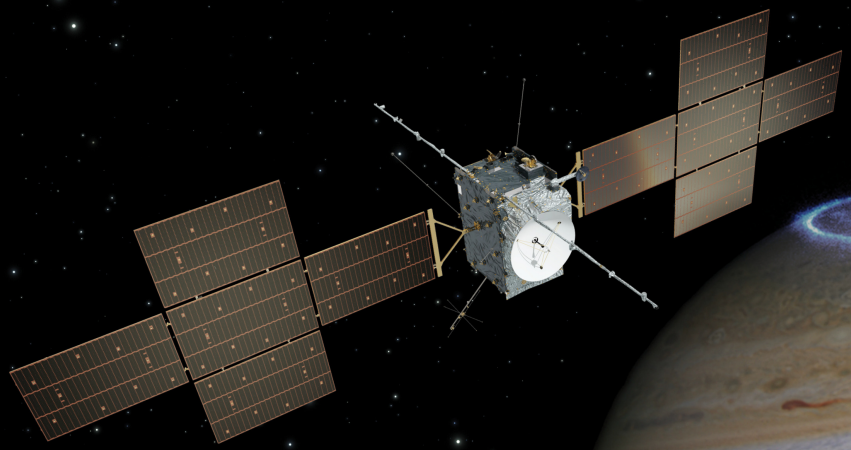
JUICE-0: Partecipazione alla missione dell'ESA JUpiter ICy moons Explorer

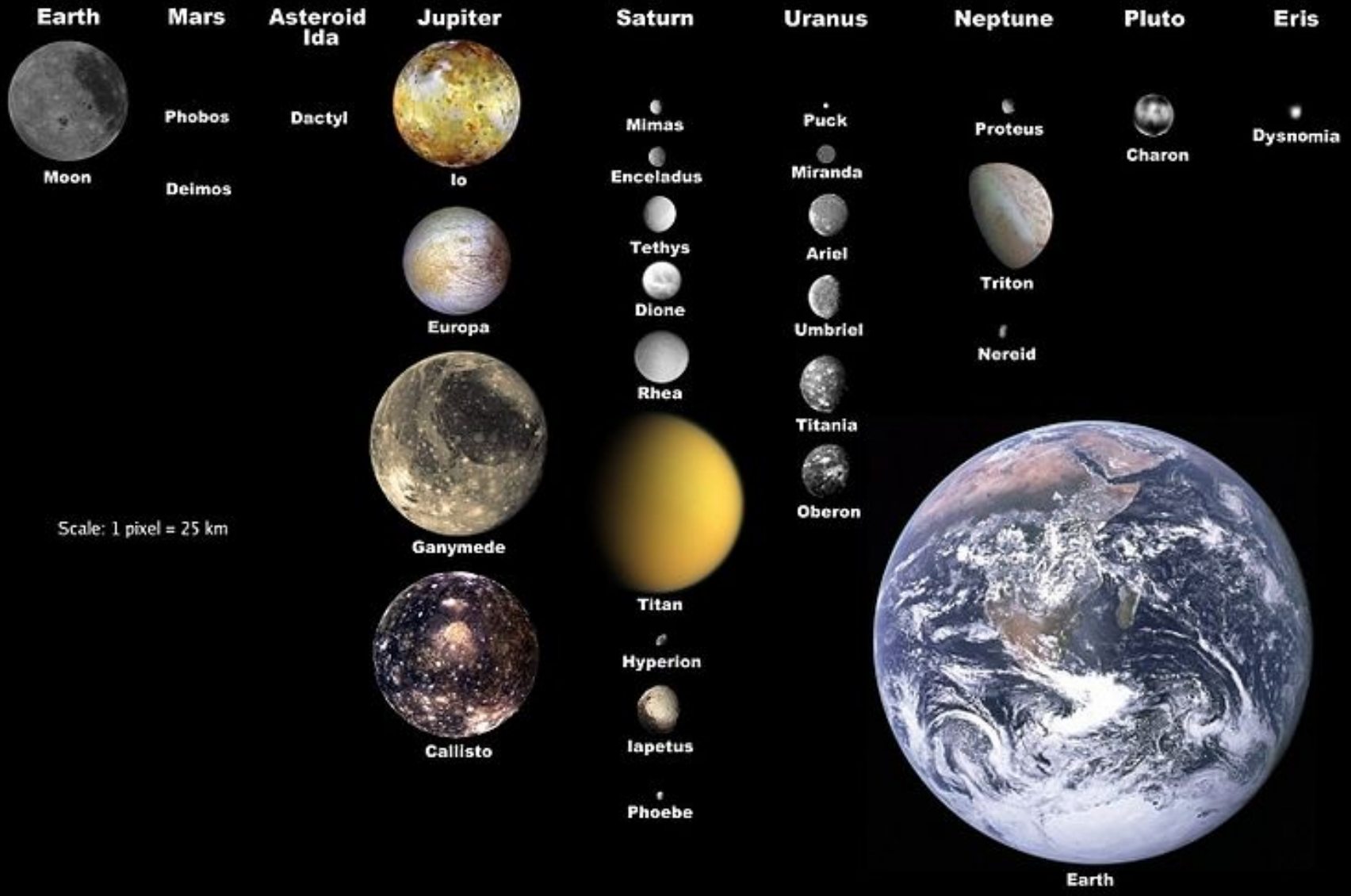


Giuseppe Piccioni INAF-IAPS
on behalf of the JUICE team

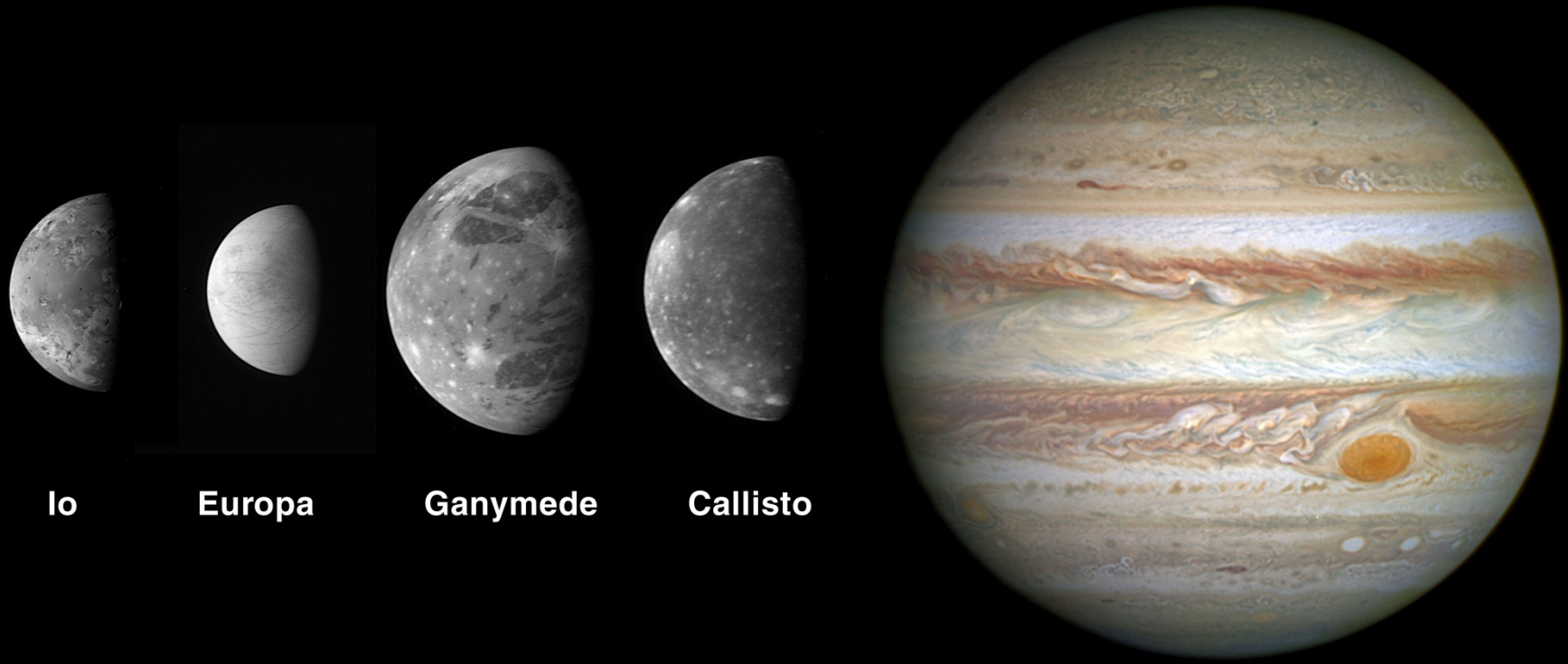
Include contributi delle «figlie» JUICE-1 (**P. Palumbo**), JUICE-2 (MM), JUICE-3 (**A. Cicchetti**), JUICE-4 (**G. D'Achille**), JUICE-5 (**F. Tosi**) e JUICE-6 (**S. Stefani**)

