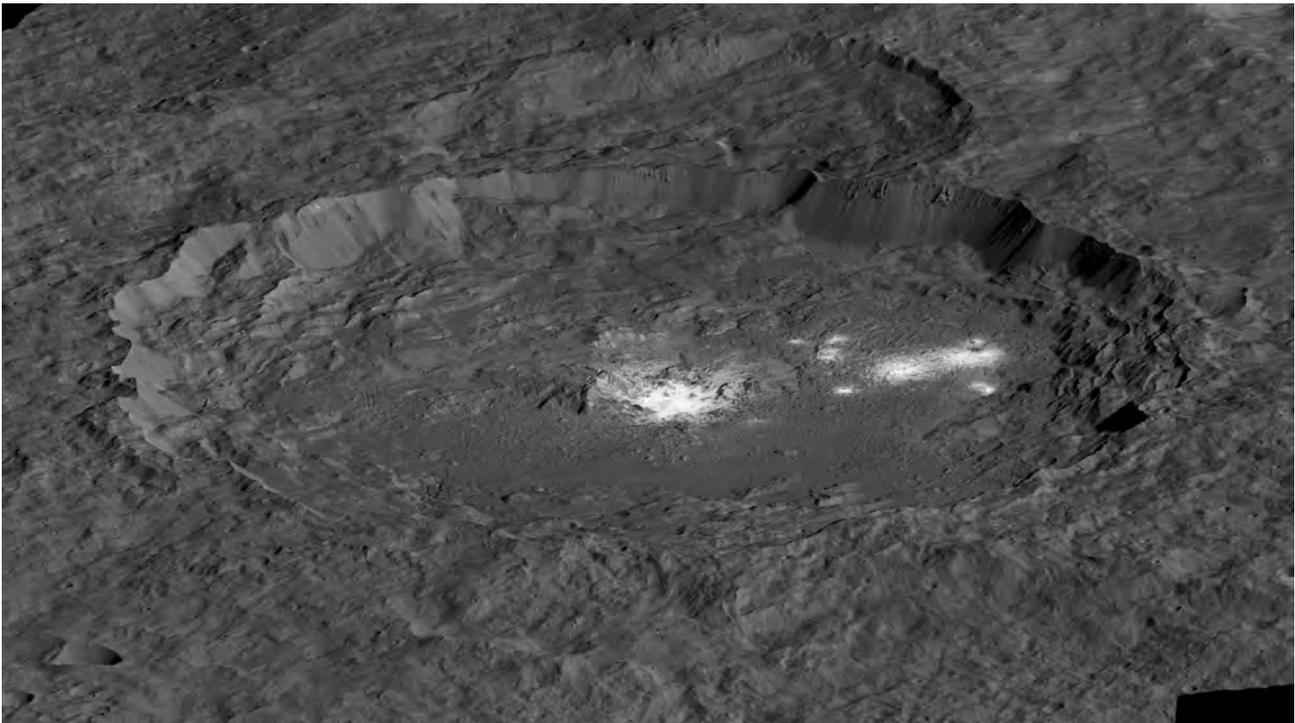


Figura 4: Una immagine del cratere Occator proiettata su un terreno digitale che dà una prospettiva in 3D della struttura dell'impatto. Si vedono molte aree chiare nel cratere. La parte interna del cratere forma un tipo di cratere nel cratere che misura circa 10 km di diametro e 0.5 km in profondità, 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'ammoniaca 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.