

Asteroidi e comete: le borracce del Sistema solare?

18 Aprile 2013



Conferenze alla Specola

Bedogni Roberto

INAF Osservatorio Astronomico di Bologna

<http://www.bo.astro.it/bedogni>

email: roberto.bedogni@oabo.inaf.it

Accadueo

Acqua-ghiaccio-vapore



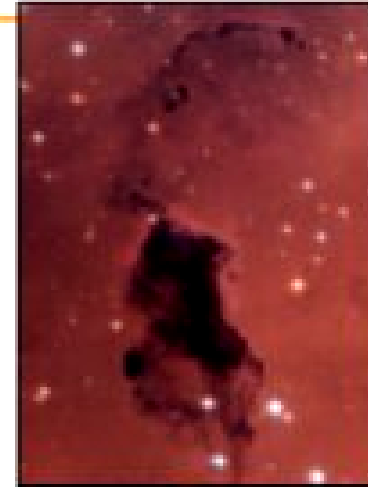
Acqua

Caratteristiche generali	
Formula molecolare	H ₂ O
Massa molecolare (u)	18,0153 g/mol
Aspetto	liquido incolore
Proprietà chimico-fisiche	
Indice di rifrazione	1,3330
Temperatura di fusione	0,00 °C (273,15 K)
$\Delta_{\text{fus}}H^0$ (kJ·mol ⁻¹)	6 (a 0,00 °C)
$\Delta_{\text{fus}}S^0$ (J·K ⁻¹ mol ⁻¹)	21,9 (a 0,00 °C)
Temperatura di ebollizione	100,00 °C (373,15 K)
$\Delta_{\text{eb}}H^0$ (kJ·mol ⁻¹)	40,7
Punto triplo	273,16 K (0,01 °C)-611,73 Pa
Punto critico	647 K (374 °C)-2,2064 × 10 ⁷ Pa
Tensione di vapore (Pa) a 293,15 K	2338,54
Sistema cristallino	esagonale (vedi ghiaccio)
Viscosità dinamica (mPa.s a 20 °C)	1

Perché si trova l'acqua ?
Elementi ed abbondanze

La nucleosintesi primordiale

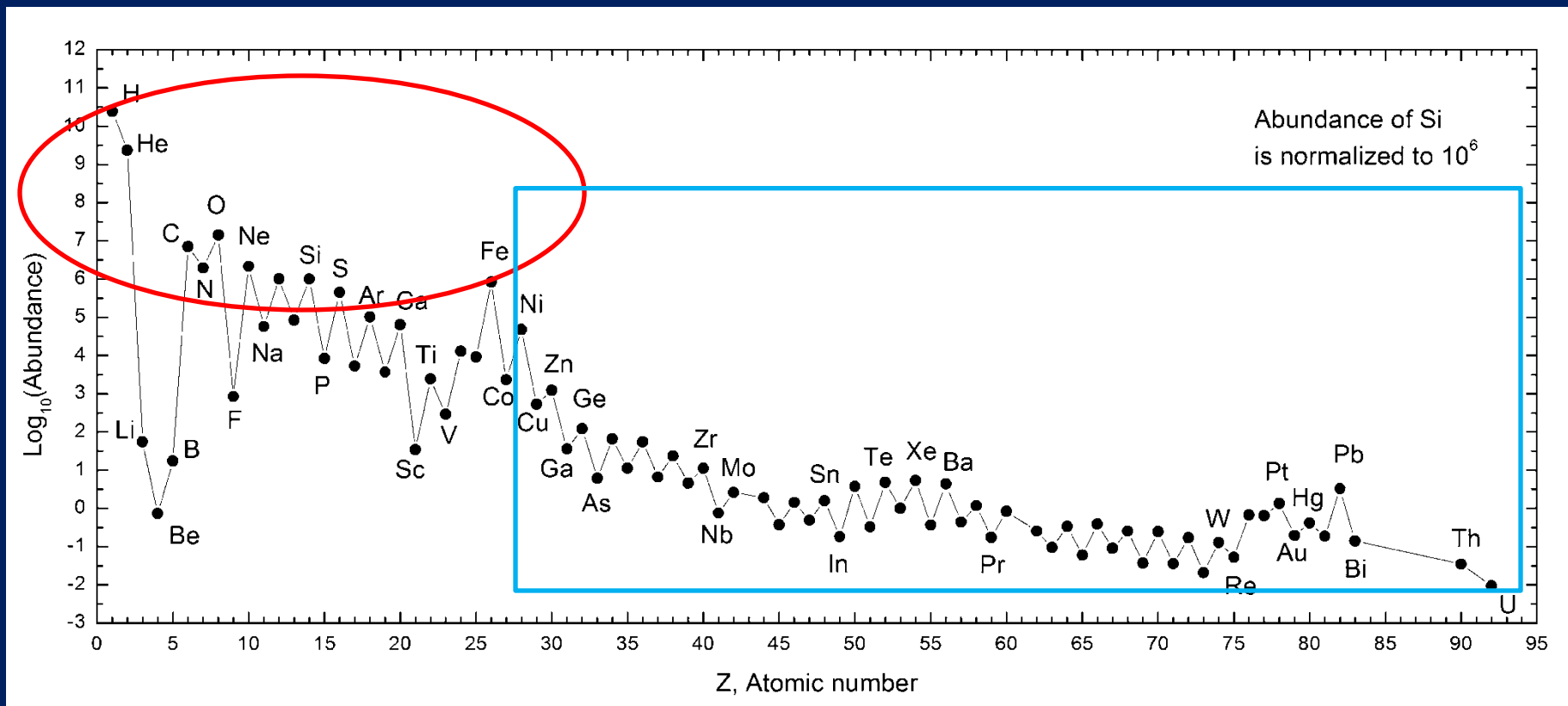
- $\text{H} = 75\%$
- ${}^4\text{He} = 24\%$
- ${}^2\text{H} = 0,1\%$
- ${}^3\text{He} = 0,01\%$
- ${}^7\text{Li} = 0,00000001\%$



Quando l'universo si è raffreddato (circa 3 minuti), i neutroni si sono trasformati in protoni ed elettroni oppure si sono combinati con i protoni nel deuterio, un isotopo di **idrogeno**. In seguito la maggior parte del **deuterio** si è combinata in **elio** e si è prodotto del **litio**, finché la diminuzione della temperatura e della densità resero altre fusioni improbabili.

Quindi nei primi tre minuti dopo il Big Bang si sono formati elementi leggeri (la cosiddetta **nucleosintesi primordiale**), la cui abbondanza finale in percentuale dipende dal rapporto tra fotoni e barioni (neutroni e protoni) e dal numero di specie di neutrini.

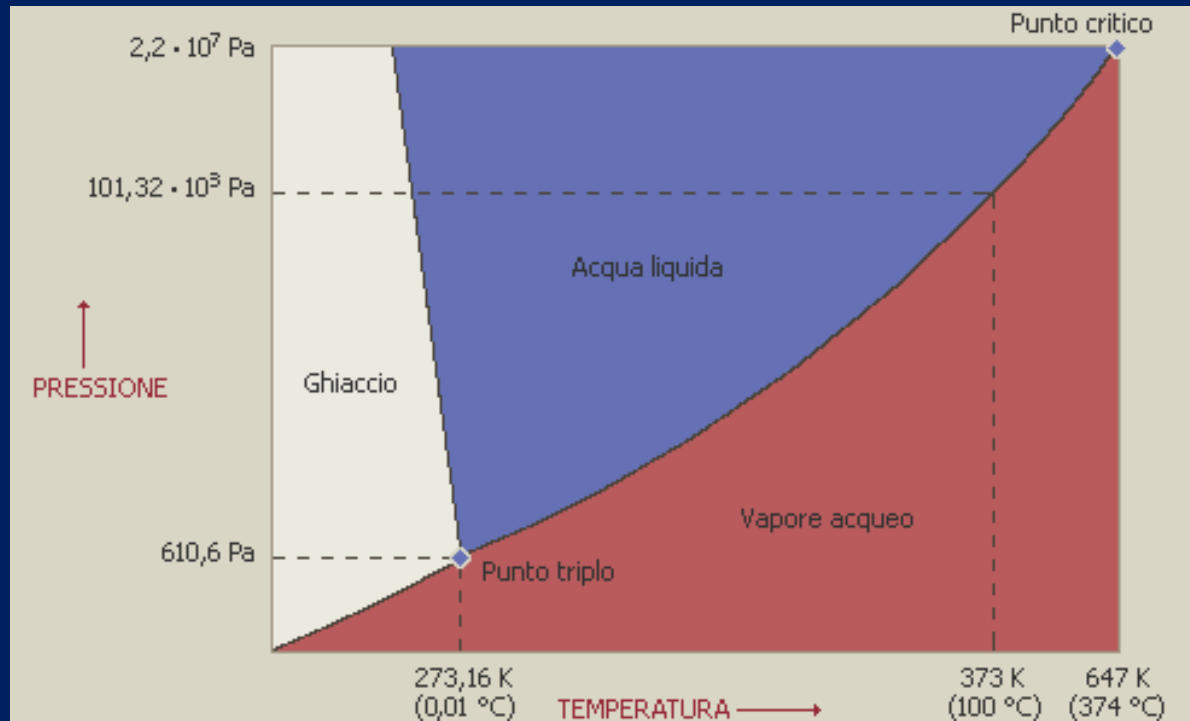
Le abbondanze degli elementi



Le abbondanze previste dalla teoria sono in buon accordo con le osservazioni, che mostrano come l'elemento più diffuso nell'universo sia l'idrogeno (circa il 75%), seguito dall'elio (circa il 24%), mentre gli elementi più pesanti metalli rappresentano soltanto una frazione trascurabile del totale.

NB il più abbondante tra i metalli è l'ossigeno O

Acqua - diagramma di stato

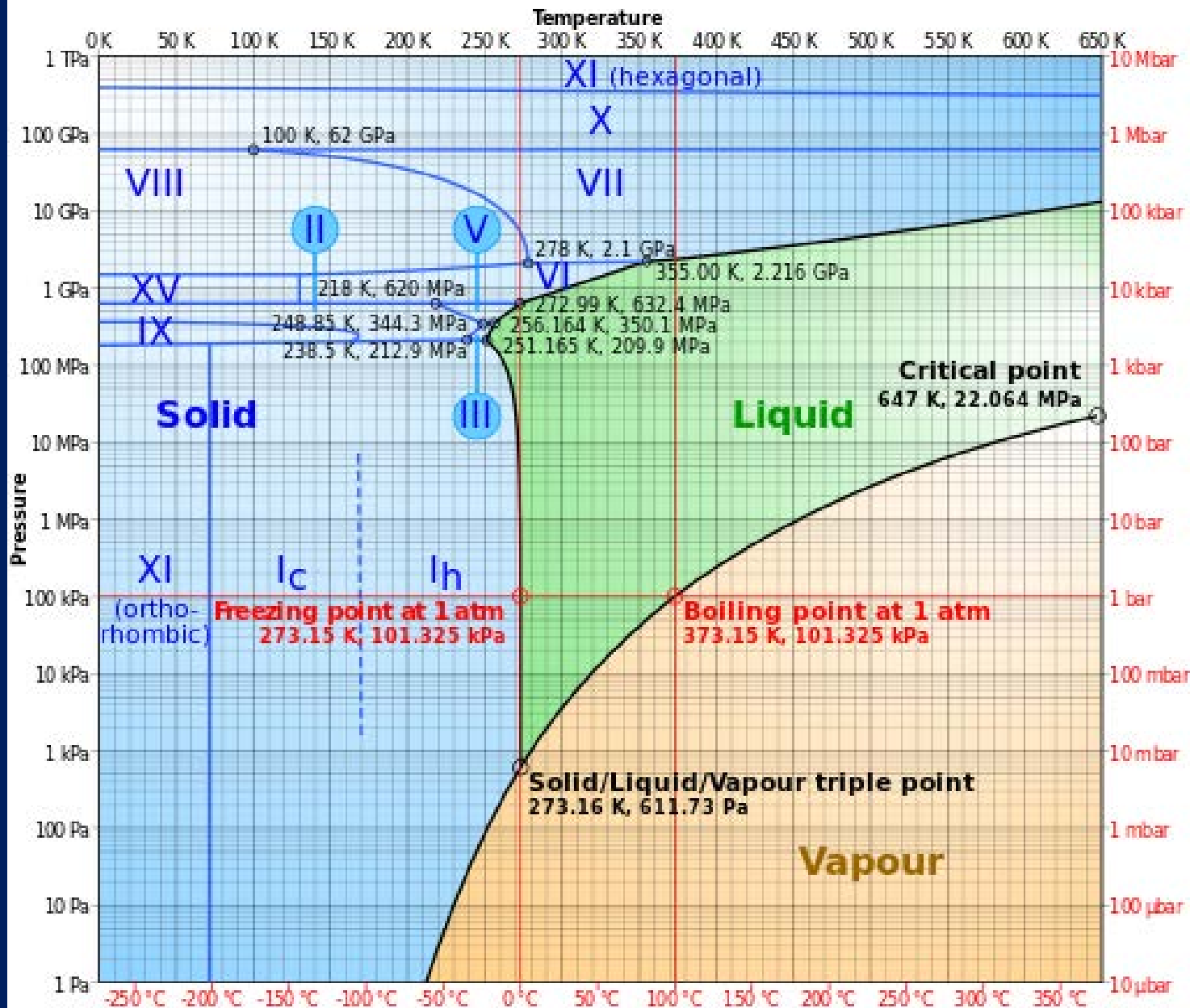


NB il punto triplo dell'acqua è a $T=273,17 \text{ °K}$ $P=0,006 \text{ atm}$

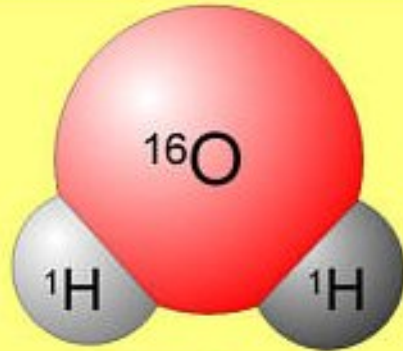
Queste condizioni sono poco distanti dalla temperatura media atmosferica rende **la Terra un pianeta in cui è prevalente lo stato liquido dell'acqua**

Al contrario nello spazio l'acqua, pur abbondante, si trova soprattutto come solido o vapore

Acqua - diagramma di stato

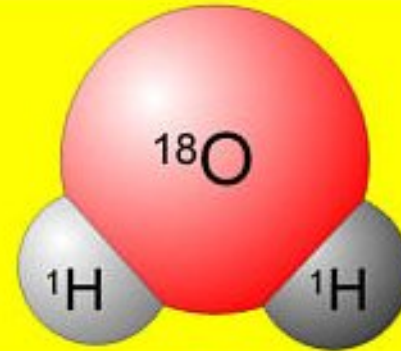


Acqua - componenti isotopiche



$1+1+16 = 18$
Peso molecolare
dell'acqua con ^{16}O

99,8 % dell'acqua
evapora più
facilmente,
precipita meno
facilmente



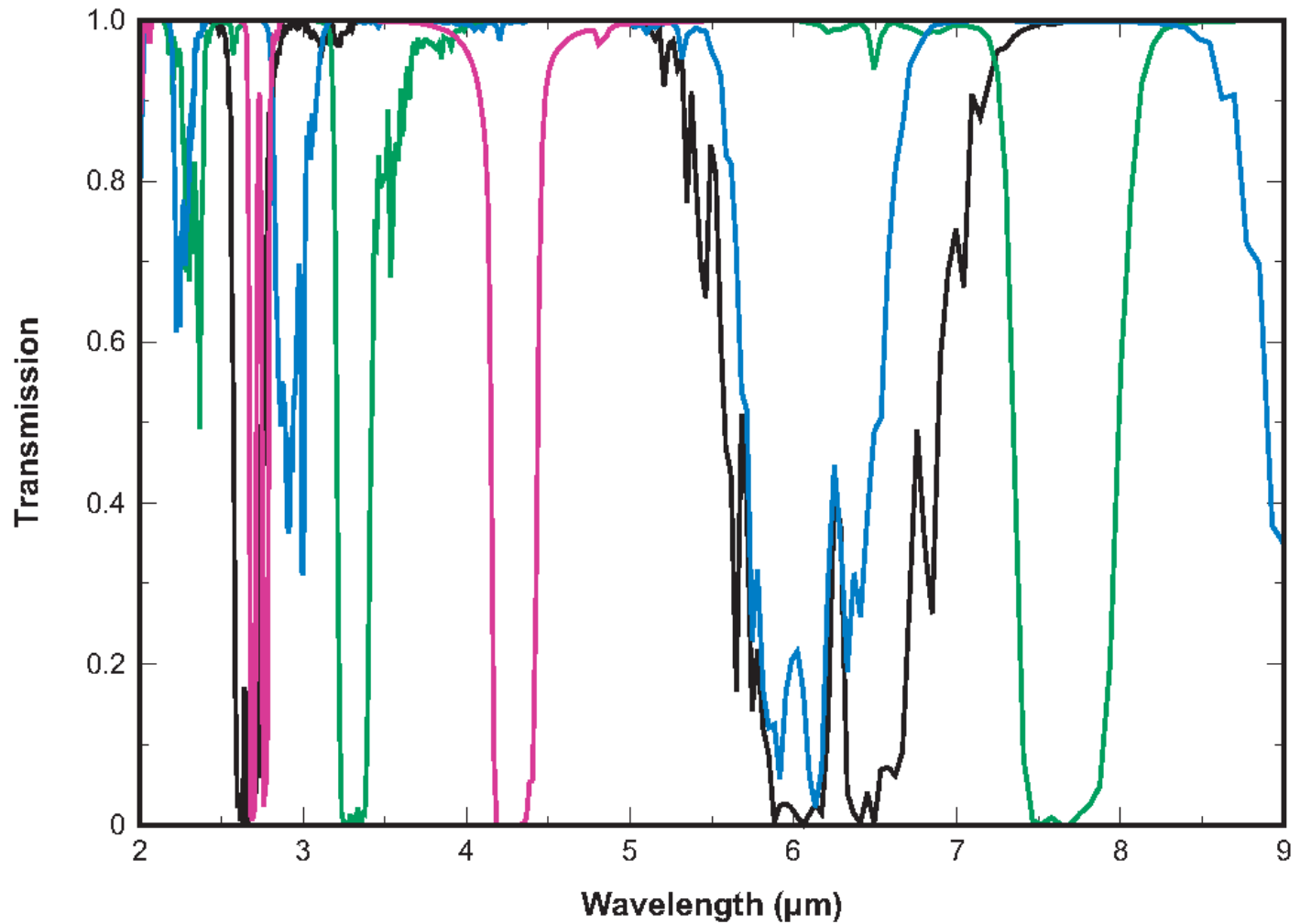
$1+1+18 = 20$
Peso molecolare
dell'acqua con ^{18}O

0,2 % dell'acqua
11% più pesante
evapora meno
facilmente,
precipita più
facilmente

Atmosfera terrestre-acqua, metano, ammoniaca e CO₂

Figure 1

Synthetic transmission spectra of molecular gases in the IR range, calculated at standard temperature and pressure conditions for a column density of 10 cm-am. Black, H₂O; green, CH₄; blue, NH₃; red, CO₂.



Acqua nel mezzo interstellare

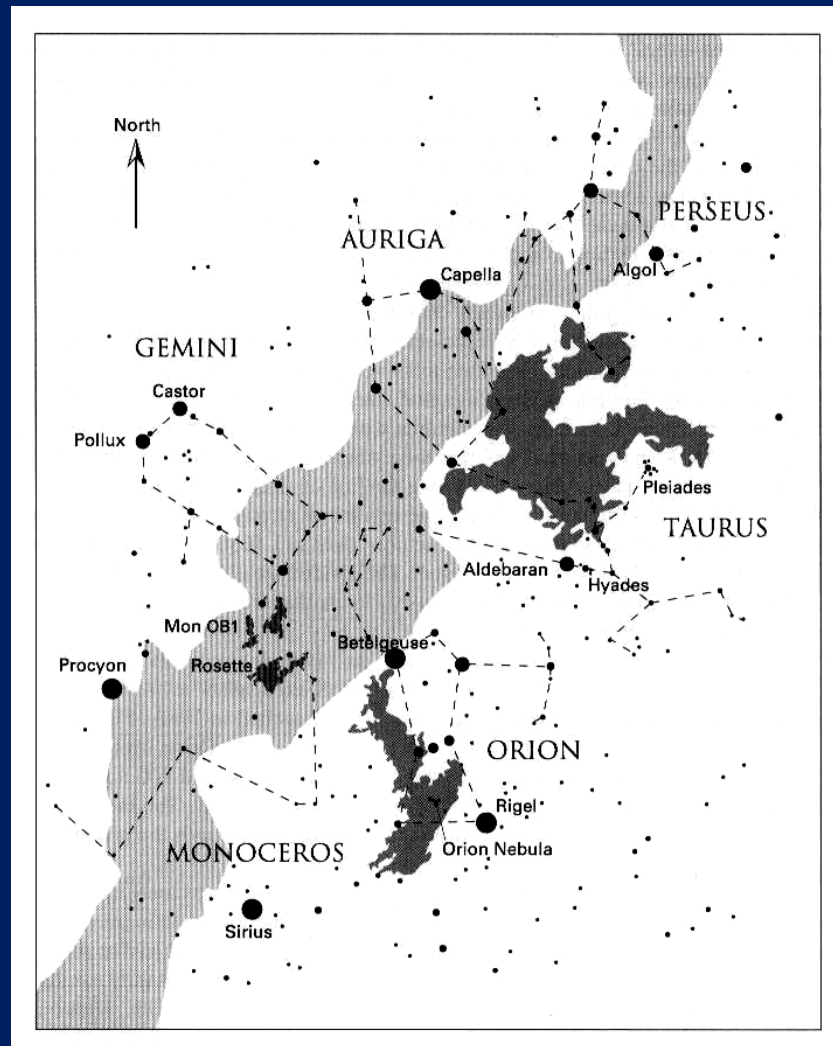


Nel mezzo interstellare diffuso, lo ione H_3^+ si forma a causa della ionizzazione di H ed H_2 prodotta dai raggi cosmici.

E quindi reagisce con gli atomi di ossigeno O per formare OH^+ e H_2 , ed infine H_2O^+ ed H.

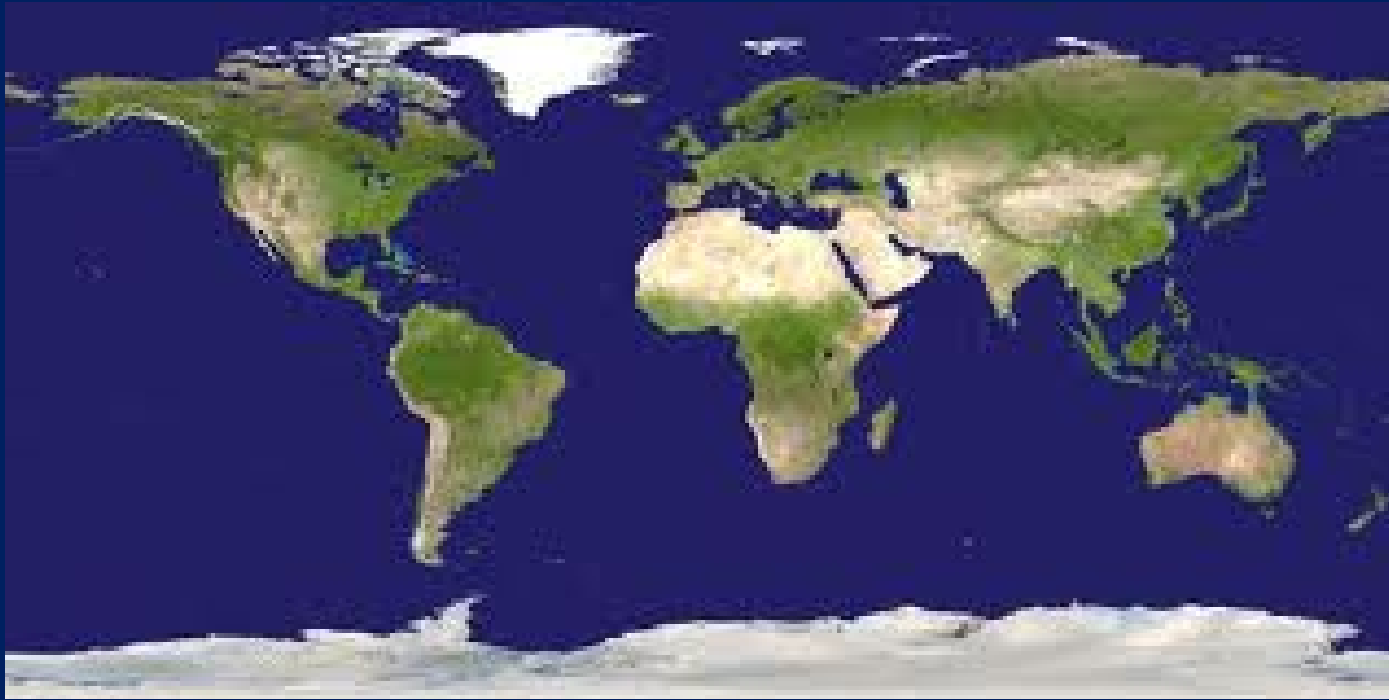
Lo ione H_2O^+ reagisce con H_2 formando H_3O^+ , che a sua volta reagisce con gli elettroni liberi formando il radicale OH producendo alla fine la molecola neutra di H_2O .

Acqua nelle nubi molecolari -nube protoplanetaria



Nelle **nubi molecolari dense**, in cui la temperatura è molto bassa, l'acqua di può formare direttamente come ghiaccio sulla superficie dei grani interstellari di carbonio C e silicio Si.

