



# *scientifica*

*presenta le LEZIONI DI SCIENZA*  
*gli eventi di approfondimento sulle materie scientifiche*

 **MONDADORI**  
EDUCATION



# Acqua nel sistema solare

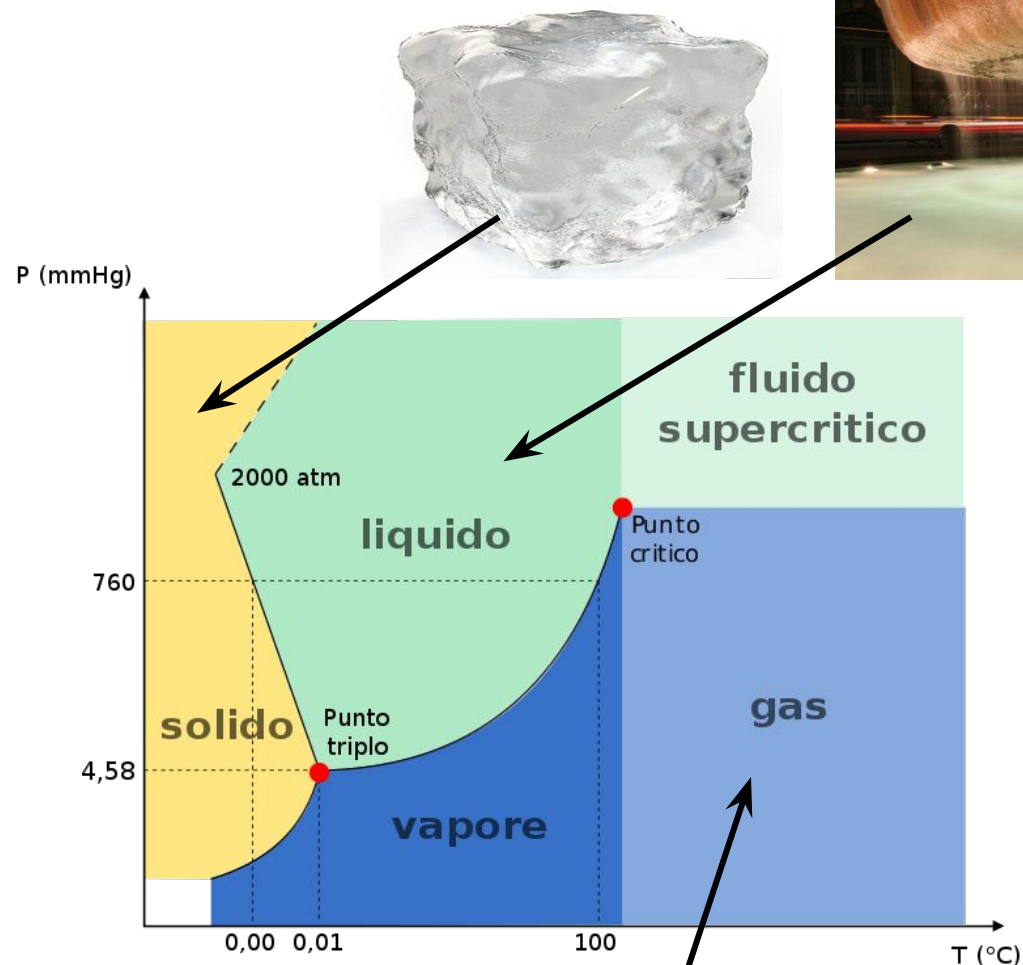
M. Cristina De Sanctis

*Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali INAF*



# Acqua nel sistema solare

- $H_2O$  è una molecola diffusa nel sistema solare
- La si trova sotto forma di acqua liquida, ghiaccio e vapore
- Spesso si sente parlare di ghiaccio nel sistema solare, ma non sempre si tratta di ghiaccio di acqua. Spesso si tratta di ghiaccio di altre molecole come la  $CO_2$ .

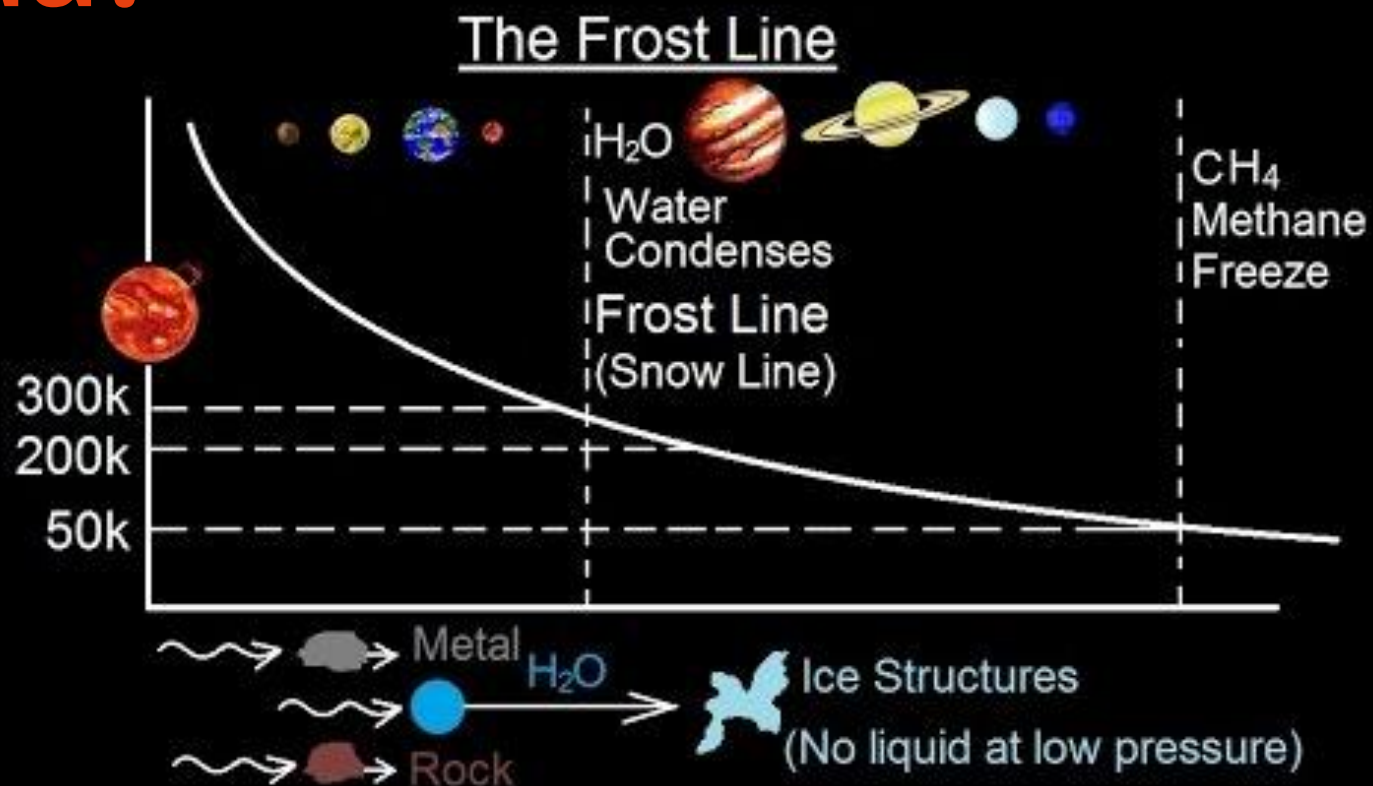


# Sistema solare

- Il sistema solare è 99% di idrogeno, elio, carbonio e ossigeno, con  $> 0,1\%$  di neon, ferro, e azoto
- Alcuni composti formano elementi ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$  ed altri) che possono essere in forma di ghiaccio
- Il più familiare è ghiaccio acqua

# Dove troviamo il ghiaccio d'acqua? Snow Line

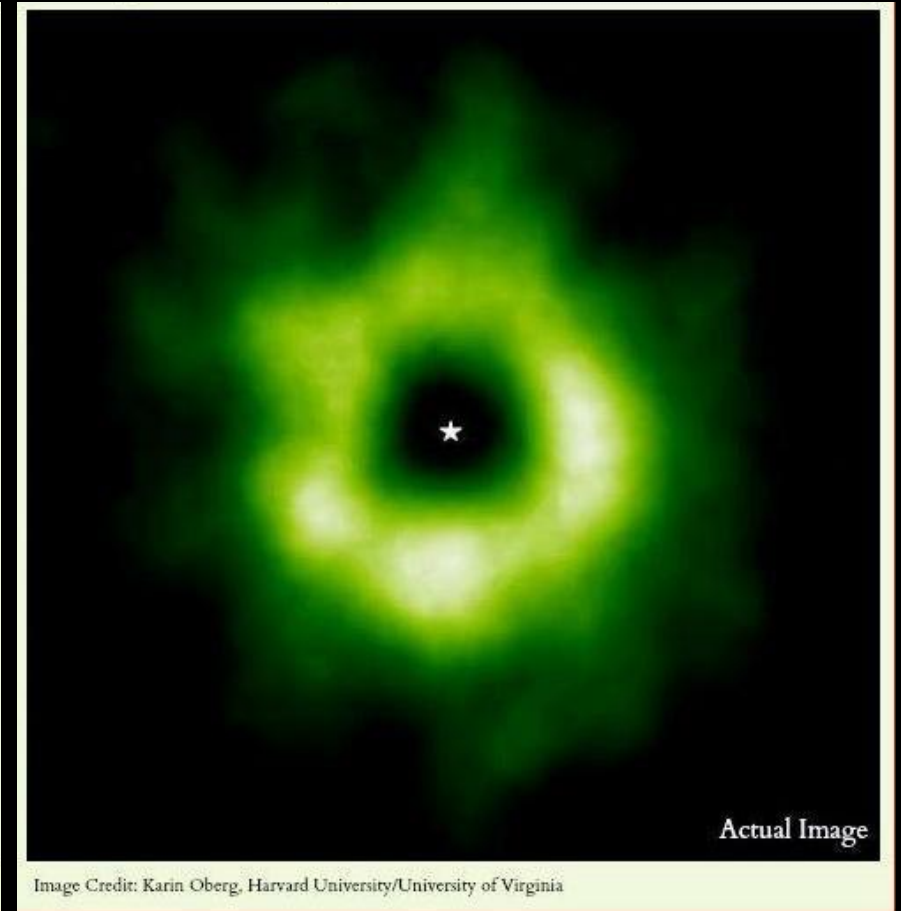
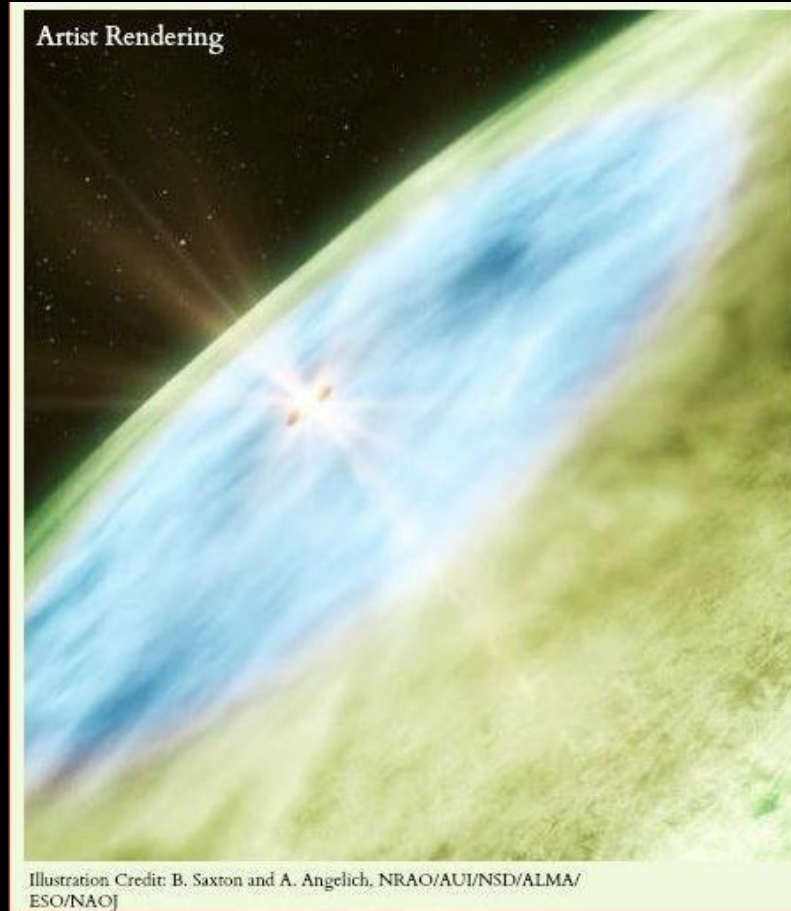
La **linea del ghiaccio** del nostro sistema solare inizia a circa 5 volte la distanza della Terra dal Sole, prima di Giove. In effetti è la linea del ghiaccio che separa i pianeti terrestri interni dai pianeti gassosi giganti.