RSN3: 27 Maggio 2021

Selected Moons of the Solar System, with Earth for Scale



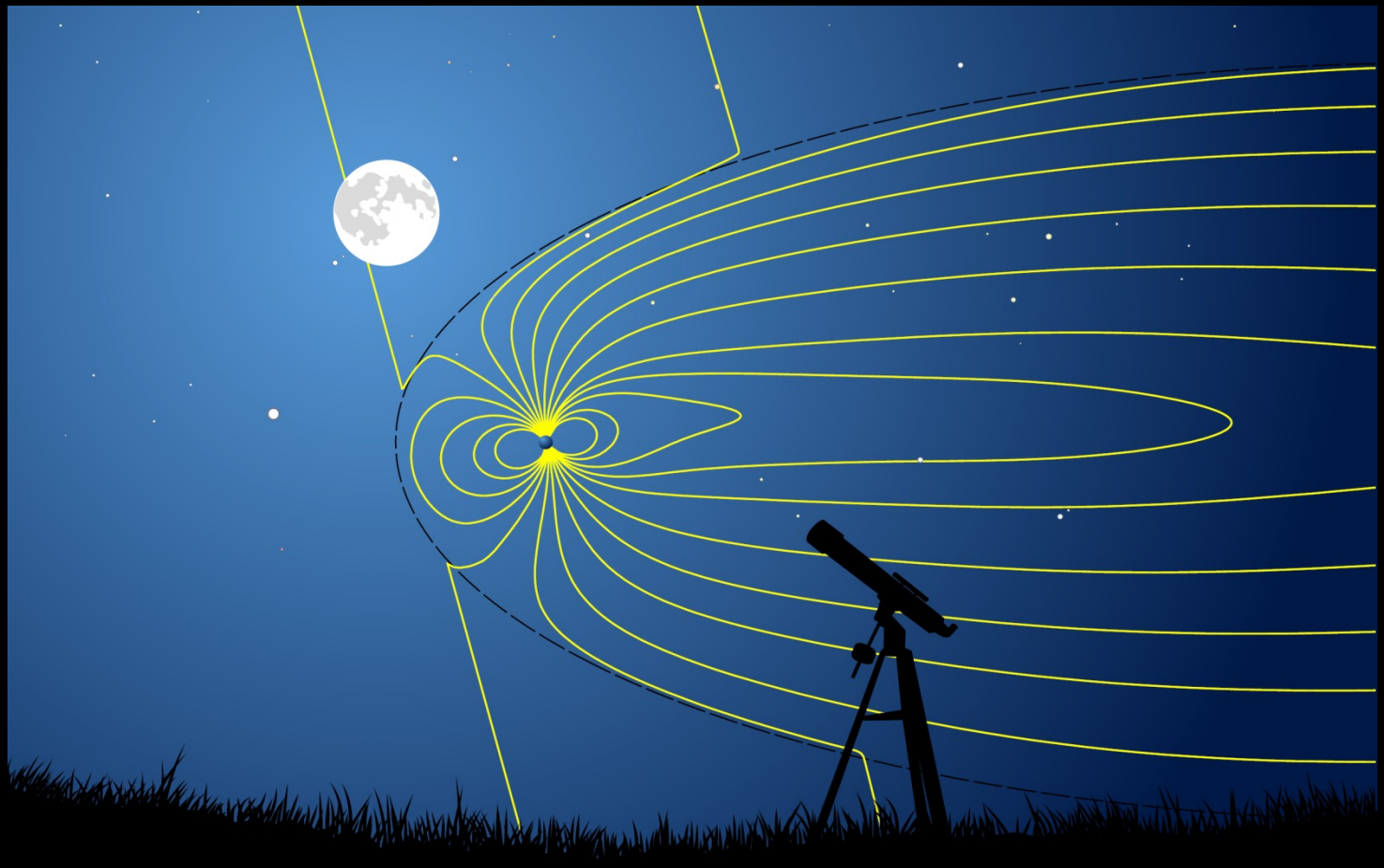
Jupiter Icy Moons Explorer

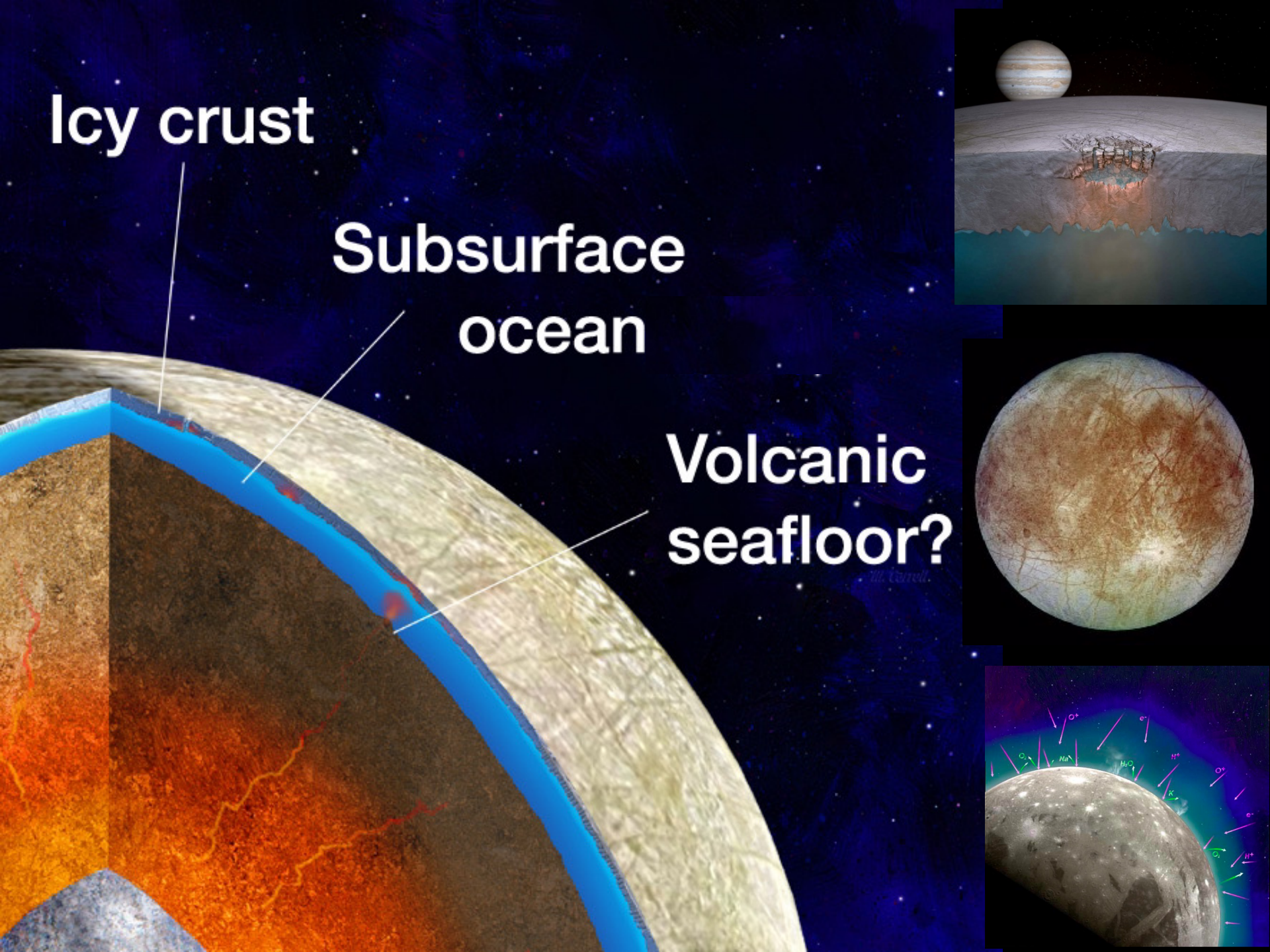


Emergence of habitable worlds around gas giants

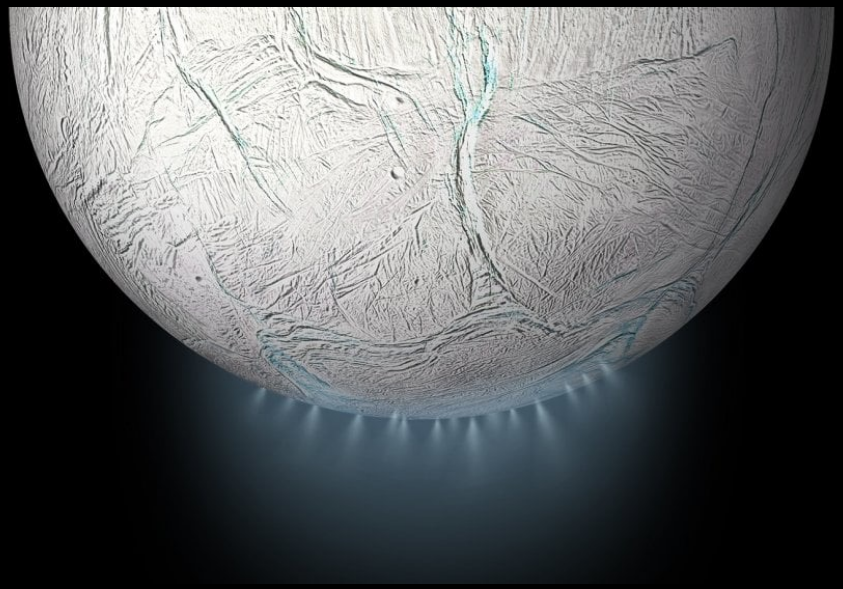
Jupiter system as an archetype for gas giants

Jovian magnetosphere

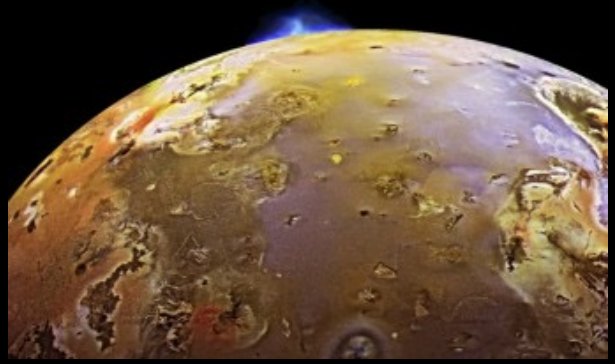



Icy crust
Subsurface ocean
Volcanic seafloor?

Tidal stress and plumes



Enceladus (Saturn)



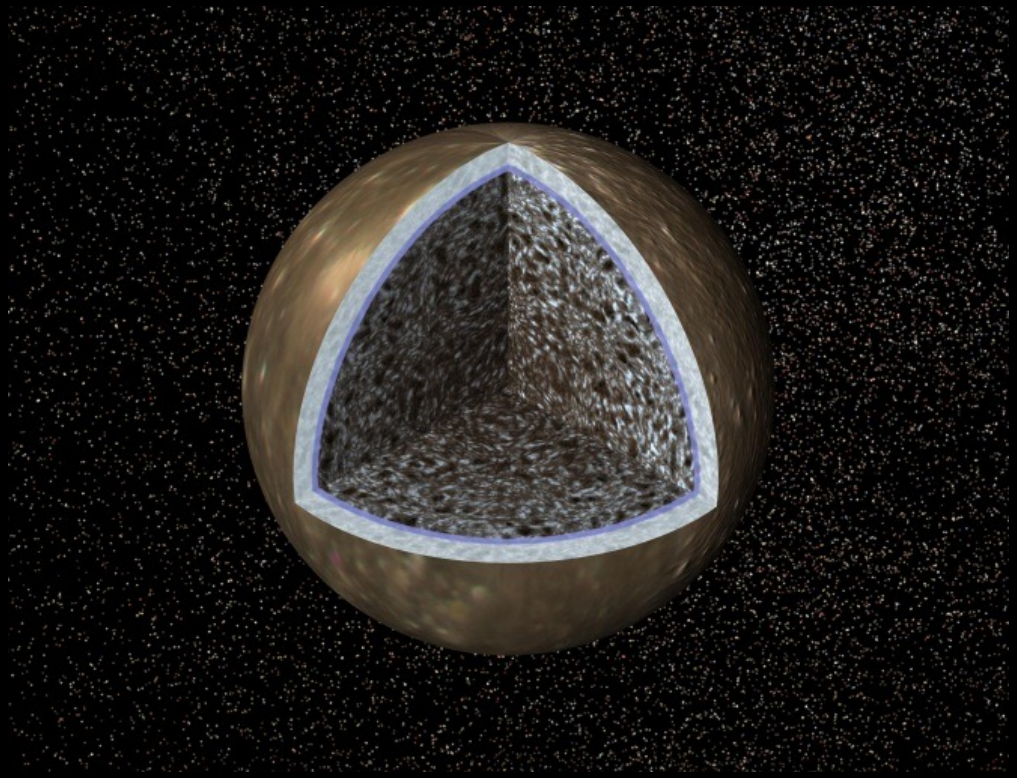
Io (Jupiter)

Europa (Jupiter)