Acqua sulla Terra



Sulla Terra l'acqua risulta da tre reazioni chimiche

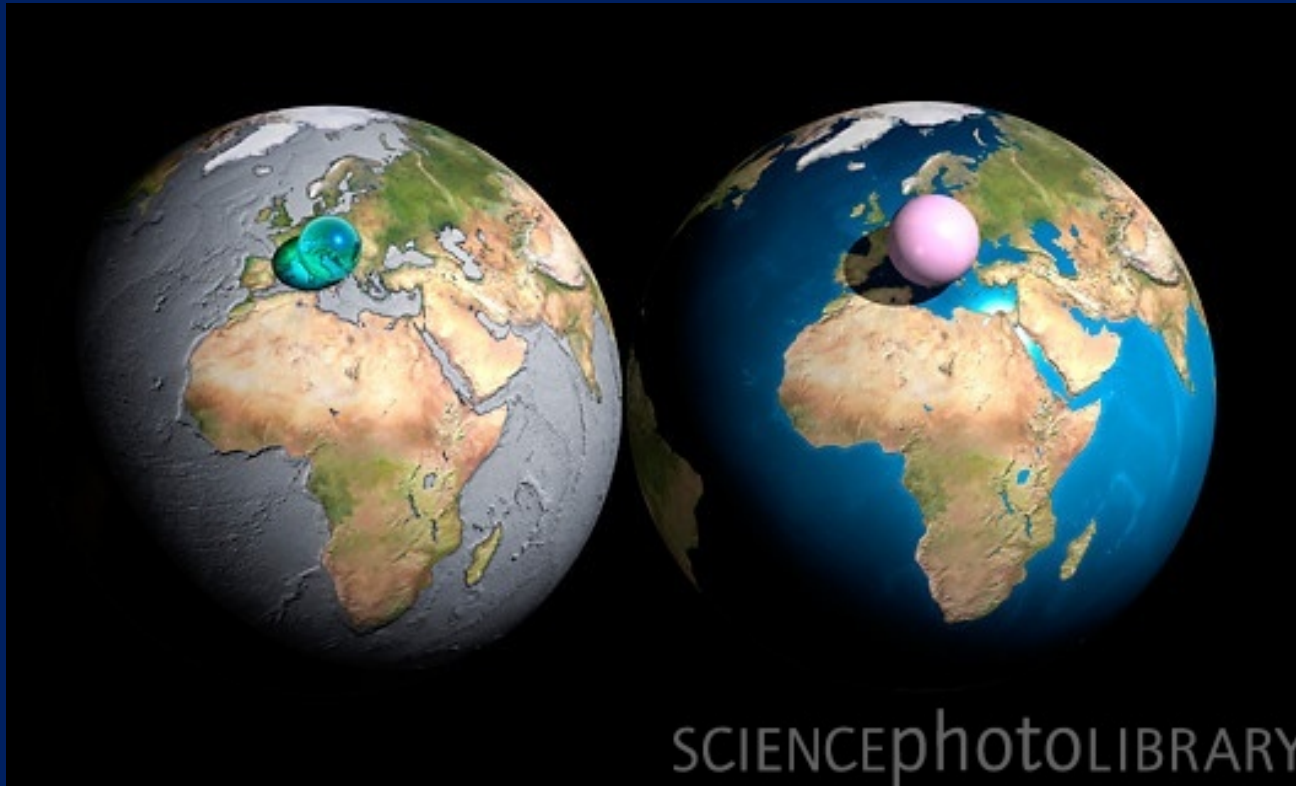


Questa sequenza di reazioni richiede un grande budget energetico pari a:

-219 kcal molecole⁻¹.

La formazione di acqua si determina tra due volumi di H ed uno di O e può avvenire sia spontaneamente che in modo esplosivo

Terra- acqua ed aria



Acqua: sfera di diametro di 1390 km con un volume di 1,4 miliardi di km^3 da cui $1,4 \cdot 10^{21}$ kg $\sim 0,023$ % della massa terrestre

Aria: sfera di diametro di 1999 km con un peso di 5140 trilioni di tonnellate

Acqua liquida nel Sistema solare



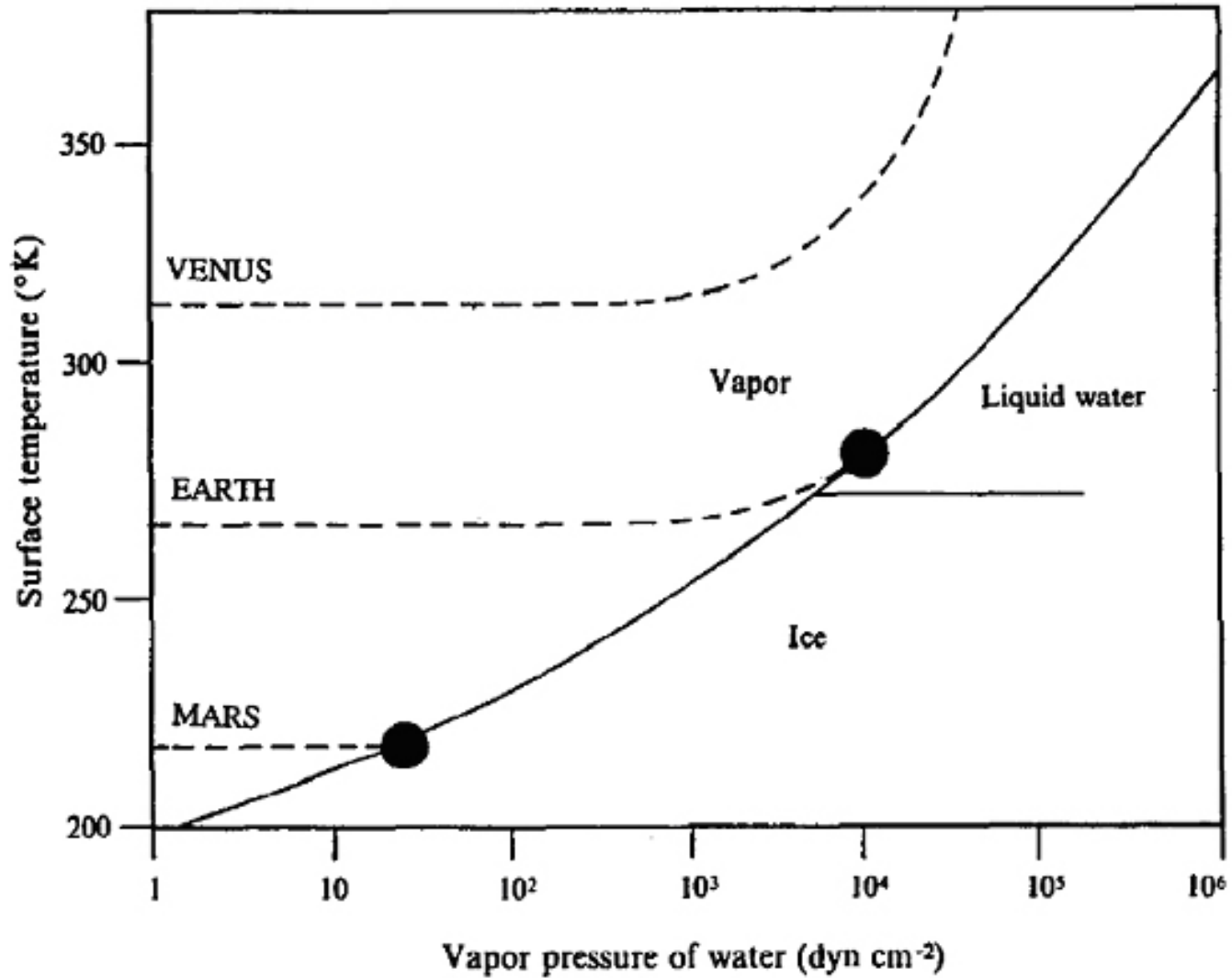
Dove si trova, nel Sistema solare, l'acqua allo stato liquido ??

1. Sotto la superficie- Europa, Cerere, Encelado
2. Sulla superficie-Terra e Marte nella fase primordiale

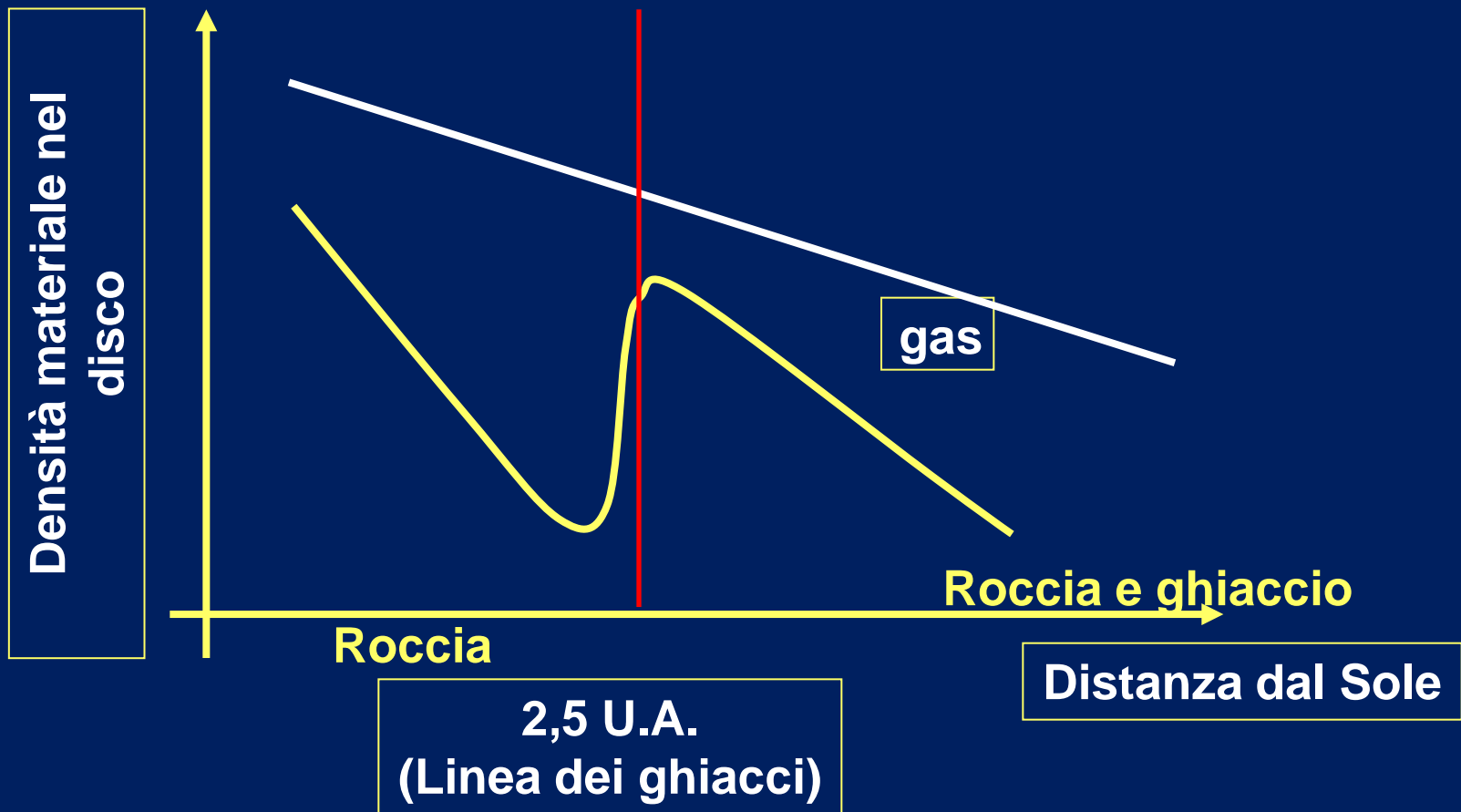
Il volume di acqua presente sulla Terra è stimato in 1 360 000 000 km³; di questi:

- 1 320 000 000 km³ sono acque marine (in maggioranza oceano).
- 25 000 000 km³ sono nei ghiacciai e nelle calotte polari.
- 13 000 000 km³ sono nel suolo, nelle falde acquifere.
- 250 000 km³ sono acque dolci nei laghi, nei mari interni e nei fiumi.
- 13 000 km³ sono vapore acqueo nell'atmosfera.

Pressione di vapore



La linea dei ghiacci



Oggi la linea dei ghiacci è collocata oltre 2 o 2,5 UA mentre si ritiene che al momento della formazione degli embrioni era più distante tra 4 e 5 UA

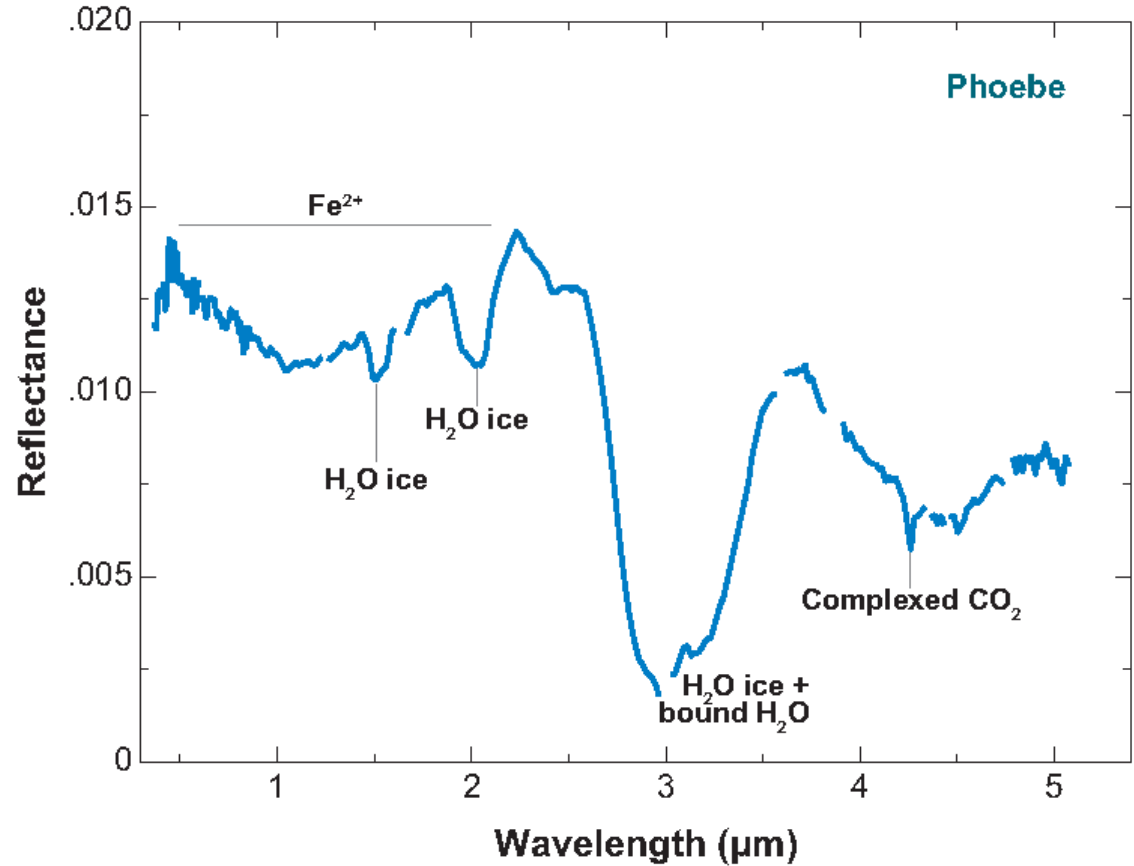
L'arricchimento dell'acqua con Deuterio è un indicatore della temperatura nella fase gassosa.

Questa abbondanza è importante per «marcare» l'eventuale «migrazione» di ghiaccio d'acqua dalla zona esterna verso la parte interna del Sistema solare

Spettro del ghiaccio d'acqua di Febe satellite di Saturno-sonda Cassini

Figure 2

The spectrum of Saturn's satellite Phoebe, as observed by the VIMS imaging spectrometer of the *Cassini* orbiter. Water ice signatures are present at 1.5, 2.0, and 3.1 μm . The figure is taken from Brown et al. (2006).



Righe dell'H₂O nelle atmosfere dei pianeti giganti

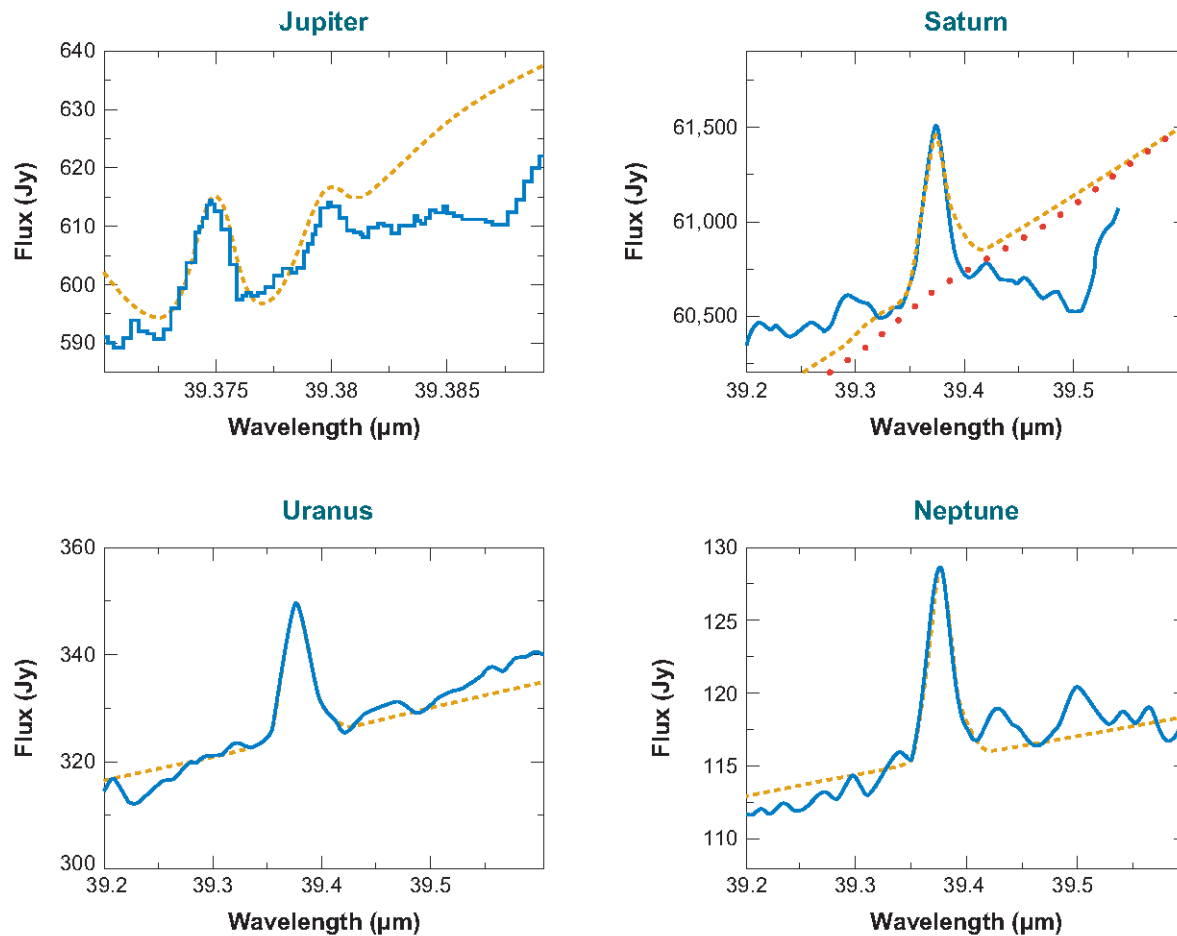


Figure 5

The H₂O line at 39.4 μm observed in emission in the stratospheres of the four giant planets with ISO-SWS. The grating mode is used for Saturn, Uranus, and Neptune with a resolving power of about 1500. In Jupiter, which is too bright for grating observations, the Fabry-Perot mode is used with a resolving power of about 30,000. With this high spectral resolution, the water line is resolved in two components. The figure is taken from Lellouch et al. (1997).

Isotopi dell'idrogeno nell'acqua – H₂¹⁸O -H₂¹⁶O osservati in comete

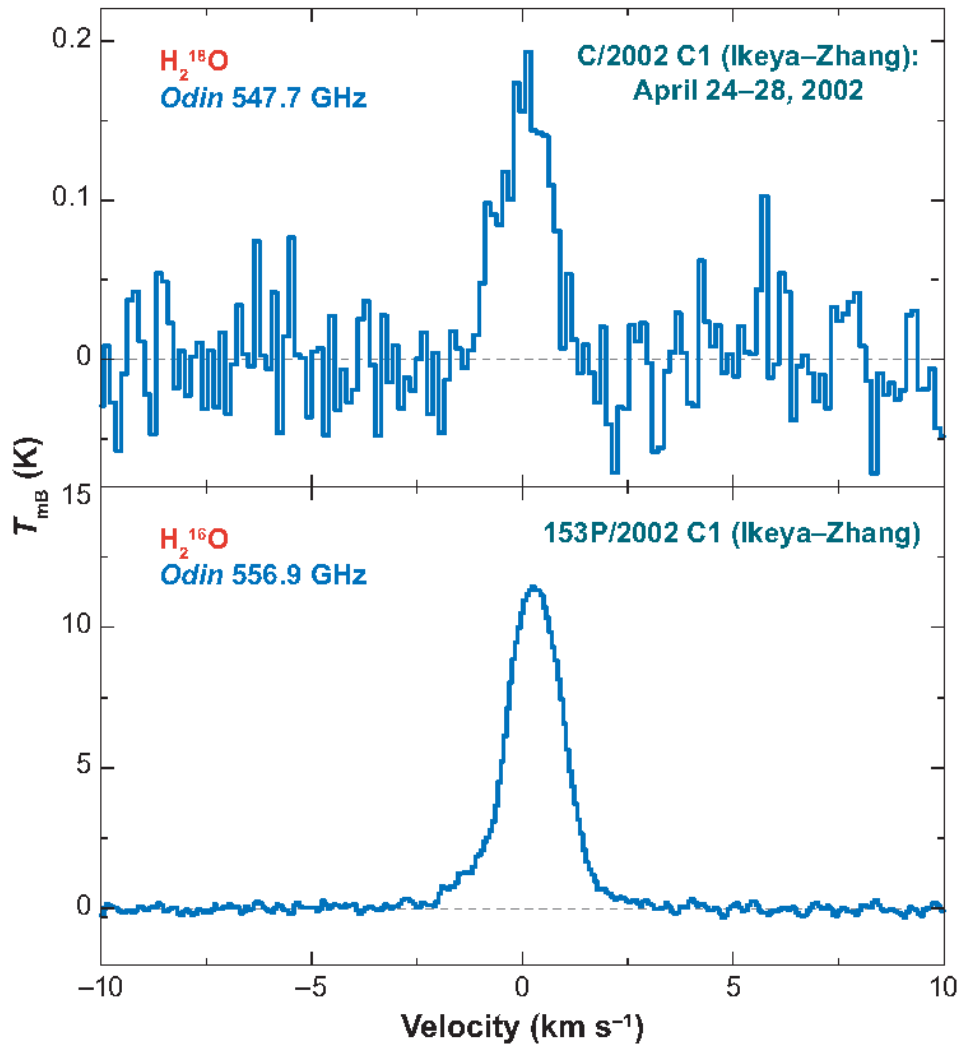


Figure 6

The $1_{10}-1_{11}$ lines of H₂¹⁶O (*top*) and H₂¹⁸O (*bottom*) observed in comet 153/2002 C1 (Ikeya-Zhang on April 24-28, 2002) by the *Odin* satellite. (From Lecacheux et al. 2003.)

Idrogeno deuterio ed acqua

- Un elettrone orbita attorno al nucleo
- 1 protone= Z =numero atomico
- 0 neutroni= N
- Massa totale= $A=Z+N=1$
- Aggiungo 1 neutrone ed ho il Deuterio



L'abbondanza di Deuterio

Il Deuterio è stato formato dalla nucleosintesi primordiale all'inizio dell'universo ed è continuamente distrutto nelle stelle, nel ciclo protone-protone, per produrre l' ^3He .

Il rapporto D/H nella nebulosa protosolare si può stimare in un valore pari a $2 \cdot 10^{-5}$ ed è minore per un fattore due rispetto a quello «primordiale» e paragonabile a quello odierno nel mezzo interstellare.

Perché questa differenza ?

A basse temperature le specie con Deuterio vengono arricchite dalla reazione:



in cui l' $\text{H}_2 \text{D}^+$ trasferisce il «deuterone» all' H_2O

Abbondanza di deuterio nelle comete



Cometa di Halley

Hyakutake

Hale-Bopp

Nelle comete Halley, Hyakutake ed Hale-Bopp il rapporto D/H è pari a $3 \cdot 10^{-4}$ pari a un valore 15 volte superiore a quello protosolare e 2 volte il valore terrestre SMOW (Standard Mean Ocean Water)

NB:

1. L'eccesso rispetto al valore protosolare ci dà un'informazione sulla temperatura di formazione (bassa) del ghiaccio d'acqua cometario
2. L'eccesso rispetto al valore terrestre è un'indicazione del fatto che l'acqua terrestre NON può venire interamente dalle comete

Cometa C/1995 O1 (Hale-Bopp) banda dell'acqua ν_3

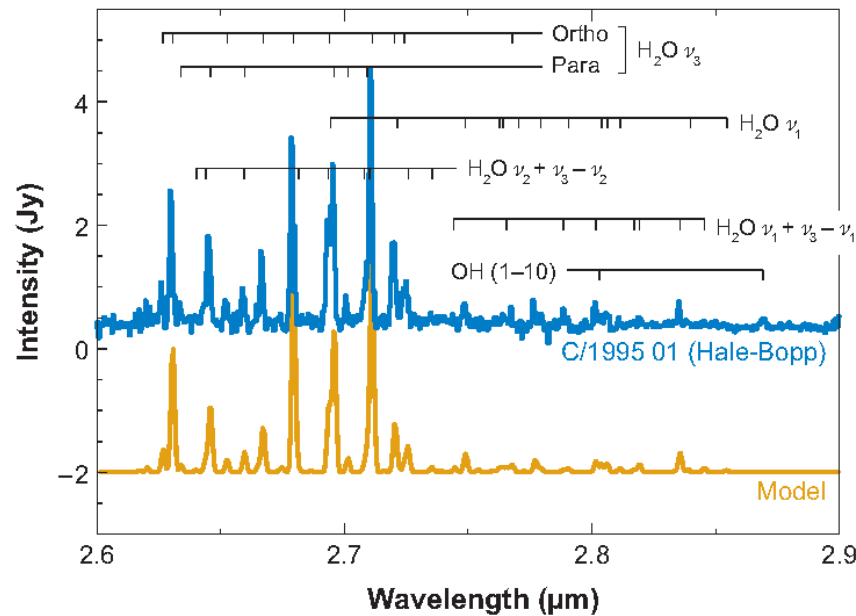


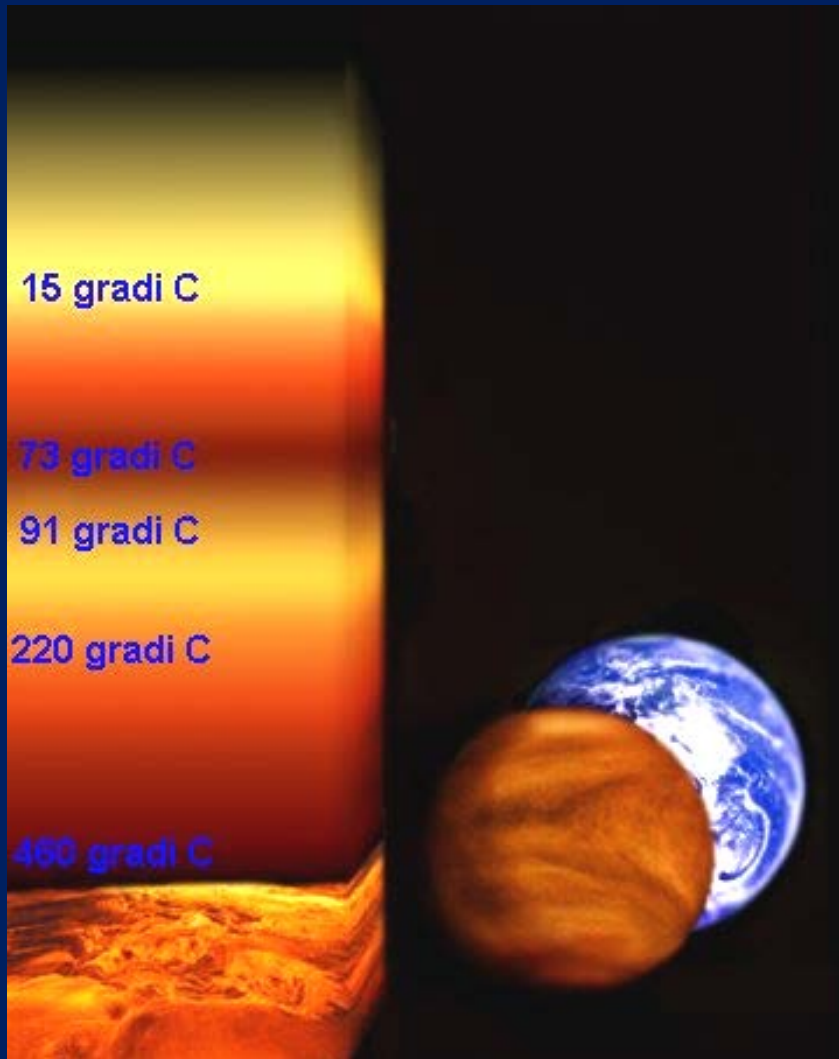
Figure 7

The region of the ν_3 band of water observed with the Infrared Space Observatory in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp). (*Top*) Line assignments are indicated, and (*bottom*) a synthetic fluorescence spectrum of water is shown. Lines from the OH radical are also present. Adapted from Crovisier et al. (1997).