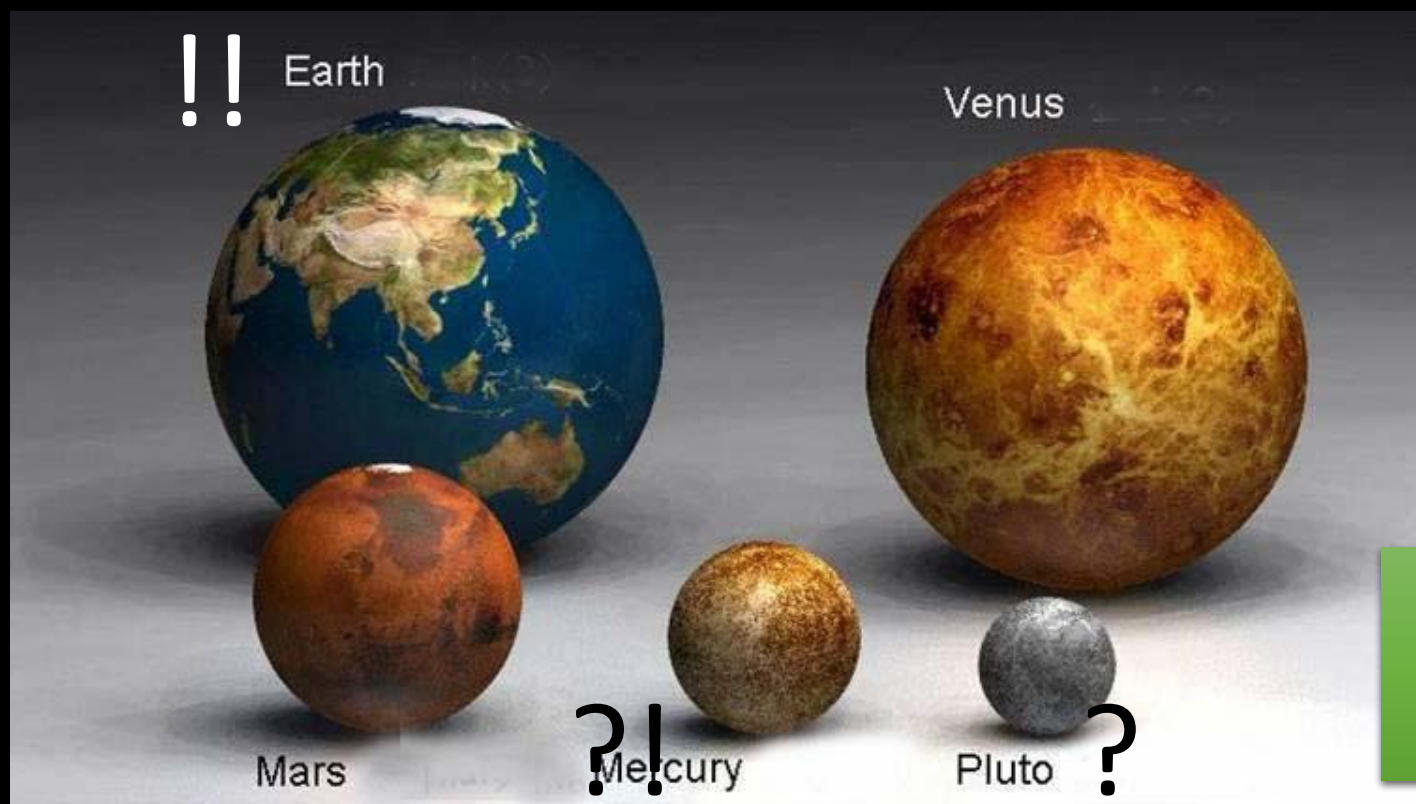


# La Snow Line

*Astronomers Capture the First Image of the Snow Line in Baby Solar System:*

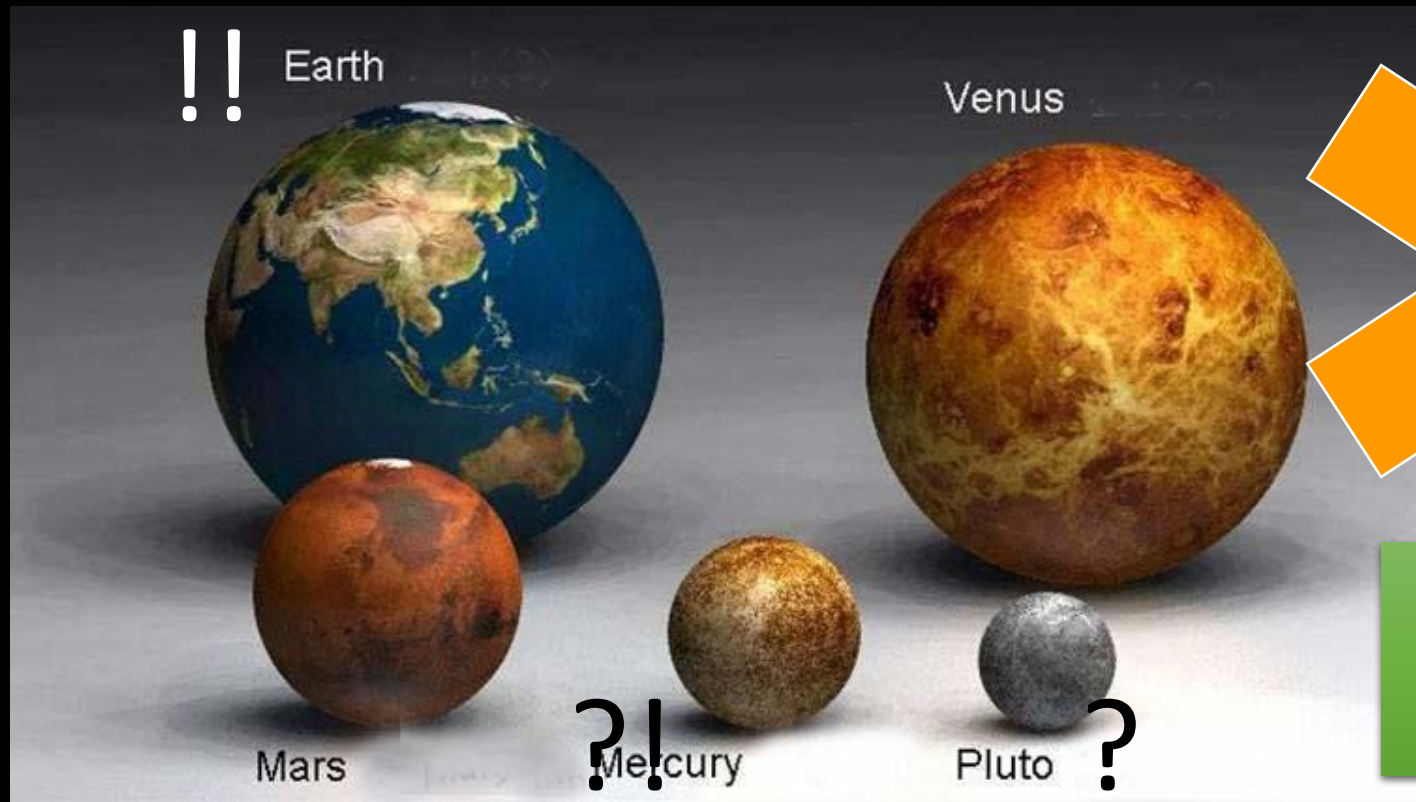


# Dove potrebbe essere stabile l'acqua nei pianeti terrestri?



Too dry!  
Too hot!

# Dove potrebbe essere stabile l'acqua nei pianeti terrestri?



Too dry!  
Too hot!

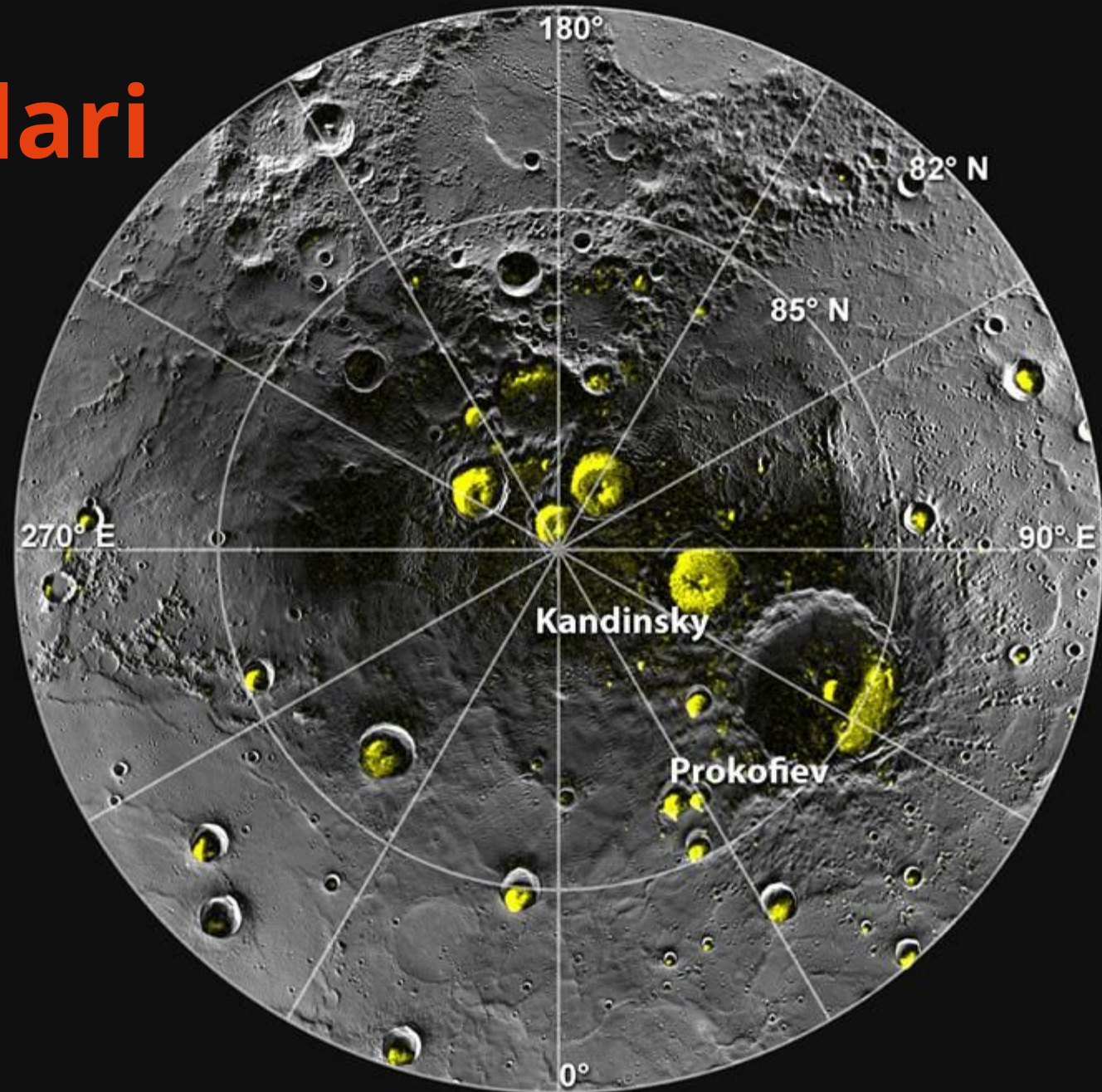


# Ghiaccio su Mercurio

- Le temperature su Mercurio possono raggiungere 427 gradi Celsius, ma attorno al polo nord, nelle zone schermate in modo permanente dal calore del sole, Messenger della NASA ha trovato una miscela di acqua ghiacciata.
- Si ritiene che siano residui di impatti cometari che hanno lasciato ghiacci in zone **«permanentemente in ombra»**
- Infatti tali ghiacci sono in zone polari (latitudine 85 gradi nord fino al polo) e in altre zone circumpolari.



# Ghiaccio polari Mercurio



.....  
Mappa delle zone  
permanentemente  
in ombra

# Marte

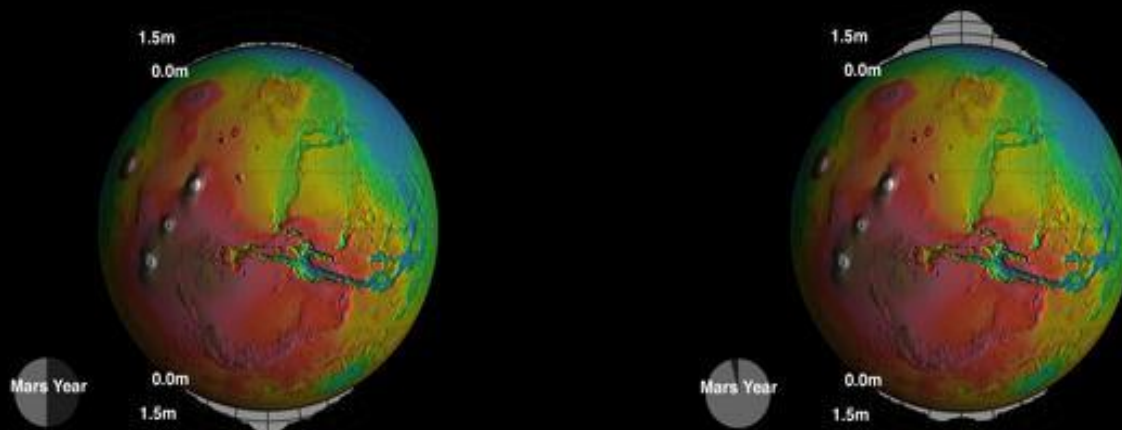
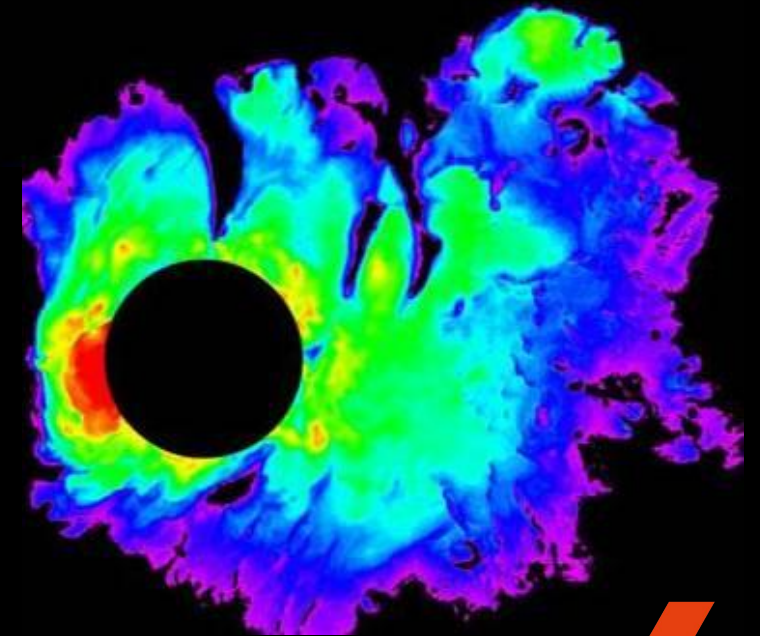
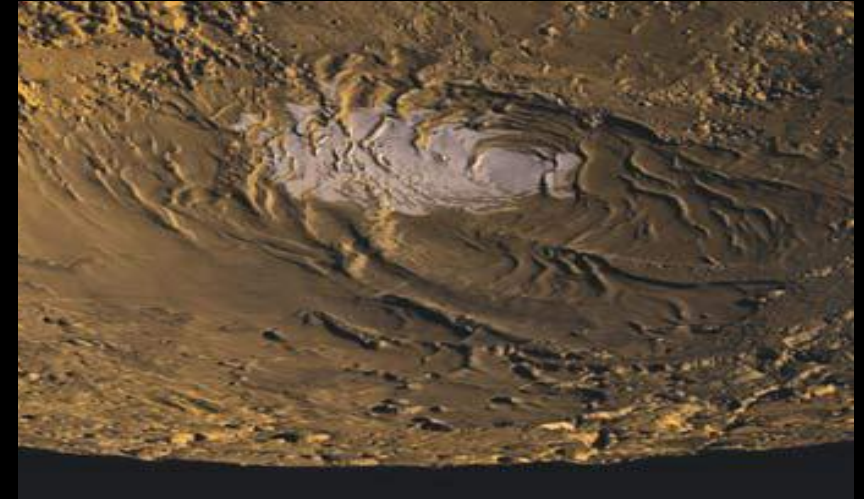


- Marte è il pianeta al limite interno della snow-line
- In questa immagine Hubble ST si nota bene come Marte abbia delle calotte polari



# Le calotte polari di Marte

- Le calotte polari di Marte hanno variazioni stagionali ma hanno anche una parte di ghiaccio permanente.
- Altimetria radar ci dice che c'è ghiaccio d'acqua quasi pura, coperta da uno strato di CO<sub>2</sub> ghiacciata stagionale



# Ghiaccio sotto-superficiale?

Questa rete poligonale osservata su Marte è molto simile a quelle che si creano a causa di contrazioni termiche nelle zone alpine e periglaciali.



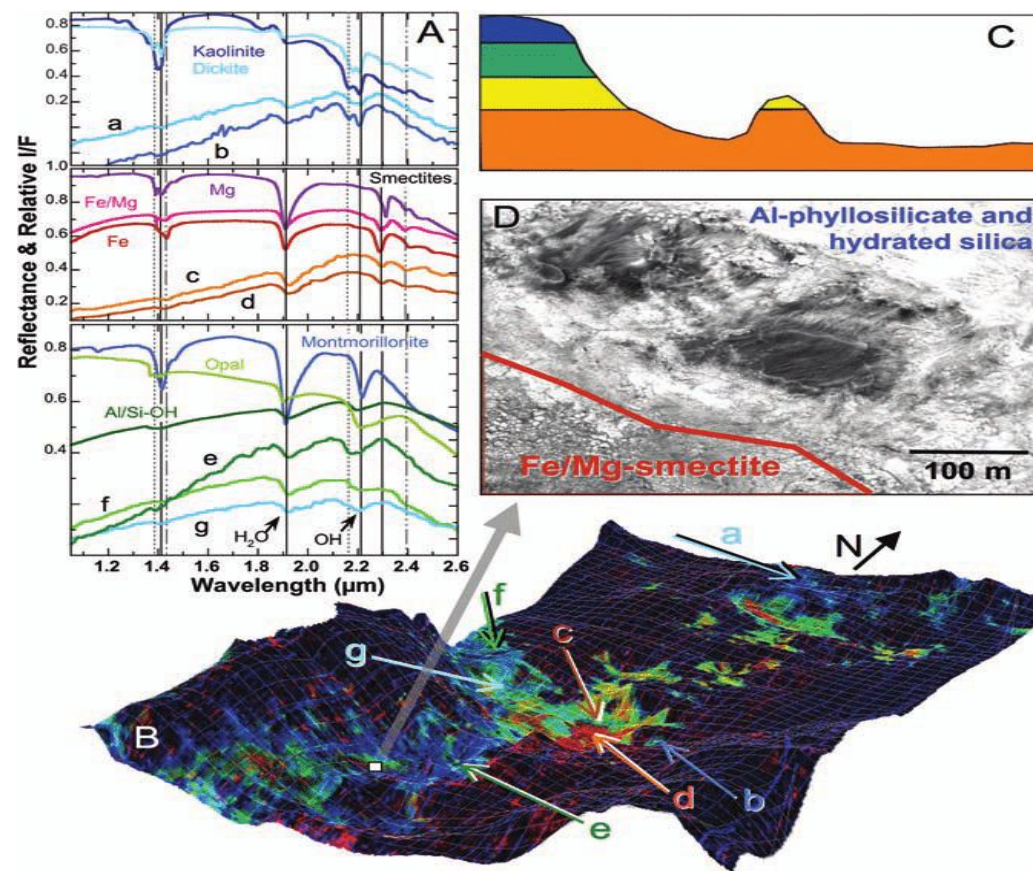
HIRISE/NASA

Western Utopia Planitia,  
northern lowlands



# Marte: composizione che implica una presenza di acqua liquida nel passato

- Marte è ricco di fillosilicati (silicati con molecole di OH e a volte H<sub>2</sub>O).
- Le formule **chimiche di base** sono  $A_3Si_2O_5(OH)_4$  e  $A_3Si_4O_{10}(OH)_2$ , dove A rappresenta uno ione che può essere di calcio, magnesio, alluminio, sodio, ferro...
- **Si formano in presenza di acqua**