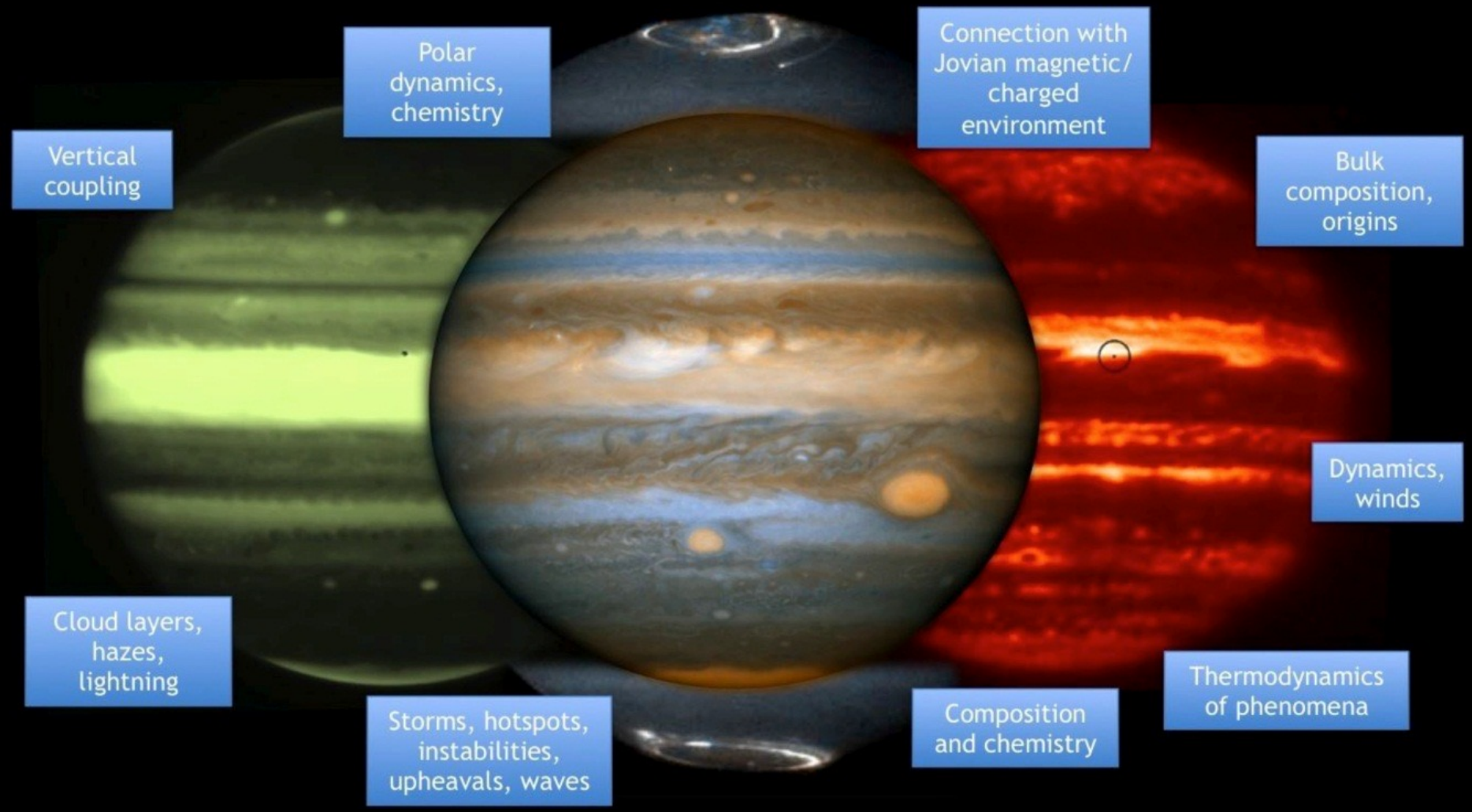
Callisto

Among the oldest surface in the Solar System

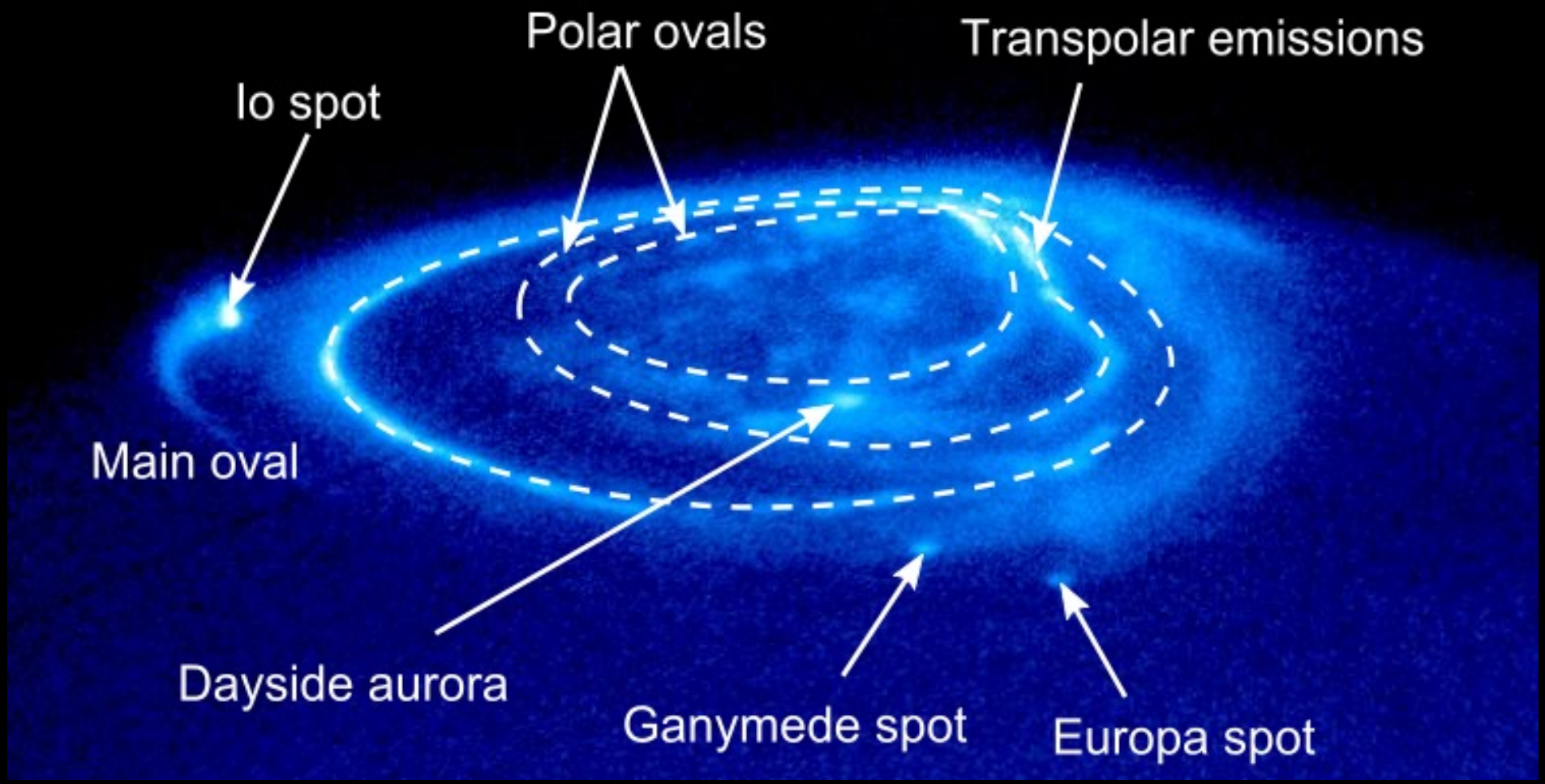
Is it differentiated ?



Jupiter atmosphere



Aurora


Polar ovals
Transpolar emissions
Io spot
Main oval
Dayside aurora
Ganymede spot
Europa spot

JUICE Spacecraft

- Prime industrial Contractor: Airbus Defence & Space (Toulouse, France), selected in July 2015

- Spacecraft:
  - 3-axis stabilised
  - Mass:
    - Launch mass: 5264 kg
    - Instruments: 219 kg
    - Propellant: 2857 kg
  - Solar array 97 m^2 (~850 W at Jupiter)
  - Fixed High Gain Antenna (X, Ka Bands)
  - Steerable Medium Gain Antenna (X, Ka Bands)
  - Data Volume ~ 1.4 Gb per day

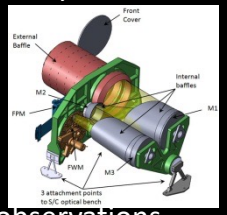
JUICE Spacecraft

Courtesy Airbus D&S

JUICE Payload

JANUS: Visible Camera System

PI: Pasquale Palumbo, Parthenope University, Italy.
Co-PI: Thomas Roatsch, DLR, Germany



- ≥7.5m/pixel
- Multiband imaging, 380 - 1080 nm
- Icy moon geology
- Io activity monitoring and other moons observations
- Jovian atmosphere dynamics

MAJIS: VIS-NIR Imaging spectrometer

PI: Francois Poulet, IAS, France
Co-PI: Giuseppe Piccioni, INAF, Italy

- 0.5-2.35 and 2.25-5.54 µm
- ≥ 25 m/pixel
- Surface composition
- Jovian atmosphere

RIME: Ice Penetrating Radar

PI: Lorenzo Bruzzone, Trento, Italy
Co-PI: Jeff Plaut, JPL, USA

- 9 MHz
- Penetration ~9 km
- Vertical resolution 50 m
- Subsurface investigations

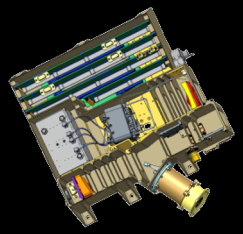
3GM: Gravity, Geophysics, Galilean Moons

PI: Luciano Iess, Rome, Italy
Co-PI: Y. Kaspi, Weizmann Institute of Science, Israel
David J. Stevenson, CalTech, USA

- Ranging by radio tracking
- 2 µm/s range rate
- 20 cm range accuracy
- Gravity fields and tidal deformation

UVS: UV Imaging Spectrograph

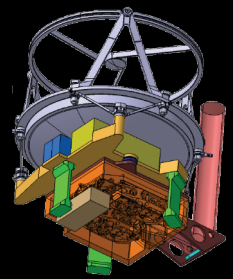
PI: Randy Gladstone, SwRI, USA



- 55-210 nm
- 0.04˚-0.16˚
- Aurora and Airglow
- Surface albedos
- Stellar and Solar Occultation

GALA: Laser Altimeter

PI: Hauke Hussmann, DLR, Germany



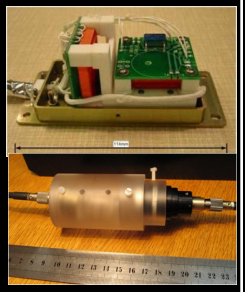
- ≥ 40 m spot size
- ≥ 0.1 m accuracy
- Shape and rotational state
- Tidal deformation
- Slopes, roughness, albedo

JUICE Payload

JMAG: JUICE Magnetometer

PI: Michele Dougherty, Imperial, UK

- Dual Fluxgate and Scalar mag
- ±8000 nT range, 0.2 nT accuracy
- Moon interior through induction
- Dynamical plasma processes



RPWI: Radio and Plasma Wave Investigation

PI: Jan-Erik Wahlund, IRF-U, Sweden

- Langmuir Probes
- Search Coil Magnetometer
- Tri-axial dipole antenna
- E and B-fields
- Ion, electron and charged dust parameters

PEP: Particle Environment Package

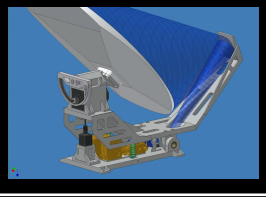
PI: Stas Barabash, IRF-K, Sweden
Co-PI: Peter Wurz, UBe, Switzerland

- Six sensor suite
- Ions, electrons, neutral gas (in-situ)
- Remote ENA imaging of plasma and torus

SWI: Sub-mm Wave Instrument

PI: Paul Hartogh, MPS, Germany

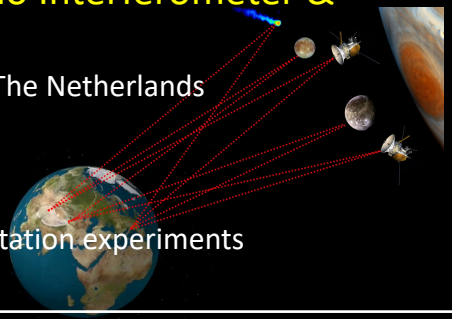
- 1080-1275 and 530-601 GHz
- Jovian Stratosphere
- Moon atmosphere
- Atmospheric isotopes



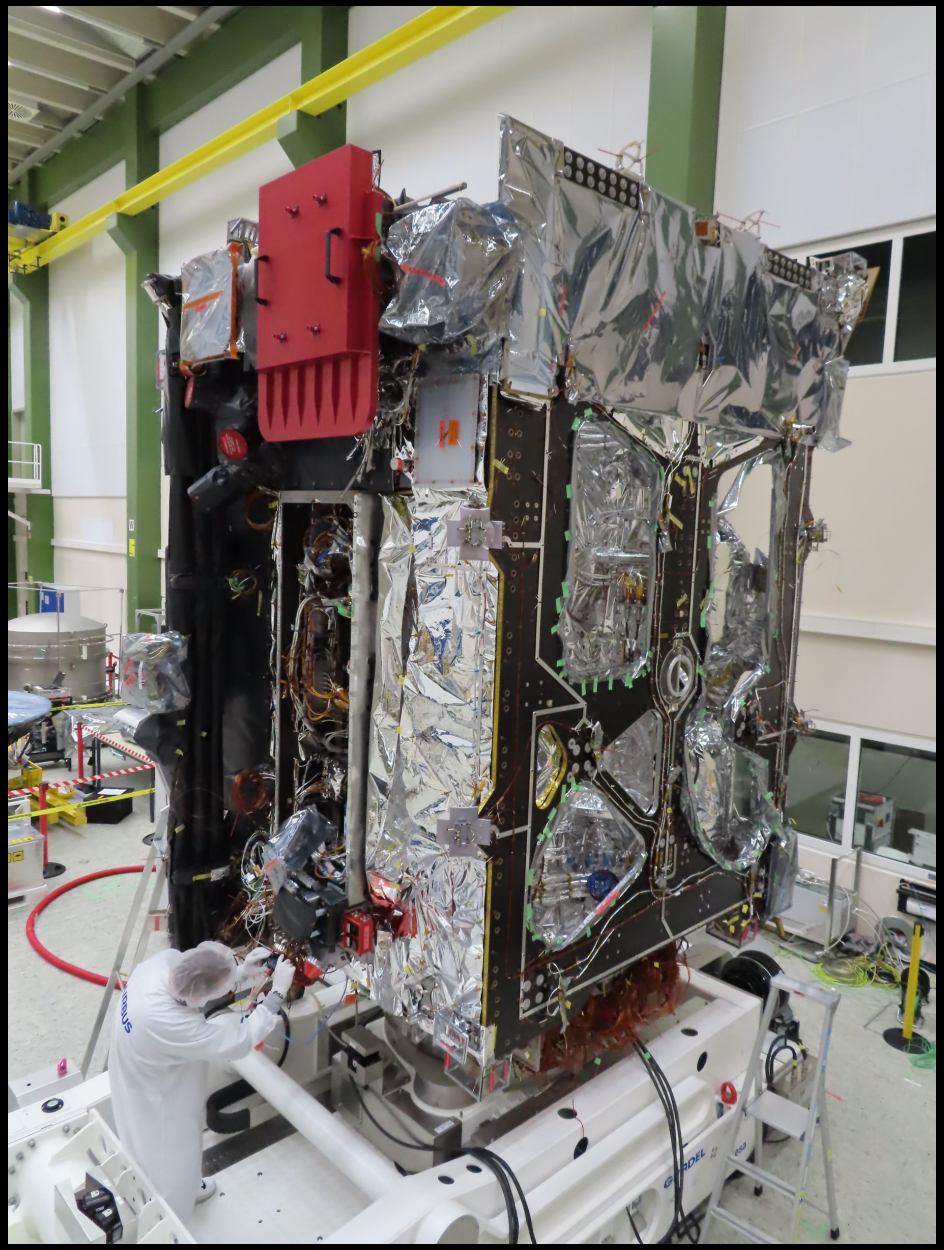
PRIDE: Planetary Radio Interferometer & Doppler Experiment

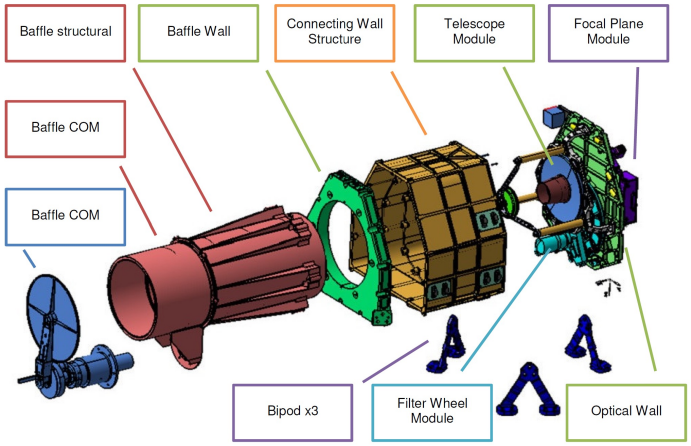
PI: Leonid Gurvits, JIVE, EU/The Netherlands

- S/C state vector
- Ephemerides
- bi-static and radio occultation experiments



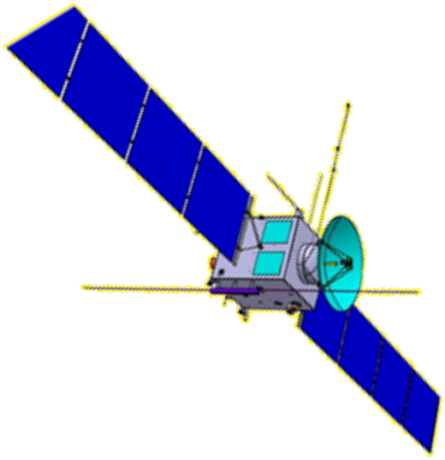
JUICE Spacecraft





- Prime industrial Contractor for MAJIS & JANUS: Leonardo S.p.A.