Il rapporto orto e para acqua normale è di 3:1 che risulta modificato se la temperatura a cui si forma (ghiaccio) è bassa, cioè inferiore a 25-30 K

Nel caso delle comete Hale-Bopp, Halley e Hartley-2 questo indica che la formazione di ghiaccio d'acqua è avvenuta ad alcune decine di UA

Vapor d'acqua nell'atmosfera di Venere



Pressione superficiale 92 bars ~ 100 atm

Densità superficiale ~ 65 kg/m³

Altezza di scala 15,9 km

Massa totale ~ 4,8 x 10²⁰ kg

Temperatura media 464 °C

Velocità dei venti da 0,3 a 1,0 m/s sulla superficie

Peso molecolare medio 43,45 gr/mole

Composizione CO₂ 96,5 %, N₂ 3,5 %
in ppm SO₂ 150, Ar 70, H₂O 20
CO 17, He 12, Ne 7

NB il valore 20 ppm si riferisce alla bassa atmosfera ma diminuisce a 3 ppm ad un'altezza di 90 km

Spettro atmosfera di Venere a 2.35 μm

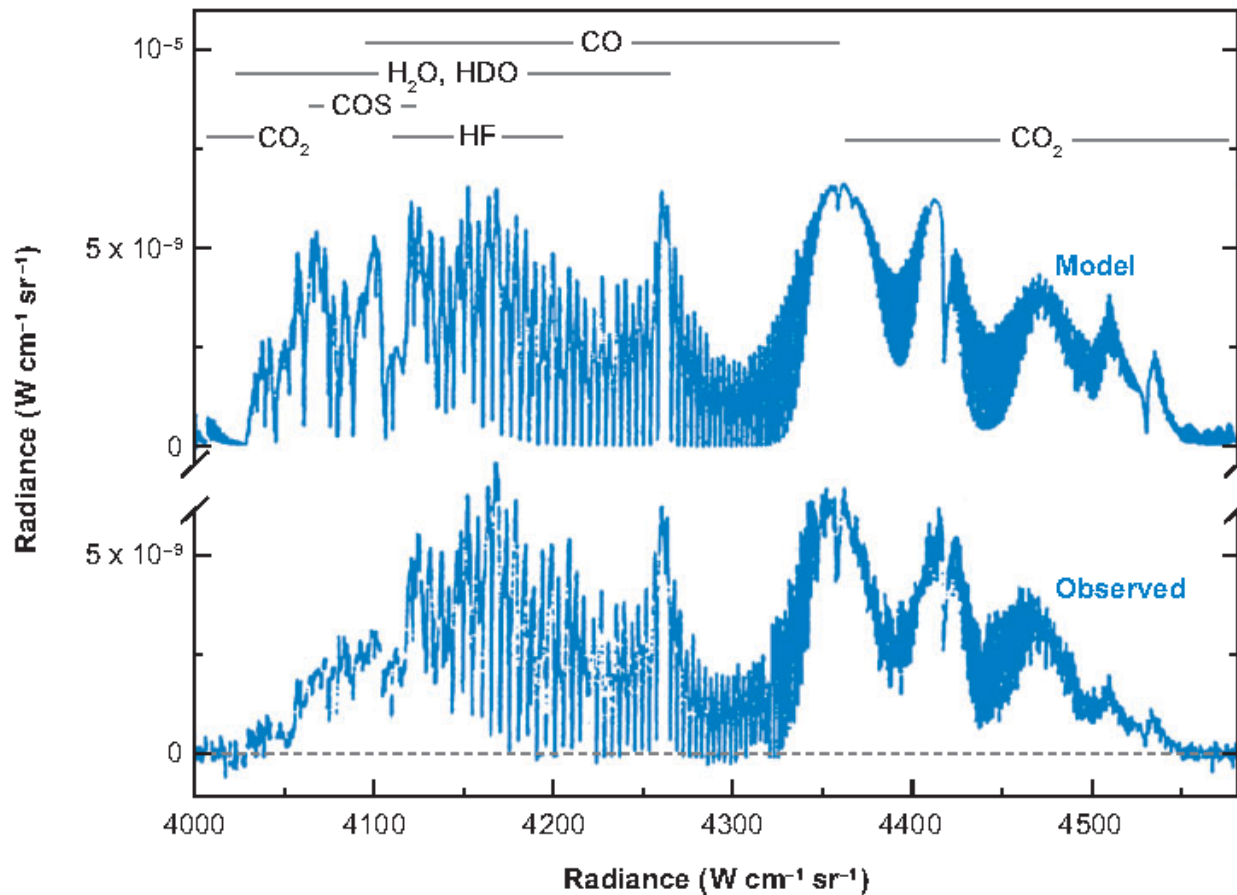
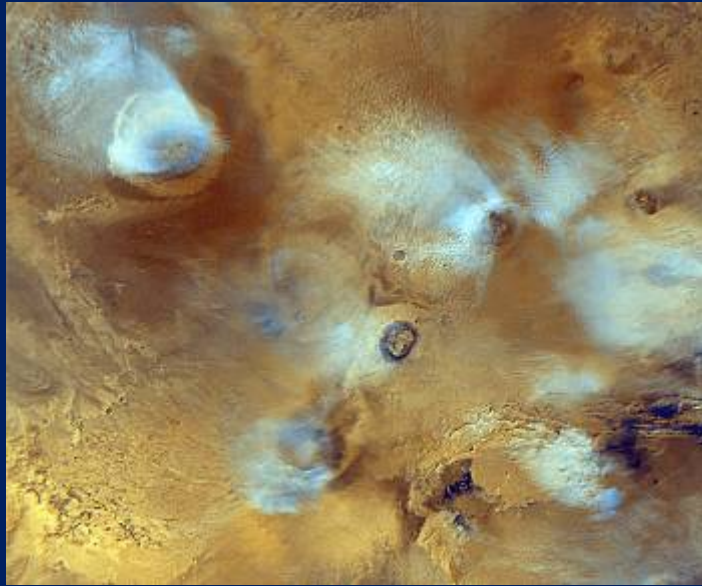


Figure 9

The ground-based high-resolution spectrum of Venus's dark side in the 2.35- μm atmospheric window (*lower curve*) compared to a synthetic best-fit model (*upper curve*). Radiation comes from the deep troposphere where several minor species can be detected, including H₂O and HDO. The figure is taken from Bézard et al. (1990).

Vapor d'acqua nell'atmosfera di Marte



Pressione superficiale 6,36 mb ~ 0,006 atm

Densità superficiale ~ 0,20 kg/m³

Altezza di scala 11,1 km

Massa totale ~ 2,5 x 10¹⁶ kg

Temperatura diurna da -89 a -31 °C

Velocità dei venti 5-7 m/s in estate

17-30 m/s tempeste di polvere

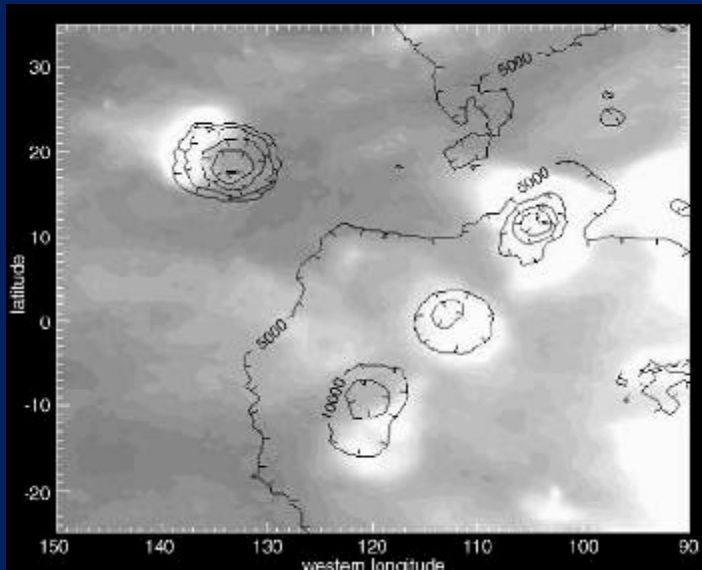
Peso molecolare medio 43,34 gr/mole

Composizione CO₂ 95,32 %, N₂ 2,7 %

in volume Ar 1,6 % O₂ 0,13 % CO 0,08 %

in ppm H₂O 210, NO 100

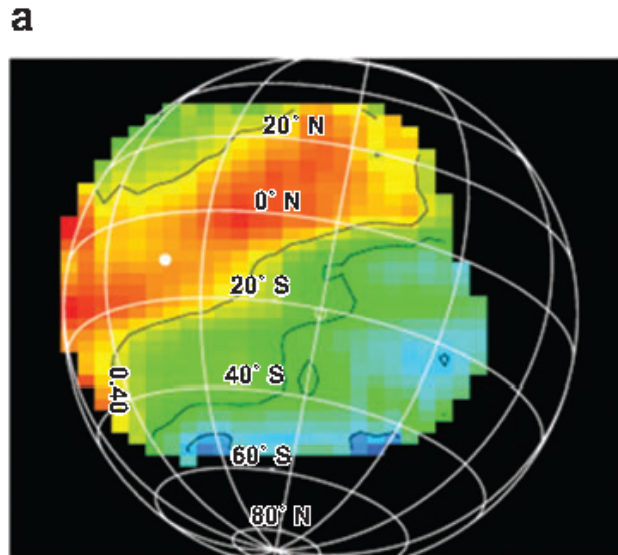
Il valore del vapor d'acqua nell'atmosfera di Marte corrisponde a 100 μm di precipitazione a differenza dei 2700 m della Terra



Mappa del vapor d'acqua su Marte

Figure 10

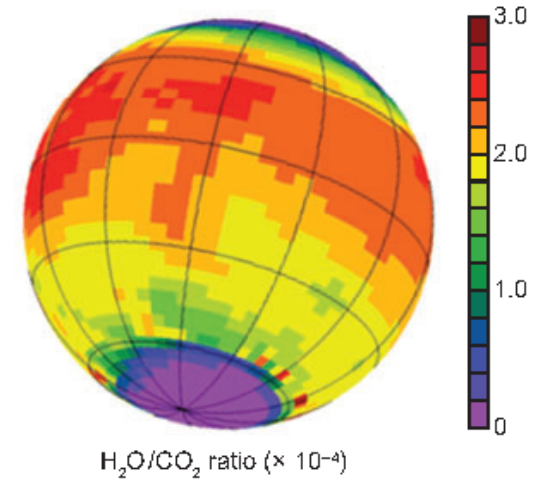
(a) A map of water vapor on Mars, observed from high-resolution ground-based spectroscopy at $8\ \mu\text{m}$ compared to (b) a GCM (Global Circulation Model) simulation. The figure is taken from Encrenaz et al. (2005a).



TEXES (Ground-based spectroscopy)

$$Q(\text{H}_2\text{O})_{\text{max}} = 3 \times 10^{-4}$$

b LS = 206, UT = 20 h
Center: 80°W , 21°S
Subsol: 120°W , 11°S



Global Circulation Model (GCM)

$$Q(\text{H}_2\text{O})_{\text{max}} = 3 \times 10^{-4}$$

Meteoriti

Analisi dei meteoriti

Tre categorie: meteoriti ferrosi, meteoriti rocciosi e meteoriti misti rocciosi ferrosi

Meteoriti ferrosi: pesanti con superficie scura ed irregolare



Meteoriti rocciosi: crosta fusa causata dall'impatto con l'atmosfera terrestre

Meteoriti misti rocciosi-ferrosi: tagliati mostrano sia ferro che roccia



Pattern tipici delle meteoriti ferrose

Condriti sfere di forma vetrosa nelle condriti

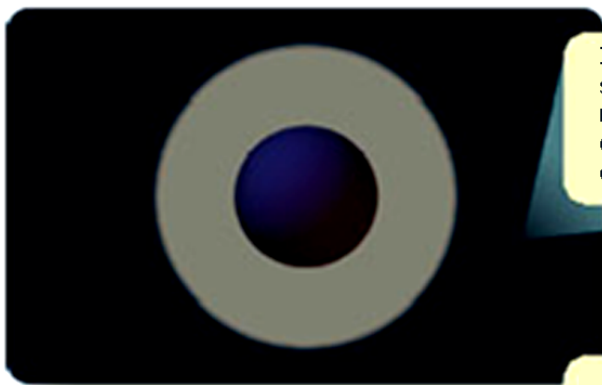


Condrite carbonacea con condriti ed elementi volatili che contengono carbonio

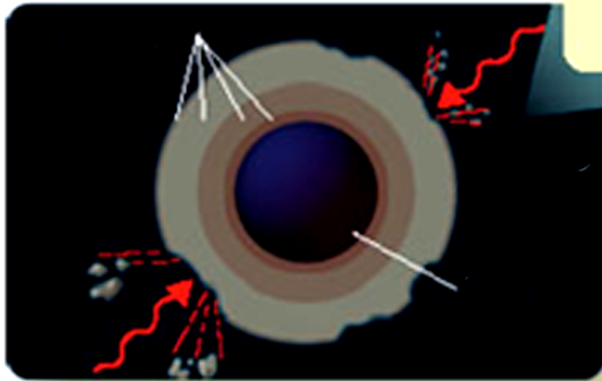
Principali tipi di meteoriti

Ferrosi	Sono composti principalmente da ferro e nickel	
Ferrosi e rocciosi	Mistura di ferro e materiali rocciosi	
Condriti	Di composizione simile alla crosta dei pianeti terrestri	
Condriti carbonacee	Con una composizione chimica simile agli elementi meno volatili del Sole	
Acondriti	Sono simili alle rocce basaltiche terrestri	

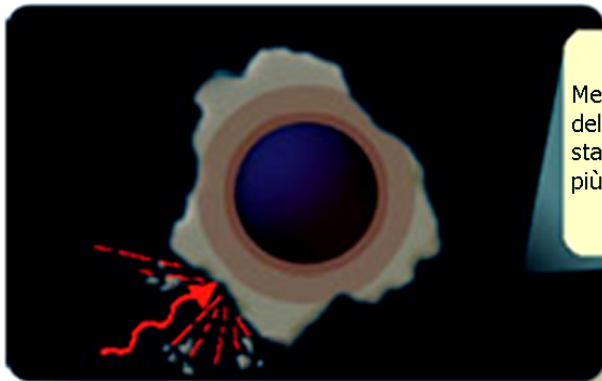
Evoluzione dei meteoriti



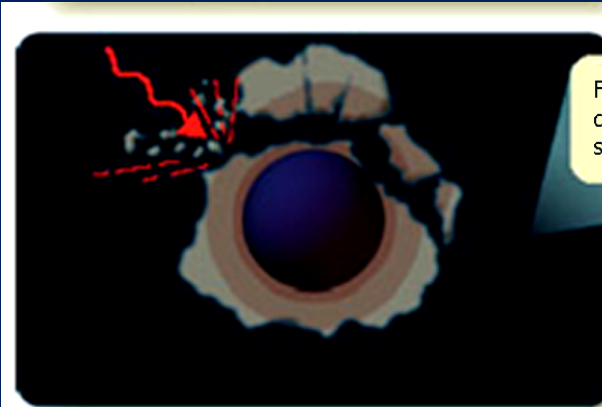
Il planetesimo trattiene sufficientemente a lungo nel suo interno il calore così da differenziare le diverse specie chimiche



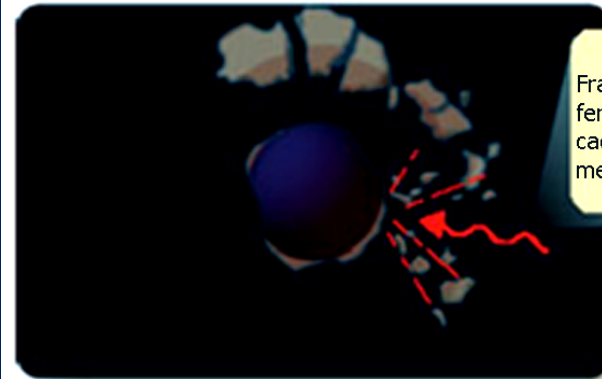
Le collisioni spezzano strati di diversa composizione del planetesimo



Meteoriti dall'interno del planetesimo sono stati riscaldati a temperature più elevate



Frammenti in prossimità del nucleo possono essere stati fusi completamente



Frammenti del nucleo di ferro estratti dal planetesimo cadono sulla Terra come meteoriti ferrose

Le Leonidi-un sciame di meteoriti



Meteoriti



Il meteorite di Murchison

Confronto tra l'esperimento di Miller e la composizione del meteorite di Murchison

AMMINOACIDO	METEORITE DI MURCHISON	ESPERIMENTO DI MILLER
GLICINA	• • • •	• • • •
ANILINA	• • • •	• • • •
ACIDO α -AMMINO-N-BUTIRRICO	• • •	• • • •
ACIDO α -AMMINOISOBUTIRRICO	• • • •	• •
PROLINA	• • •	• •
NORVALINA	• • •	• • •
ISOVALINA	• •	• •
PROLINA	• • •	•
ACIDO PIPECOLICO	•	•
ACIDO ASPARTICO	• • •	• • •
ACIDO GLUTAMMICO	• • •	• •
β -ALANINA	• •	• •
ACIDO β -AMMINO-N-BUTIRRICO	•	•
ACIDO β -AMMINOISOBUTIRRICO	•	•
ACIDO γ -AMMINOBUTIRRICO	•	• •
SARCOSINA	• •	• • •
N-ETILGLICINA	• •	• • •
N-METILALANINA	• •	• •

II meteorite Allende-condrite carbonacea

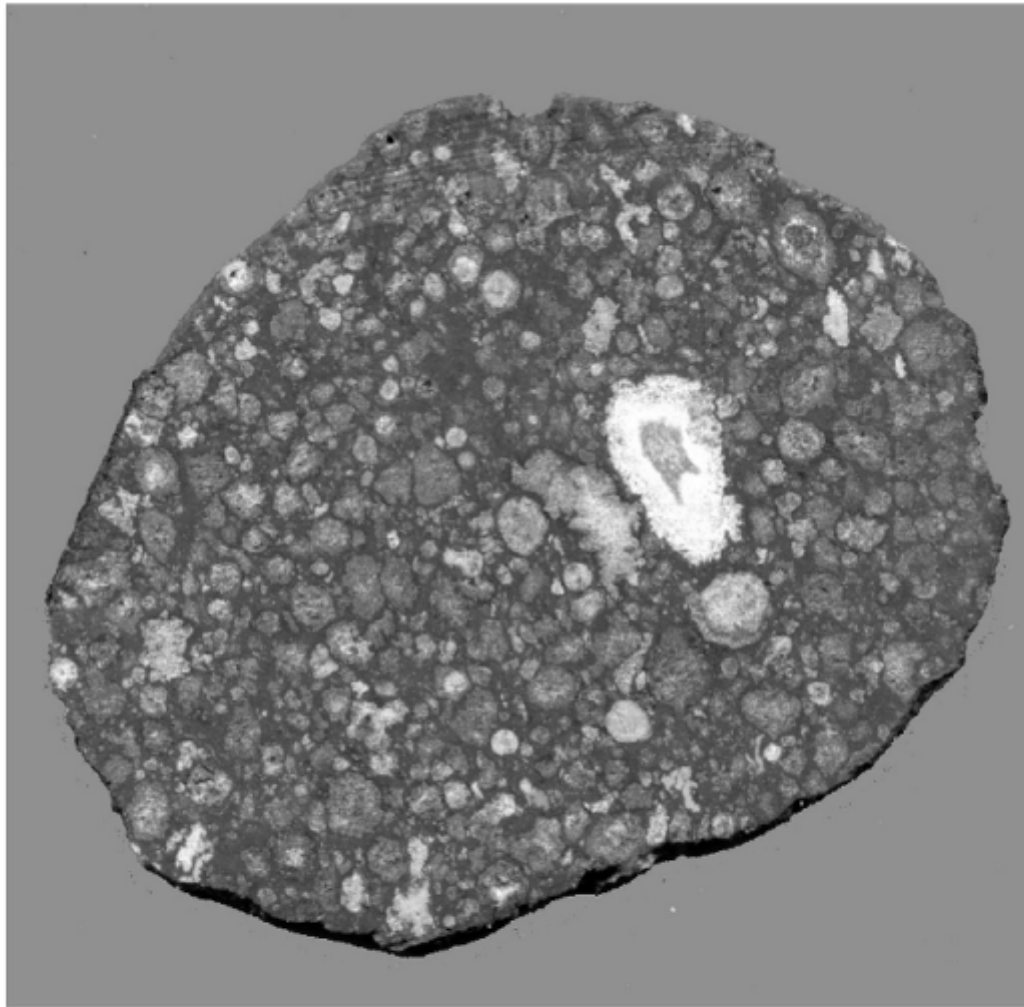


Fig. 5.1. The undifferentiated carbonaceous chondrite Allende. This rock was probably never heated to temperatures above 500° C. It preserves a variety of primitive, pre-accretionary components, such as chondrules, and Ca-Al-rich inclusions, the oldest known material in our Solar System. Meteorite collection, Dieter Heinlein, Augsburg, Germany.

Impatti di Meteoriti

Piccoli impatti dono abbastanza frequenti
rari invece quelli di grandi meteoriti



1954 Mrs. E. Hulitt Hodges di Sylacauga, Alabama è l'unica persona conosciuta colpita da un meteorite.

150 crateri di impatto sulla Terra



Meteor Crater formato ~ 50,000 anni fa da un meteorite di ~ 80 – 100 m di diametro

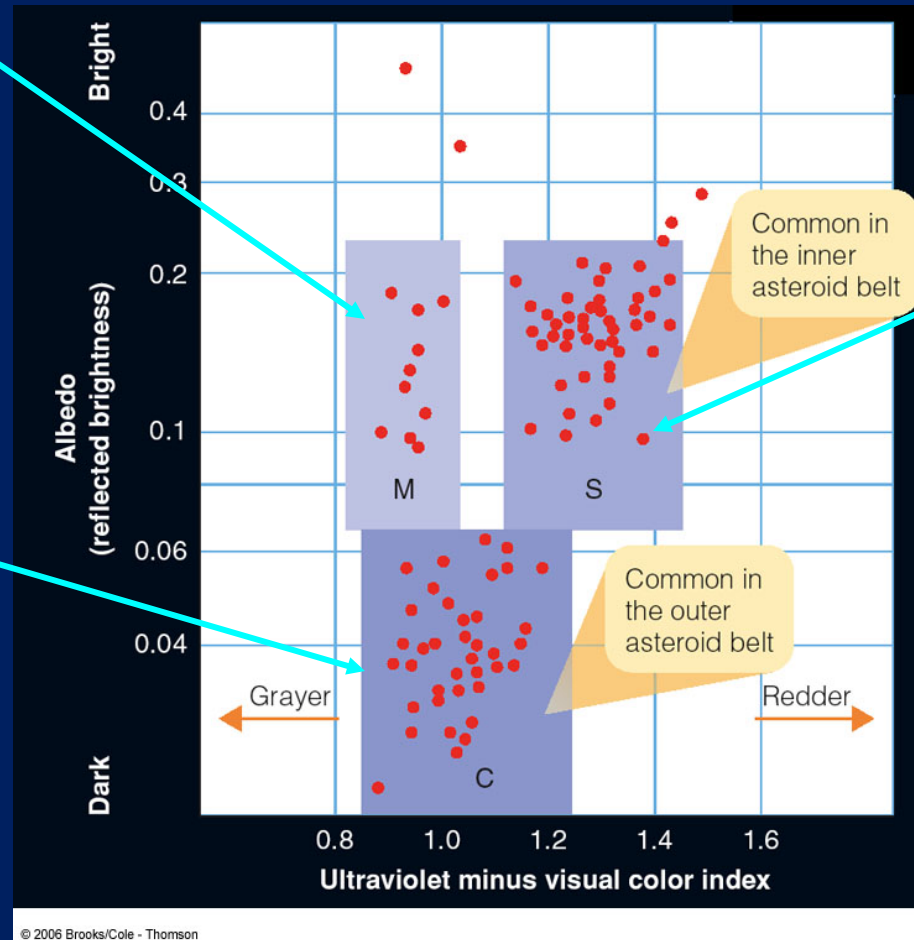
Asteroidi- i blocchi per la costruzione del Sistema solare

Il colore degli Asteroidi

Colori ossia albedo cioè riflettività a diverse lunghezze d'onda.