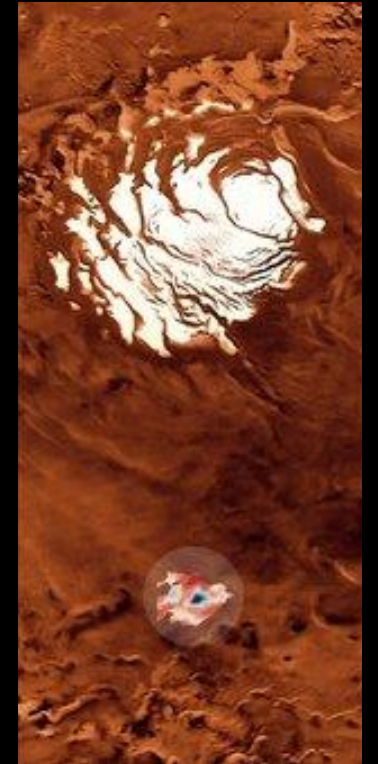
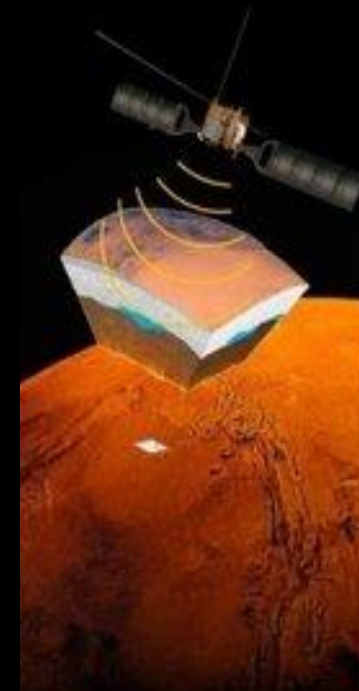
# Marte: i canali, i delta e paleolaghi

- Non ci sono dubbi sulla presenza di acqua ma **oggi** questa è in forma ghiacciata (vedremo un'eccezione).
- Siamo certi che un tempo ci fosse acqua liquida su Marte: depositi fluviali, canali, formazioni glaciali.
- L'acqua liquida era presente 4-3.7 miliardi di anni fa (Periodo Noachiano).

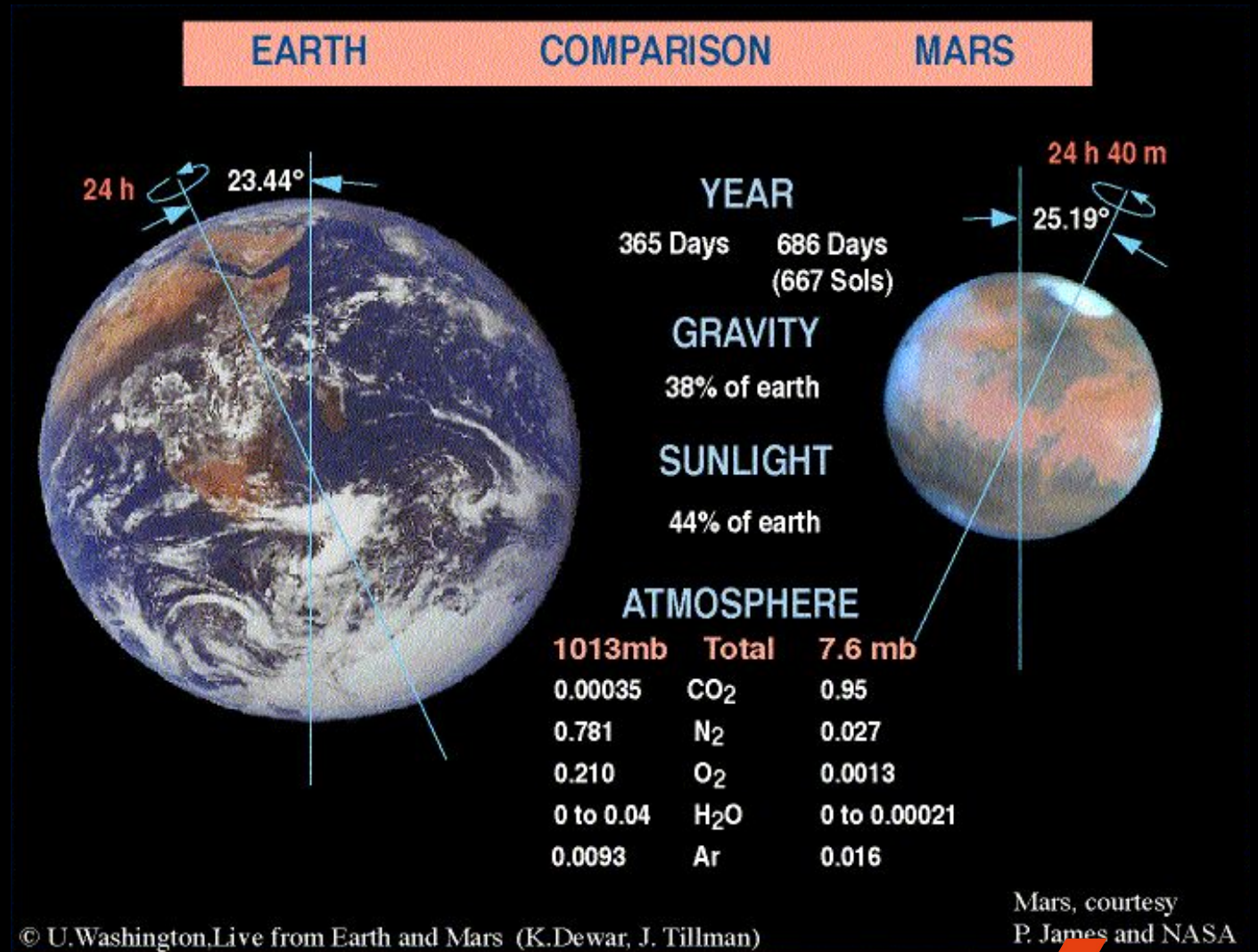


# Marte: laghi di acqua salina sotto la calotta

Le immagini radar del Polo Sud marziano indicano la possibile esistenza di laghi nascosti sotto il ghiaccio. Questi laghi potrebbero rimanere liquidi a causa delle concentrazioni molto elevate di sali chiamati perclorati.



# Perché non c'è acqua liquida sulla superficie di Marte?







# Acqua nel sistema solare: Terra-Luna

- La terra è nella zona “secca” del sistema solare quindi non dovrebbe contenere molta acqua
- Gli altri pianeti terrestri sono “privi” o hanno poche riserve di acqua

# Acqua sulla Luna?

- Per molti decenni si è ritenuto che la Luna fosse completamente priva di acqua.
- Tra le più interessanti scoperte degli ultimi anni c'è quella dell'acqua sulla Luna.
- Ma che di che tipo di "acqua" parliamo?



# OH e H<sub>2</sub>O

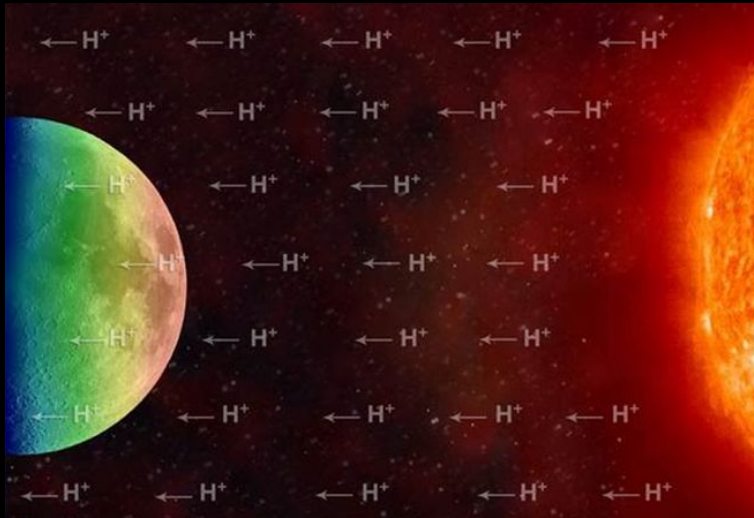
- A volte si fa confusione tra materiali che contengono OH (gruppo monovalente –OH, detto anche *idrossile*) e H<sub>2</sub>O (acqua vera e propria)
- Ad esempio, alcune materiali, come le alcune specifiche argille contengono OH ma non H<sub>2</sub>O, mentre altre hanno sia la molecola di acqua sia l'ossidrile.
- Vediamo di cosa intendiamo per acqua lunare: esogena ed endogena.



# Origine acqua sulla luna: acqua «esogena»

## Formazione di acqua (OH) da idrogeno solare

- Gli ioni  $H^+$  del vento solare reagiscono con la superficie lunare e formano dei legami OH

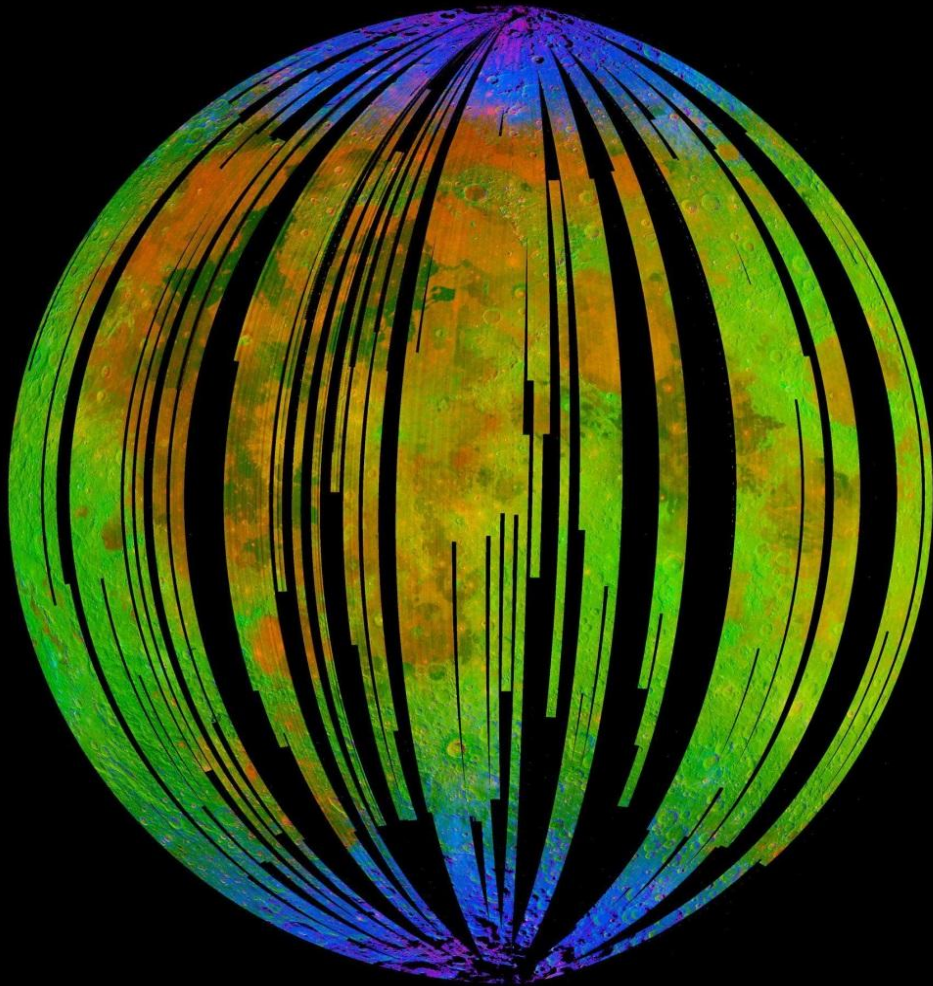


## Ghiaccio di acqua da impatti cometari o altre sorgenti

- Impatti con oggetti ricchi di acqua (comete ed asteroidi con ghiaccio) rilasciano quantità di acqua che può essere intrappolata nelle zone di ombra permanente



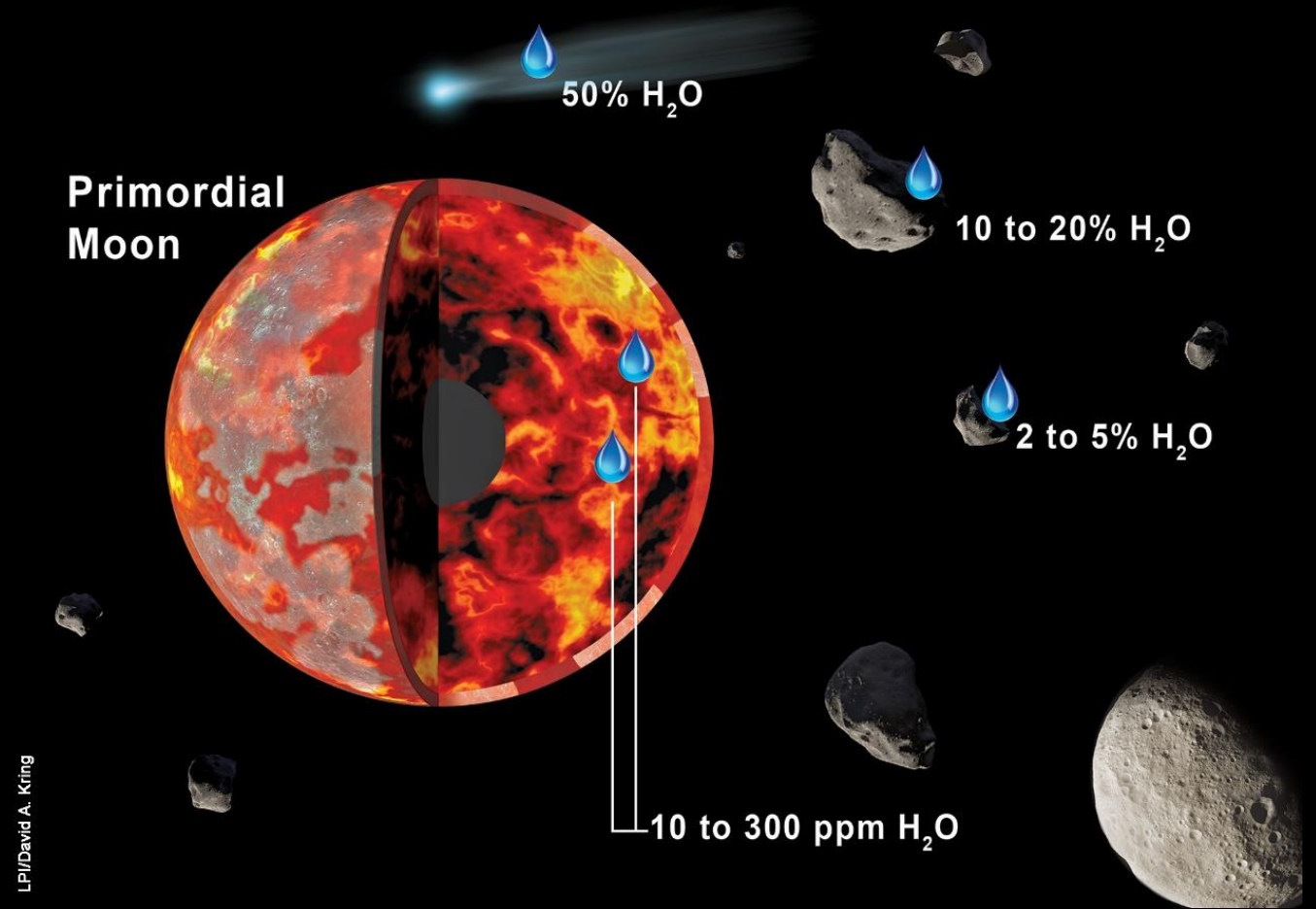
# OH e materiali idrati



- Distribuzione di «OH» sulla luna fa pensare ad un accumulo nelle zone più fredde e probabilmente ad un origine esogena
- Forte dipendenza dalle latitudini quindi dalla temperatura

# Acqua lunare «endogena»

- Per molti anni, i ricercatori hanno creduto che le rocce lunari fossero prive di acqua e solo recentemente è stata scoperta dell'acqua che probabilmente è di tipo «endogena» .
- La Luna potrebbe aver ottenuto l'acqua da impatti di asteroidi e meteoriti quando era ancora parzialmente fusa e la sua crosta primordiale si stava formando.