- Prime industrial Contractor for RIME & 3GM: THALES ALENIA SPACE ITALIA SPA (TAS-I)



Overall Mission Profile

Launch	26 Aug/15 Sep 2022
Interplanetary transfer (Moon+Earth-Earth-Venus-Earth-Earth)	8.9 years
Jupiter orbit insertion	27 July 2031
2 Europa flybys	Jun-Jul 2032
Jupiter high-latitude phase	Aug 2032-Aug 2033
Transfer to Ganymede	Nov 2033-Nov 2034
Ganymede orbit insertion	20 Dec 2034
End of mission	29 Sep 2035

Challenges

→Large mission, large teams

→Long cruise phase
→Complex navigation in the Jupiter system

→Radiation environment
→Power and thermal (cold)
→Spacecraft electromagnetic cleanliness

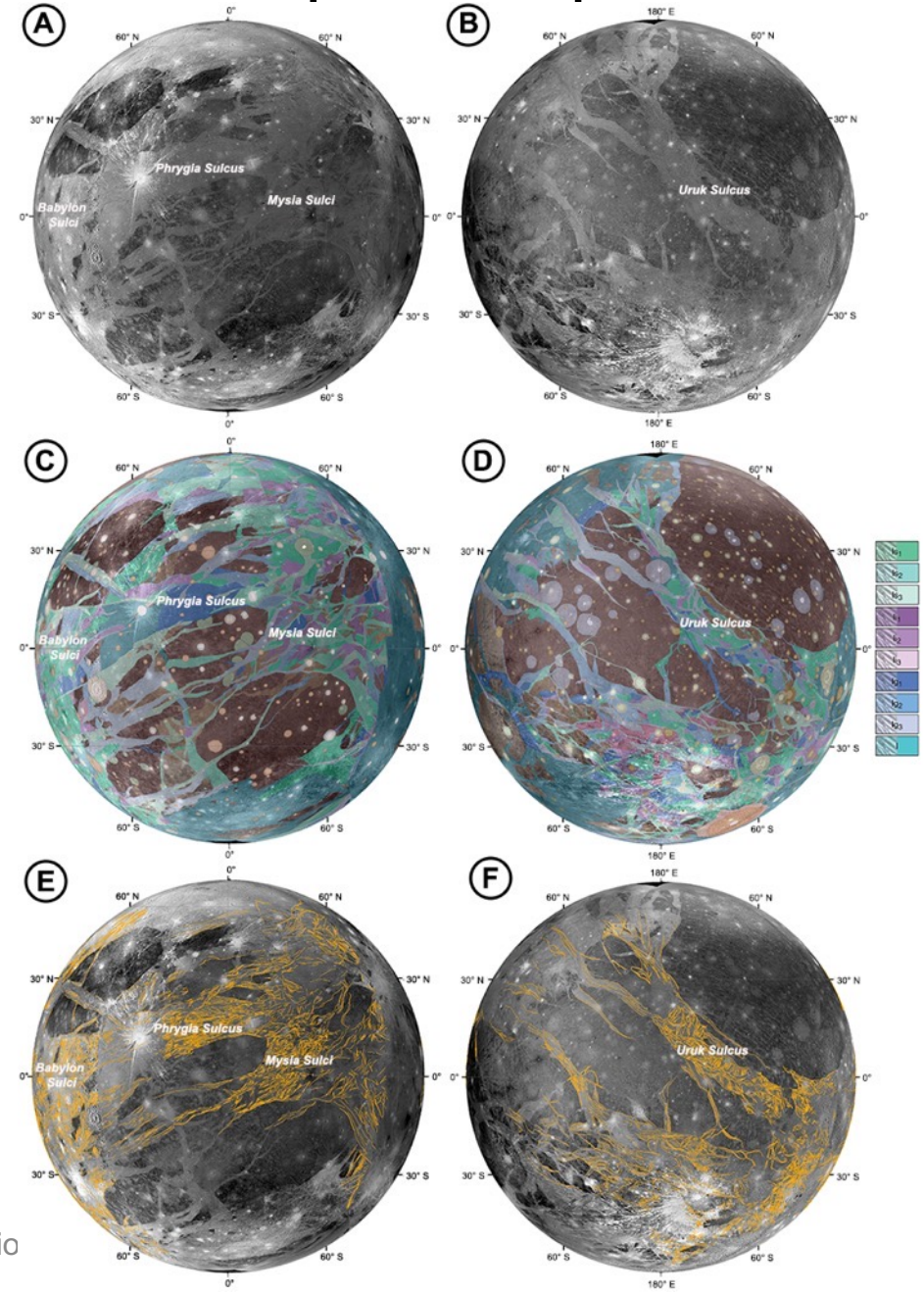
→Broad science
→(relatively low) data rate

JANUS: la camera multispettrale per JUICE

JANUS (Jovis, Amorum ac Natorum Undique Scrutator) è l'imager multi-filtro nel visibile (340-1080 nm) selezionato nel 2013 per la missione JUICE.

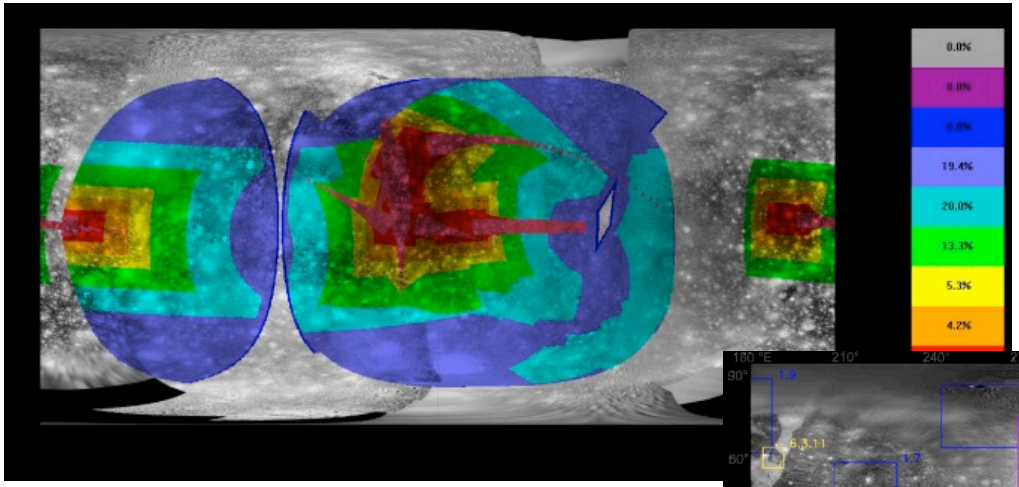
Gli obiettivi scientifici di JANUS sono:

- lo studio dei processi geologici attivi sui satelliti Galileiani ghiacciati, in particolare i processi di impatto, tettonici, potenzialmente legati ad una tettonica a zolle attiva, il criovulcanismo e in generale l'interazione fra processi superficiali e interni e gli scambi con il potenziale oceano globale sottosuperficiale; tali studi sono strettamente legati alla potenziale abitabilità di questi corpi;
- lo studio delle cause, dell'evoluzione e degli stili eruttivi del vulcanismo di Io, monitorato per i 4 anni della missione nominale;
- lo studio dettagliato della dinamica atmosferica di Giove
- caratterizzare e studiare le proprietà fisiche degli altri satelliti interni e irregolari del sistema di Giove
- caratterizzare le proprietà fisiche degli anelli



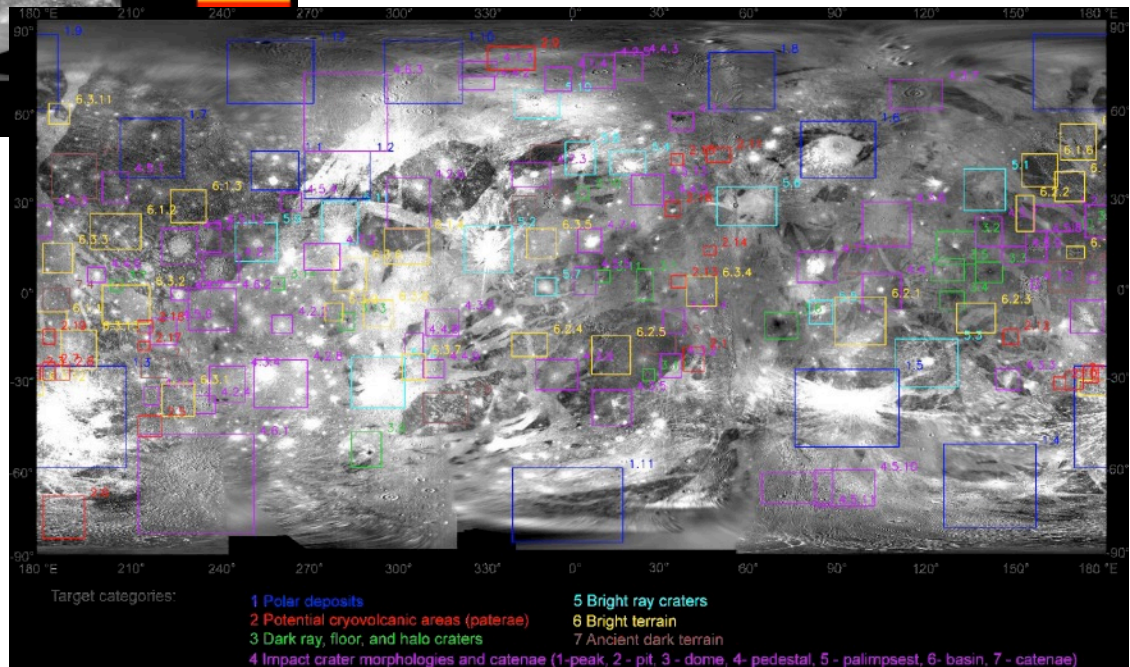
JANUS: la camera multispettrale per JUICE

Le attività scientifiche relative ai target di JANUS sono basate sui dati della sonda Galileo e sono principalmente orientate all'identificazione dei target da osservare in alta risoluzione e a definire la migliore strategia osservativa.



Mappa della copertura attesa di Callisto durante i fly-by, in funzione della risoluzione

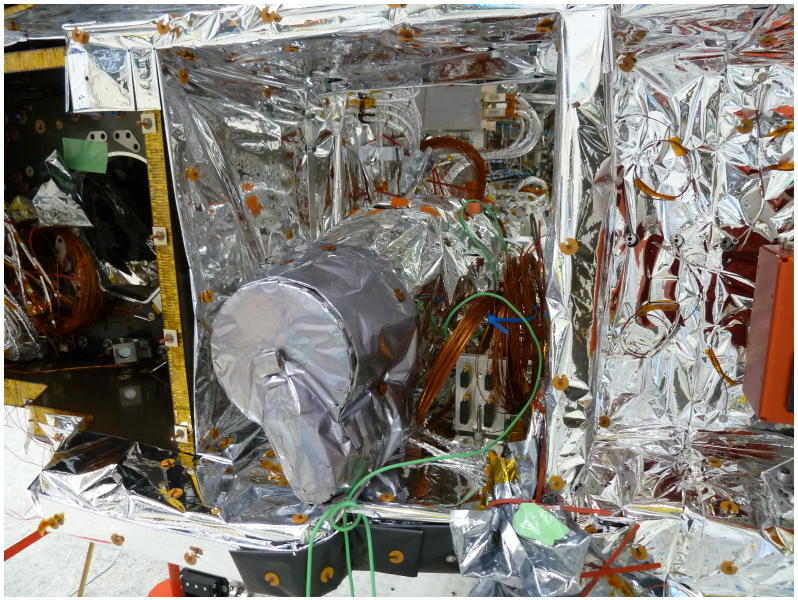
Mappa preliminare dei target da osservare in alta risoluzione sulla superficie di Ganimede



JANUS: la camera multispettrale per JUICE

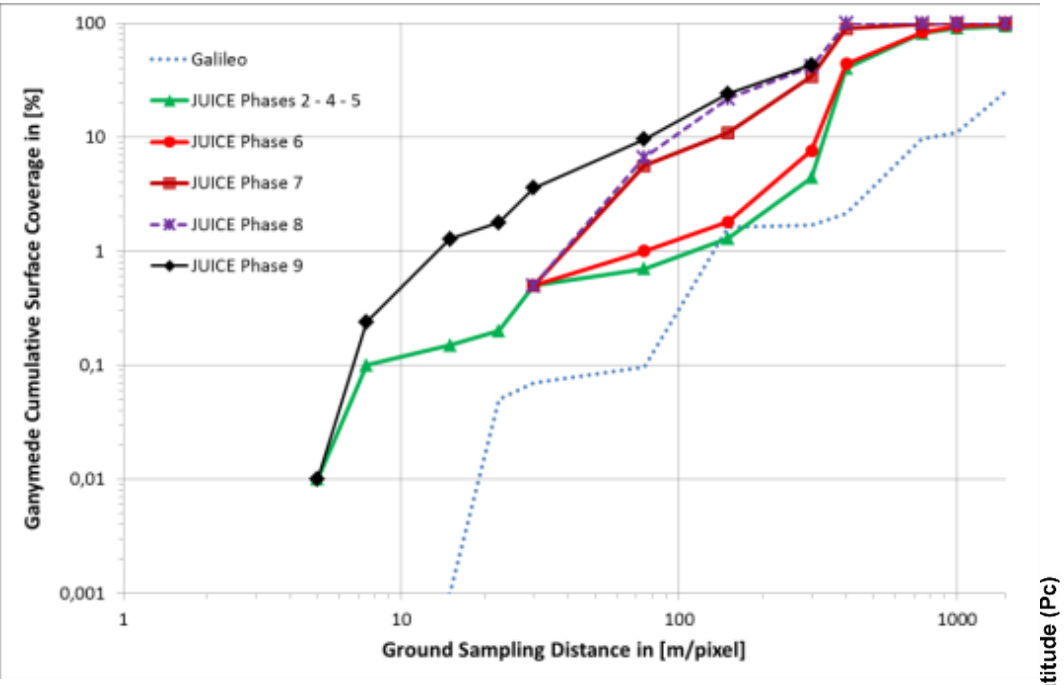
Lo strumento, proposto e sviluppato inizialmente dal team (UniParthenope, INAF-IAPS, OAPd e CISAS-UniPadova), è ora in fase di finalizzazione presso Leonardo SpA di Firenze, con il contributo di H/W da parte di DLR (Berlino), IAA (Granada) e Open University (MiltonKeynes).