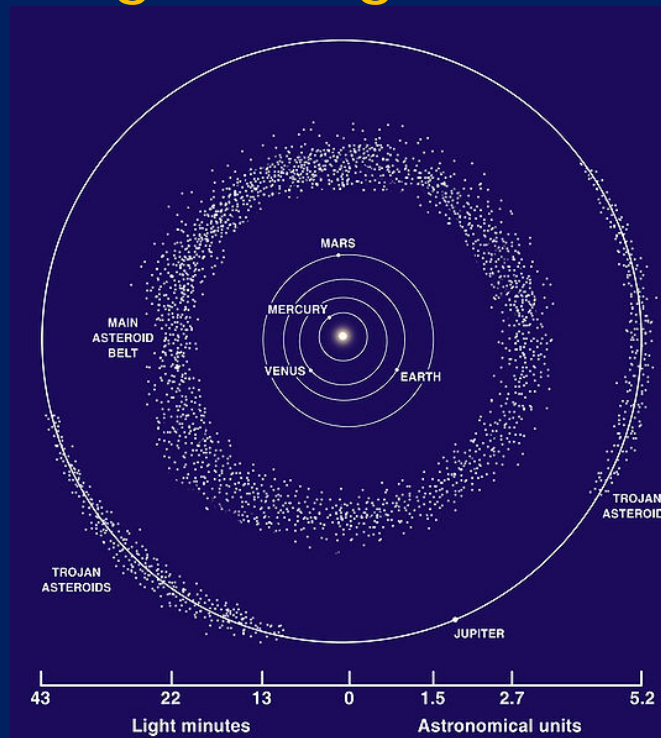
Tipo M: Asteroidi brillanti «poco rossi» ricchi di metalli probabilmente nuclei di Asteroidi frammentati

Tipo C: Asteroidi scuri ricchi di carbonio cioè condriti carbonacee comuni nella fascia esterna



Tipo S: brillanti, rossi con materiale roccioso i più comuni nella fascia interna

L'origine degli Asteroidi



- La massa totale degli Asteroidi è circa 1/20 di quella della Luna
- Gli Asteroidi sono probabilmente il residuo di un pianeta che non si è potuto formare a 2,8 UA causa l'effetto perturbativo della gravità di Giove
- Gli Asteroidi sono resti e/o frammenti dei planetesimi
- Nella fascia esterna si sono formate le condriti carbonacee dove la nebulosa protoplanetaria era abbastanza fredda da permettere la condensazione del carbonio
- In questo modo gli Asteroidi di tipo C sono stati segregati nella fascia esterna a differenza di quelli di Tipo S invece presenti nella fascia interna

Asteroidi – classificazione per composizione

Utilizzando l'analisi spettroscopica i pianetini si possono classificare in base alla loro composizione chimica nei seguenti tipi:

- **Asteroidi di tipo C**, include il 75% degli Asteroidi conosciuti: sono molto scuri (cioè con un albedo di 0,03) e simili ai meteoriti classificati come condriti carbonacee. Hanno approssimativamente la stessa composizione del Sole meno l'idrogeno, l'Elio e gli altri elementi "volatili".
- **Asteroidi di tipo S**, sono il 17%: abbastanza brillanti (albedo 0,10-0,22) con una composizione metallica (ferro-nikel mescolati a ferro e magnesio-silicati).
- **Asteroidi di tipo M** i restanti: brillanti (albedo 0,10-0,18), ferro-nikel

Ci sono altri tipi di asteroidi, molto più rari:

- **Asteroidi di tipo G** - Una suddivisione degli asteroidi di tipo C, spettralmente distinta per le differenze nell'assorbimento degli ultravioletti. Il principale rappresentante di questa classe è l'asteroide 1 Ceres.
- **Asteroidi di tipo E** - *La E sta per enstatite*. Raccoglie asteroidi di ridotte dimensioni che orbitano principalmente nella parte interna della Fascia principale e che probabilmente hanno avuto origine dal mantello di asteroidi di grandi dimensioni, distrutti in tempi remoti
- **Asteroidi di tipo R** - La R sta per (colore e spettro) rossastro.
- **Asteroidi di tipo V** - La V sta per Vesta, un grosso asteroide di cui si pensa che questi potrebbero esserne frammenti.

Asteroidi disposizione

Sono ulteriormente classificati in base alla loro posizione in:

Fascia Principale: collocata tra Marte e Giove a circa 2-4 U.A.; a loro volta sono suddivisi nei sottogruppi: *Hungarias*, *Floras*, *Phocaea*, *Koronis*, *Eos*, *Themis*, *Cybeles* and *Hildas* dai nomi dei principali pianetini del gruppo.

Asteroidi quasi-terrestri: quelli che si avvicinano all'orbita terrestre.

Atens: con semiasse maggiore minore di 1 U.A. e distanza all'afelio più grande di 0,983 U.A.;

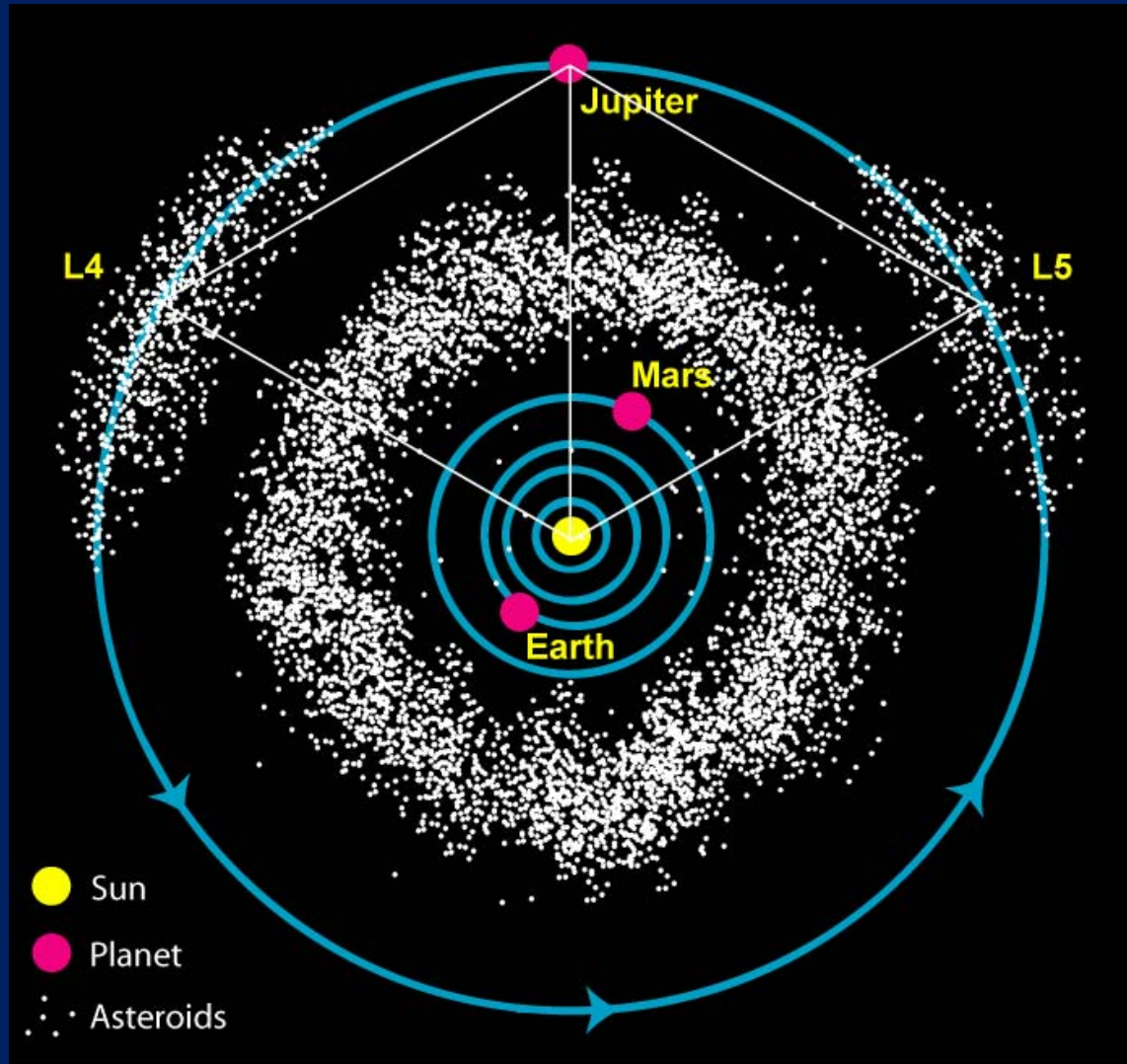
Apollos: con semiasse maggiore più grande di 1 U.A. e distanza al perielio minore di 1,017 U.A.;

Amors: con distanza al perielio tra 1,017 e 1,3 U.A.;

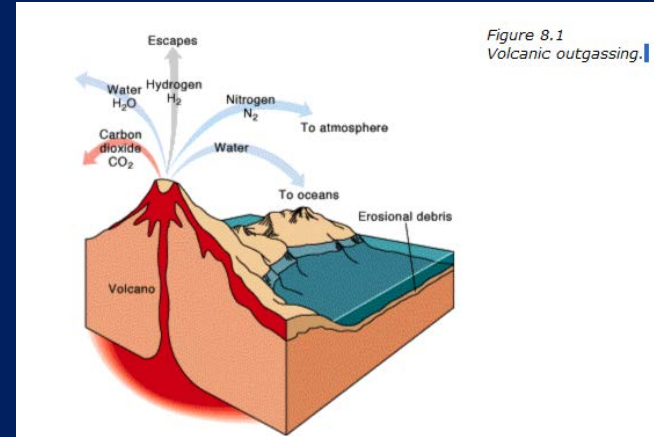
Troiani: collocati vicino ai punti Lagrangiani in prossimità di Giove

Tra le concentrazioni più importanti dei pianetini nella "Fascia Principale" ci sono regioni relativamente *vuote* dette Kirkwood gaps (lacune di Kirkwood).

La fascia degli Asteroidi



Acqua nella fascia interna del Sistema solare



Di acqua nella fascia interna del Sistema solare non ce né molta

Si trova comunque acqua sotto forma di argille nelle Condriti Carbonacee e nelle Condriti LL3 che hanno un basso contenuto di ferro. Si ritiene che queste risalgano alle meteoriti di Tipo-D formatesi nella zona più esterna della fascia principale asteroidale compresa tra 2,0 e 3,3 UA.

Il rapporto D/H delle condriti CC3 è analogo a quello terrestre (SMOW pari a 1.5×10^{-4}) NB la metà di quello cometario

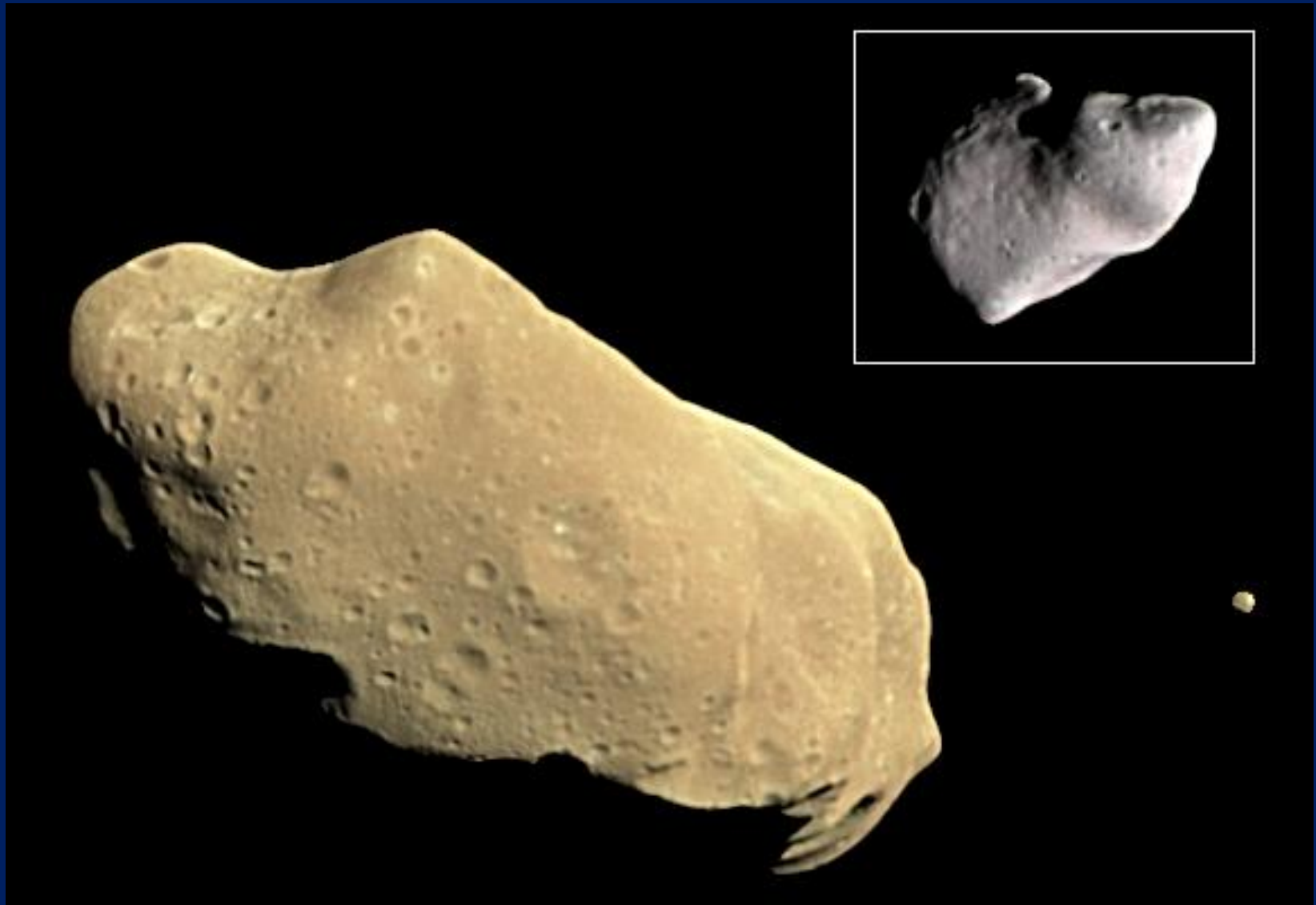
Questo comporta che l'acqua terrestre NON può avere origine soltanto dalle comete ma risente di un contributo importante da parte degli Asteroidi "primordiali" posti fuori dalla fascia principale.

Un altro contributo è dovuto al "degassamento" prodotto da attività vulcanica ed originario dell'interno terrestre.

Asteroidi



L'Asteroide Ida ed il suo satellite Dactil



Sonda Galileo

Meteoriti ed età del Sistema solare



E' essenziale riuscire a stabilire

quando si è formato il Sistema solare

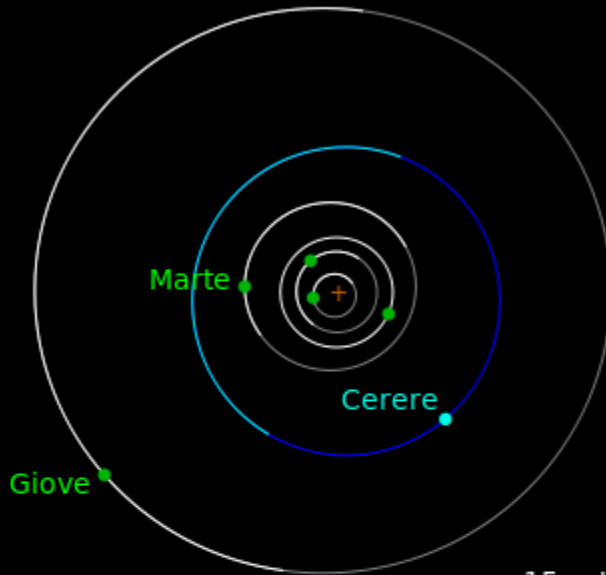
e quanto è durato il processo di formazione.

Per dare una risposta a queste due domande è necessario introdurre il metodo di determinazione dell'età delle rocce terrestri, lunari e, soprattutto, dei meteoriti

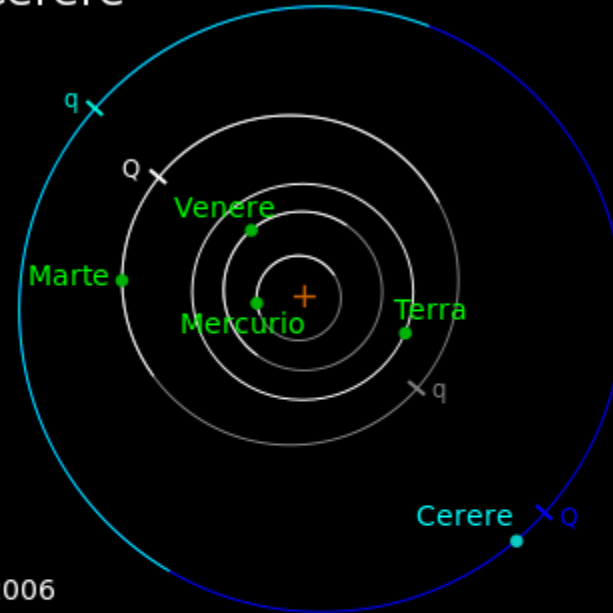
I Pianeti Nani

Cerere Pianeta Nano -orbita

Orbita di Cerere



Eccentricità: 0,080
Periodo orbitale: 4,599 anni



Perielio (q): 2.544 UA
Afelio (Q): 2.987 UA



Distanza dal Sole: 2,938 UA
Distanza dalla Terra: 2,135 UA

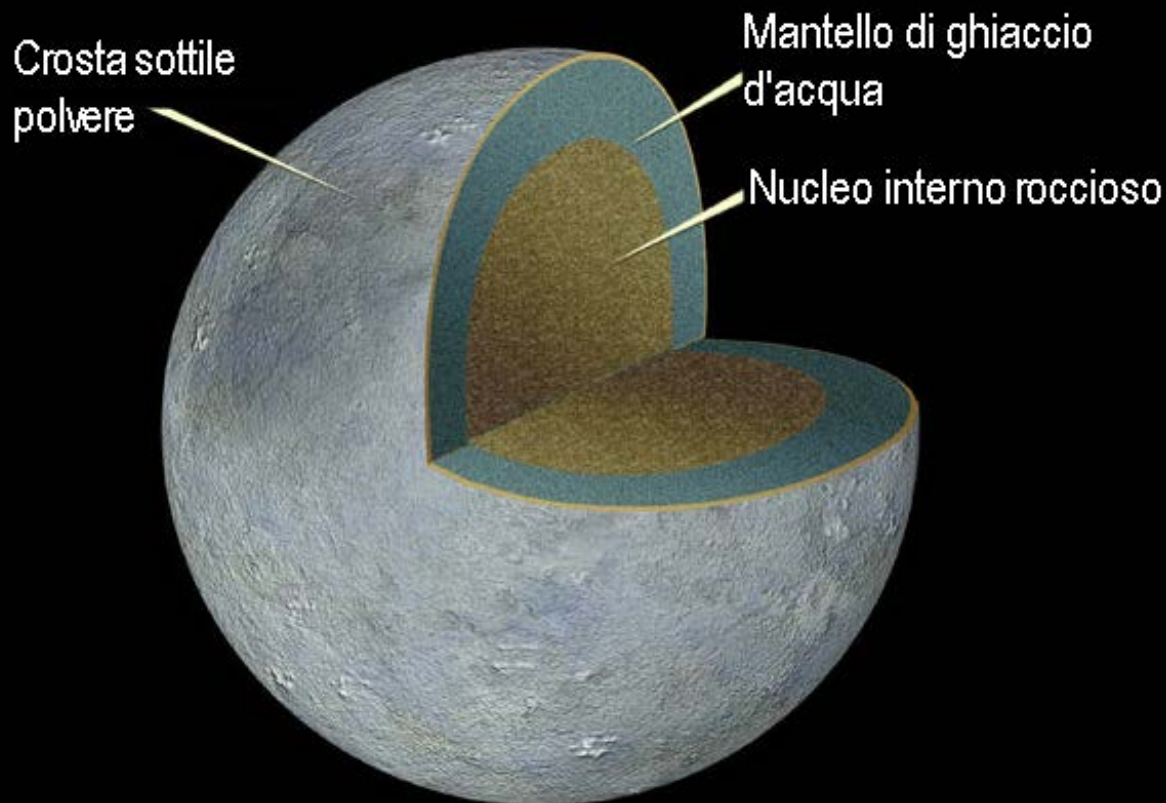
Inclinazione orbitale: 10,6°

Cerere

Cerere –dati fisici

Diametro equat.	$(974,6 \pm 3,6)$ km
Diametro polare	$(909,4 \pm 3,2)$ km
Diametro medio	952,4 km
Superficie	$2,85 \times 10^{12}$ m ²
Massa	$9,43 \times 10^{20}$ kg
Densità media	$(2,077 \pm 0,036) \times 10^3$ kg/m ³
Acceleraz. di gravità in superficie	0,278 m/s ²
Velocità di fuga	515 m/s
Periodo di rotazione	0,3781 giorni (9 h 4 min 28 s)
Inclinazione assiale	~3°
A.R. polo nord	19 h 24 min 291°
Declinazione	59°
Temperatura superficiale	~167 °K(media)-239 °K (max)
Albedo	$0,090 \pm 0,0033$ (geometrica, visibile)