# Come è arrivata l'acqua sulla Terra e sulla Luna

La Terra primordiale era una palla di magma ribollente, così l'acqua iniziale sarebbe evaporata nello spazio.

Gli scienziati planetari hanno a lungo dibattuto quale dei due tipi di oggetti, **comete o asteroidi**, erano responsabili per la fornitura di acqua della Terra.

Vediamoli da vicino e cerchiamo di capire chi ci ha regalato gli oceani.



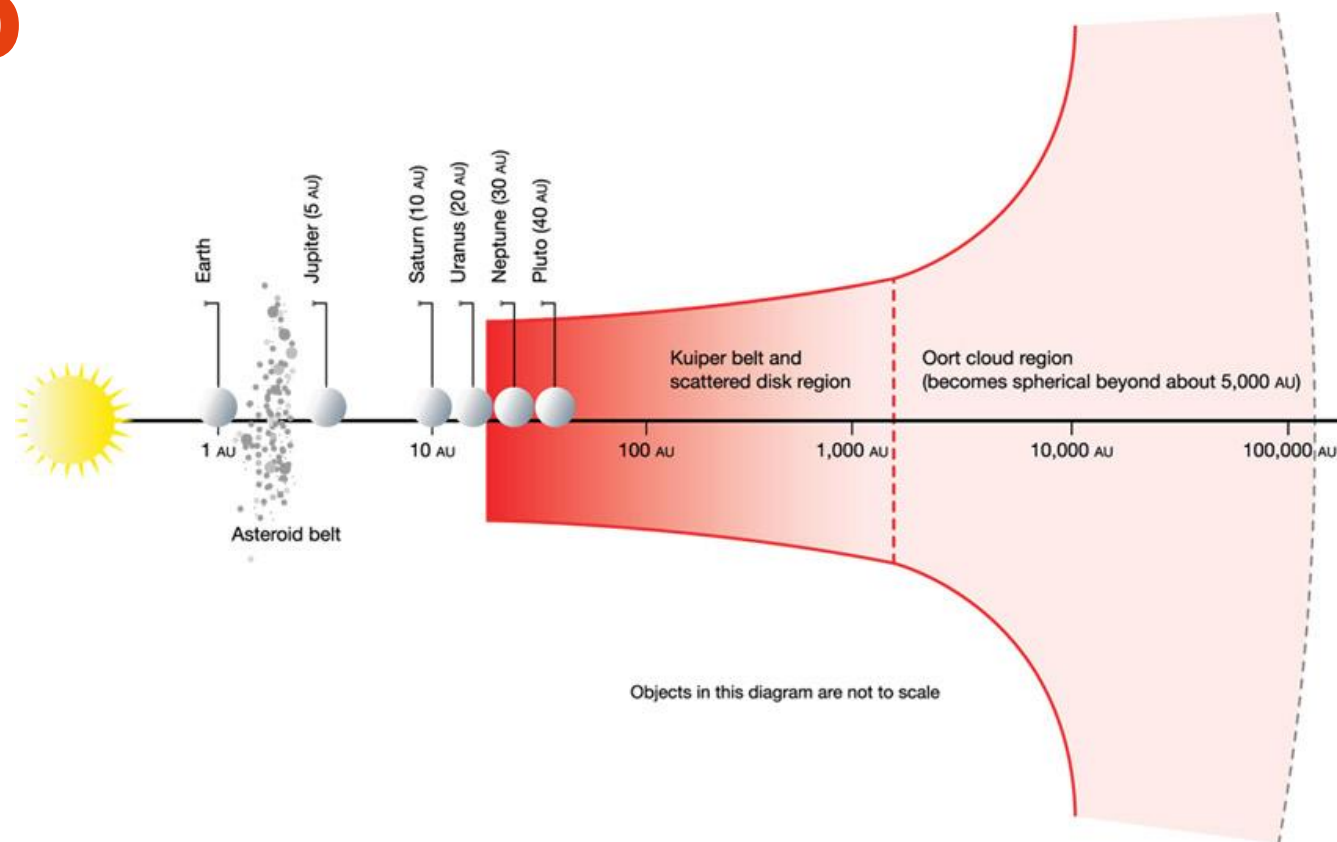


# Comete: agglomerati di polveri e ghiacci



# Le comete: da dove vengono

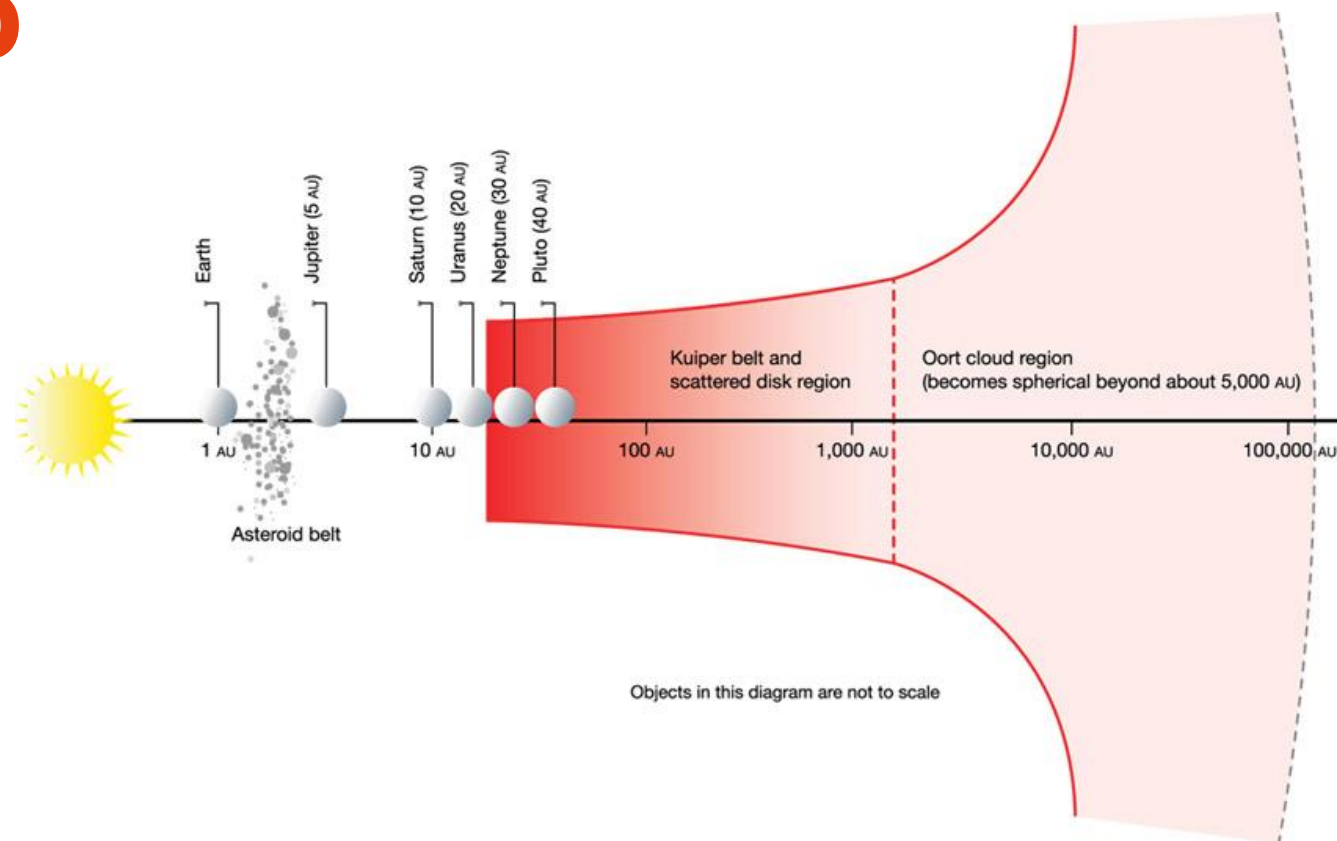
- Nube di Oort
- Kuiper Belt





# Le comete: da dove vengono

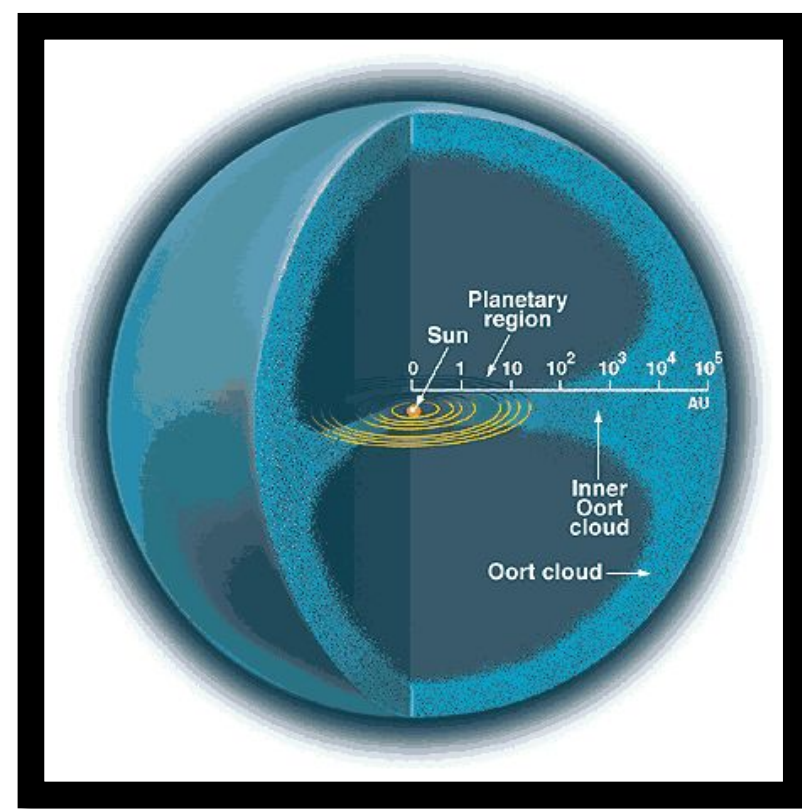
- Nube di Oort
- Kuiper Belt



*Gli oggetti nella Nube di Oort e nella fascia di Kuiper sono residui della formazione del sistema solare circa 4.6 miliardi di anni fa.*

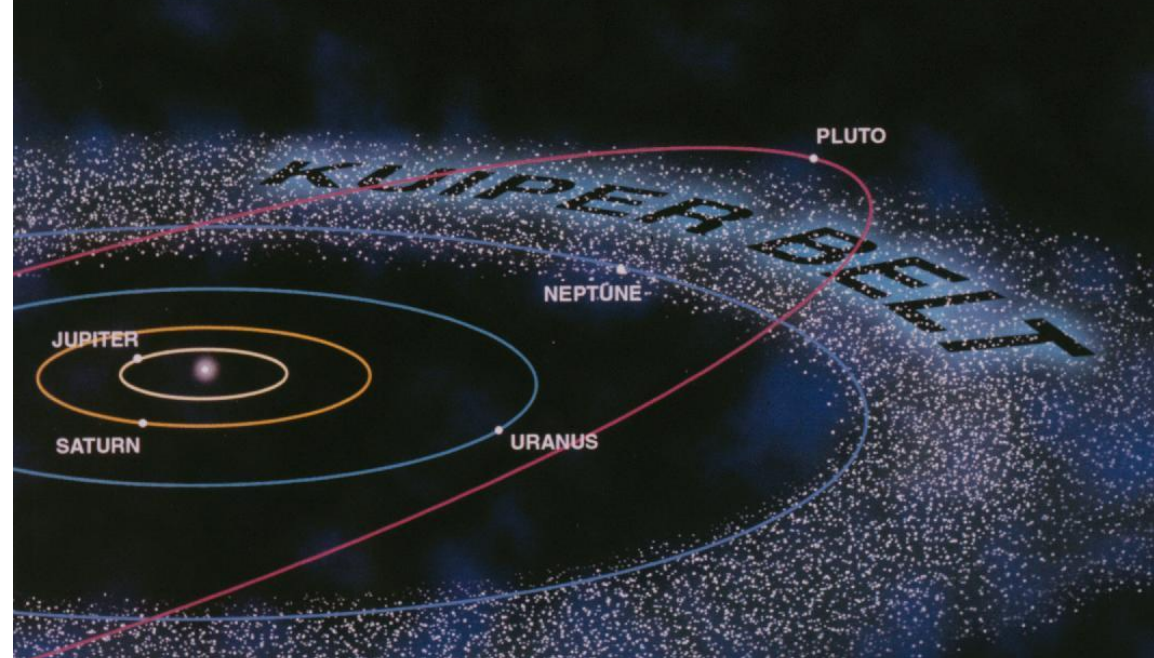
## Nube di Oort

- Nel 1950, l'astronomo olandese Jan Oort propose che alcune comete provenissero da un vasto guscio sferico di corpi ghiacciati che circondano il sistema solare.
- La **Nube di Oort** occupa lo spazio ad una distanza tra 5.000 e 100.000 unità astronomiche.



- La Nube di Oort contiene probabilmente migliaia di milioni di corpi ghiacciati.
- Di tanto in tanto, a causa di perturbazioni orbitali e gravitazionali, alcuni di questi oggetti vengono spostati dalla Nube di Oort al sistema solare interno: si ha così una **cometa di lungo periodo**.
- Le orbite delle comete di lungo periodo sono molto lunghe ed eccentriche; Le comete impiegano migliaia di anni per girare intorno al sole e si osservano nel sistema solare interno solo una volta.