La consegna del modello di volo è prevista per la fine di luglio.

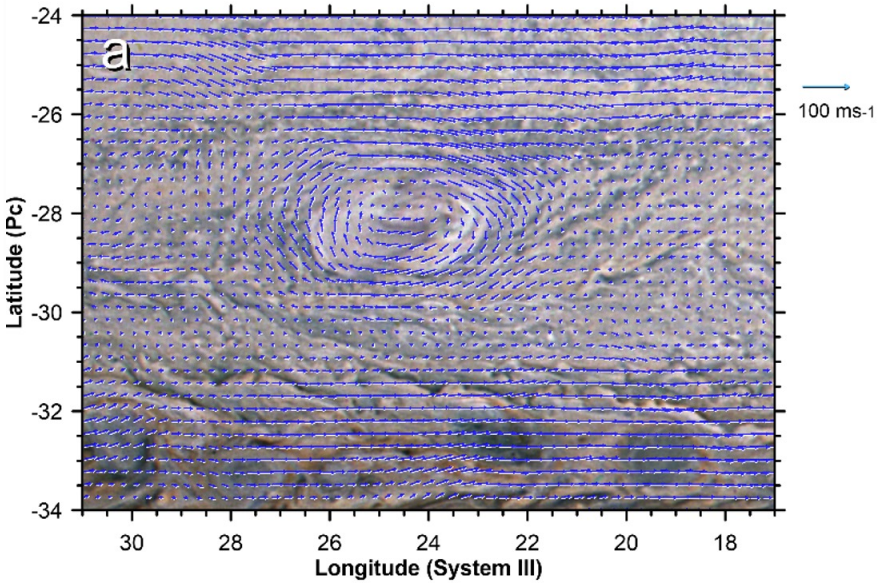


JANUS: la camera multispettrale per JUICE

JANUS fornirà dati sui target osservativi che miglioreranno di oltre un ordine di grandezza la risoluzione spaziale, la copertura e la sensibilità di alcuni parametri (e.g., la velocità delle strutture nell'atmosfera gioviana)



Plot copertura-risoluzione prevista da JANUS su Ganimede



Simulazione basata su dati Juno della dinamica atmosferica di Giove; JANUS sarà in grado di misurare le velocità con accuratezza 10 volte superiore

Team di JANUS

- Il personale INAF nel team di JANUS è attualmente composto da:
  - 3 primi ricercatori
  - 3 primi tecnologi
  - 9 ricercatori
  - 3 tecnologi
  - 4 ricercatori TD (in share su altri progetti)
  - 3 AdR (in share su altri progetti)

Team di JANUS

- Il personale associato nel team di JANUS è attualmente composto da:
  - 2 professori ordinarii
  - 3 professori associati
  - 1 RTD
  - 3 AdR

Team di JANUS

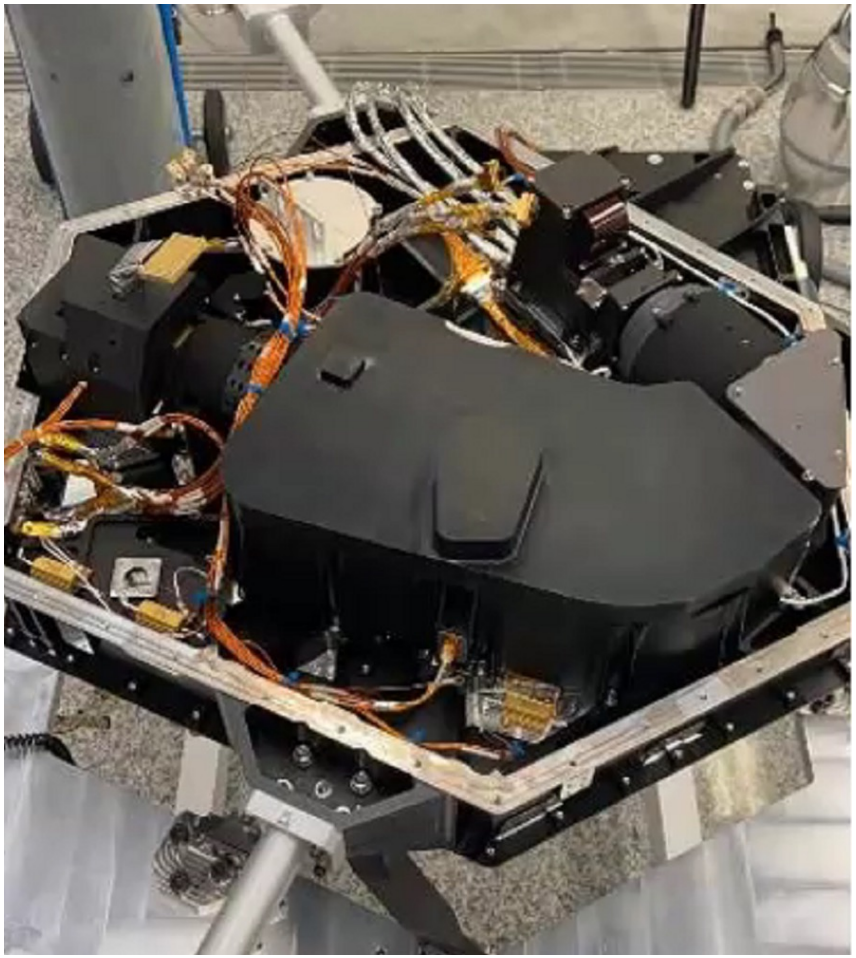
- Il team internazionale di JANUS è attualmente composto da **54 Co-I's** (16 I, 15 G, 7 F, 5 US, 4 UK, 3 ES, 2 JP, 1 FIN, 1 ISR) più **47 *associated scientists*** (26 I, 6 G, 7 UK, 2 F, 2 JP, 1 ES, 1 US, 1 ISR), oltre ad un imprecisato numero di ingegneri, tecnici, ecc.

Team di JANUS

- Per un totale stimato (solo team italiano) di **160 FTE**, di cui **120 FTE di INAF**
- L'inviluppo complessivo dei fondi esterni per le sole attività scientifiche è di circa **3.8 M€** (stimati per il futuro e fino a fine missione)

JUICE-2: what is MAJIS ?

- **MAJIS** (Moons And Jupiter Imaging Spectrometer) is a performing imaging spectrometer in the **spectral range** from **0.50 to 5.54 µm**
- As largely demonstrated by the past-present space missions, **a VIS-IR imaging spectrometer is a key instrument** to study in a very **interdisciplinary** way any kind of SS **body**, from its **surface** up to its **exosphere**
- Large heritage of INAF for this kind of instruments (**Cassini-VIMS, Rosetta-VIRTIS, Venus Express-VIRTIS, Dawn-VIR, Juno-JIRAM, Bepi-Colombo-VIHI**, etc.)

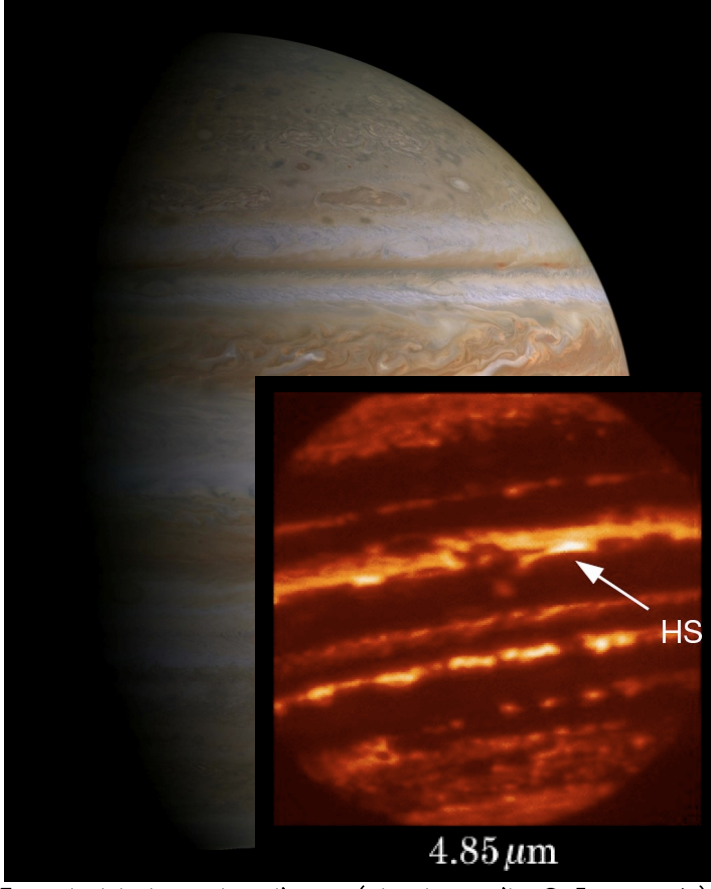


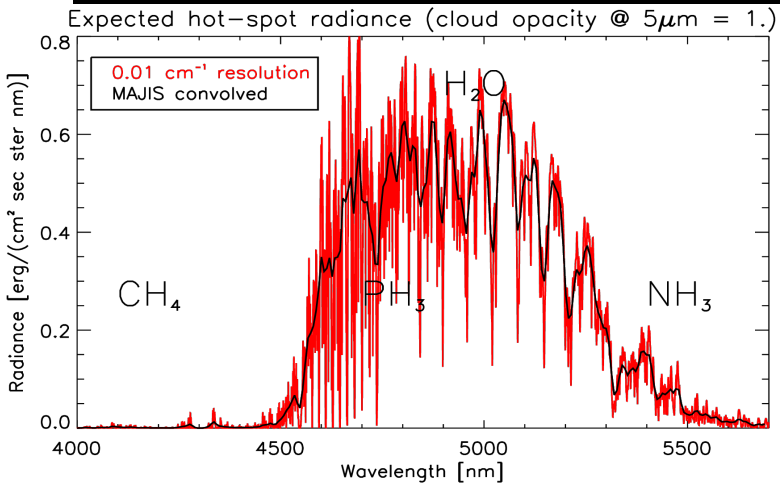
MAJIS scientific objectives for Galilean satellites

- **Determination of the icy, mineral and organic constituents of the surface**
- **Determination of the relationship between composition and geological processes**
- **Measurement of volatiles, relationship with exobiology**
- **Characterization of tectonic, cryovolcanic and impact features**
- **Surface alterations due to radiation**
- **Monitoring Io's volcanic and thermal activity**

MAJIS scientific objectives for Jupiter

- Global circulation **dynamics** and composition
- Observation of the **auroral emissions** (mainly due to H_3^+)
- Determination of the **water** in the stratosphere; its **latitudinal distribution** and role in chemistry and dynamics
- Monitoring **clouds** and thermal **hot spots**
- Characterization of the nature of the **hydrocarbon chemistry**
- Determination of the **composition** of the primordial material from which Jupiter formed
- Characterization of the strength of the **vertical mixing** in the stratosphere



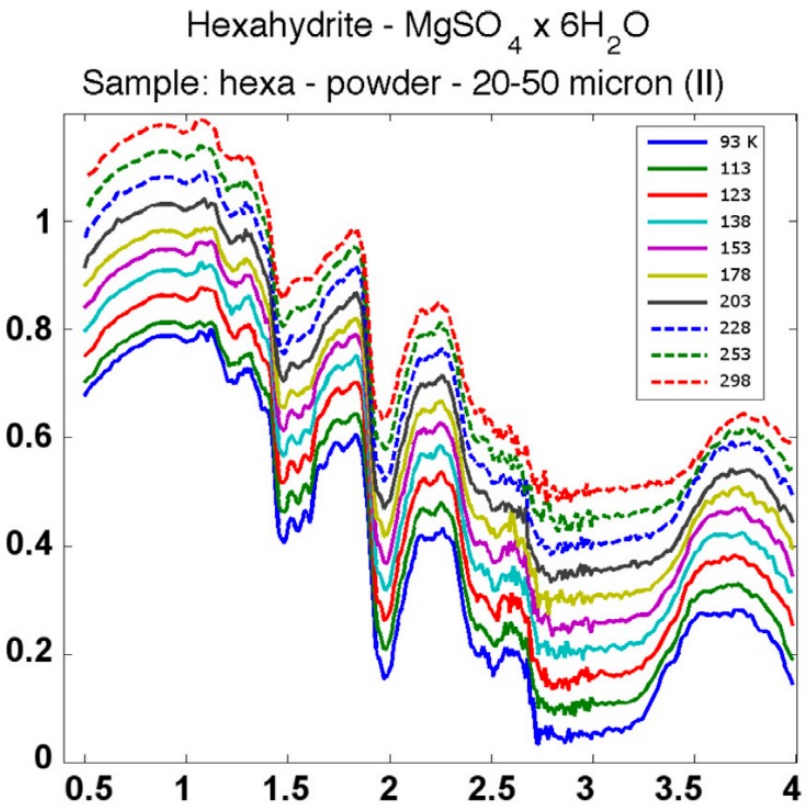


(D. Grassi et al., 2010)