Struttura interna di Cerere e contenuto d'acqua



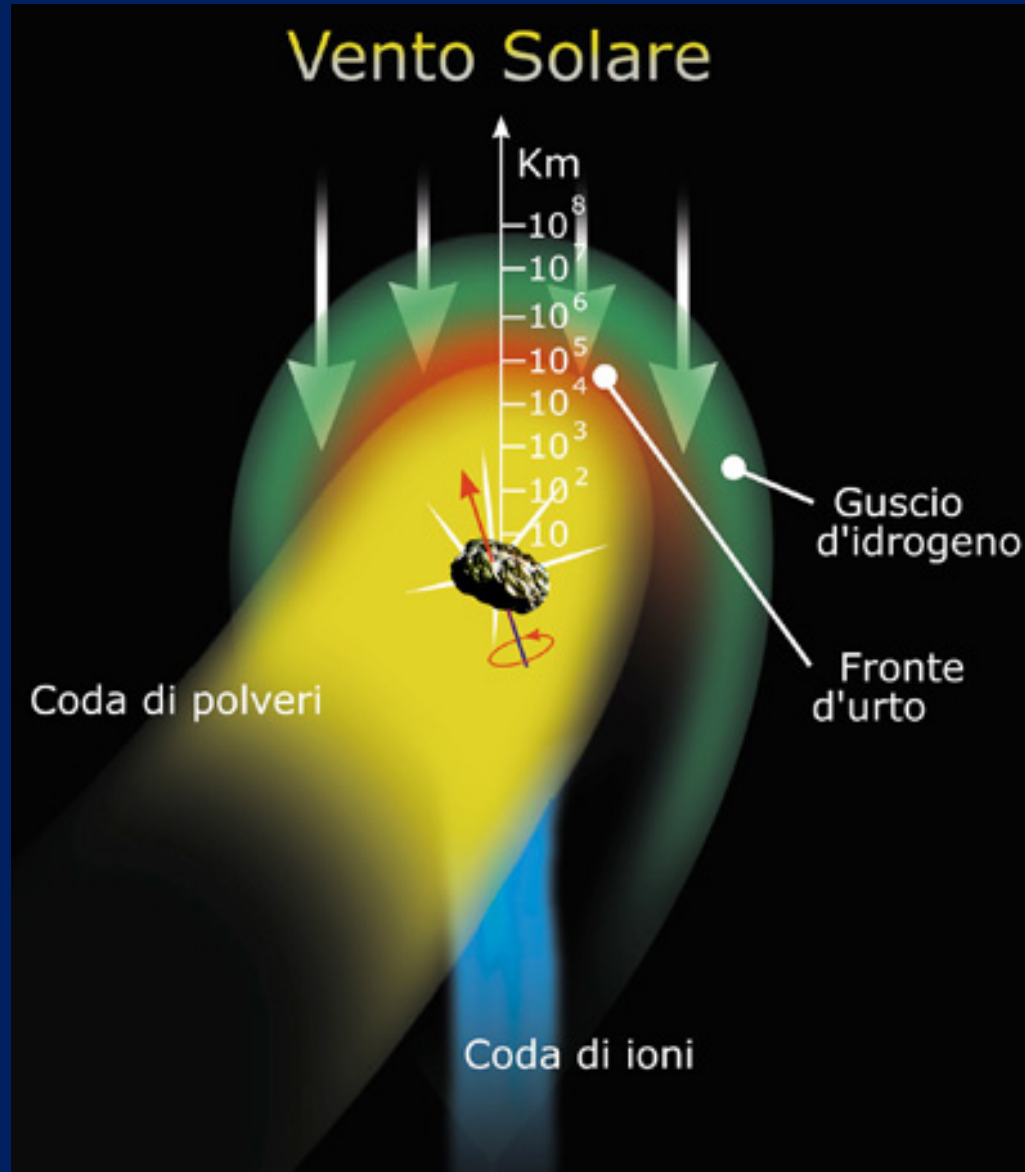
Struttura interna di Cerere

Ceres • January 24, 2004

HST ACS/HRC

Le comete

Descrizione delle comete



La cometa di Halley dipinta da Giotto nella cappella degli Scrovegni



La cometa di Halley



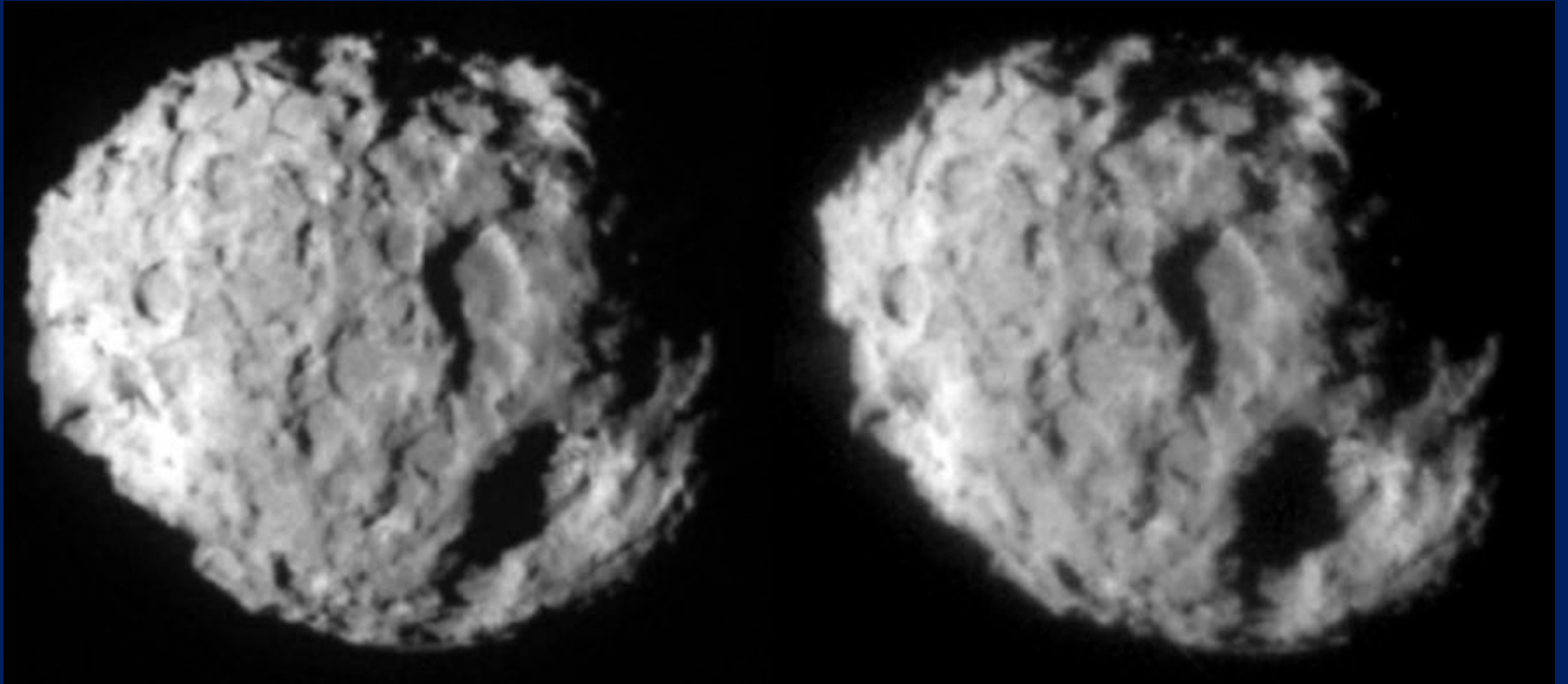
La cometa-Schwassmann-Wachmann



La cometa Hale-Bopp



La cometa Wild 2



Sonda Stardust

Una mappa composta della Cometa Tempel 1



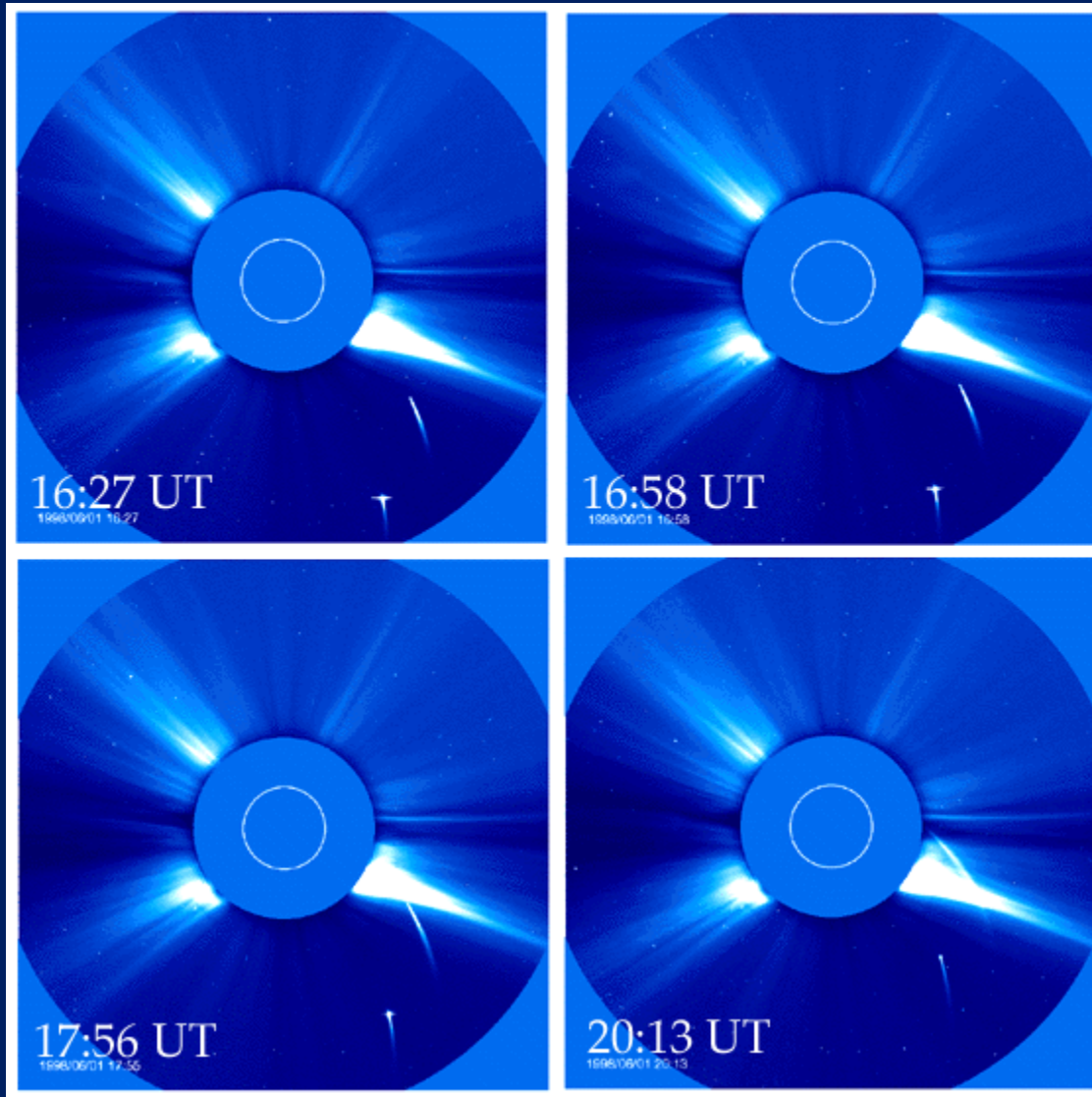
Missione Deep Impact

Il nucleo della cometa Borrelly



Missione Deep Space I

Comete a corto periodo sul Sole



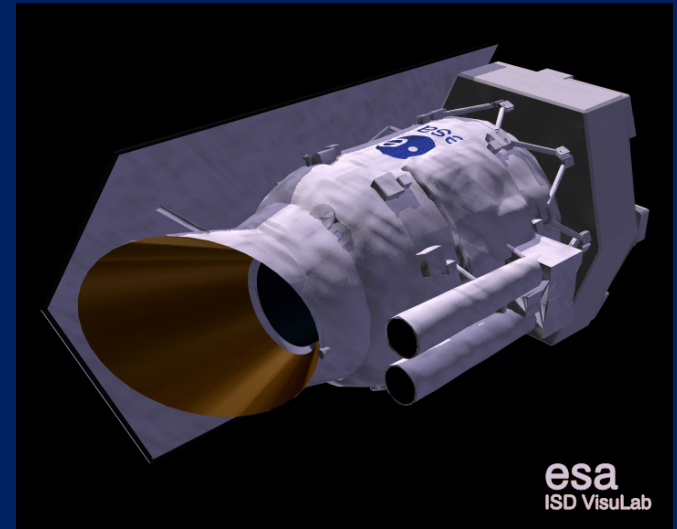
Sonda Soho

Bande del vapor d'acqua nella cometa Hale-Bopp

ISO : Bande

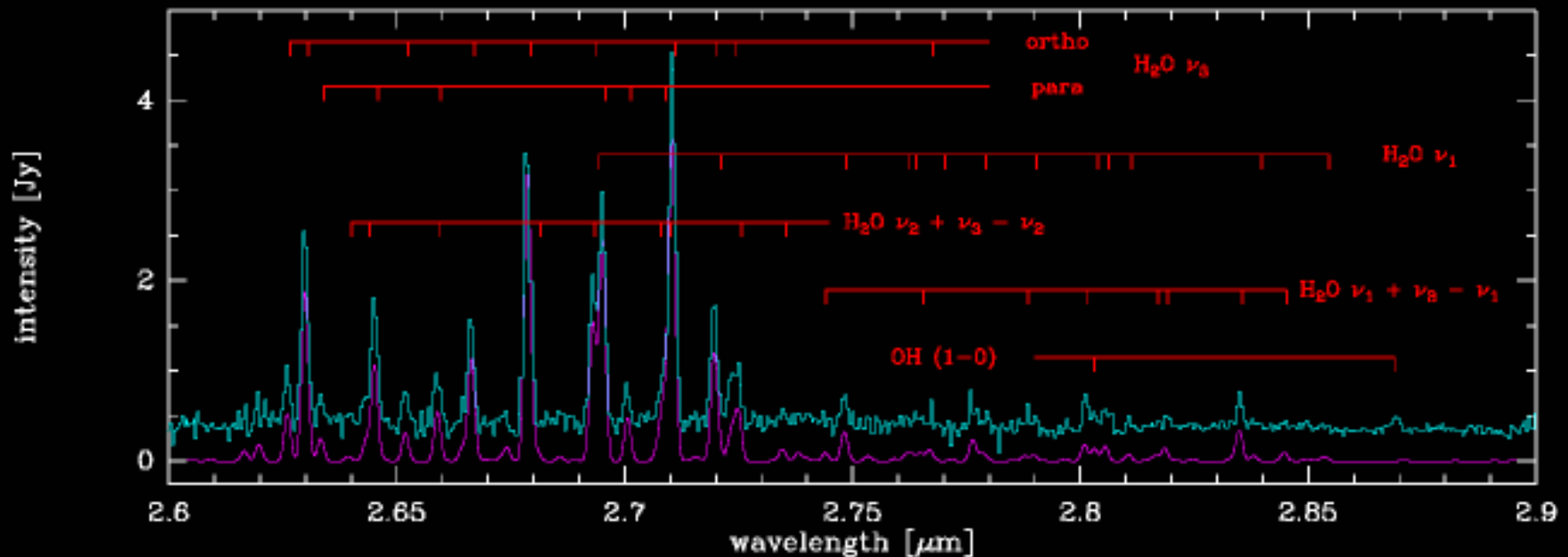
Crovisier et al. 1997

Science, 275, 1904

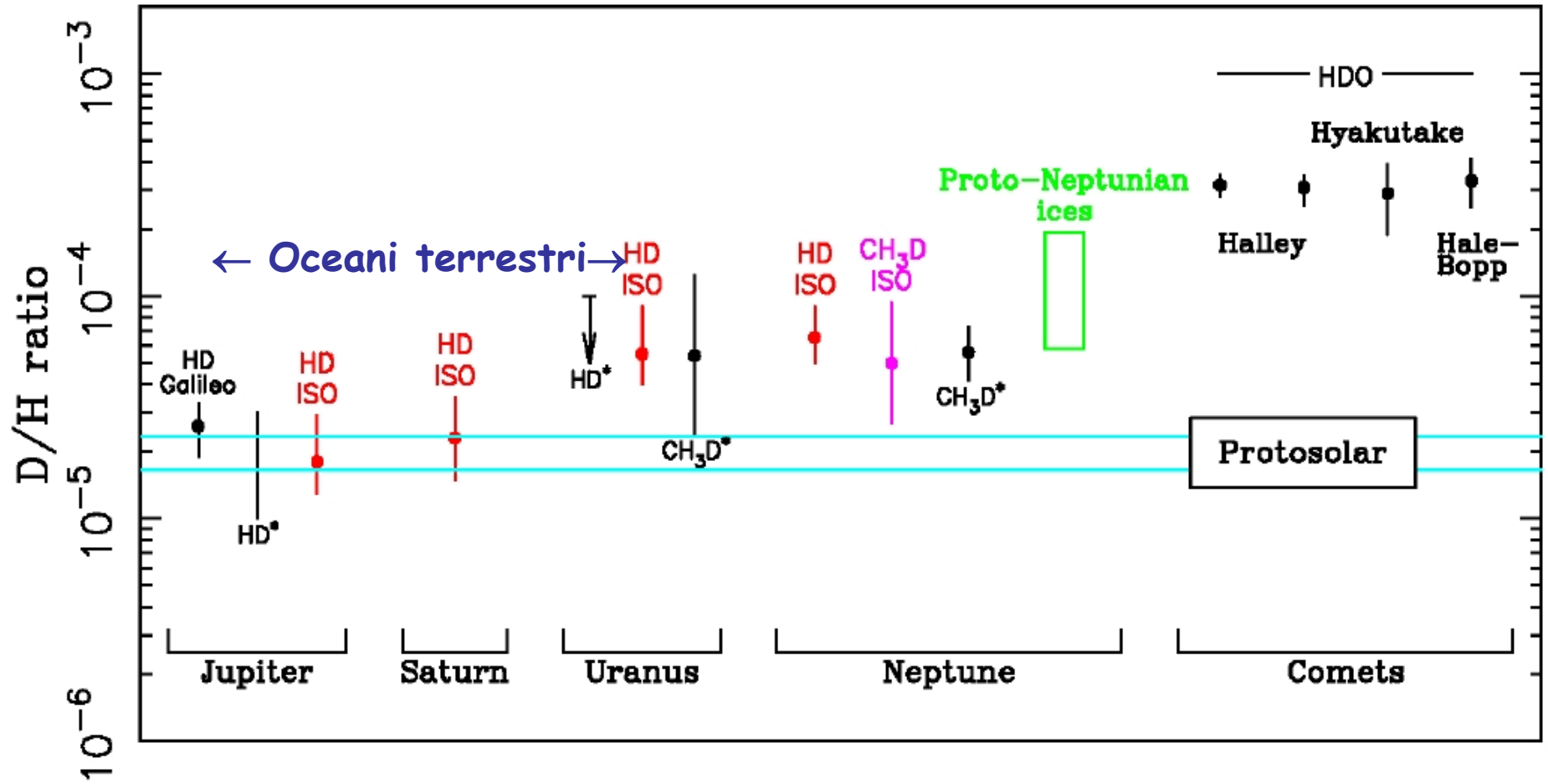


C/1995 01 (Hale-Bopp)

27 Sept. + 6 Oct. 1996



Rapporto D/H nelle comete e nel Sistema solare

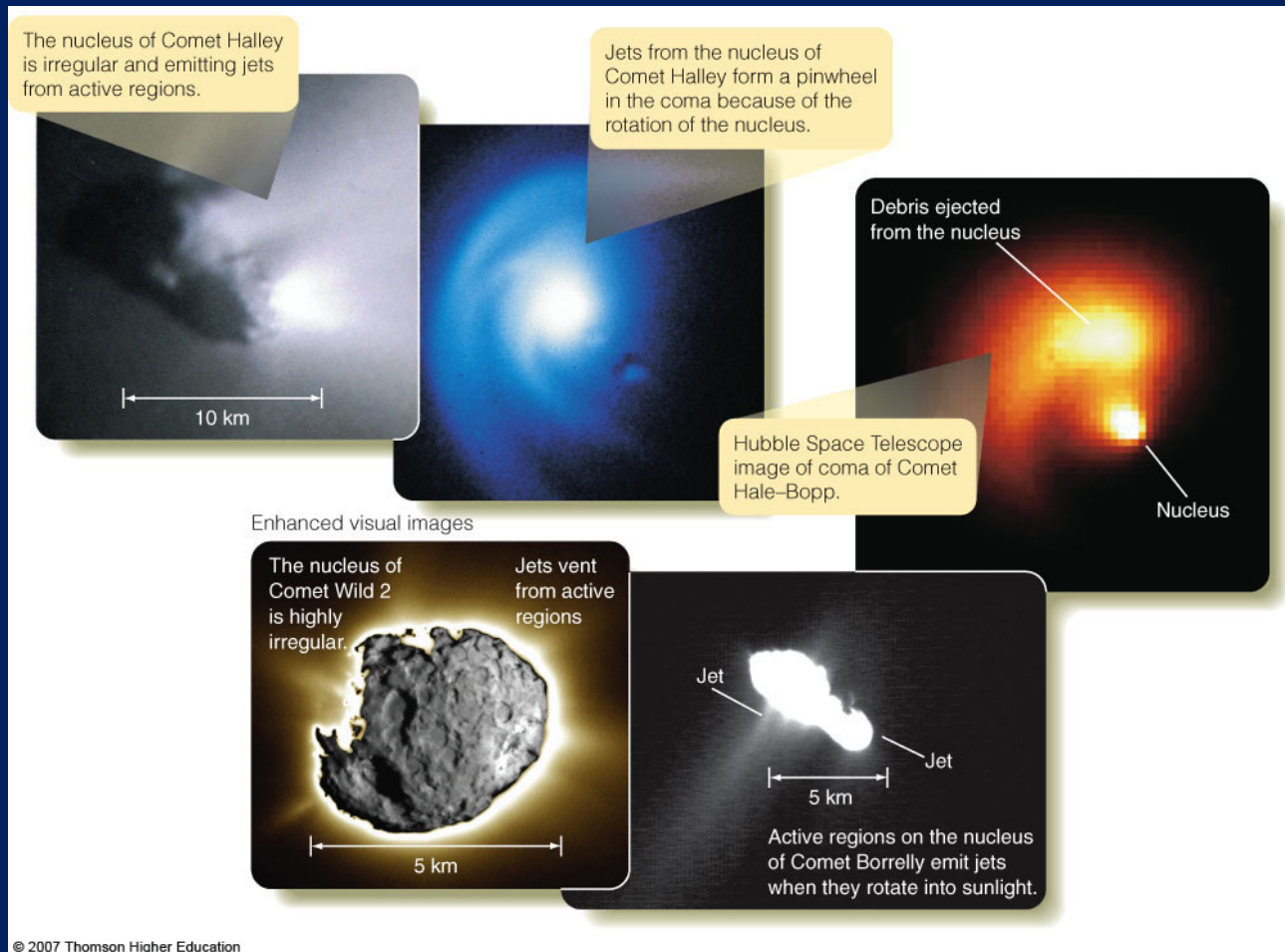


Composizione del nucleo cometario

Il nucleo di una cometa contiene: ghiaccio d'acqua, anidride carbonica, metano ed ammoniaca etc.. Materiali che si sono condensati nella parte più lontana del Sistema solare. Questi composti sublimano avvicinandosi al Sole

La densità del nucleo cometario è :

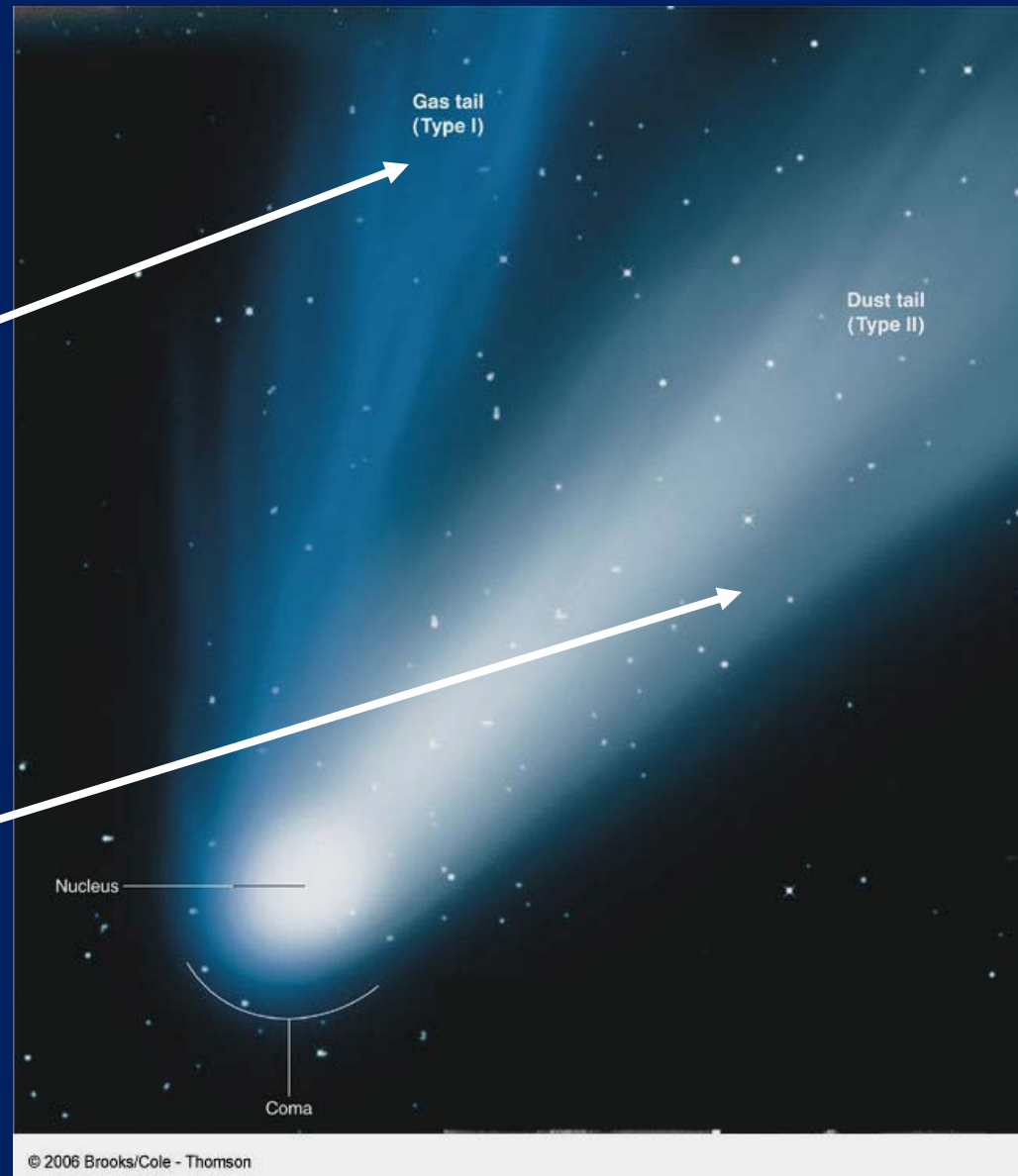
$\sim 0,1 - 0,25 \text{ g/cm}^3$



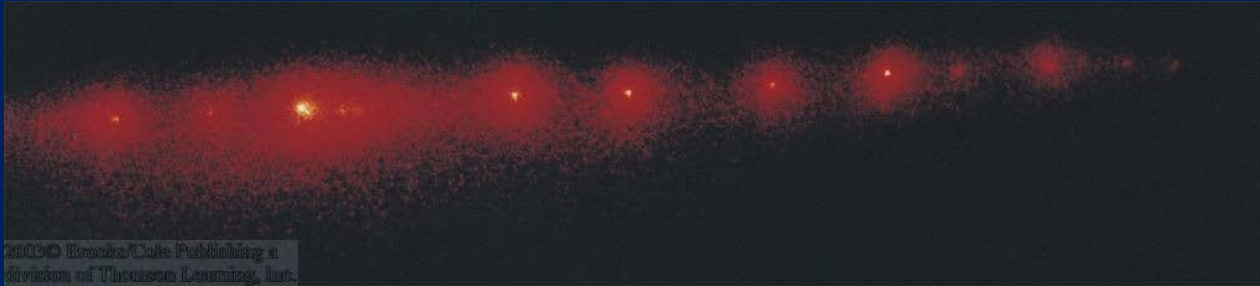
Due tipi di code cometarie

Coda di gas ionizzato spinta dal Vento Solare nella direzione opposta al Sole

Coda di polvere e ghiaccio che segue la traiettoria della cometa spinta dalla pressione di radiazione del Sole



Frammentazione del nucleo cometario



Cometa Shoemaker-Levy spezzata dalle forze mareali di Giove

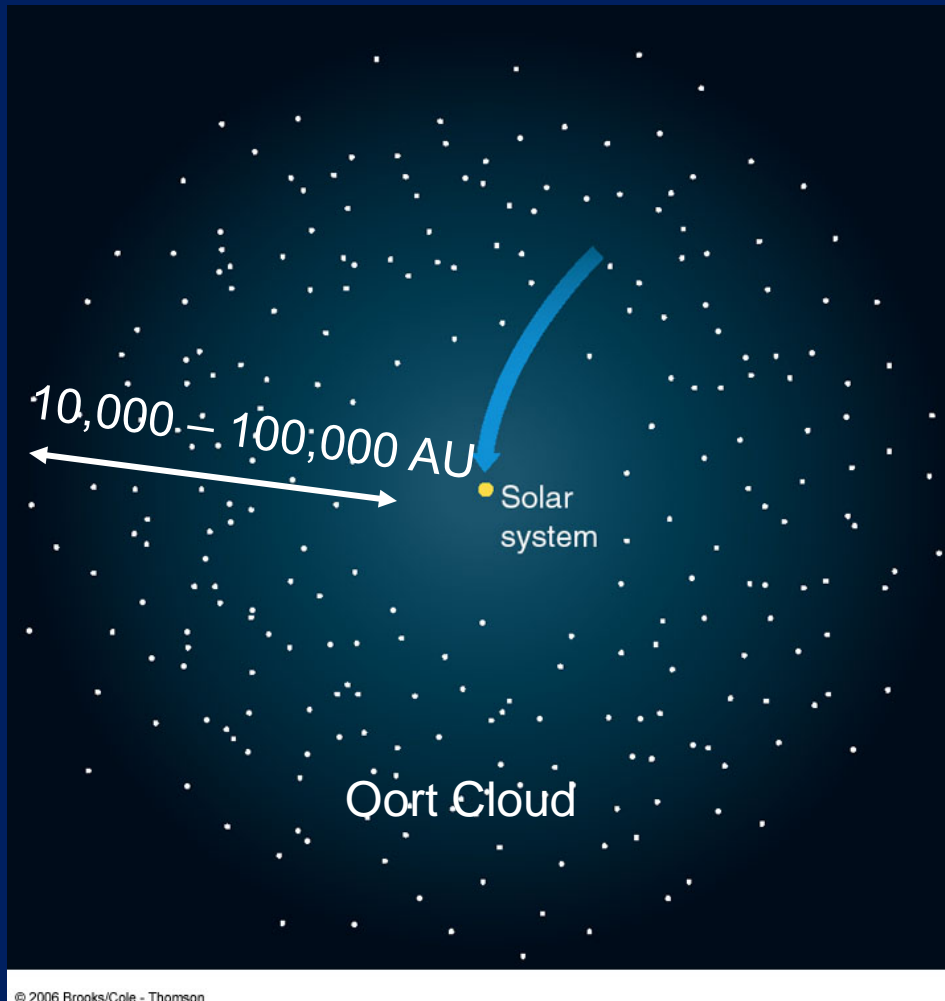


Catenarie di crateri di impatto sulla Luna e su Callisto prodotti dalla frammentazione di una cometa.

Origine e moto delle Comete

Le comete sono originate nella nube di Oort:

Nubi sferici composte da alcuni trilioni di corpi ghiacciati posti tra
~ 10 000 – 100 000 UA dal Sole.