## Kuiper Belt

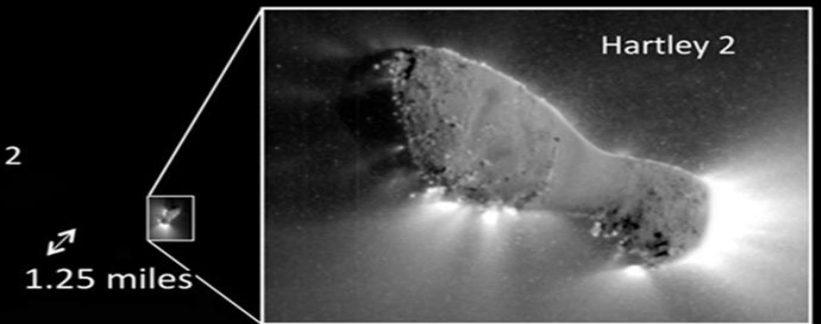
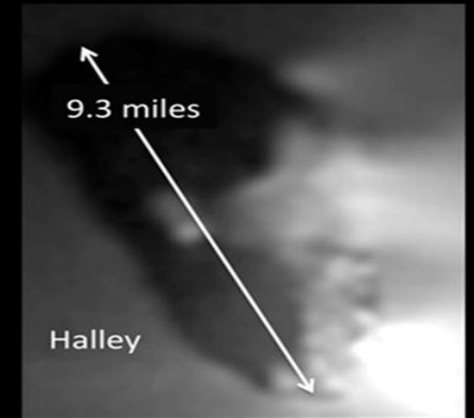
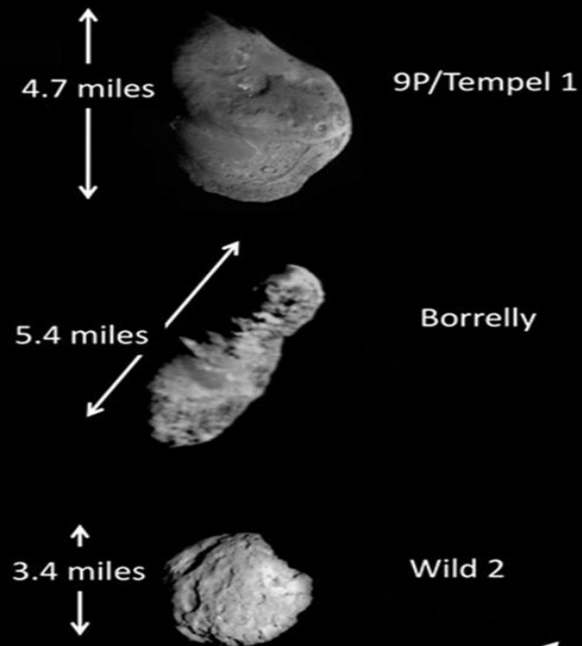
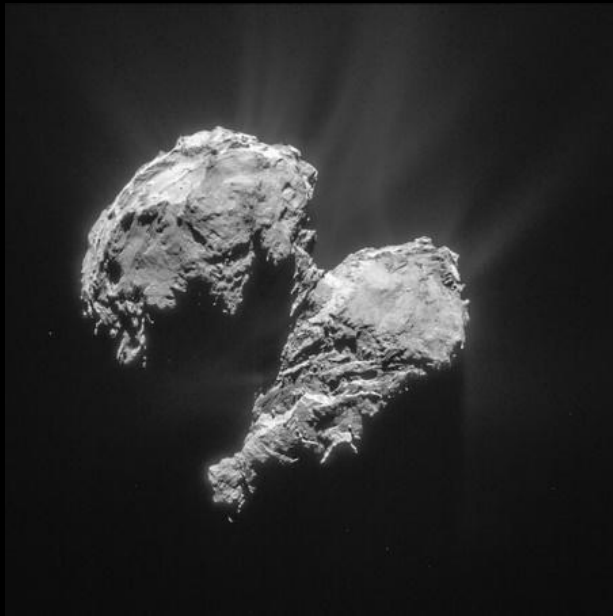


- Al contrario, le **comete di corto periodo** impiegano meno di 200 anni per orbitare intorno al sole e viaggiano approssimativamente nel piano in cui la maggior parte dei pianeti orbitano.
- Si presume che esse provengano da una regione a forma di disco oltre Nettuno chiamata fascia di Kuiper, dal nome dell'astronomo Gerard Kuiper.
- La fascia di Kuiper si estende da circa 30 a 55 UA e probabilmente è popolata da centinaia di migliaia di corpi ghiacciati più grandi di 100 km di diametro e si stima che vi siano mille miliardi o più di comete.



# Cosa sono? I nuclei di comete

Le comete sono agglomerati di materiale condensato nelle zone esterne del sistema solare primordiale.



Composizione: acqua, polveri di tipo diverso (silicati e organici), composti del carbonio e dell'azoto.

# Come sono da vicino

La **coda di ioni** è costituita dal plasma prodotto dalla interazione con il Vento Solare e si estende per oltre 100 milioni di km. Il colore blu è dovuto a  $\text{CO}_2^+$

Ion tail  
(Type I)

Dust tail  
(Type II)

La **coda di polvere** è composta di particelle di polvere molto piccole generate nel nucleo dai gas che lo compongono. È la parte prominente della cometa, quella maggiormente visibile (ad occhio nudo) e si estende fino a 10 milioni di km di lunghezza.

Nucleus

Coma

**Nucleo:** polvere e ghiaccio miscelati

# Comete: hanno portato loro l'acqua sulla terra ?

- Anche se le comete sono fonti ideali, con il loro alto contenuto percentuale di acqua, ricca di aminoacidi, ci sono alcune evidenze contro di loro, tra cui i rapporti isotopici dell'idrogeno pesante (o deuterio) che è molto più alto di quello della Terra.
- Infatti, molte comete sono caratterizzate da un rapporto Deuterio/Idrogeno (D/H) diverso da quello terrestre.

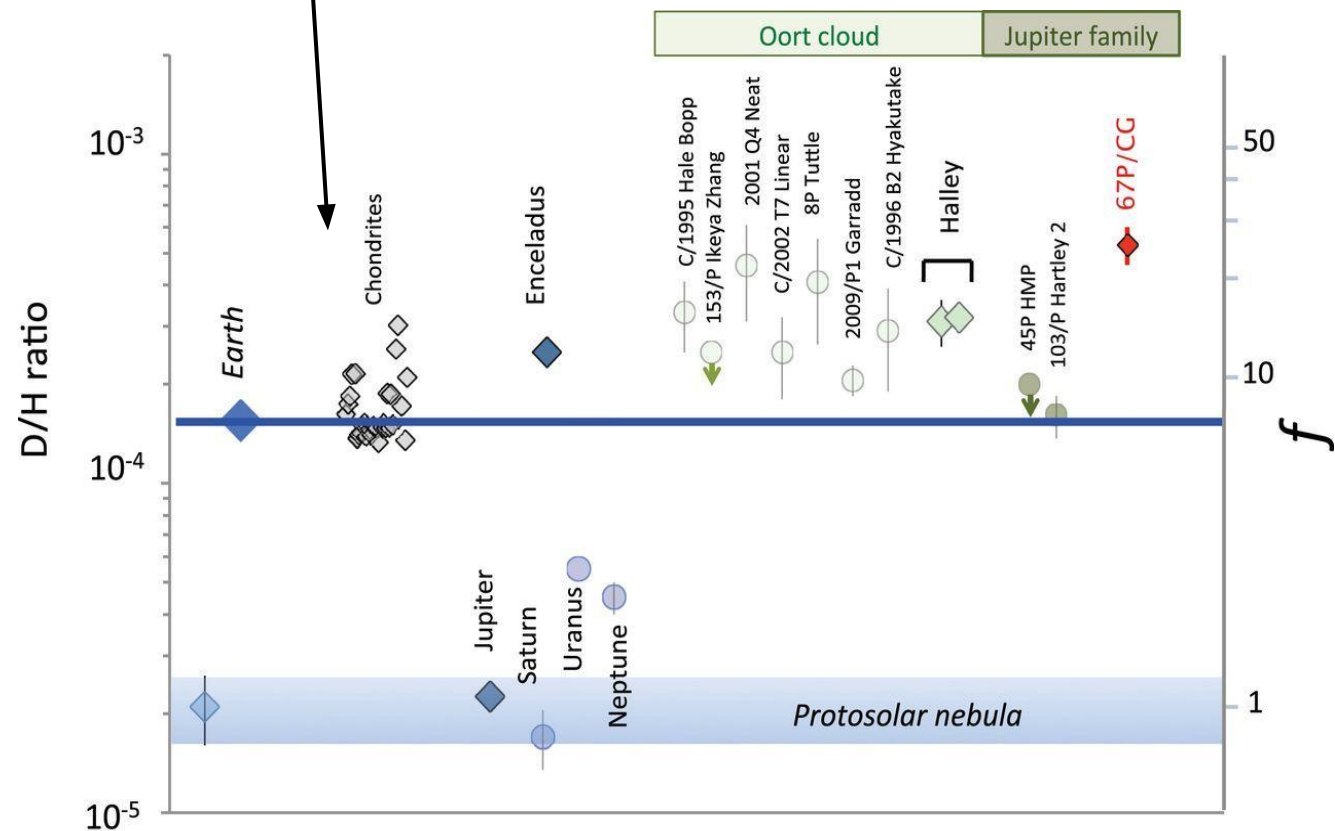
In questa immagine scattata da una sonda della NASA, si vede un turbinio di particelle d'acqua ghiacciate attorno alla cometa 103P/Hartley 2.



# D/H ratio

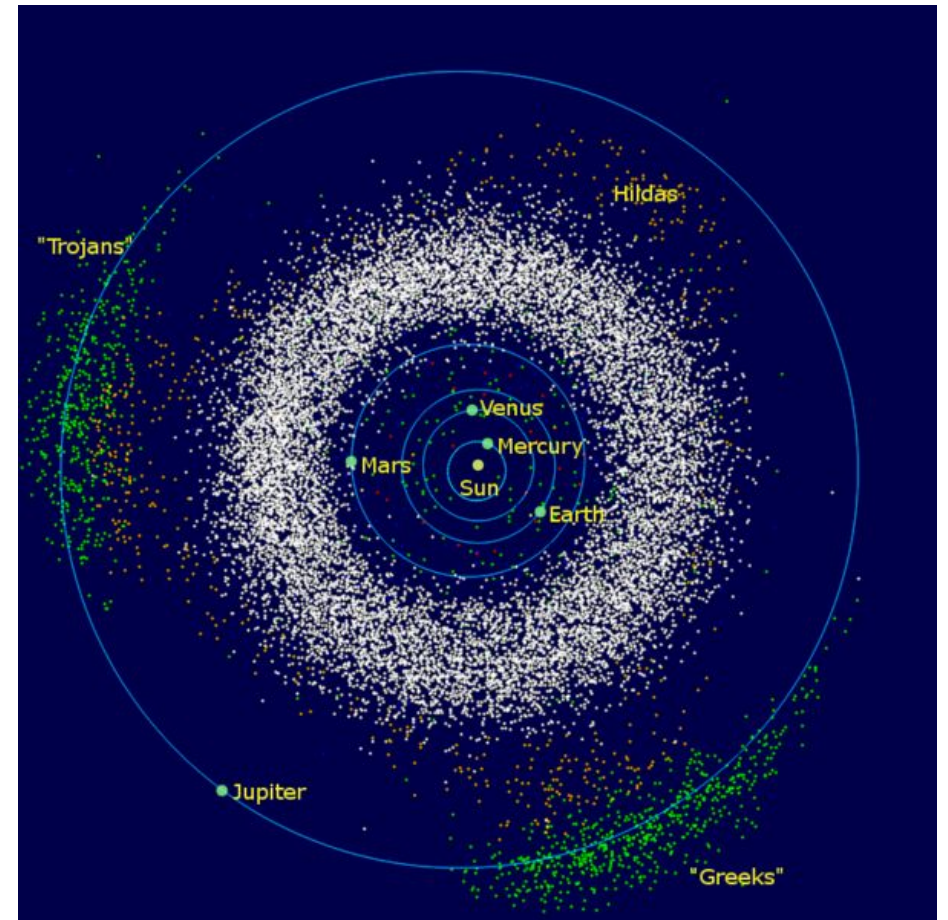
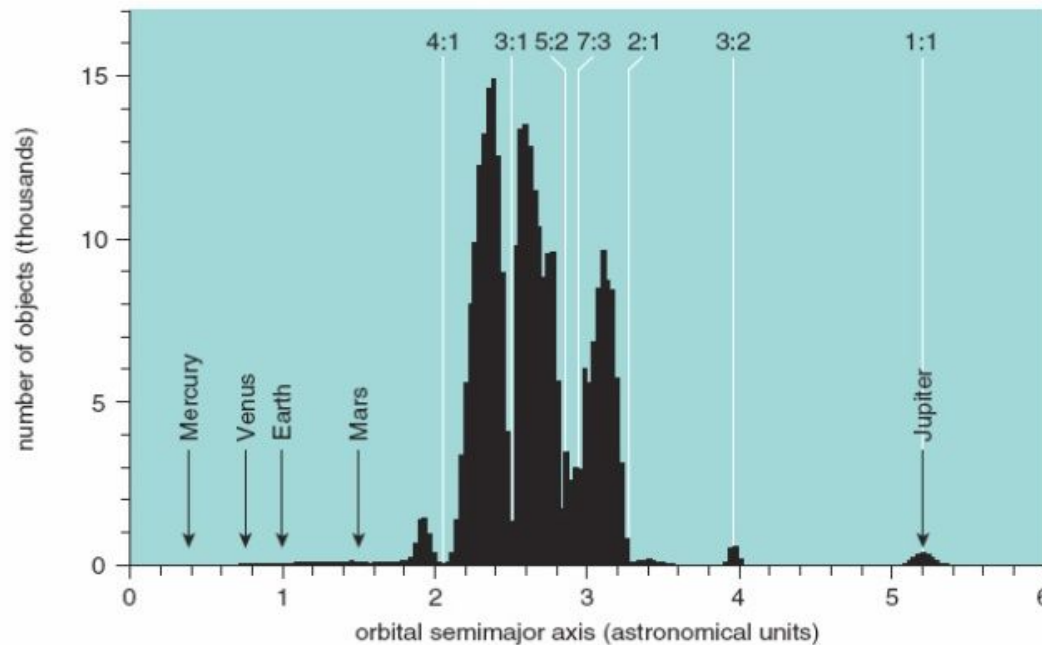
- La cometa 103P/Hartley 2 è l'unica ad avere stessa composizione isotopica dell'acqua della Terra.
- Aver trovato una cometa con una composizione così simile a quella della Terra fa pensare che ci possano essere molte altre comete simili, e ciò vorrebbe dire che parte dell'acqua del nostro pianeta sarebbe stato portato dalle comete.

D/H ratio degli oceani è compatibile con quello degli asteroidi primitivi



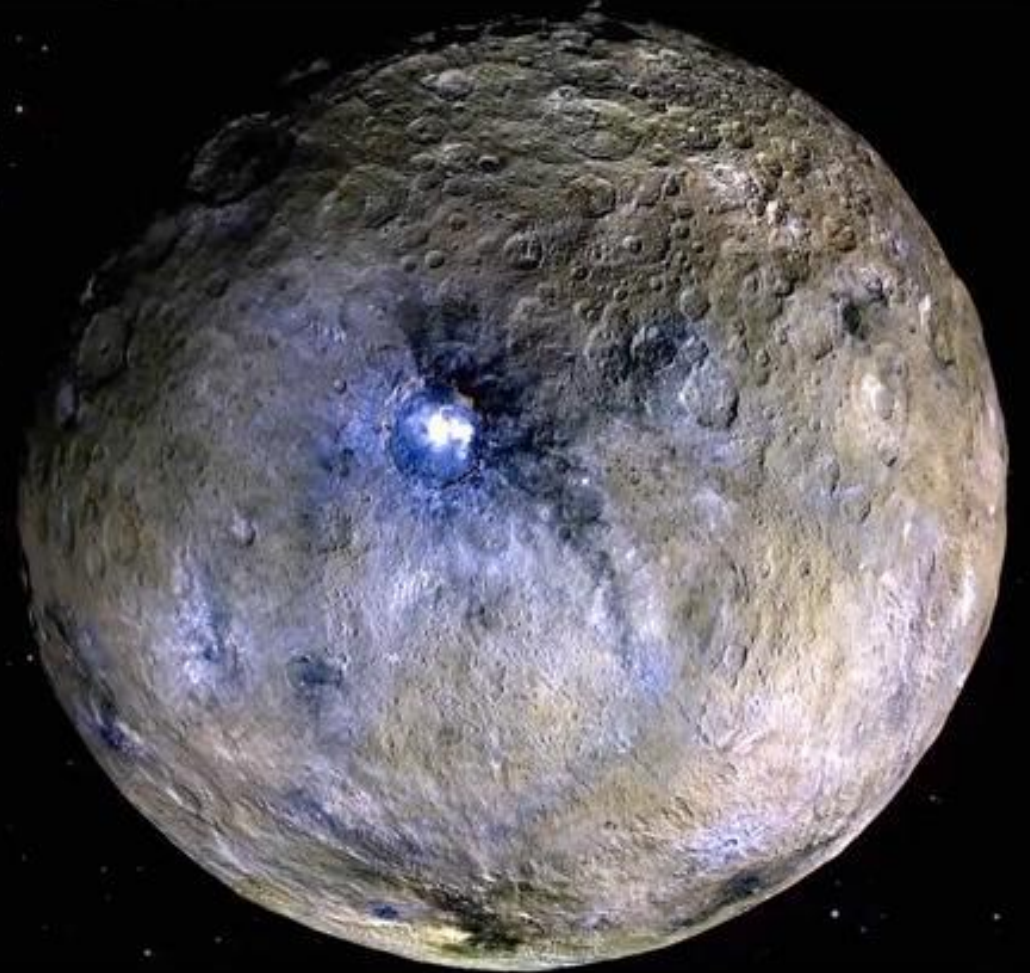
# Asteroidi: ricchi in acqua ?