Spectral features and temperature

Laboratory opportunity

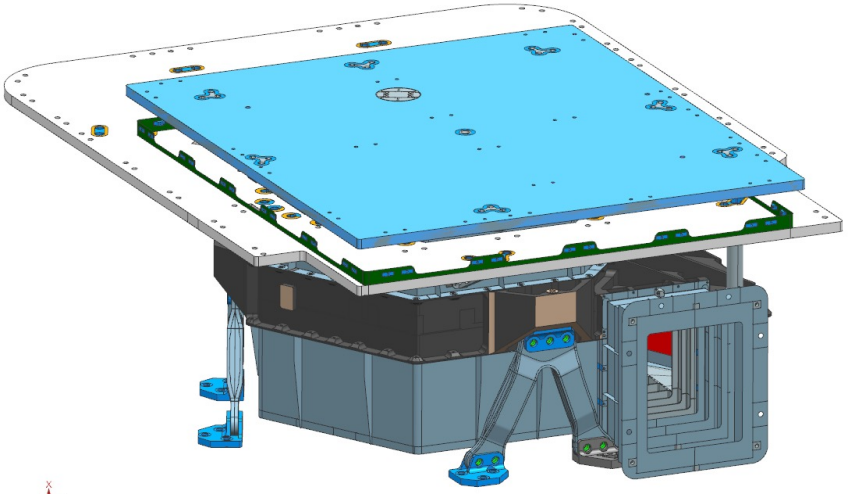
- **Absorption bands** of hydrate salts on the surface of the icy satellites **exhibit** a significant **dependence with temperature** (shape and band position)
- Crystalline **ice features** (especially @ 1.6µm) are also **very dependent** on **temperature**
- => besides **composition**, **spectrum** is an important proxy for the **physical conditions** of the materials (formation and environment)

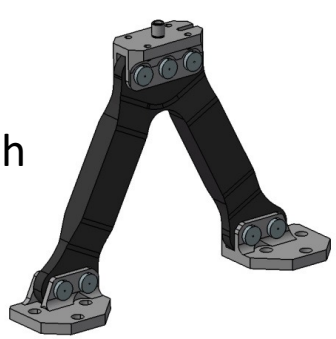


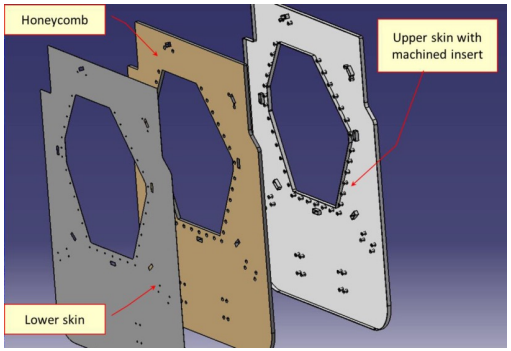
De Angelis et al., 2017

MAJIS OH Design Challenges

- High performance cryogenic operations (materials, shapes, solutions) for full passive thermal design :
  - Insulating CFRP bipods for interfacing the OH to the S/C
  - Warm radiator (Al Honeycomb) to cool down the Optical Bench including VISNIR detector (<140 K)
  - Cold radiator (Al honeycomb) to cool down the IR detector (<100K)
  - Double MLI barrier around OH
- Optical design developed in close loop with radiation and thermal analysis
- Dedicated radiation shields for the most sensitive optical elements







Team di MAJIS

- Il personale INAF nel team di MAJIS è attualmente composto da:
  - 1 dirigente di ricerca
  - 2 primi ricercatori
  - 1 primo tecnologo
  - 12 ricercatori
  - 1 tecnologo
  - 2 TD tecnologi (in share su altri progetti)
  - 4 CTER

Team di MAJIS

- Il personale associato nel team di MAJIS è attualmente composto da:
  - 2 primi ricercatori
  - 1 professore associato
  - 1 tecnico laureato
  - 1 RTD
  - 1 AdR (in essere) + 3 AdR da reclutare

Team di MAJIS

- Il team internazionale di MAJIS è attualmente composto da **34 Co-I's** (12 F, 12 I, 3 B, 3D, 2 UK 1 E, 1 Ru) più **20 *associated scientists*** (9 F, 10 I, 1 B), oltre ad un imprecisato numero di ingegneri, tecnici, ecc.

Team di MAJIS

- Totale stimato (al ribasso) di **400 FTE**, di cui **174 FTE di INAF**
- L'inviluppo complessivo dei fondi esterni per le sole attività scientifiche è di circa **5M€**

JUICE-3: "Radar for Icy Moons Exploration (RIME)"

Obiettivi Scientifici/Tecnologici

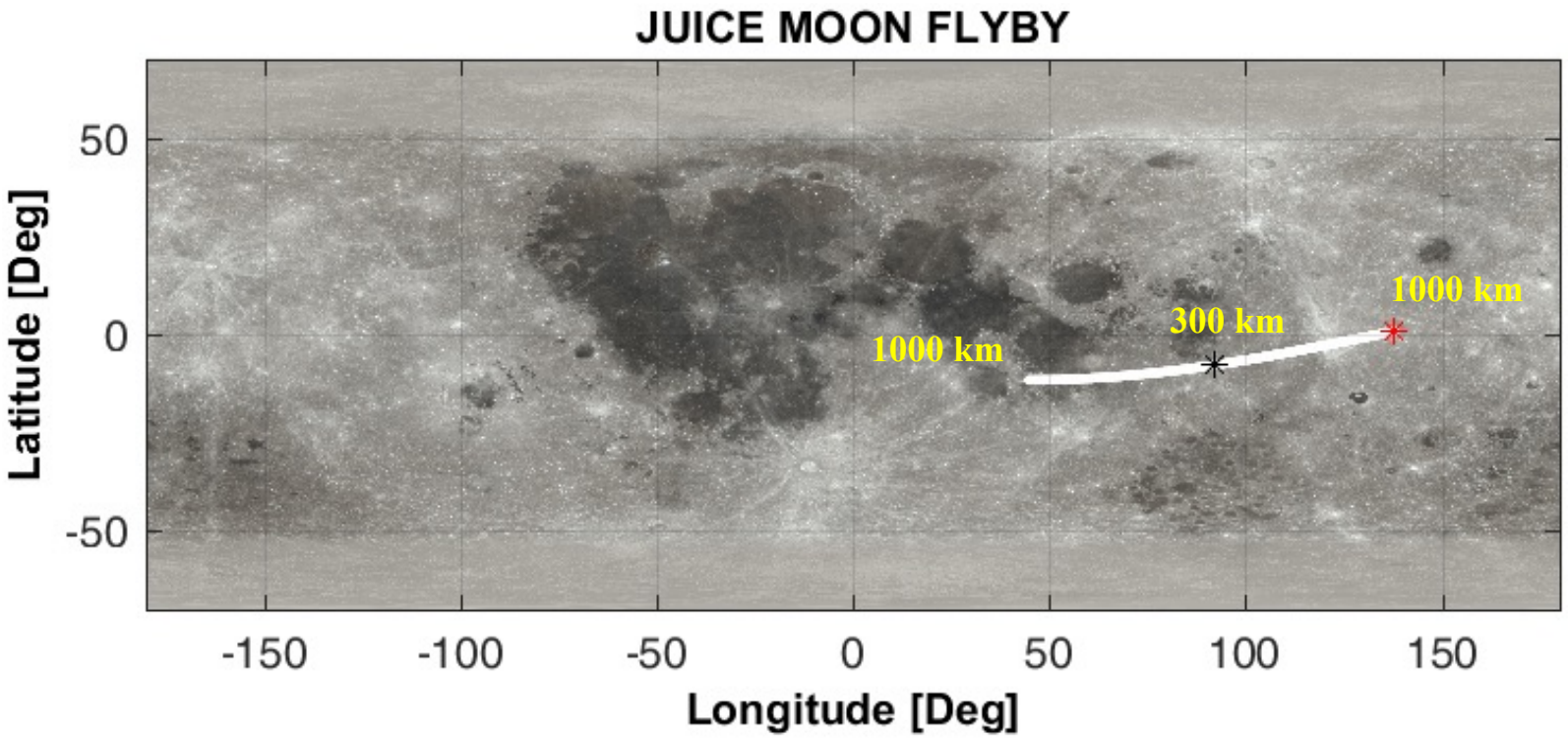
- Il radar **RIME** sarà il **primo strumento in grado di acquisire misure dirette e continue del sottosuolo di Ganimede**, principale luna di Giove, e delle altre due lune Callisto ed Europa. Le misure delle proprietà verticali del sottosuolo acquisite da RIME saranno poi integrate con le informazioni derivanti soprattutto dalla camera ottica JANUS e dal laser altimetro GALA.
- RIME opera a **9 MHz**, una frequenza adeguata ad ottenere una profondità di penetrazione massima di **~9 km nel ghiaccio puro** con due modalità di larghezza di banda a 3 MHz e 1 MHz che si traducono rispettivamente in un'alta risoluzione verticale (50 m nel ghiaccio) o una bassa risoluzione verticale (140 m in ghiaccio).
- Al fine di evitare l'interferenza dell'emissione radio di Giove, che può ridurre notevolmente il rapporto segnale/rumore, **RIME funzionerà in modalità attiva solo sul lato anti-gioviano delle lune ghiacciate**, mentre osservazioni radar passive sono previste nel range di longitudini rimanenti in passaggi ravvicinati ogni volta che l'altezza sulla superficie è **<1000 km**.
- **INAF contribuisce attivamente al team di RIME** per il supporto al **ground segment** (pianificazione delle osservazioni e archiviazione dati), per la **modellistica dei dati radar**, nonché per la **combinazione ("fusione") dei dati acquisiti da RIME con quelli di altri strumenti di JUICE a guida italiana (JANUS, MAJIS)** sui target scientifici di maggiore interesse.

Team INAF di RIME

Nome	Struttura	Qualifica	Ruolo nel progetto
Roberto Orosei	INAF-IRA	Co-Investigator	Modellistica echi radar e interpretazione dei dati
Andrea Cicchetti	INAF-IAPS	Associate Team member	Responsabile WP3300: Ground Segment Support
Federico Tosi	INAF-IAPS	Associate Team member	Combinazione con i dati di JANUS e MAJIS su specifiche regioni di interesse
Marco Cartacci	INAF-IAPS	Associate Team member	Supporto allo sviluppo dei requisiti S/W, per il processing dei dati
Raffaella Noschese	INAF-IAPS	Associate Team member	Supporto allo sviluppo dei requisiti S/W, per l'archiviazione dei dati secondo lo standard PDS

JUICE Moon Flyby Opportunity for RIME

La sonda JUICE raggiungerà la Luna il **1 settembre 2023**. Quando la quota dello SC raggiungerà la distanza di 1000 km, il radar RIME, per circa 18 minuti, inizierà ad acquisire i dati. Tali dati saranno di elevato interesse scientifico in quanto essendo la luna priva di atmosfera, le onde radio non subiranno nessun tipo di distorsione.



JUICE-4 - 3GM

Aspetti scientifici/tecnologici

L'esperimento **3GM** (Gravity and Geophysics of Jupiter and the Galilean Moons) **è composto da un trasponditore per uso scientifico in banda Ka (KaT), un oscillatore ultra-stabile (USO)** e software di elaborazione dati a terra. Il KaT e l'USO sono due unità completamente indipendenti e separate e rappresentano il payload scientifico a bordo. Il **routing del segnale** a bordo può avvenire sia **attraverso l'antenna ad alto guadagno (RGA) che quella a medio guadagno (MGA)**. L'MGA verrà utilizzata durante i flyby sia per l'esperimento di radio scienza che per la navigazione e la telemetria della sonda. Il software di elaborazione dati rappresenta la parte dell' esperimento condotta a terra.

JUICE-4 - 3GM

Personale INAF attualmente impiegato:

Il responsabile scientifico Gaetano Di Achille (ricercatore TD, INAF-OAAB) e un potenziale di fondi per 4 anni di assegni di ricerca. Attualmente sono utilizzati fondi per circa 6 mesi di un assegno cofinanziato su altro progetto (Marco Cardinale, INAF-OABB)

JUICE-4 - 3GM

Risultati e/o Prospettive

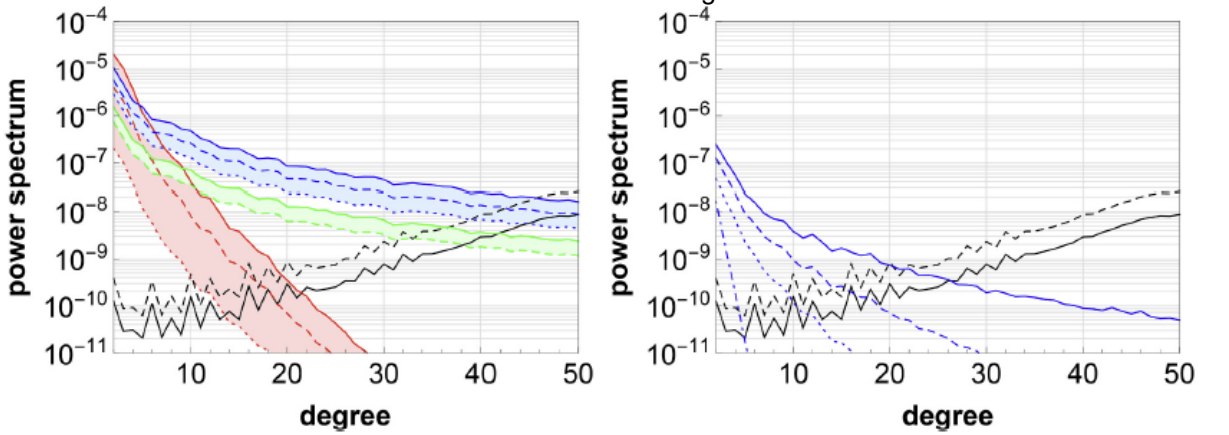
3GM si propone di stimare il campo di gravità statica di Europa e i **campi di gravità statici e dinamici** di Callisto e Ganimede per determinare il numero di Love k2. I campi di gravità (statici e dinamici) **forniscono preziose informazioni sulla struttura interna delle lune** e vengono misurati indirettamente attraverso il loro effetto perturbativo sulla traiettoria della sonda. L'esperimento 3GM permetterà inoltre di migliorare le **effemeridi del sistema gioviano** e del sistema solare e studiare l'**atmosfera e la ionosfera di Giove** e delle sue lune.