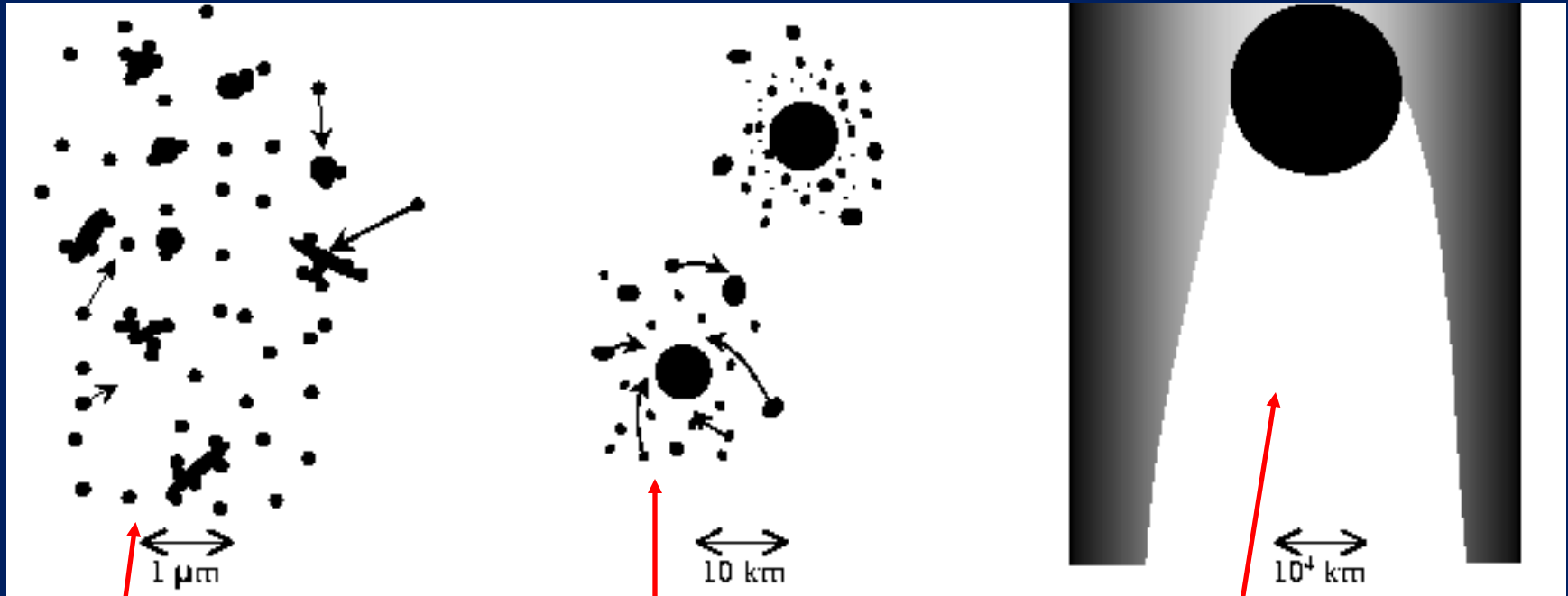


Le stelle perturbano la loro stabilità e le immettono nel Sistema solare

Alcune comete vengono catturate dai pianeti giganti e le loro orbite sono interne al Sistema solare-Comete di corto periodo

Formazione del Sistema solare

La formazione dei planetesimi



Condensazione e
coagulazione 1 micron

Collisioni ed
attrazione
gravitazionale
10 km

Interazione con il
gas ad embrioni e
pianeti già
formati 10000 km

Dai planetesimi agli embrioni ai pianeti



La fase finale nella crescita da planetesimi a pianeti di tipo terrestre è violenta e drammatica

Grandi pianeti embrionali delle dimensioni di Mercurio produrranno oggetti come Venere Marte e la Terra

Questo tipo di dinamica richiede impatti di corpi (asteroidi sugli embrioni) di grandi dimensioni

Ce ne è traccia nel Sistema solare ??

La formazione dei pianeti-crescita dagli embrioni runaway accretion

- Una volta che i grani sono abbastanza grandi da avere un campo gravitazionale abbastanza intenso il ritmo di accrescimento cresce ancora di più (quando $S = \text{sezione di urto effettiva} > 2 R$)
- I modelli numerici suggeriscono che i primi oggetti di grande taglia che si possono formare hanno le dimensioni di alcuni km

Crescita per
collisioni

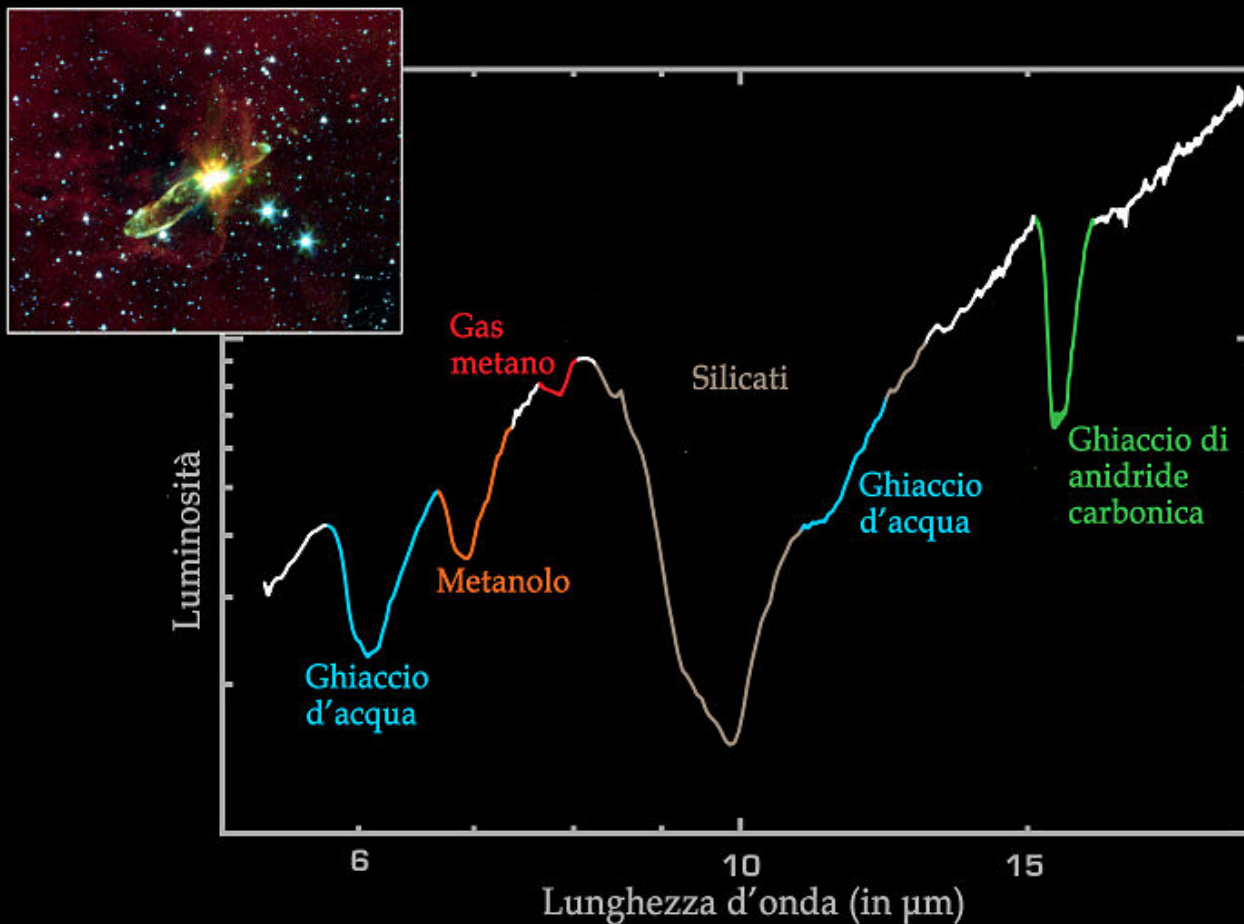


Crescita
dinamica



Planetesimi
Embrioni

Acqua nello spettro di HH 46/47



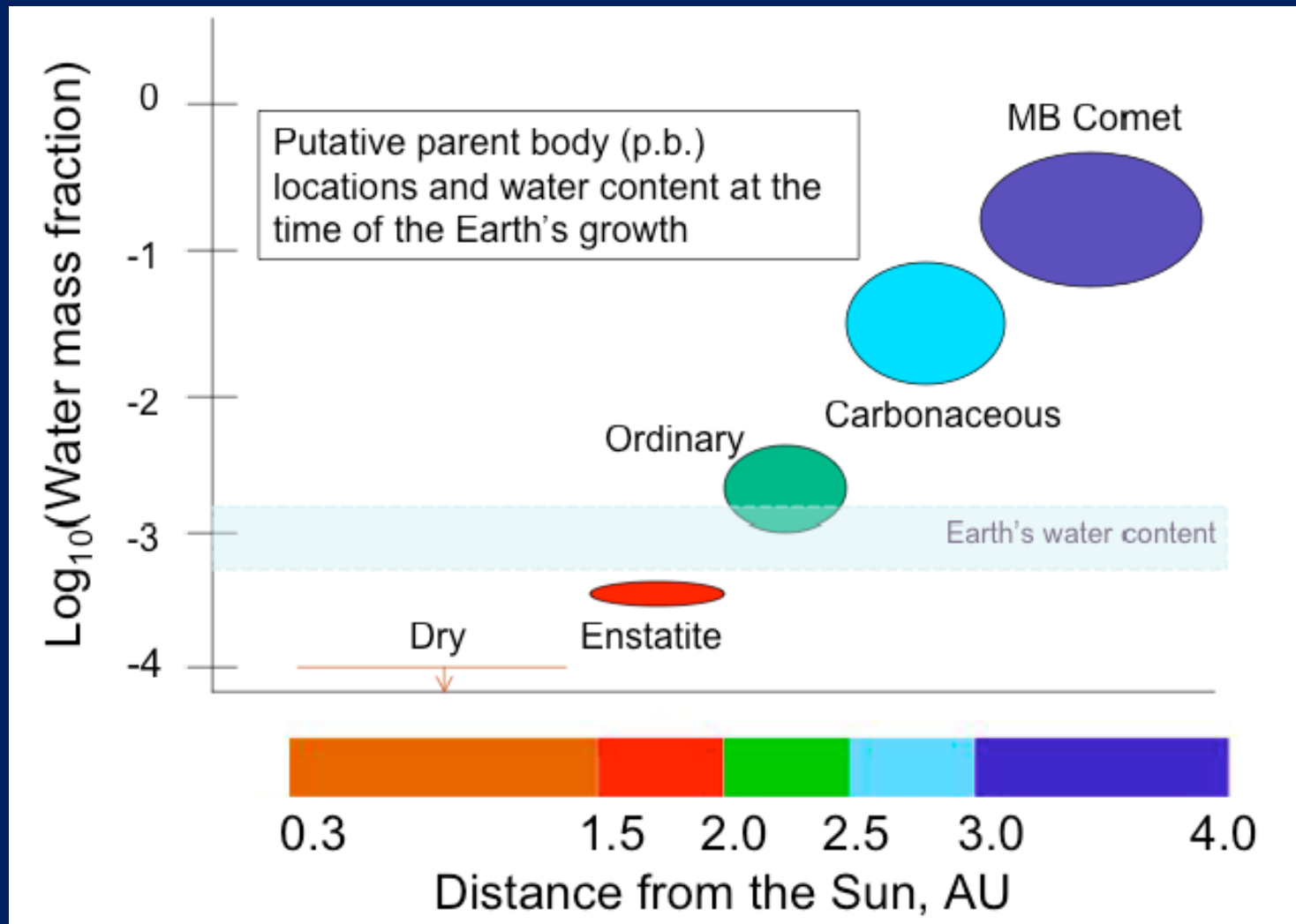
Composti nello spettro d'assorbimento di HH 46/47 Spitzer Space Telescope • IRS • IRAC

NASA / JPL-Caltech / A. Noriega-Crespo [SSC/Caltech]

ssc2003-06g

I costruttori di terre

Dove e quanta acqua al tempo della formazione della Terra



Modelli di formazione planetaria

Making other Earths: Dynamical Simulations of Terrestrial Planet Formation and Water Delivery

Sean N. Raymond, Thomas R. Quinn & Jonathan I. Lunine

ABSTRACT

We present results from 42 simulations of late stage planetary accretion, focusing on the delivery of volatiles (primarily water) to the terrestrial planets. Our simulations include both planetary “embryos” (defined as Moon to Mars sized protoplanets) and planetesimals, assuming that the embryos formed via oligarchic growth. We investigate volatile delivery as a function of Jupiter’s mass, position and eccentricity, the position of the snow line, and the density (in solids) of the solar nebula.

In all simulations, we form 1-4 terrestrial planets inside 2 AU, which vary in mass and volatile content. In 42 simulations we have formed 43 planets between 0.8 and 1.5 AU, including 11 “habitable” planets between 0.9 and 1.1 AU.

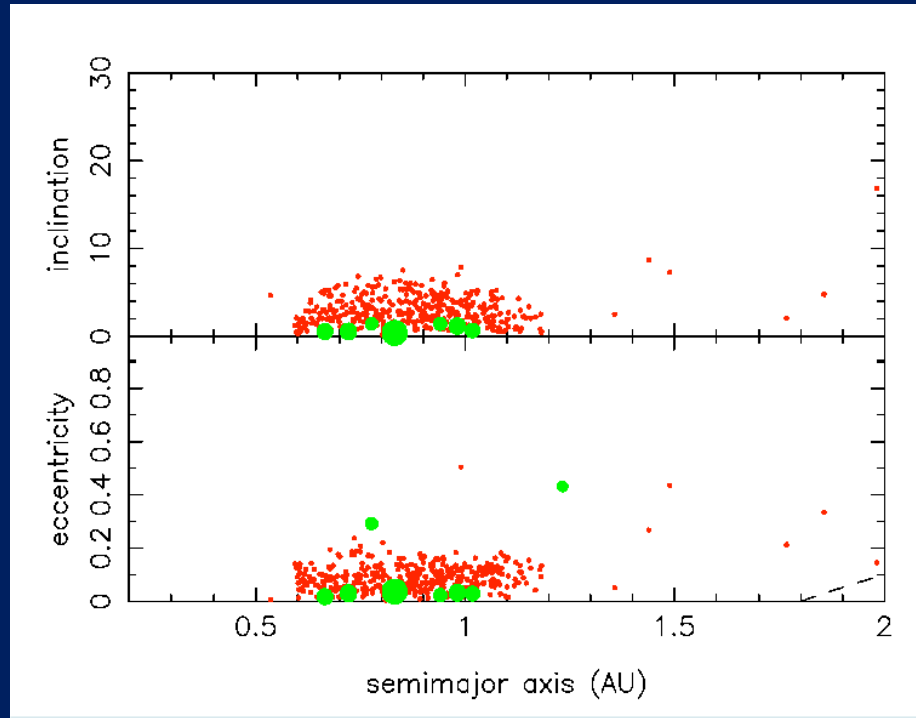
These planets range from dry worlds to “water worlds” with 100+ oceans of water (1 ocean = 1.5×10^{24} g), and vary in mass between $0.23M_{\oplus}$ and $3.85 M_{\oplus}$.

There is a good deal of stochastic noise in these simulations, but the most important parameter is the planetesimal mass we choose, which reflects the surface density in solids past the snow line.

A high density in this region results in the formation of a smaller number of terrestrial planets with larger masses and higher water content, as compared with planets which form in systems with lower densities.

We find that an eccentric Jupiter produces drier terrestrial planets with higher eccentricities than a circular one. In cases with Jupiter at 7 AU, we form what we call “super embryos,” 1-2 M_{\oplus} protoplanets which can serve as the accretion seeds for 2+ M_{\oplus} planets with large water contents.

Modelli di formazione planetaria



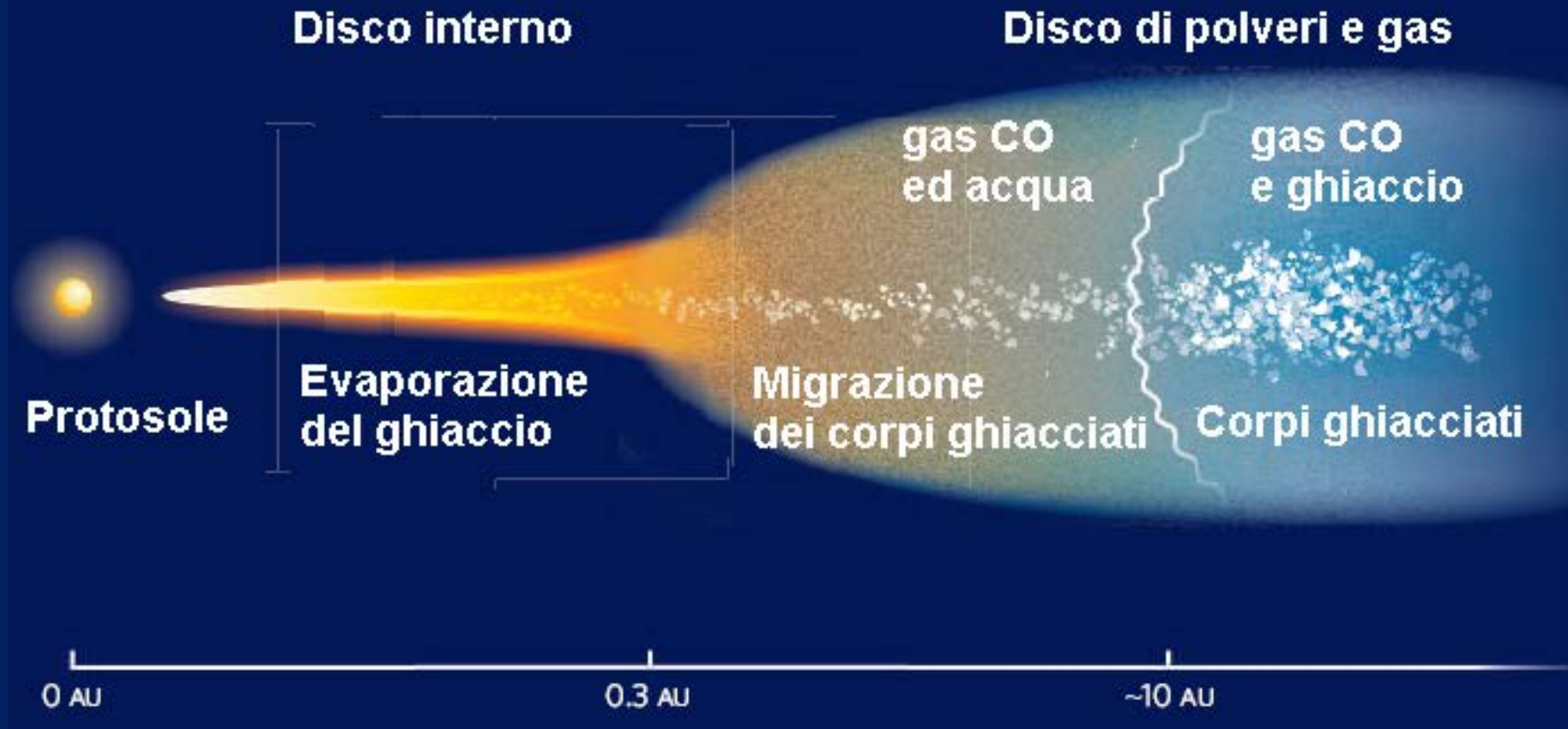
42 Simulazioni di accrescimento planetario nella fase finale

In tutte le simulazioni formiamo da 1 a 4 pianeti terrestri entro 2 UA con differenti masse e diverso contenuto negli elementi "volatili"

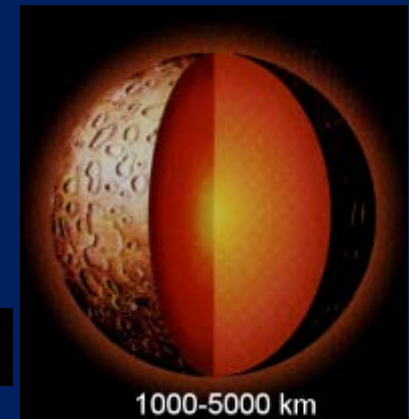
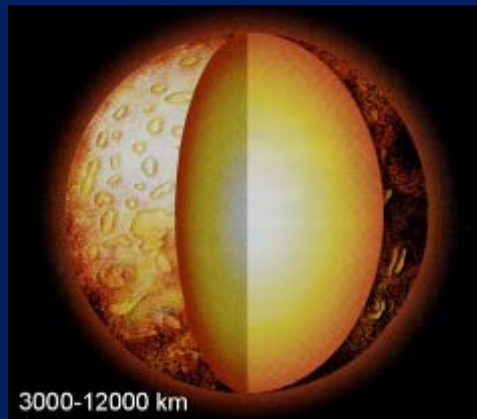
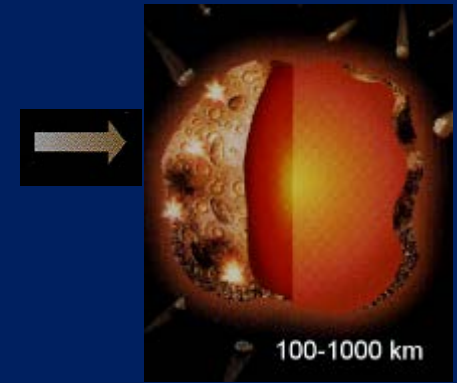
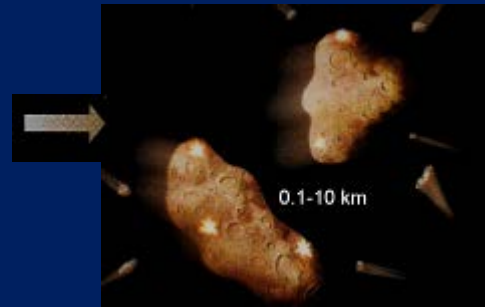
Nelle 42 simulazioni formiamo 43 pianeti tra 0,8 ed 1,5 UA con 11 pianeti "abitabili" tra 0,9 e 1,1 UA

I pianeti "abitabili" presentano diverse condizioni: da quelli "secchi" a "mondi acquosi" con diversi "oceani d'acqua" (1 oceano = 1.5×10^{24} g), e con massa variabile tra $0.23M_{\text{T}}$ e $3.85 M_{\text{T}}$.

Andamento di densità nel disco e linea del " ghiaccio" selezione nella formazione dei pianeti interni rispetto ai pianeti esterni

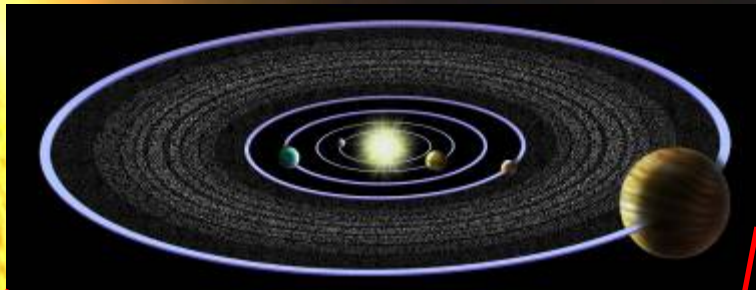


La sequenza di formazione del Sistema solare



Il Sistema solare

I corpi del Sistema Solare



La fascia asteroidale tra Marte e Giove



Giove

Saturno

Urano Nettuno

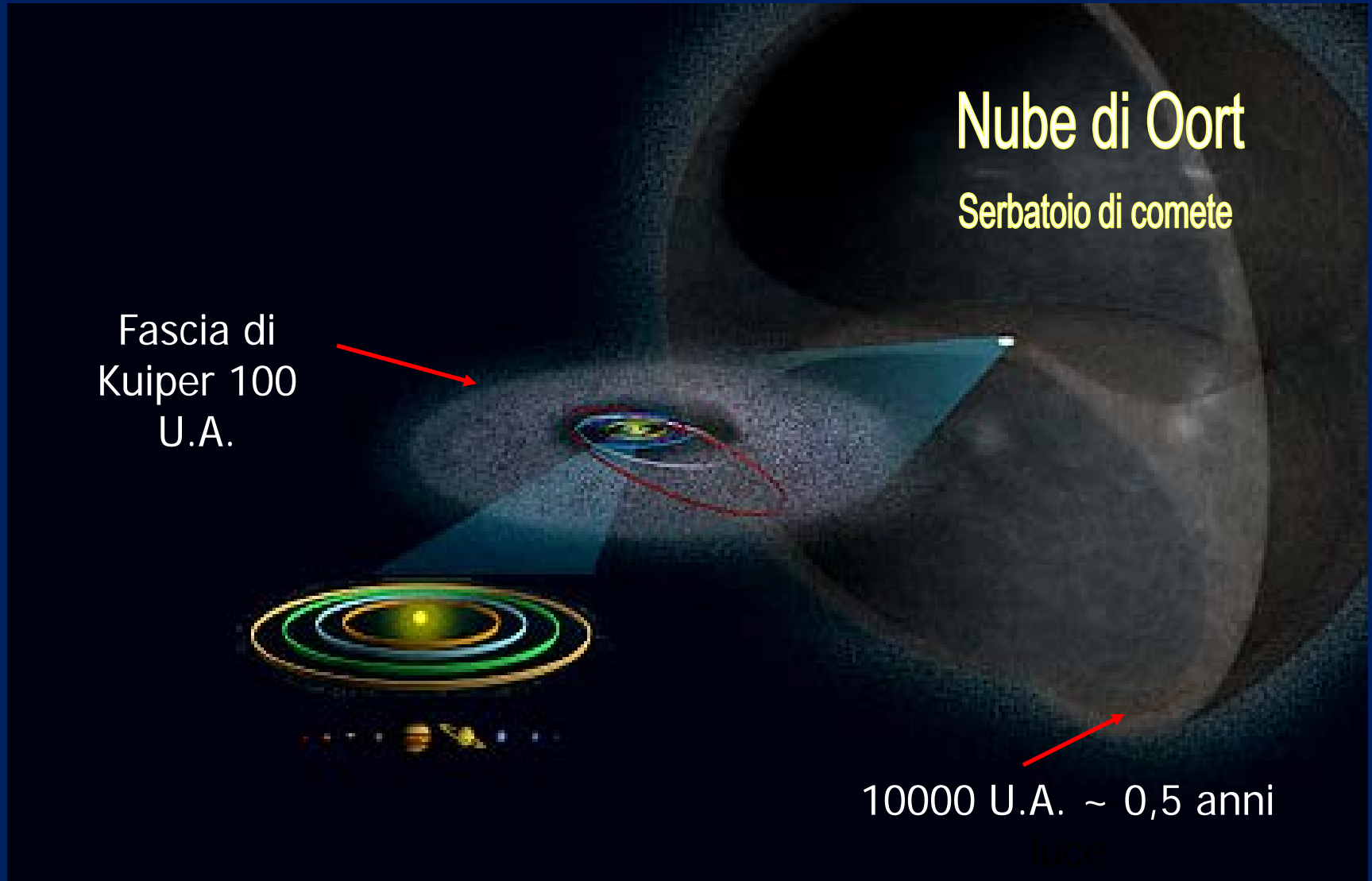


Mercurio Venere Terra Marte

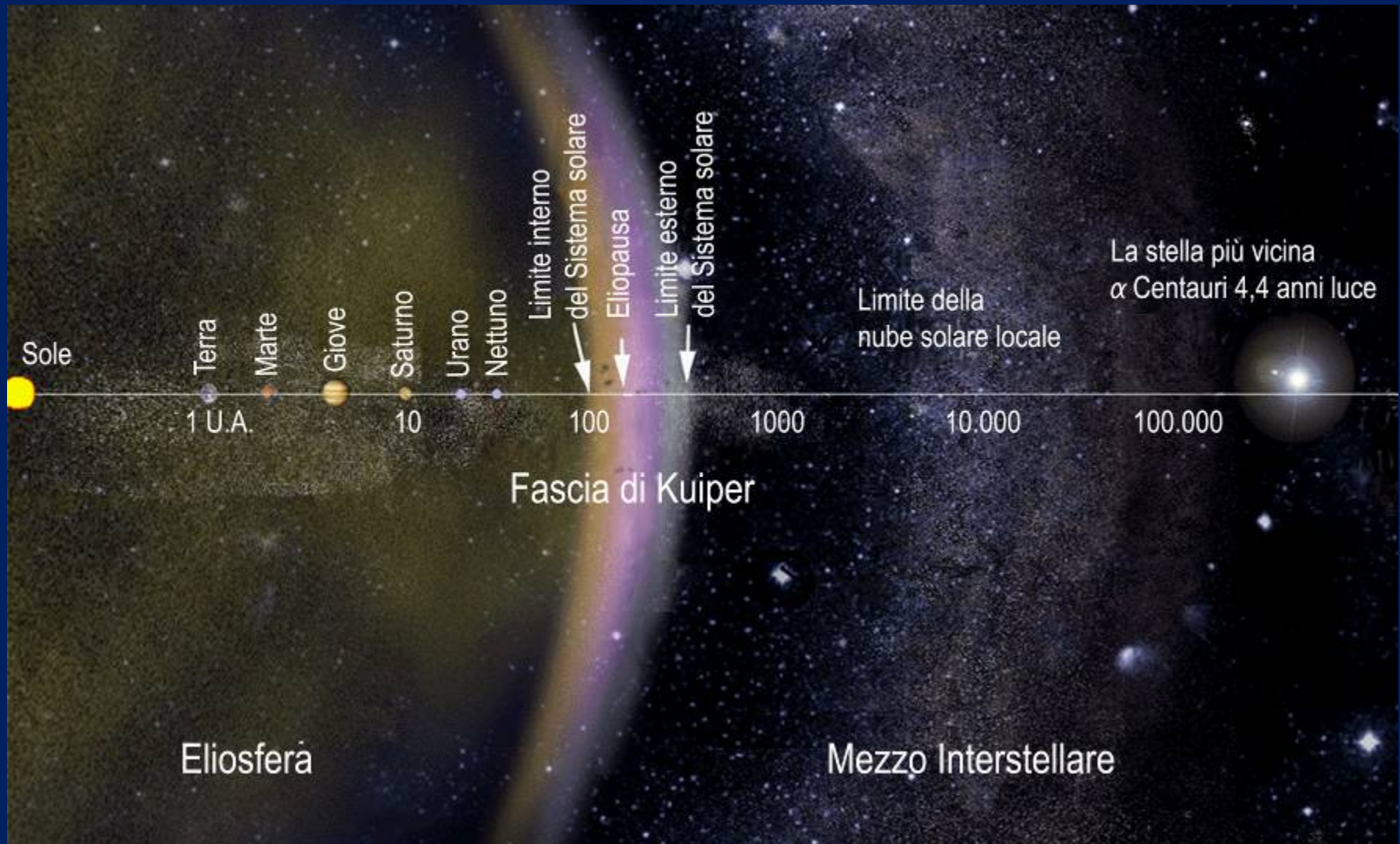


Plutone e la fascia di Kuiper

Tutto il Sistema solare dai pianeti alle comete (nube di Oort)