Gli asteroidi si trovano tra Marte e Giove.  
Sono stati ritenuti a lungo dei grossi «sassi»  
privi di acqua, ma recenti scoperte hanno  
indicato una diversa composizione



# Asteroidi con segni di ghiaccio/acqua

- La zona più esterna della fascia degli asteroidi è ricca di oggetti con segni di presenza di acqua.
- Il più emblematico è Cerere, il corpo più grande della zona degli asteroidi, che contiene circa il 40% di acqua in volume.





# Hanno portato loro l'acqua sulla terra ?

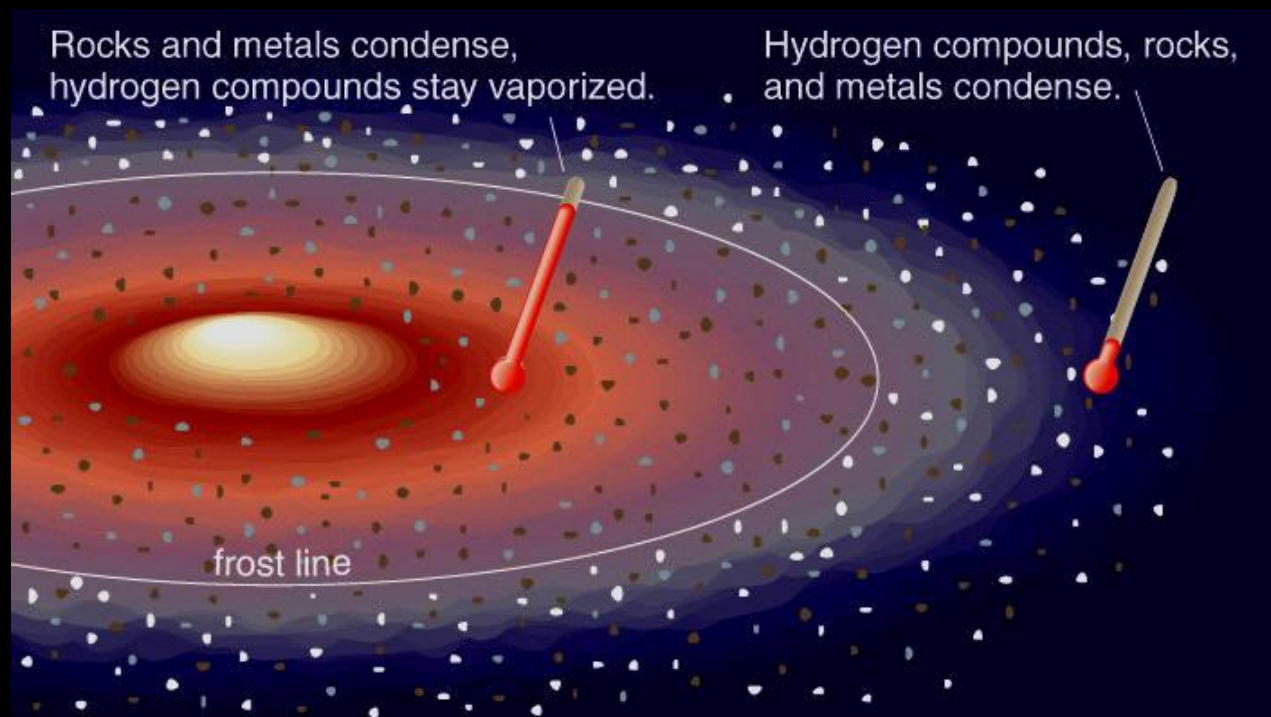
- Gli scienziati nel corso degli anni hanno ipotizzato che comete e condriti carbonacee si siano originate oltre il pianeta Giove, forse anche più lontano, e che abbiamo potenzialmente trasportato carbonio, azoto e acqua sulla **Terra**.
- Analizzando la **composizione isotopica** in delle **condriti carbonacee** queste risultano affini all'acqua degli oceani terrestri.



Inoltre, studi di dinamica del sistemi solare suggeriscono che c'è stato un periodo di tempo di circa 3,9 miliardi di anni fa durante il quale la Terra sarebbe stata colpita da moltissimi asteroidi ricchi in acqua.

# Oltre la snow line

- Qui le temperature sono tali da avere facilmente acqua condensata e i pianeti e satelliti sono dominati dalla presenza di acqua
- Satelliti ghiacciati dei pianeti giganti sono ricchi di acqua tranne qualche eccezione
- Ci sono poi gli oggetti della fascia di Kuiper (Trans-Neptunian)



# I principali satelliti ghiacciati





# Large Trans-Neptunian Objects (> 1000 km in Diameter) and Their Satellites



Charon

Pluto



Dysnomia

Eris



S/2015 (136472) 1

Makemake



S/2010 (225088) 1

2007 OR<sub>10</sub>



Namaka

Hi'iaka

Haumea

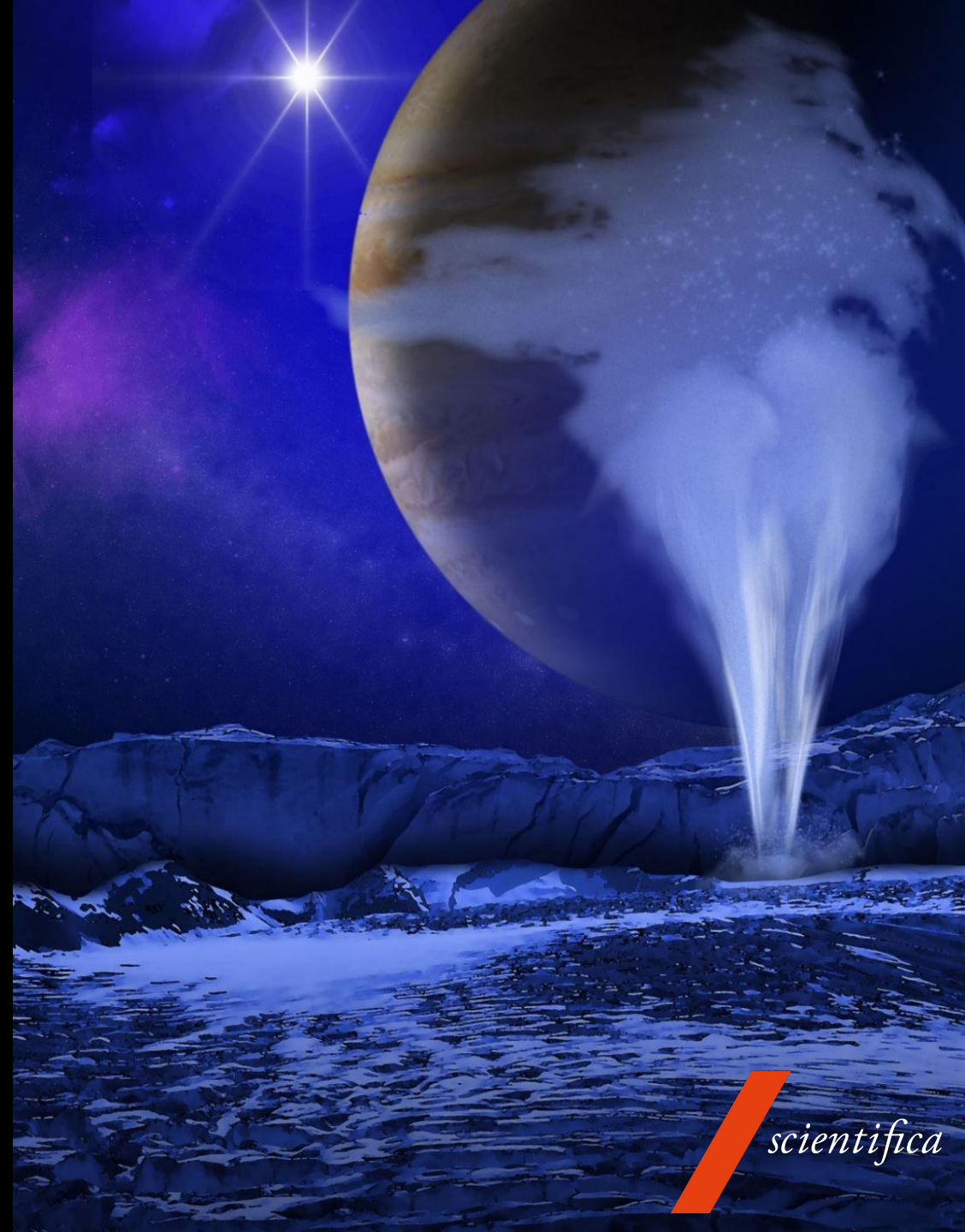


Weywot

Quaoar

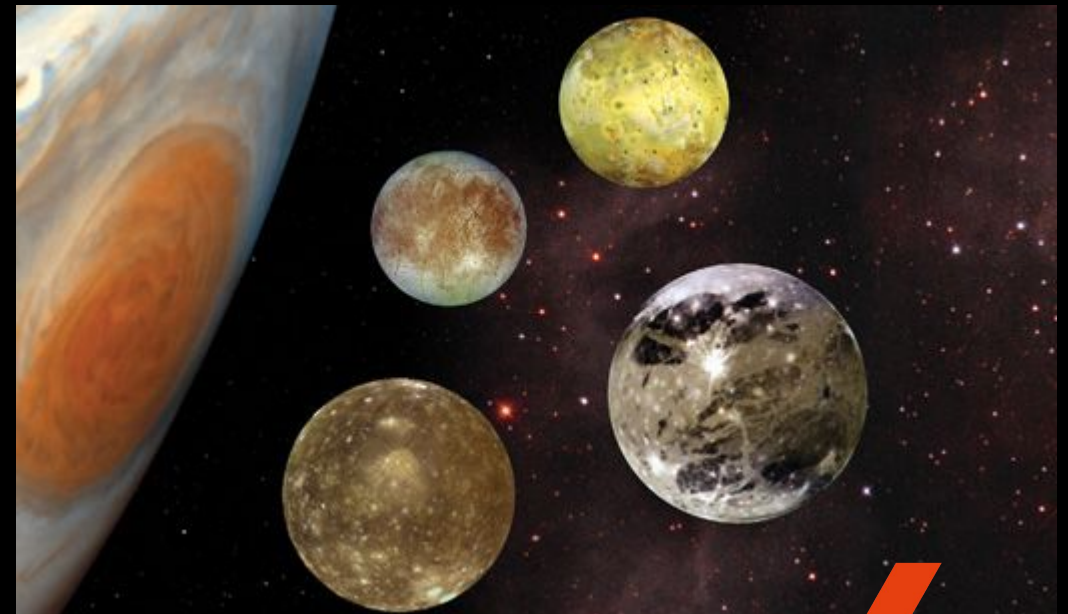
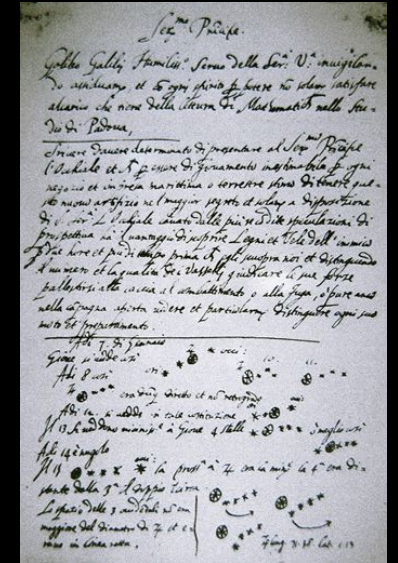
# I mondi oceanici del sistema solare esterno

Da qualche anno è chiara l'evidenza di oceani di acqua liquida in alcuni corpi del sistema solare esterno. Vediamo quali, perché l'acqua può essere liquida e le implicazioni.



# I più vicini alla snow line: I satelliti ghiacciati di Giove

- Giove ha circa 70 satelliti, i più grandi e noti sono i Galileiani (scoperti da Galileo): Io, Europa, Ganimede e Callisto
- Tranne Io, gli altri sono costituiti in larga parte da acqua (ghiacciata e liquida)

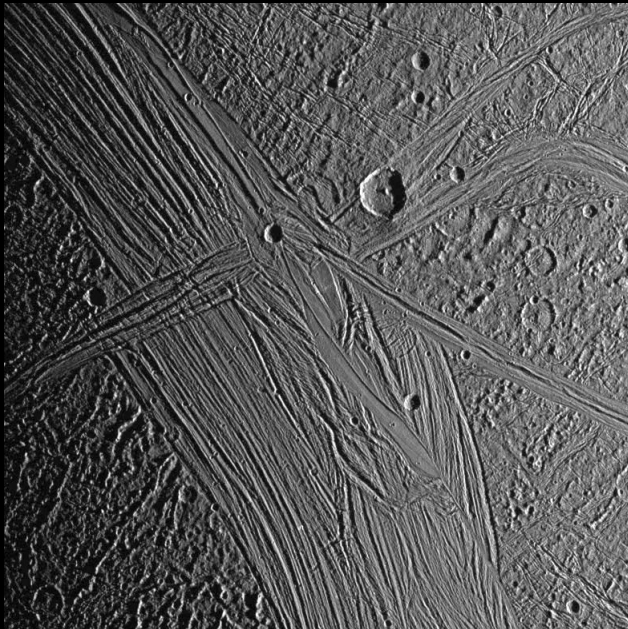




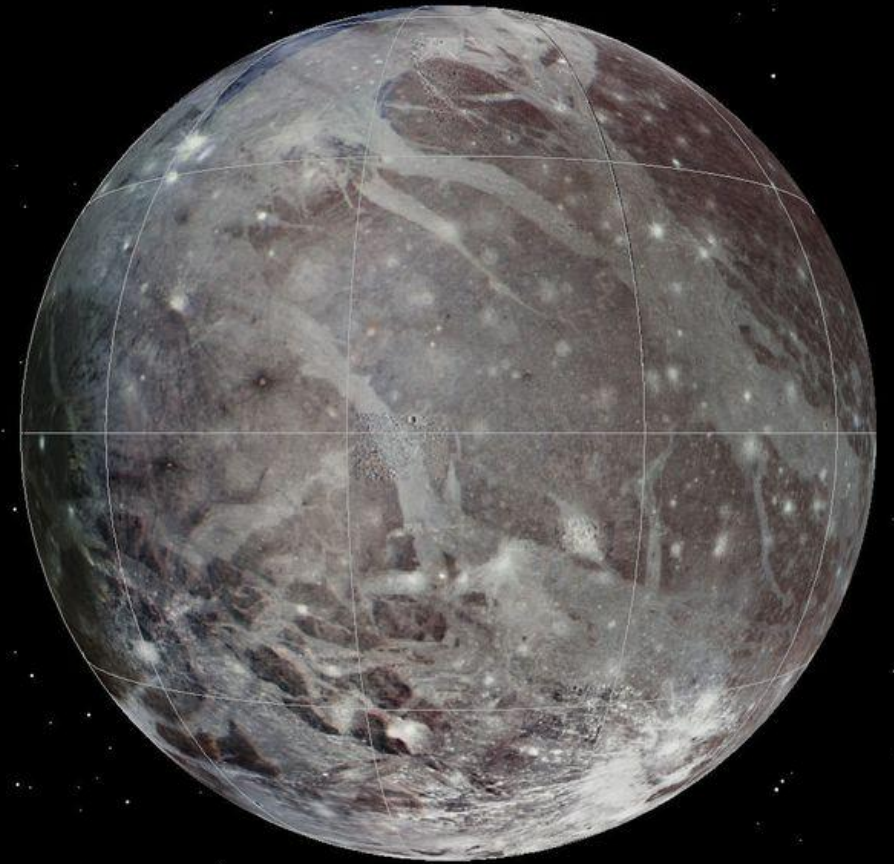
# Acqua liquida sotto la superficie-evidenze osservative

Ganimede

- La presenza di ghiaccio in superficie è molto chiara ma ci sono anche indizi per l'esistenza di un oceano sotto la superficie