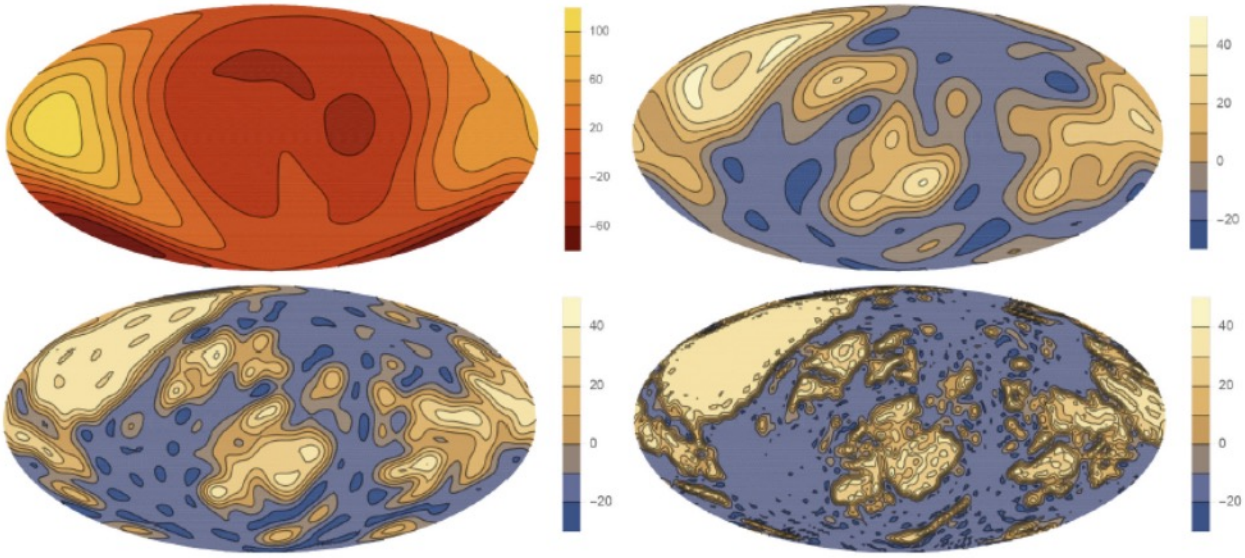
JUICE-4 - 3GM

Risultati e/o Prospettive

**De Marchi, Di Achille, Mitri, Cappuccio, Di Stefano, Di Benedetto, Iess*, Observability of Ganymede's gravity anomalies related to surface features by the 3GM experiment onboard ESA's JUpiter ICy moons Explorer (JUICE) mission, Icarus, 354, 2021, 114003

Spettri di potenza in funzione del grado di espansione in armoniche sferiche del segnale simulato*





Mappa di anomalie di gravità alla superficie di Ganimede ottenibili con l'esperimento 3GM*

JUICE-5: Progetto Mainstream INAF: "*Ganimede dal 2D al 3D: Un approccio multidisciplinare in preparazione a JUICE*" (PI: Federico Tosi)

Project Management
Lead: Federico Tosi
INAF-IAPS

"Ganimede dal 2D al 3D: Un approccio multidisciplinare in preparazione a JUICE"

UdR #1
INAF-IAPS
Surface Science

Lead: Federico Tosi

Federico Tosi
Giuseppe Piccioni
Pasquale Palumbo
Gianrico Filacchione
Francesca Zambon
Valentina Galluzzi

UdR #2
INAF-OAPd
Subsurface/surface geophysics modeling
Lead: Gabriele Cremonese

Gabriele Cremonese
Alice Lucchetti

UdR #3
INAF-IRA
Topographic and radar data modeling
Lead: Roberto Orosei

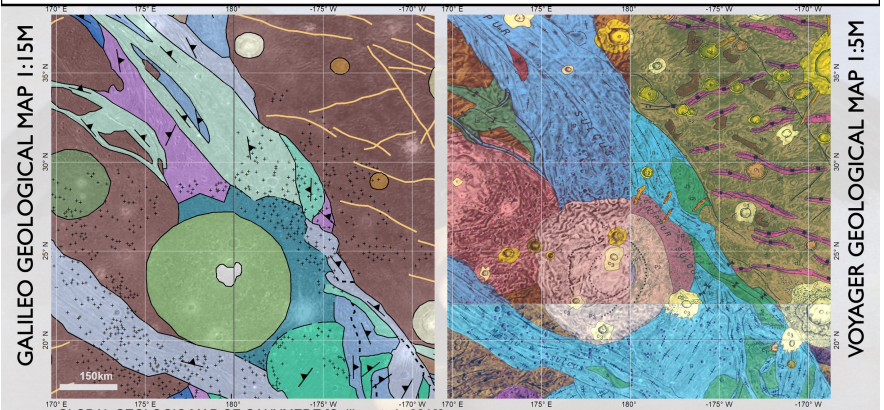
Roberto Orosei

- Progetto **selezionato il 25/03/2019**.
- Finanziato con **34 k€**.
- Durata biennale + estensione COVID-19 = fine prevista entro il **30/06/2022**.

Scopo

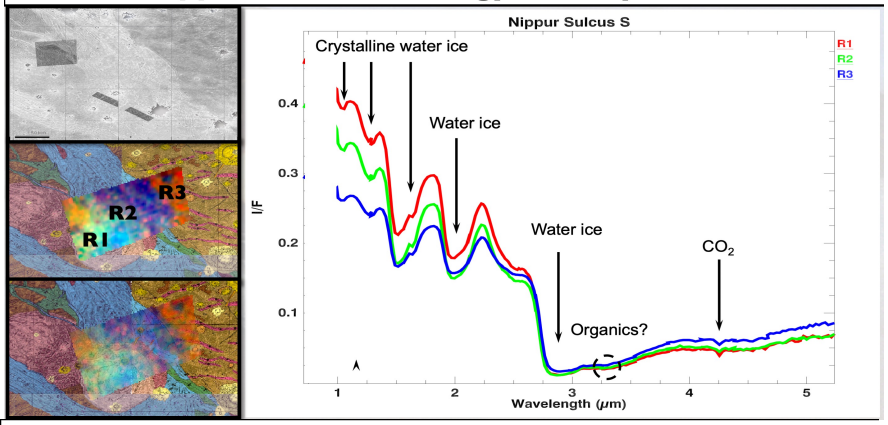
- L'obiettivo principale di questo progetto di ricerca Mainstream è di eseguire una comparazione tra **geologia**, **composizione superficiale** e **geofisica**, per una **data regione di interesse di Ganimede**.
- Tale studio è propedeutico ad indirizzare **osservazioni sinergiche di diversi strumenti di JUICE**, che possano restituire complessivamente una **visione 3D di una data ROI** per dimostrare le potenzialità della combinazione di dati acquisiti da più strumenti a larga partecipazione italiana (camera ottica JANUS, spettrometro ad immagine MAJIS, ice penetrating radar RIME).
- Lo studio che proponiamo di intraprendere fa uso sia di **dati telerilevati** attualmente disponibili per Ganimede, cioè quelli restituiti dalla missione NASA Galileo che ha operato nel sistema di Giove nel periodo 1995-2003, sia di **simulazioni** riguardanti tanto la topografia quanto l'interno del satellite, per cui ad oggi disponiamo di dataset molto limitati o addirittura non esistono misure dirette.

Nippur Sulcus – Geologic Context



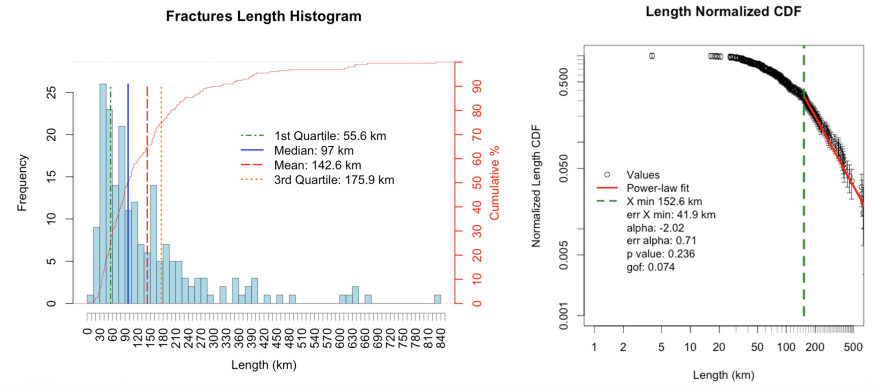
GLOBAL GEOLOGIC MAP OF GANYMEDE [Collins et al., 2013]
GEOLOGIC MAP OF THE PHILUS SULCUS (Jg-4) QUADRANGLE OF GANYMEDE [Murchie & Head et al., 1989]
GEOLOGIC MAP OF THE URUK SULCUS QUADRANGLE (Jg-8) OF GANYMEDE [Guest et al., 1988]

Nippur Sulcus – Geology + Composition

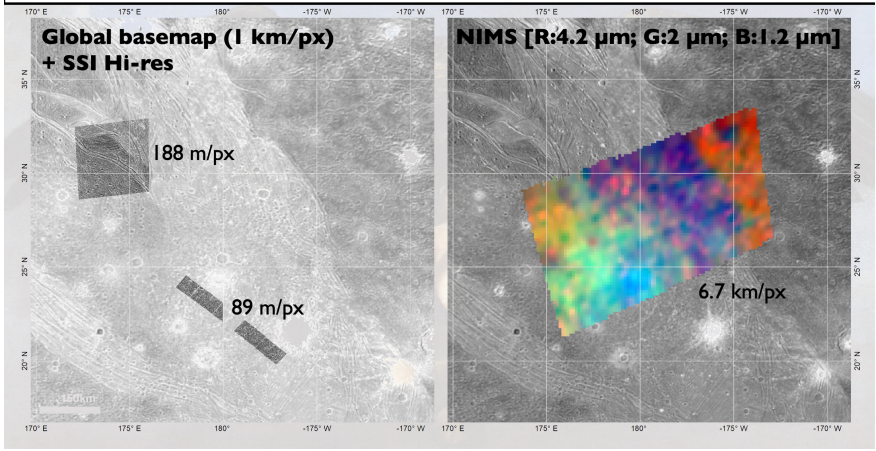


Modeling of Nippur Sulcus: Length analysis

Nippur Sulcus – Length distribution analysis

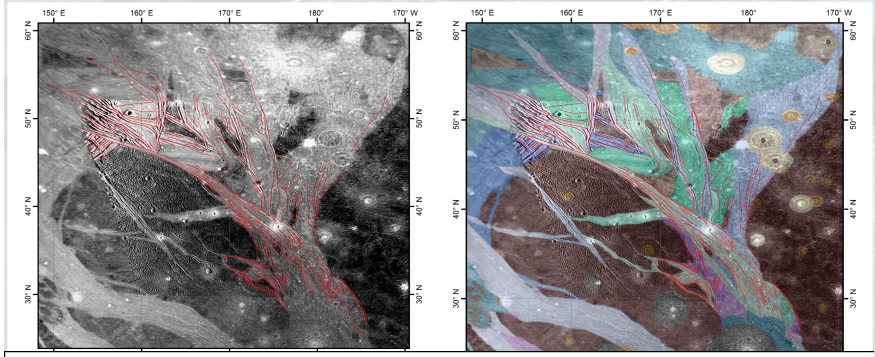


Nippur Sulcus – Geology + Composition

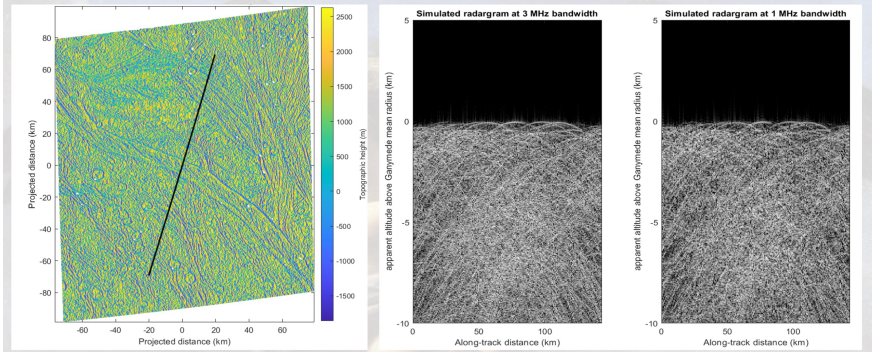


Modeling of Nippur Sulcus: Grooves mapping

Nippur Sulcus → **200 grooves mapped**. Starting from the available work published by Rossi et al. (2020), we improved the grooves mapping in Nippur Sulcus .