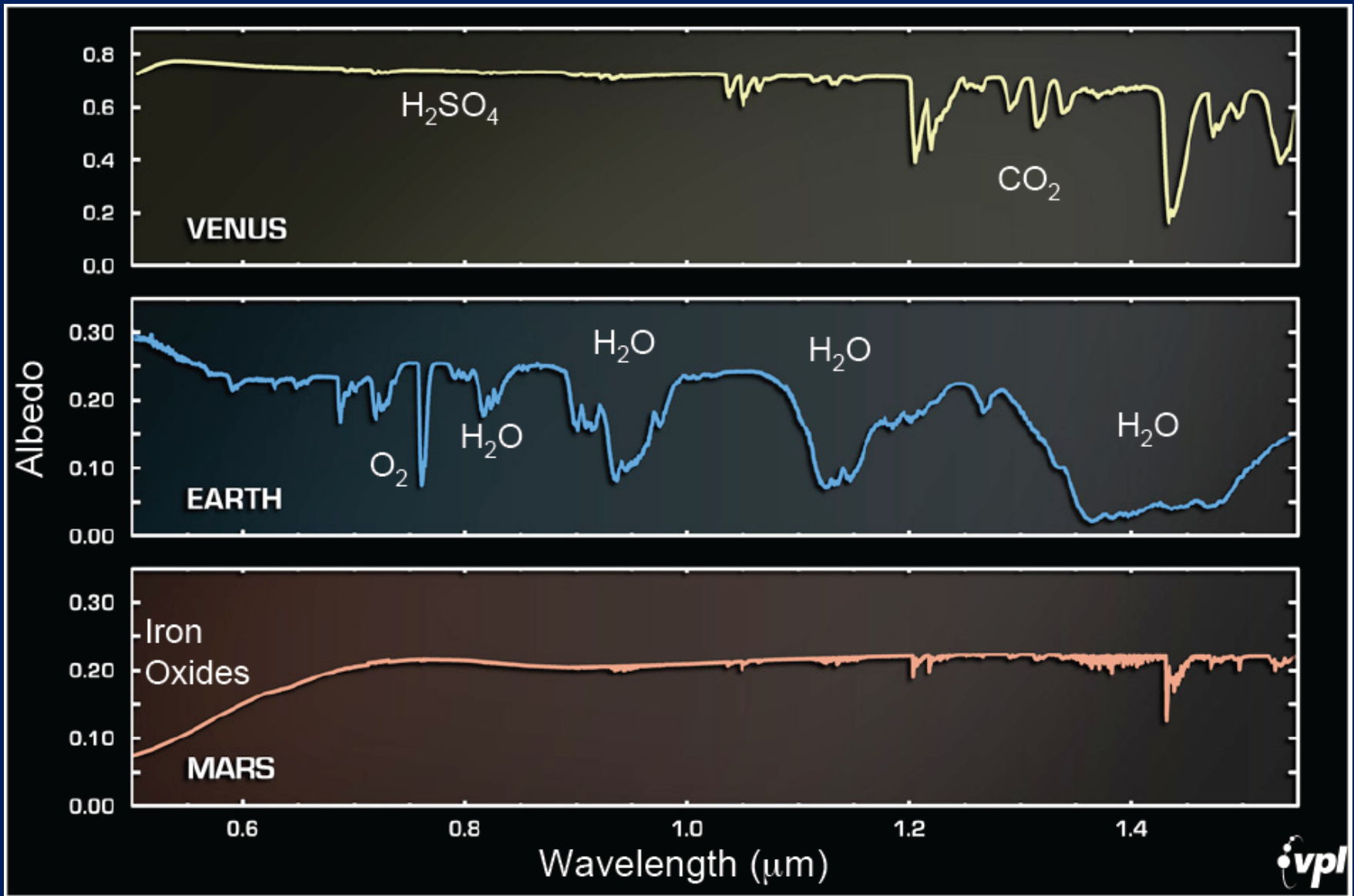


Una ricostruzione del Sistema solare oltre la fascia di Kuiper e la nube di Oort

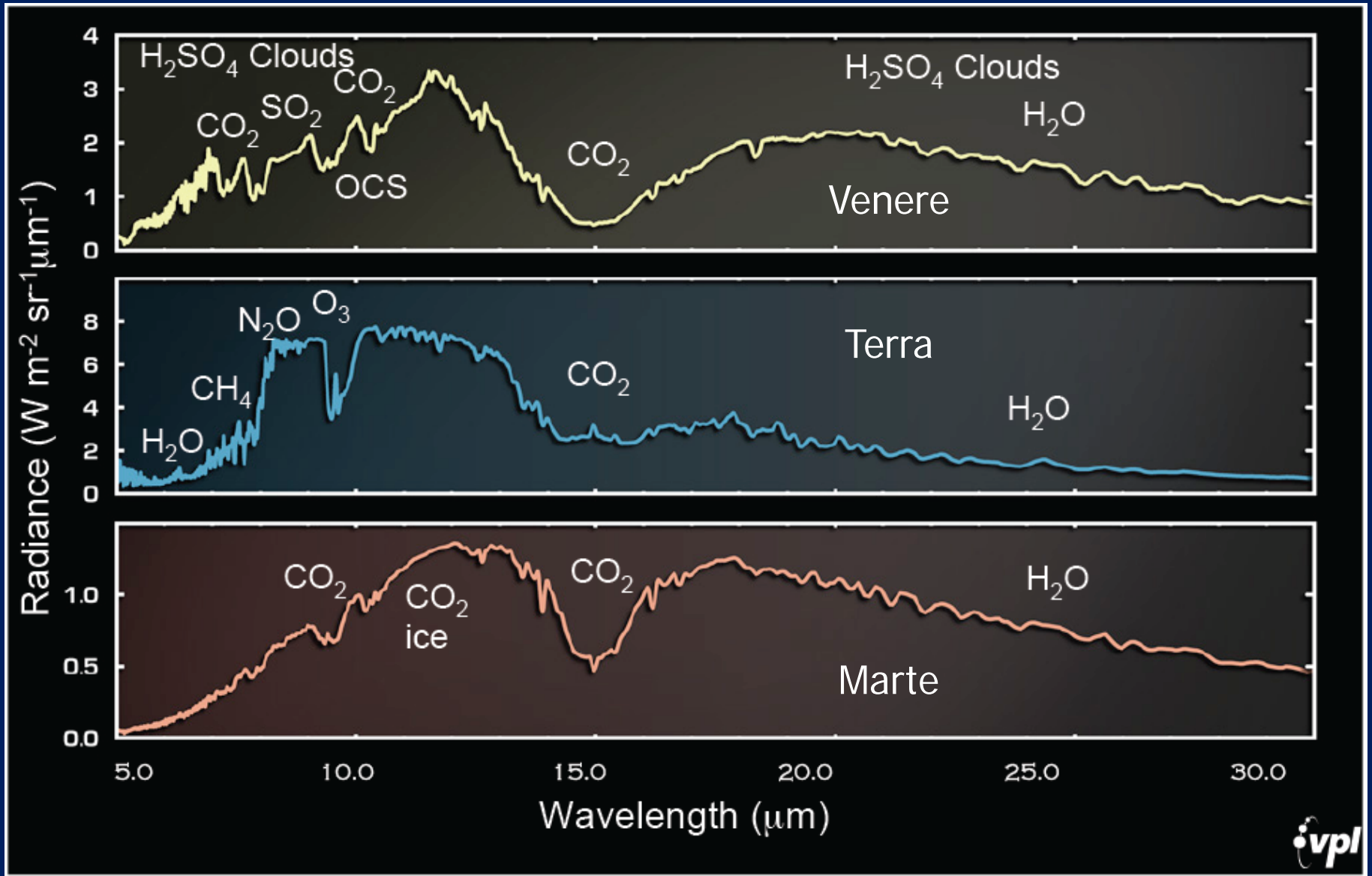


Acqua nella fascia interna

Albedo pianeti terrestri

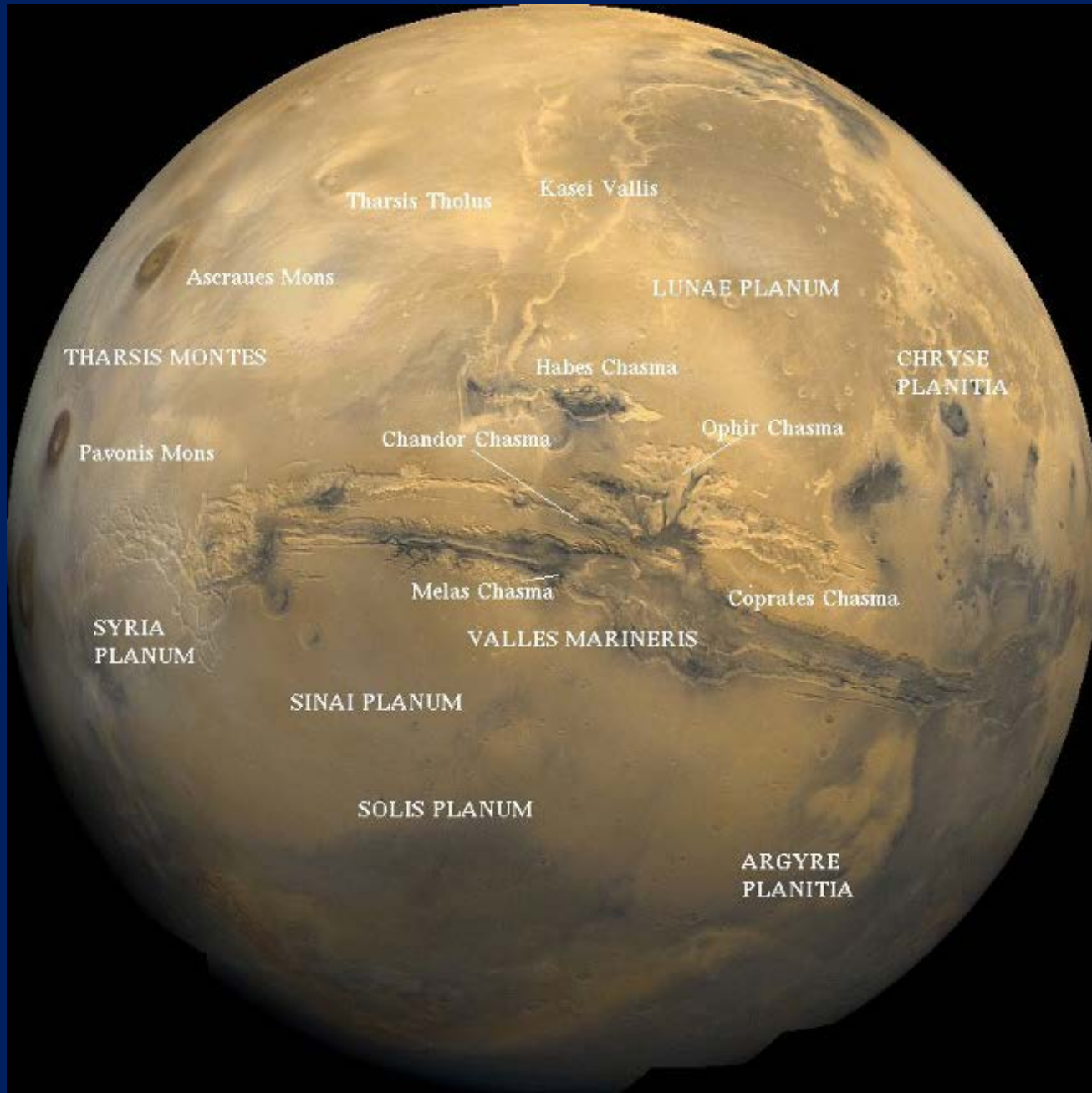


Radianza pianeti terrestri



Marte

Sonda
Viking
orbiter



Phoenix Lander - acqua ai poli

Sol 20



Sol 24

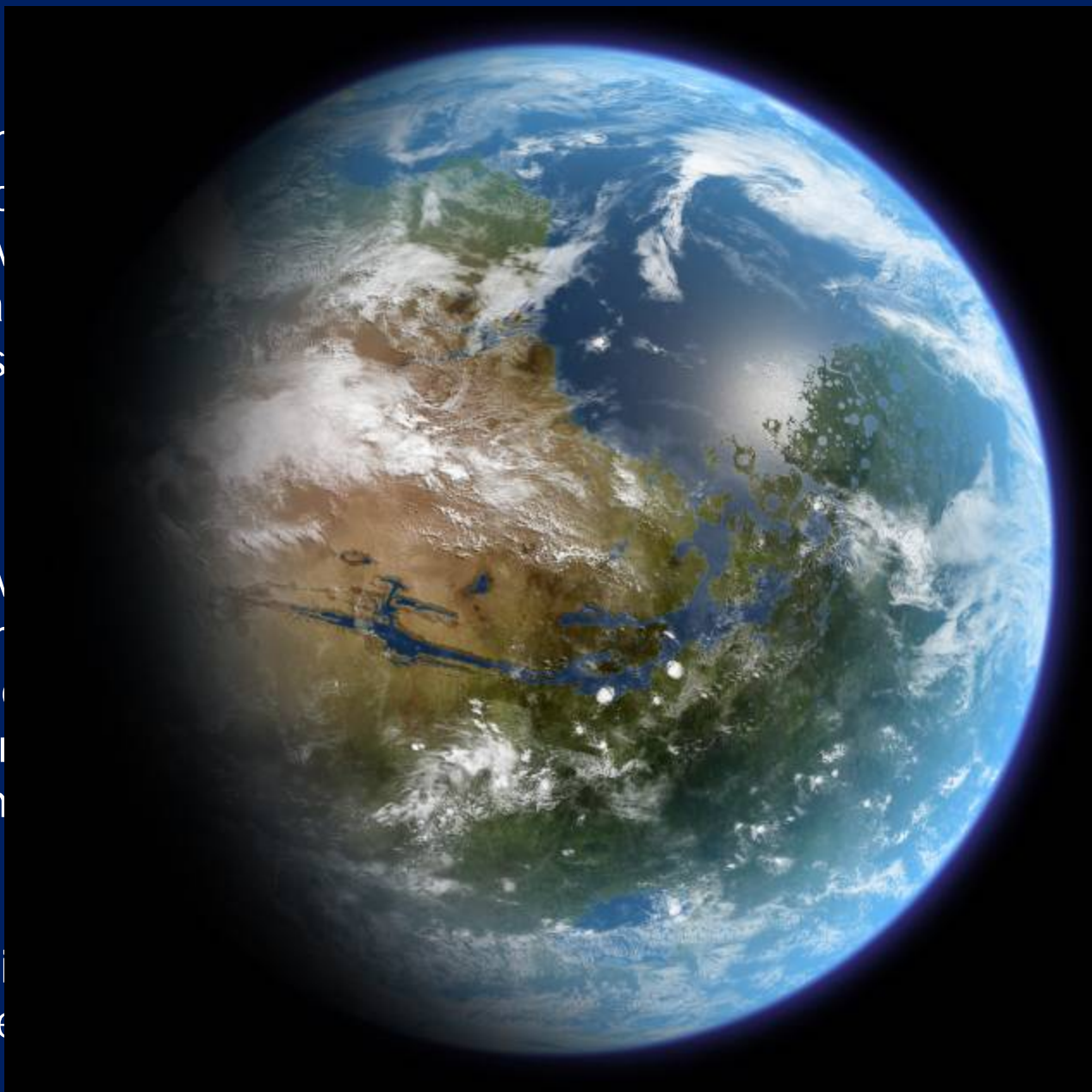


Una sintesi della storia primordiale di Marte

- 4.5
- Forma
- Si fo
- Attiv
- della
- Flus

- 4.0
- Attiv
- Form
- L'ac
- Svar
- l'atm

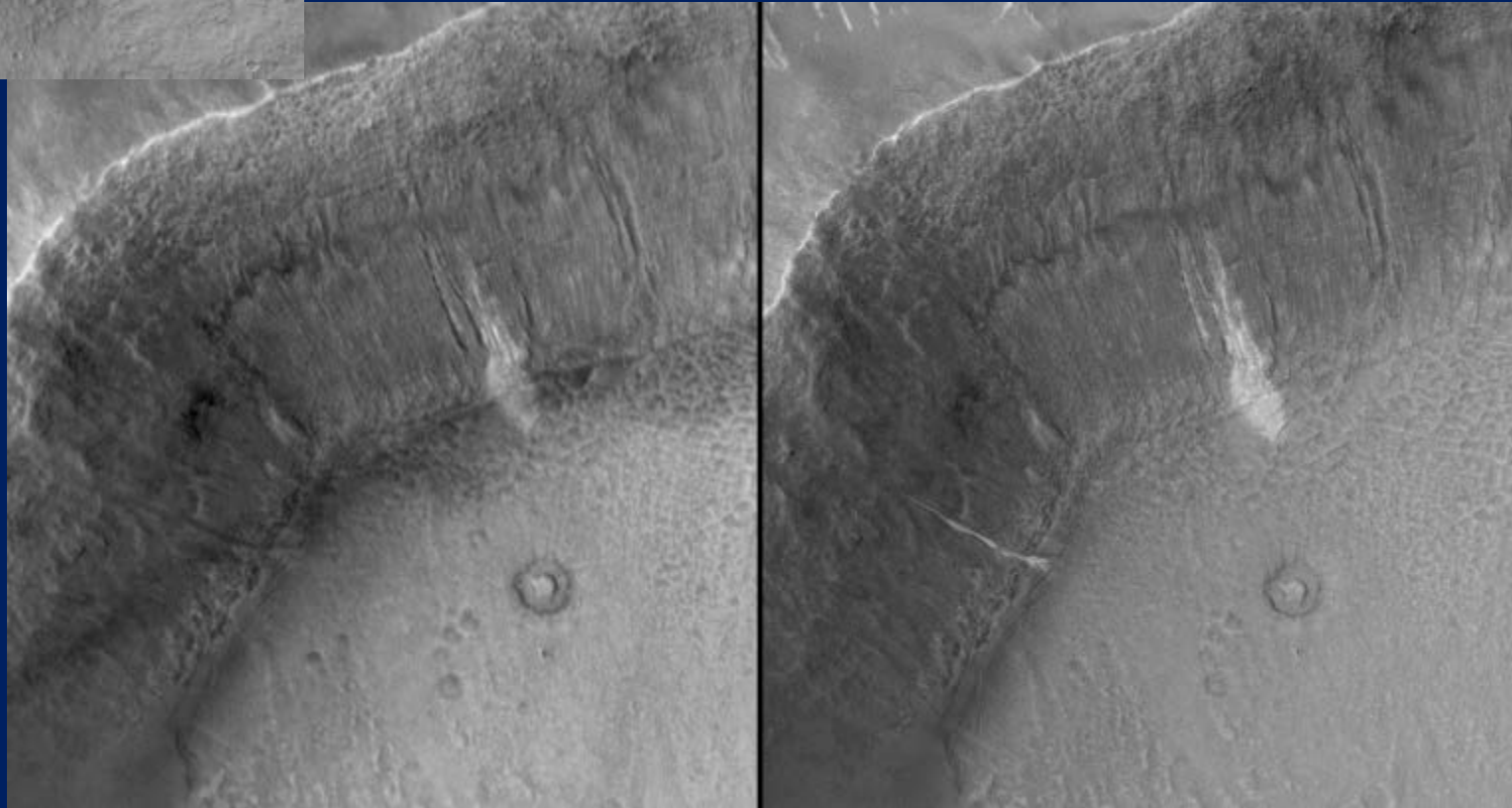
- 3.0
- Ossi
- Asse



no Tharsis e

ice

Acqua liquida ... su Marte?