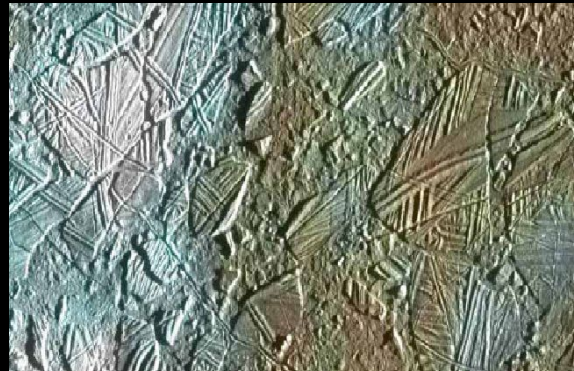
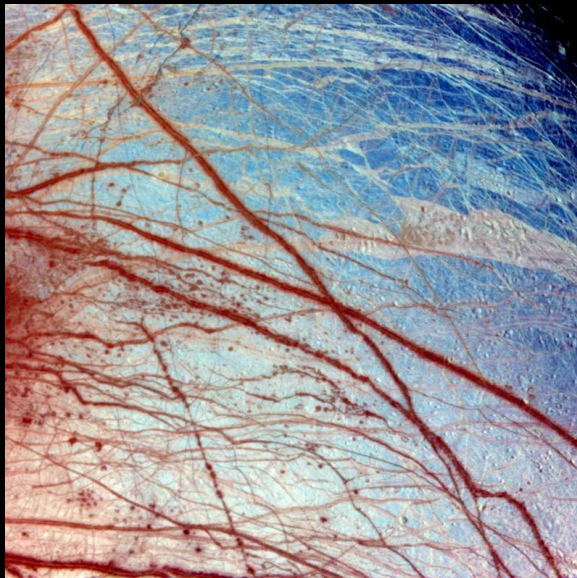
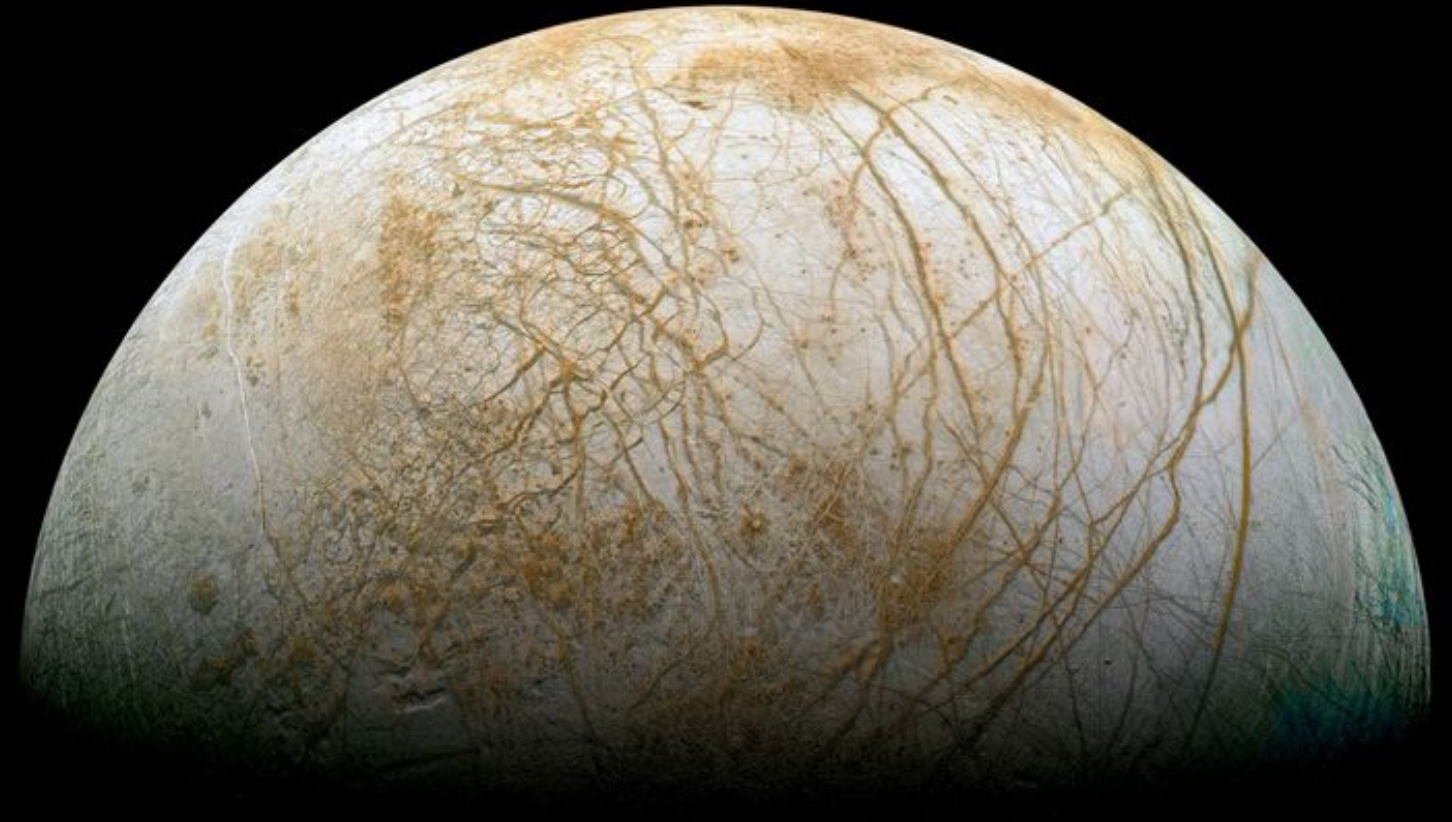
*Ghiaccio in superficie formatosi molto di recente (assenza di crateri)*





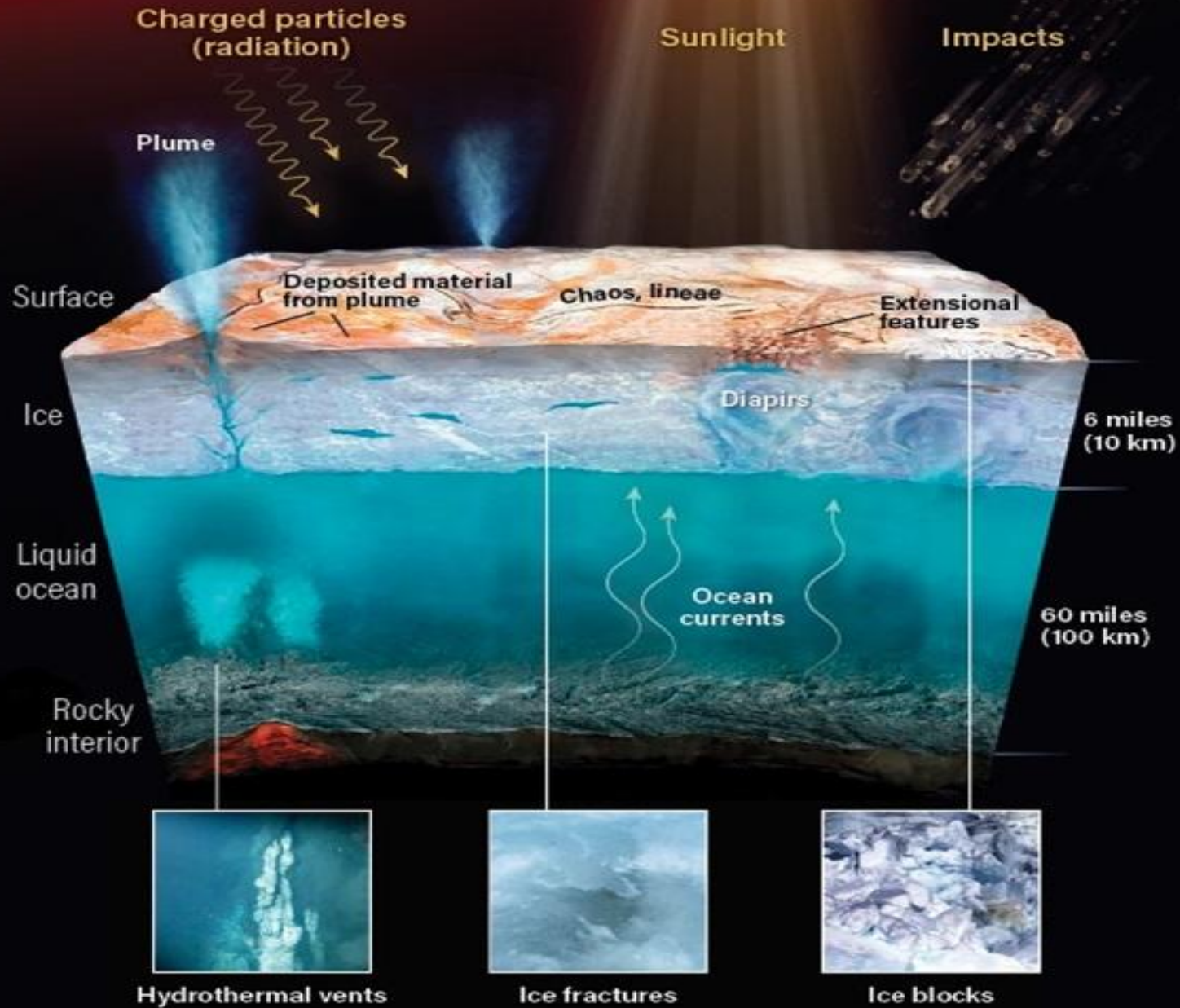
# Europa

Ci sono diverse caratteristiche che indicano la presenza di un oceano d'acqua sotto la sua crosta di ghiaccio. Fratture simili a quelle del pack artico che implicano un fluido su cui il ghiaccio in superficie si muove





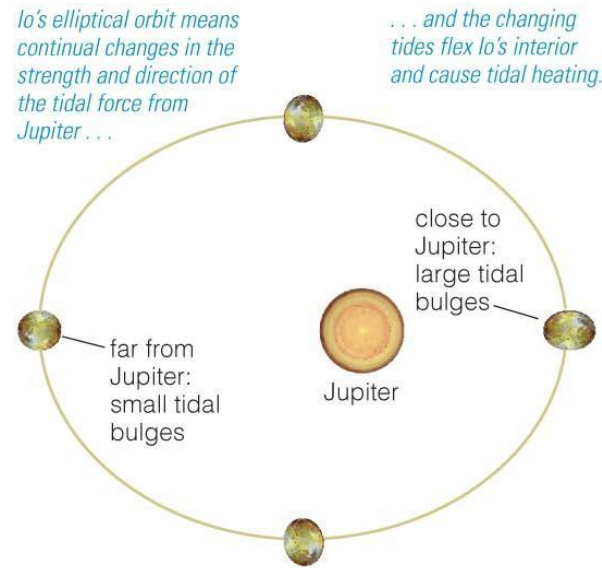
# A PEEK INSIDE EUROPA





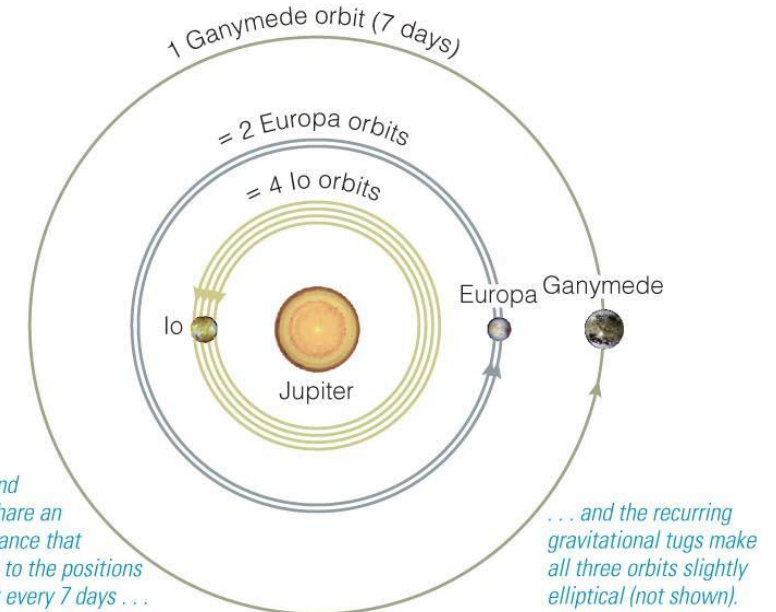
# Perchè l'acqua può essere liquida anche oltre la snow line ?

- Perchè l'acqua sia liquida abbiamo bisogno di una fonte di calore che porti l'acqua a temperature vicino 0°.
- Nel caso dei satelliti di Giove e Saturno, il riscaldamento è dovuto alle maree gravitazionali



**a** Tidal heating arises because Io's elliptical orbit (exaggerated in this diagram) causes varying tides.

Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

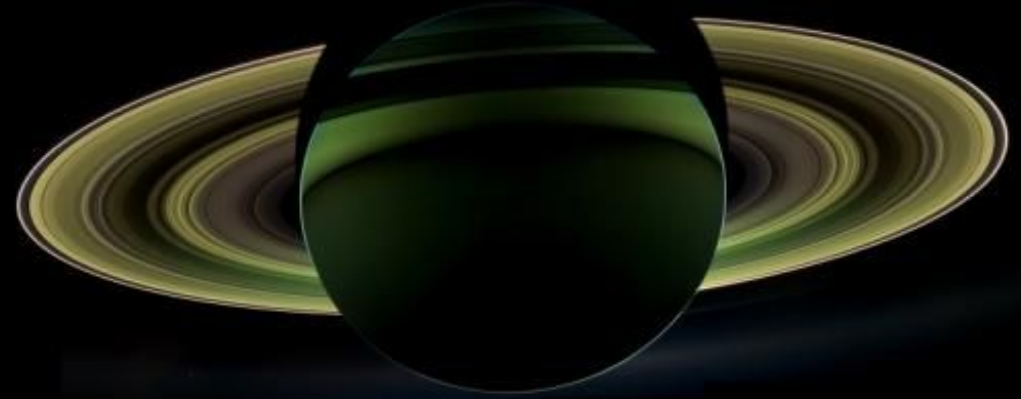
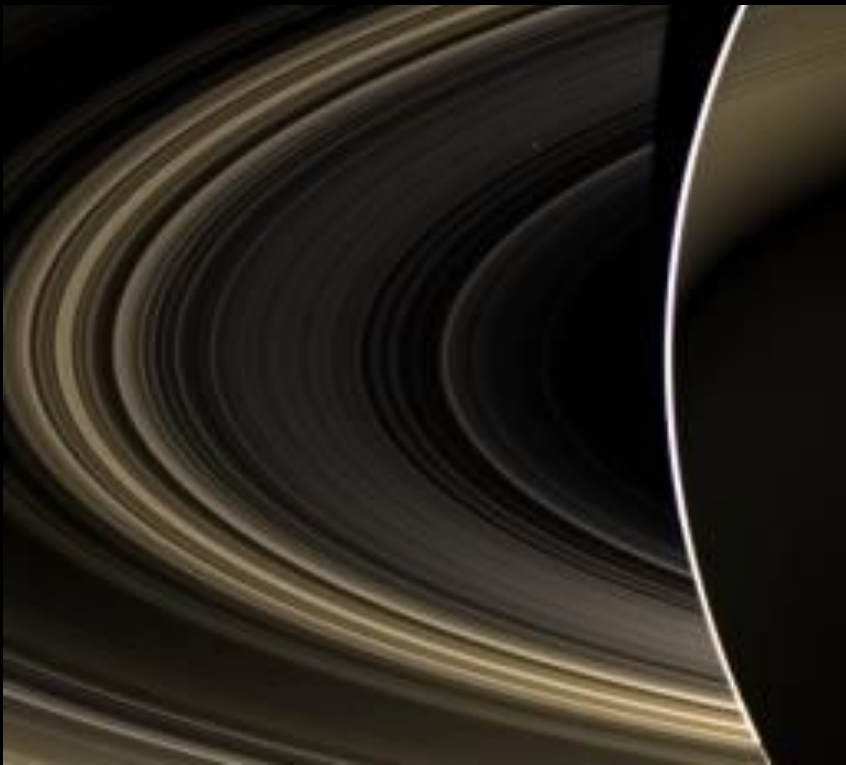


**b** Io's orbit is elliptical because of the orbital resonance it shares with Europa and Ganymede.

# Il Sistema di Saturno




# Saturno: acqua, acqua, acqua



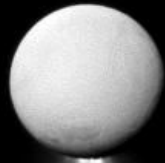
- Saturno con il suo sistema di anelli e di satelliti mostra molte forme diverse di ghiaccio
- Troviamo ghiaccio di acqua tra gli anelli e sulle superfici dei satelliti
- Ma ci sono anche dei geysers di ghiaccio
- Concentriamoci sul più interessante!