Simulation of radar surface scattering: First results

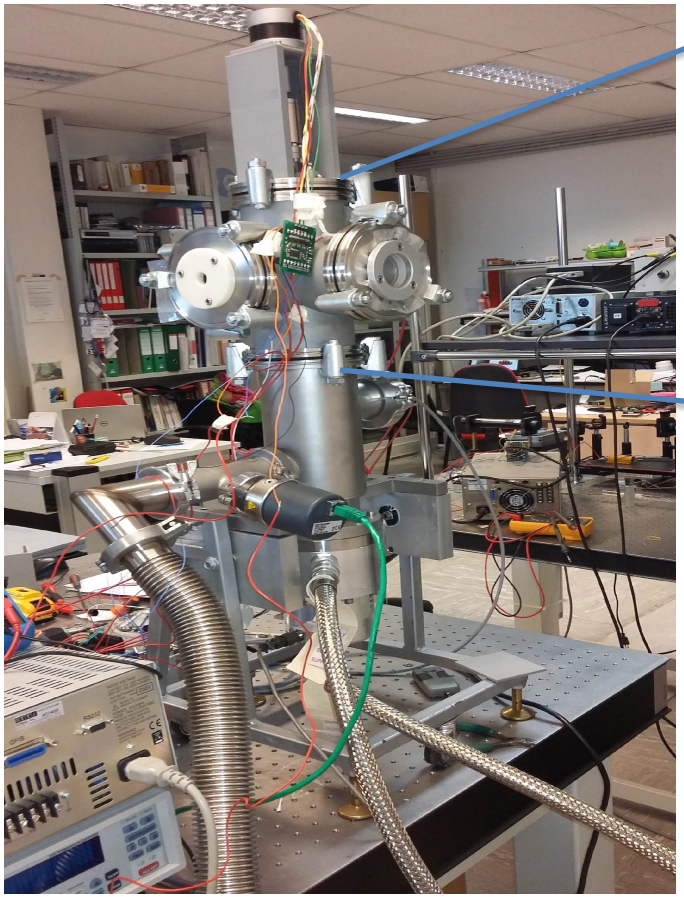


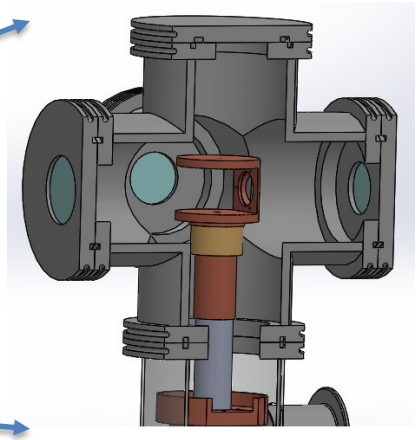
Ground track of the simulated observation projected over a pseudo-DEM centered at 174°E, 31°N

The complex surface produces extensive "clutter" (surface echoes coming from off-nadir) that could mask subsurface echoes.

JUICE-6: Verifica e test di sotto-sistemi flight

Scheda a cura di **S. Stefani** (IAPS) per il **RSN5**





Run Optical Chamber Test set-up (ROCT): set up sperimentale usato per eseguire performance test su sistemi e sottosistemi ottici, elettrici e meccanici flight o di qualifica.

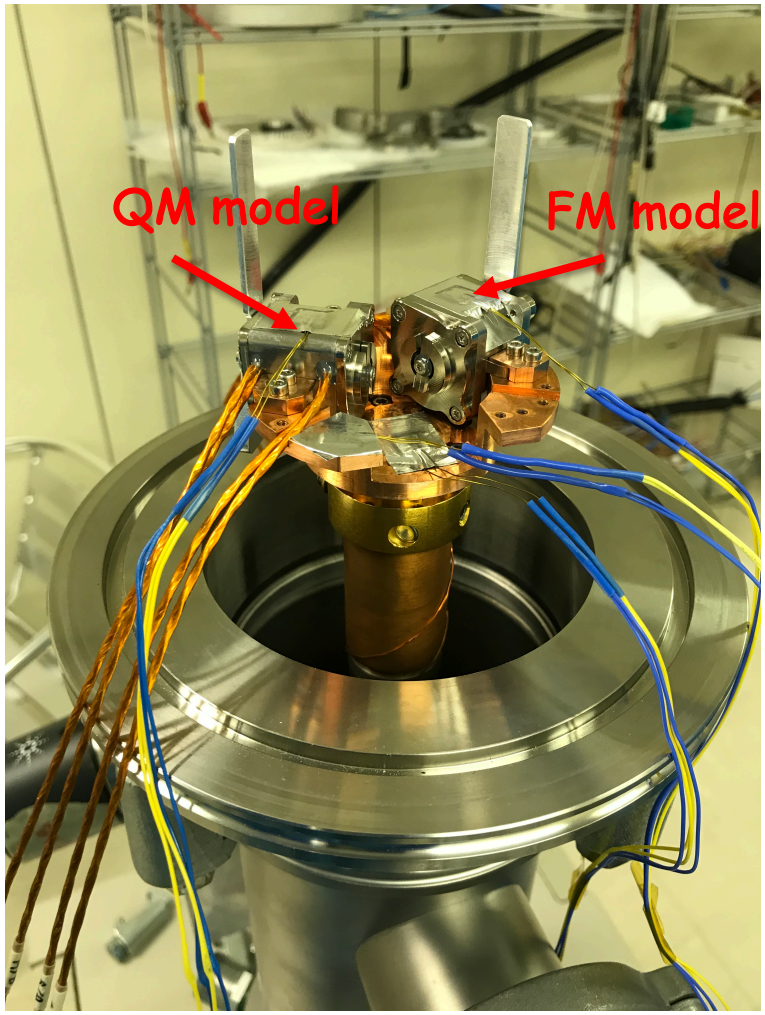
Il set up è costituita da:

- Una camera da vuoto che lavora a pressioni dell'ordine dei 10^{-6} mbar
- Un cryo-cooler a doppio stadio con una capacità di raffreddamento pari a:

  40W a 43K (1°stadio)

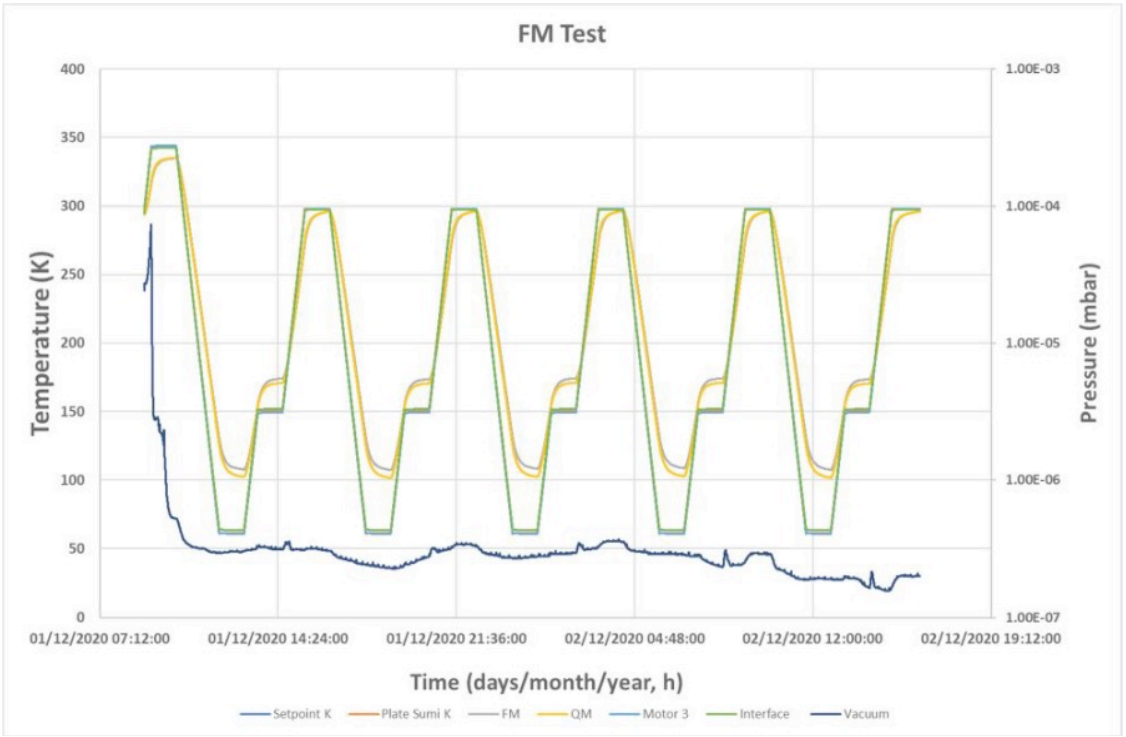
  1.0 W a 4.2K /2° stadio)

JUICE-6: Verifica e test su sotto-sistemi flight



Test di qualifica ed accettazione degli shutter flight dello strumento MAJIS:

- 5 cicli termici variabili da circa 350 K a 110 K (T flight)



Fondi JUICE (parte scienza)

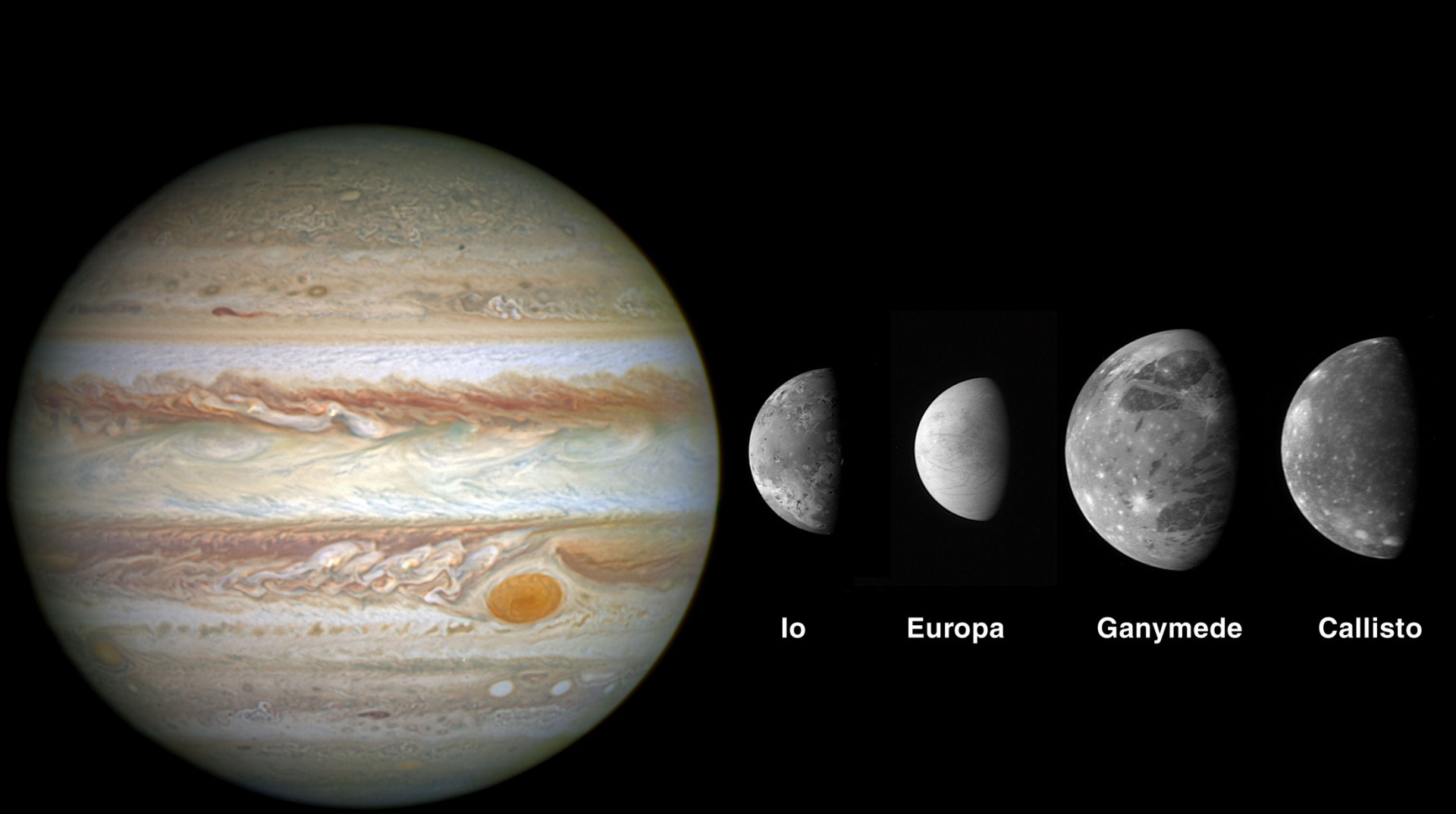
- ASI è la principale fonte di finanziamento esterno per le attività scientifiche, attraverso l'accordo ASI-INAF:
  - 1.05.04.49.06 Attività scientifiche per JUICE fase C/D (ref. G. Piccioni) - Accordo Attuativo ASI-INAF n. 2018-25-HH.0 (scadenza maggio 2022)
- La quota cofinanziata di INAF è pari circa al 50% di quella ASI

Risultati e prospettive

- **Elevato numero di pubblicazioni scientifiche** nella prima fase ma soprattutto in fase operativa e post-operativa (vedi ad esempio NASA-ASI-ESA Cassini come esempio simile)
- **Probabilità elevata di risultati scientifici rilevanti ed unici** per lo studio del Sistema Solare, in particolare per il sistema di Giove
- Varie **opportunità di attività scientifica anche in fase preparatoria** alla missione operativa (flybys durante la cruise, predizione delle performance, preparazione alle osservazioni, ecc.)
- Notevoli possibilità di **sinergia tra i vari strumenti italiani**, con un importante livello di competenza all'interno di INAF
- Molte **opportunità di attività di laboratorio** sia a carattere scientifico che tecnologico
- Opportunità di vari **eventi mediatici e divulgativi** (soprattutto per camera e spettrometro) come già ampiamente dimostrato in passato

Criticità

- Le criticità maggiori al momento sono i **tempi strettissimi legati ai tempi di consegna dei modelli di volo** (la flessibilità delle date è molto limitata dalle finestre di lancio, per altro non tutte allo stesso livello di performance)
- Missione di lungo termine con **passaggio generazionale delle competenze**. Importanza della formazione dei giovani e del loro impiego «ponte» per non disperdere le competenze e le eccellenze acquisite o in fase di acquisizione
- Internamente ad INAF le criticità maggiori sono:
  - **tempi molto lunghi per gli storni di bilancio** (dalla richiesta inviata alla disponibilità effettiva dei fondi passano diversi mesi)
  - **tempi molto lunghi su acquisti di laboratorio** che a volte si intoppano anche per vincoli difficili da gestire



Grazie per l’attenzione