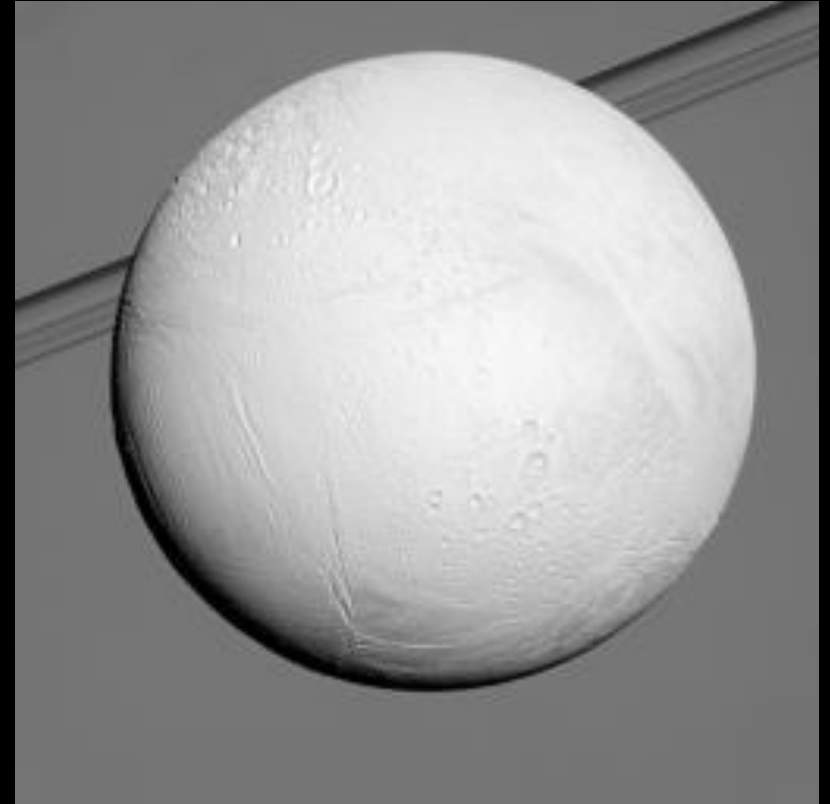


**Encelado:  
l'oggetto più brillante  
del sistema solare**

# Perché Encelado è brillante ?



Il ghiaccio «vecchio» diventa subito scuro.  
Bastano poche tracce di polvere per scurire il ghiaccio.  
Ghiaccio brillante indica ghiaccio fresco, generato di continuo da qualche sorgente.  
La missione Cassini ha osservato dei geyser di ghiaccio provenienti da Encelado

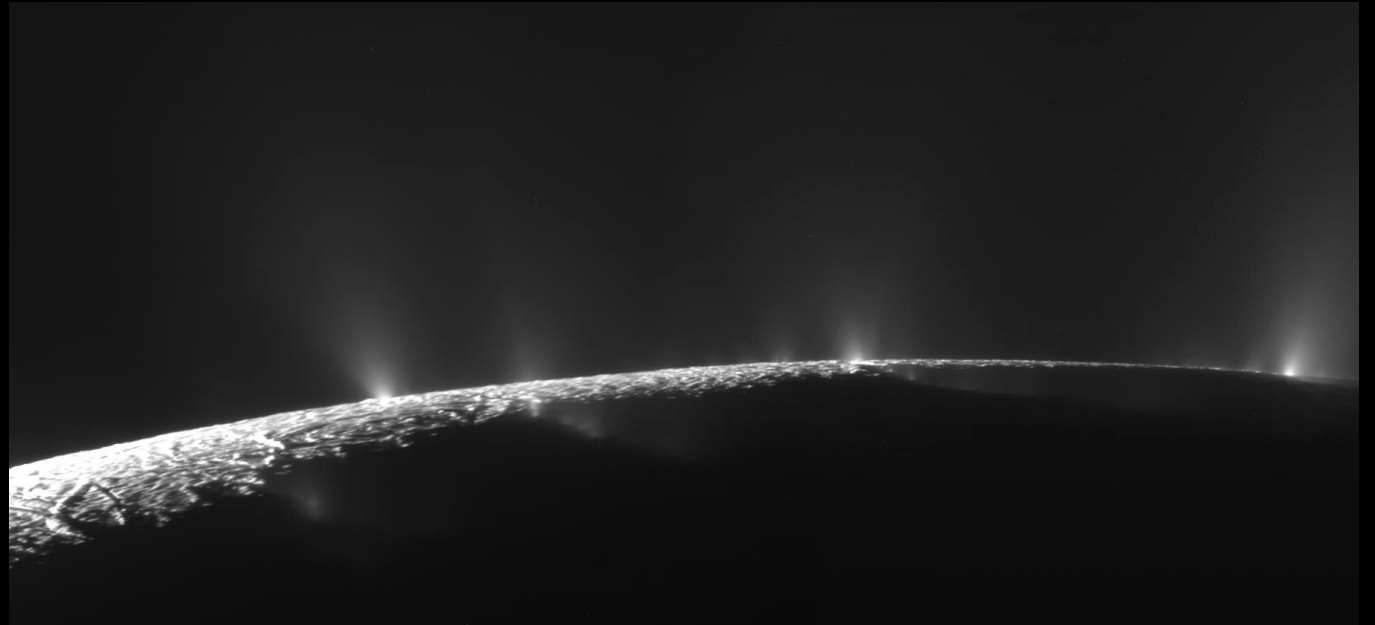


# I geyser di Encelado



# C'è un oceano sotto la sua superficie?

- Il getto è per lo più vapore acqueo, con minuscole particelle di ghiaccio e di altre molecole gassose mescolato (ad esempio CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)
- Il pennacchio fornisce particelle di ghiaccio a uno degli anelli di Saturno
- Alcune particelle di ghiaccio contengono sale, il che potrebbe indicare che provengano da un oceano in profondità sotto la crosta ghiacciata



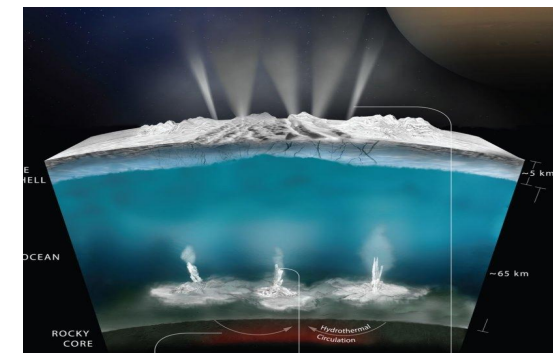
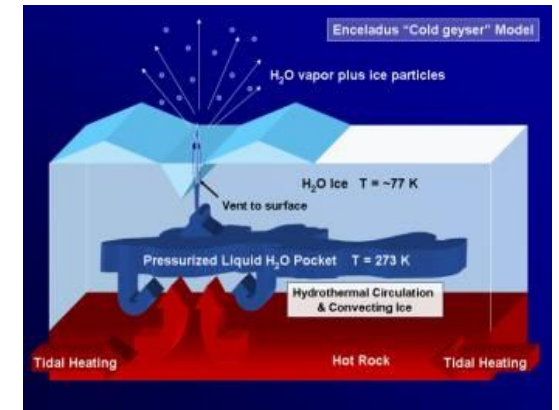
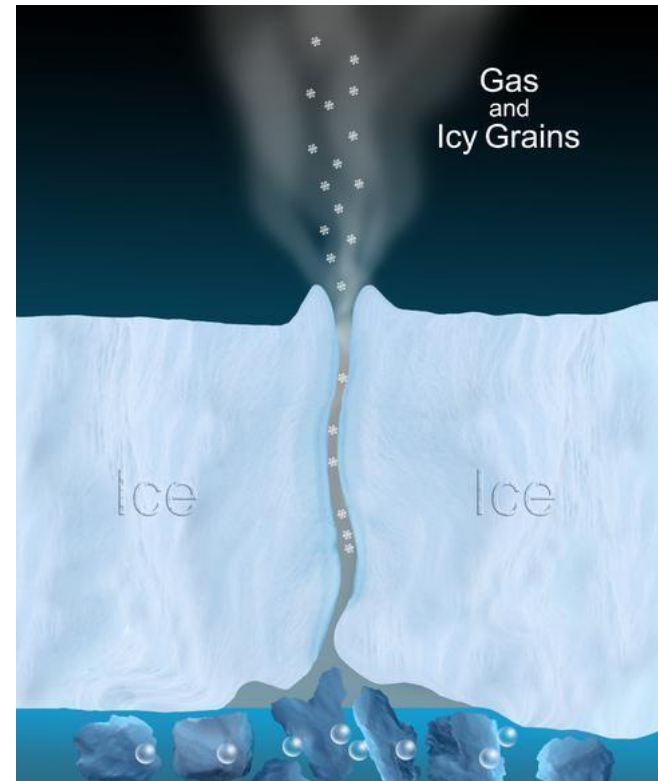
*Image mosaic of Enceladus taken by Cassini, showing individual plumes of gas and ice escaping from the surface. The plumes extend 100's of km into space from the ~500 km diameter moon.*

# Come si alimenta il geyser?

I getti possono essere materiale che fuoriesce dalle fessure superficiali da un oceano salato interno o lago

Alternativamente, ghiaccio può evaporare lungo fessure e si può avere fuoriuscita di vapore acqueo e di particelle ghiacciate

Molti scienziati a trovare il modello di oceano salato più convincente, ma altri preferiscono combinazioni di spiegazioni alternative



# I pianeti più esterni: Urano



*I maggiori satelliti di Urano mostrano ghiaccio di acqua sulla superficie ma la loro densità indica anche una percentuale elevata di roccia*



# I satelliti di Nettuno



Triton



Proteo



Larissa



Nereide



Galatee



Naiade



Despina

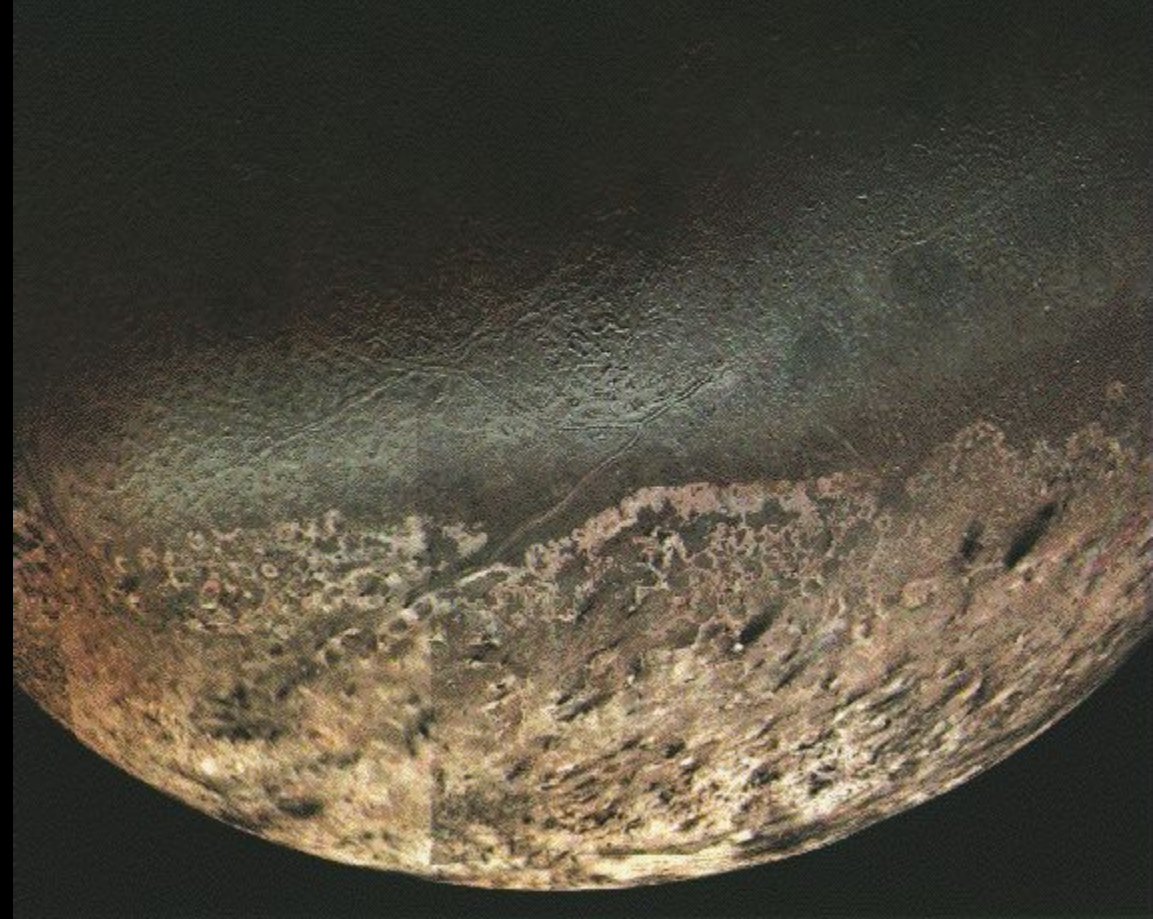
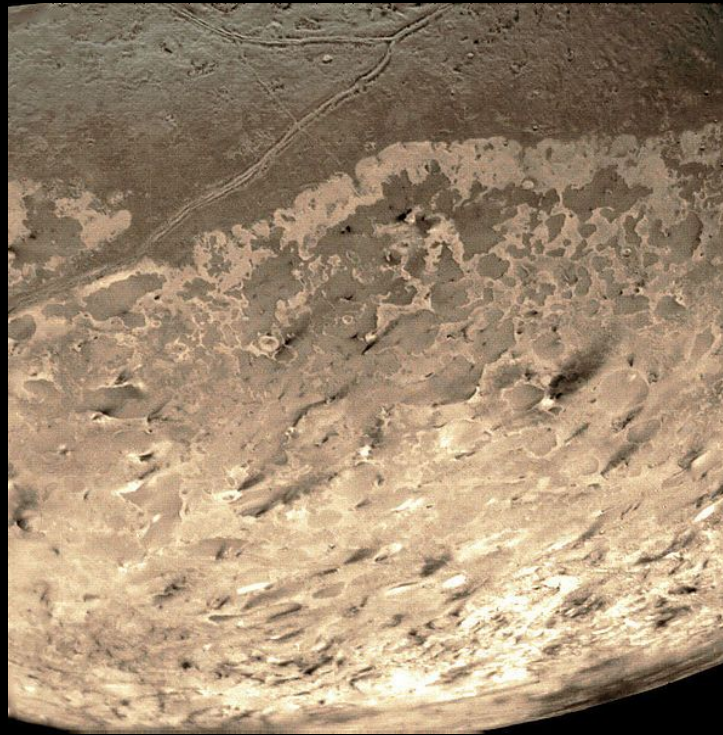


Thalassa

*Les satellites de Neptune*

# Tritone

- Tritone ha ghiaccio di acqua sulla superficie
- Ha piccoli geysers attivi





# Mondi Oceanici

- I dati a nostra disposizione indicano che gli oceani sotto le superfici ghiacciate dei corpi del sistema solare esterno sono quasi una normalità e non un'eccezione.
- L'oceano è un ambiente potenzialmente abitabile del sistema solare esterno. L'acqua è essenziale per la vita, serve come un mezzo perfetto per sciogliere sostanze nutritive e per il trasporto di prodotti chimici.
- Ambienti favorevoli per la chimica della vita (o anche la vita stessa, in forma microbica) potrebbero esistere in questi oceani.



ISSN: 1531-1074

Volume 19, Number 1 January 2019

# Astrobiology

The NASA Roadmap to Ocean Worlds



Mary Ann Liebert, Inc.  publishers  
[www.liebertpub.com/ast](http://www.liebertpub.com/ast)

 **MONDADORI**  
EDUCATION

**Rizzoli**  
EDUCATION



# FORMAZIONE SU MISURA



[WWW.FORMAZIONESUMISURA.IT](http://WWW.FORMAZIONESUMISURA.IT)





# *scientifica*

*presenta le LEZIONI DI SCIENZA*  
*gli eventi di approfondimento sulle materie scientifiche*

 **MONDADORI**  
EDUCATION