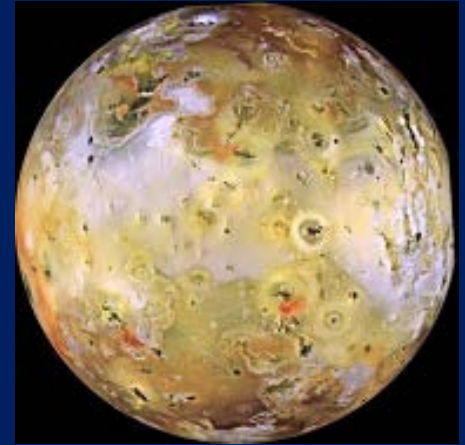


Acqua nella fascia esterna

Giove ed i pianeti medicei visti dalla sonda Galileo



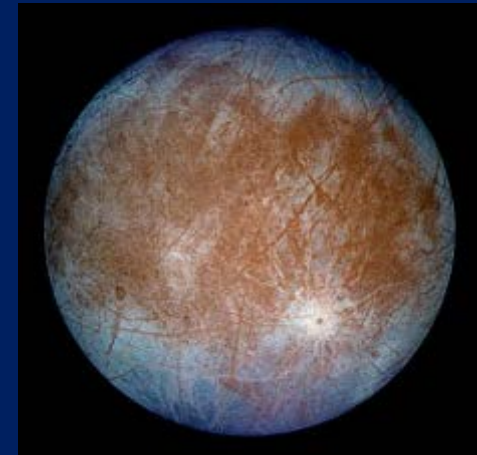
Callisto



Io

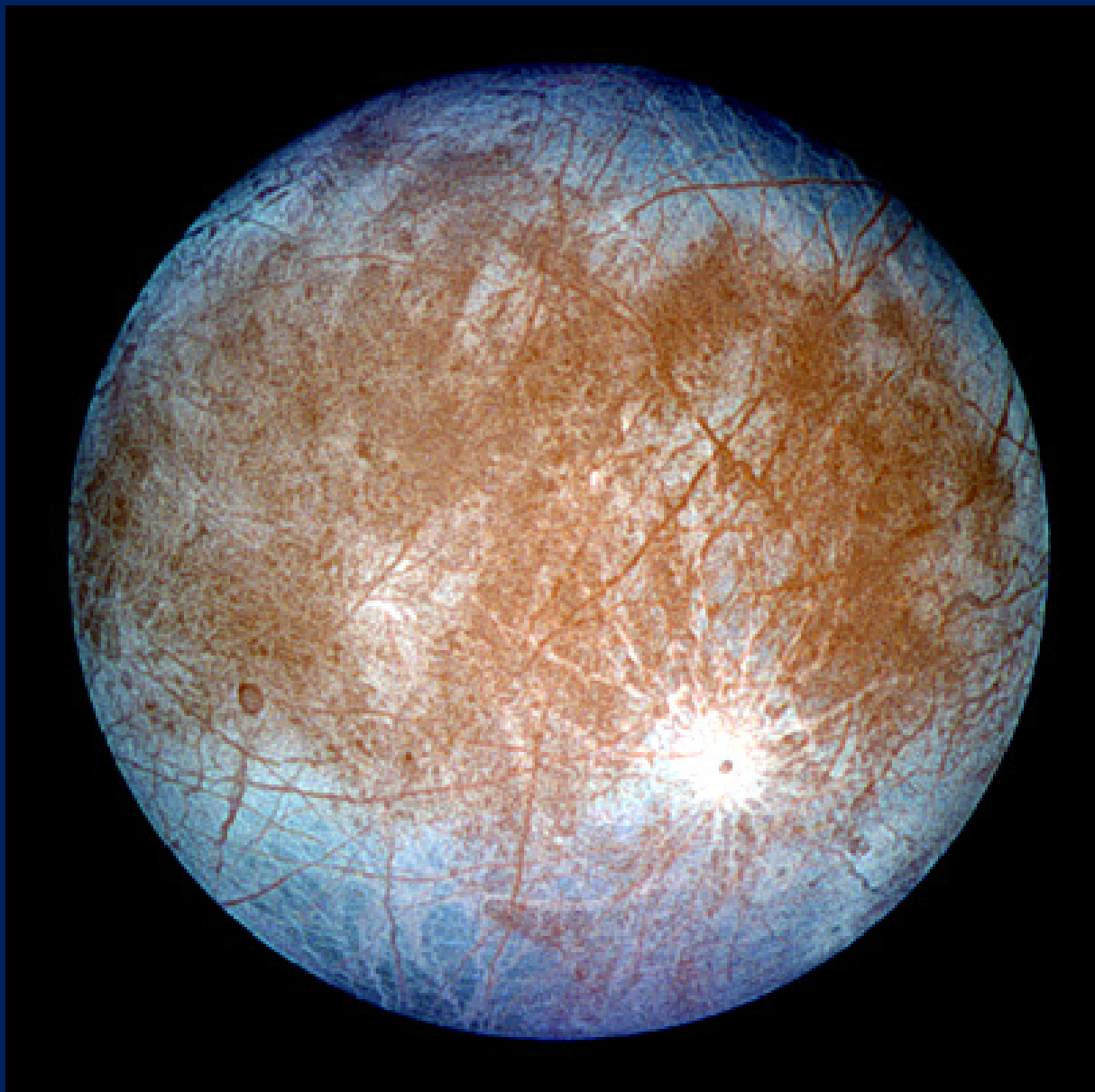


Ganimede



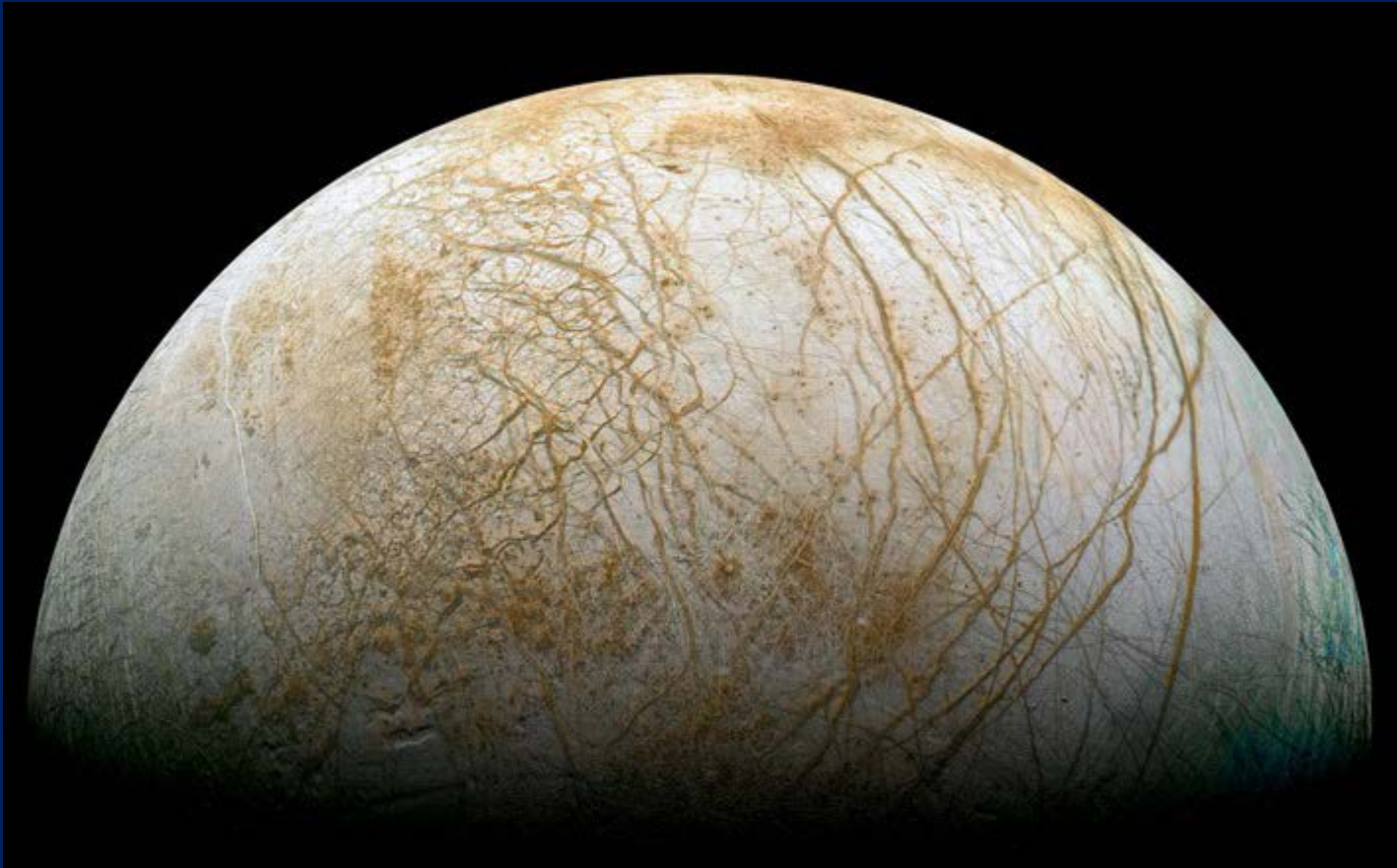
Europa

Europa un satellite di “ghiaccio”



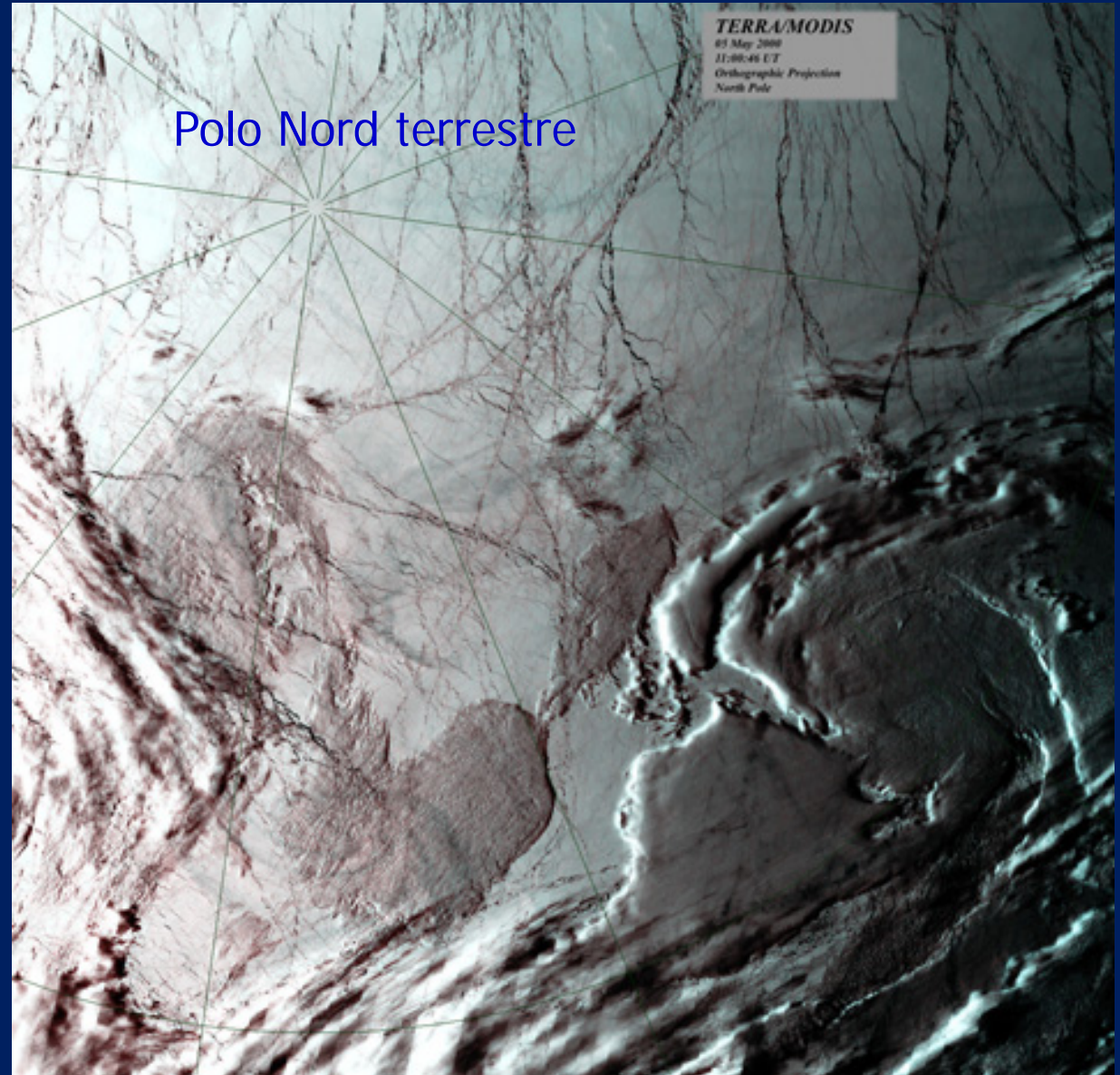
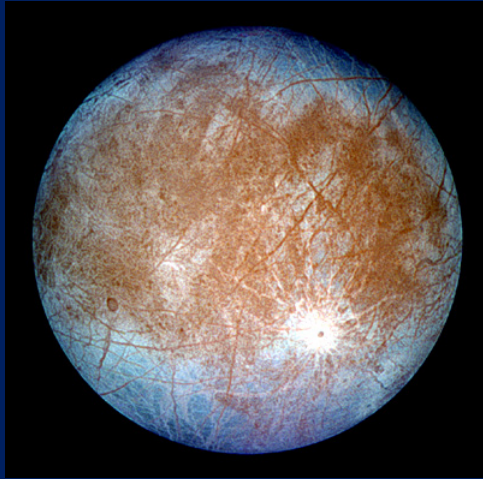
Europa mostra dettagli della sua superficie, confermati dalla missione Galileo, che **suggeriscono** l'esistenza di uno strato di ghiaccio sotto il quale si trovi un'altro strato di acqua liquida profondo decine di km

Acqua su Europa



Una stima indica una quantità d'acqua doppia di quella terrestre

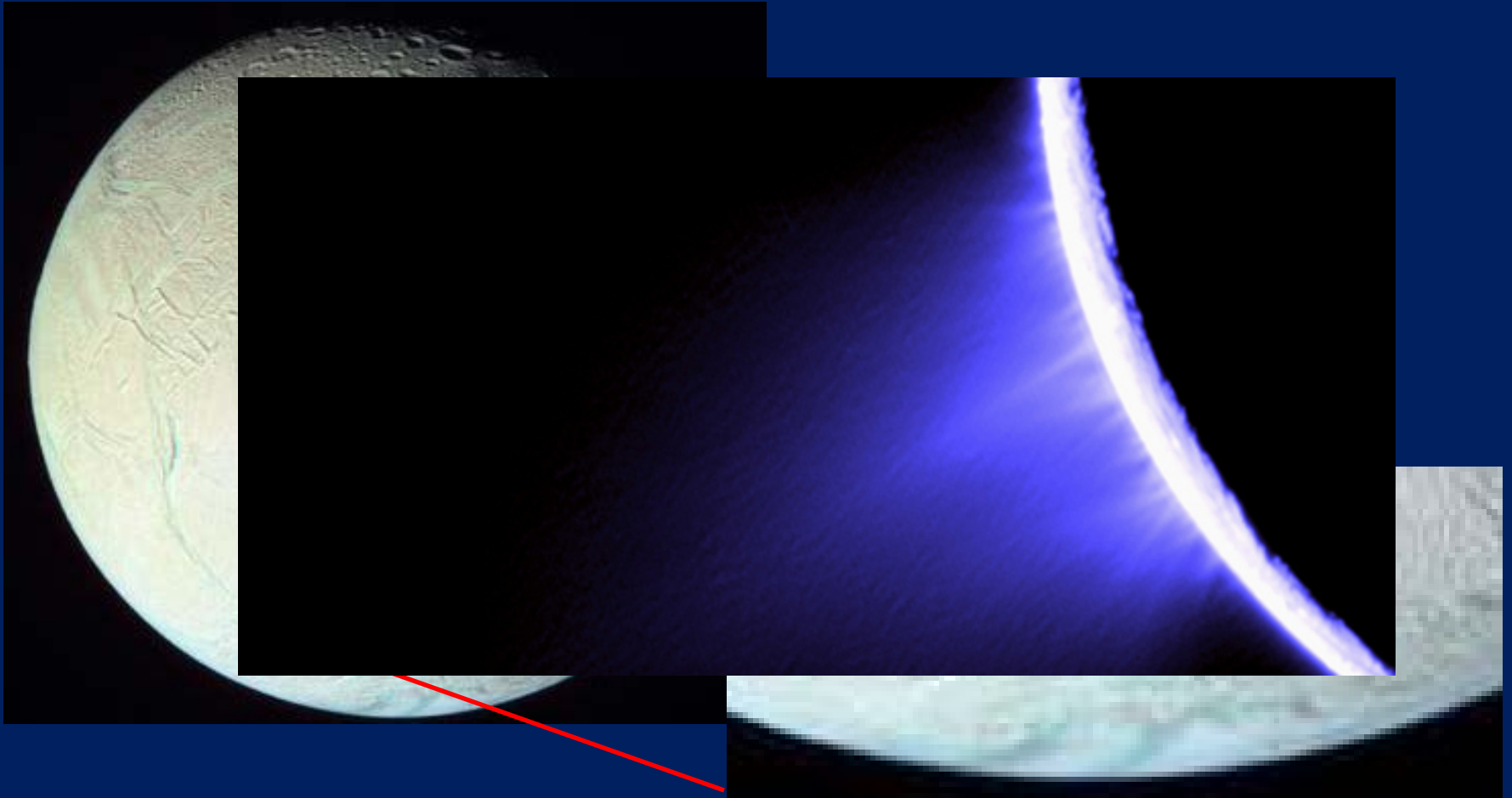
Confronto con la superficie ghiacciata al Polo Nord terrestre



La superficie di Europa satellite di Giove sonda Galileo



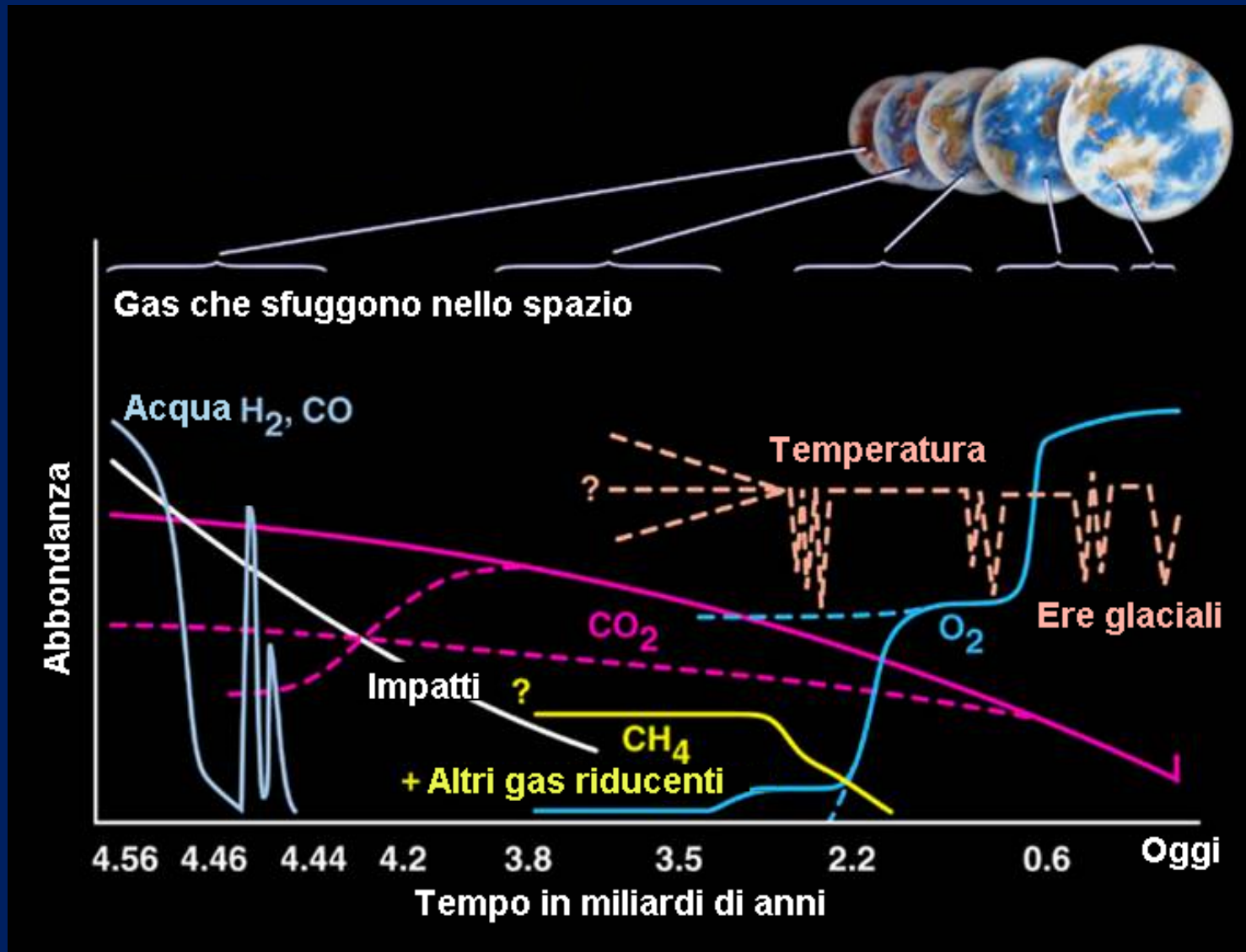
Encelado satellite di Saturno



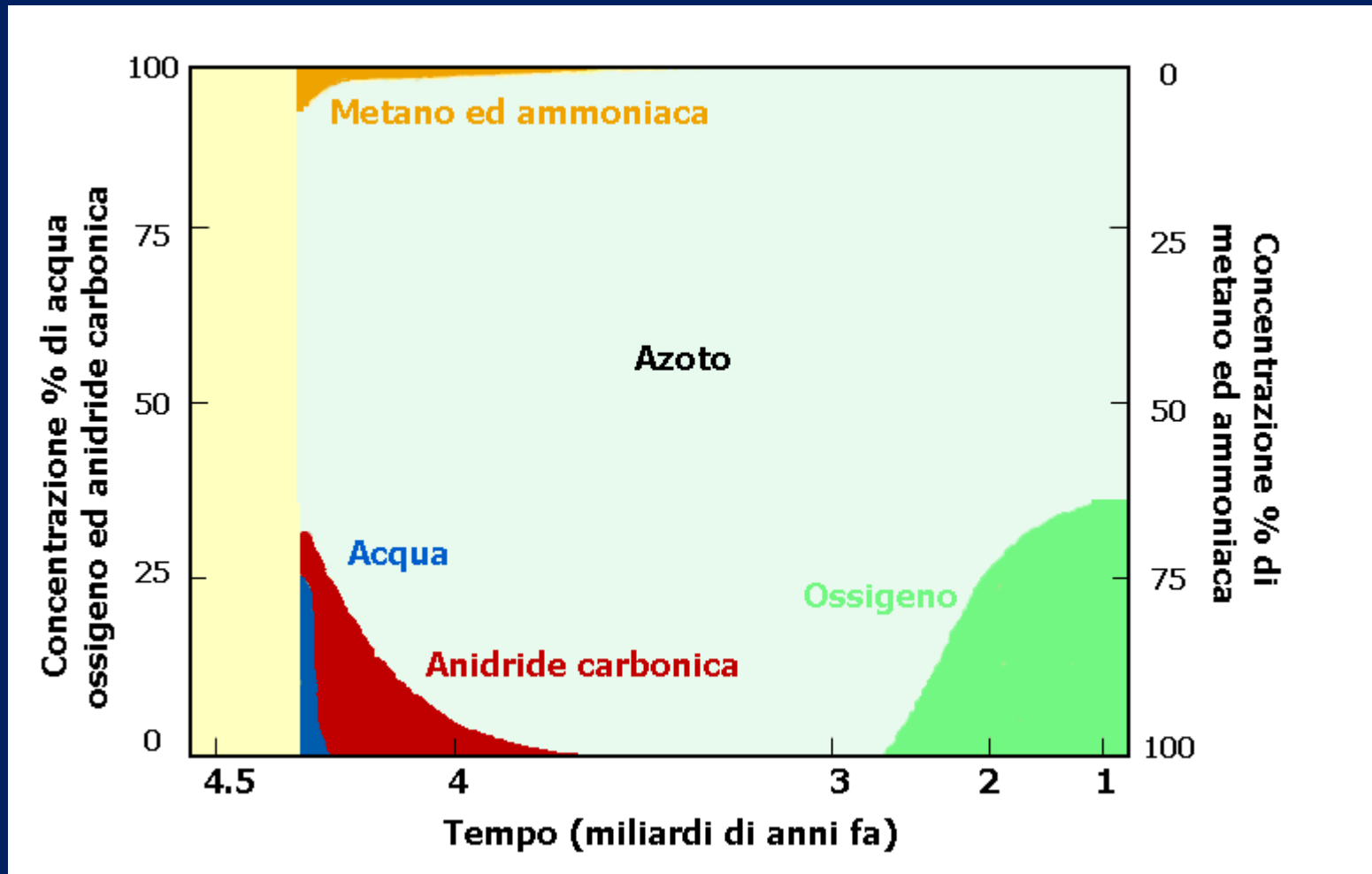
La **sonda Cassini** ha osservato su Encelado dei Geyser di materiale (acqua) espulso dalla sottosuolo di questo satellite ghiacciato

Terra

Acqua ed atmosfera terrestre

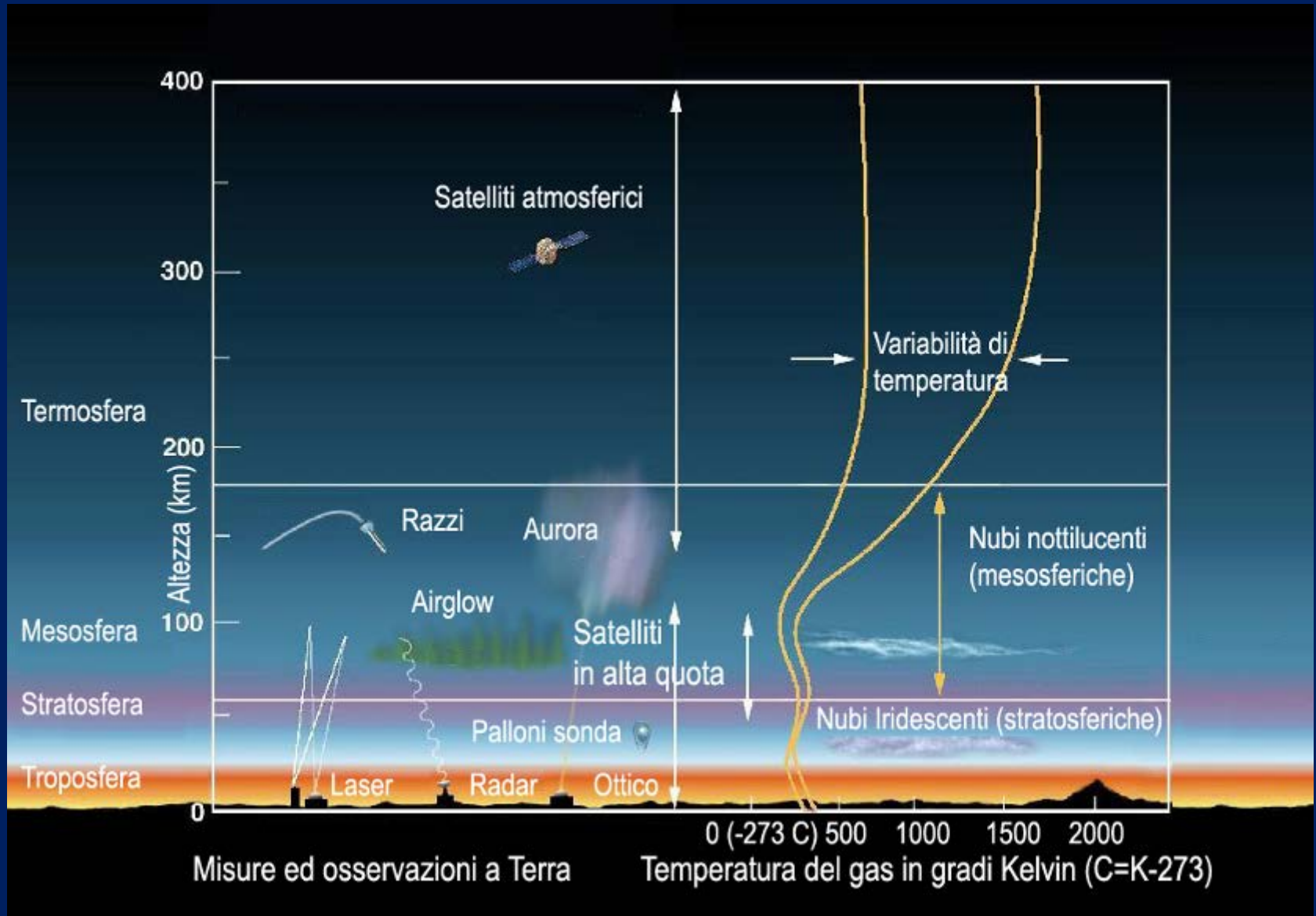


L'evoluzione dell'atmosfera terrestre



Dall'atmosfera primordiale (riducente) a quella attuale ricca di O_2 (ossidante)

L'atmosfera terrestre



Ecosfera planetaria e zona abitabile



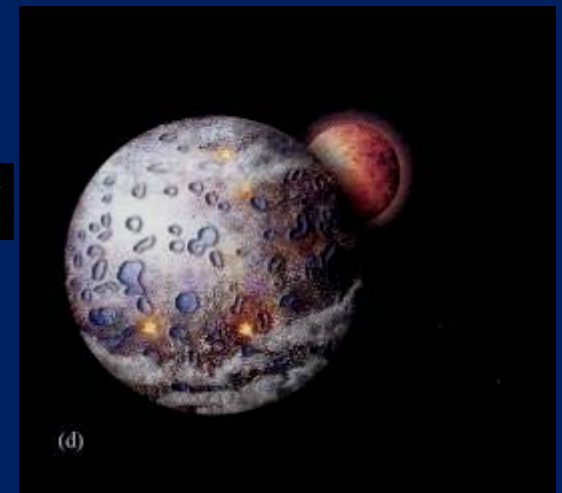
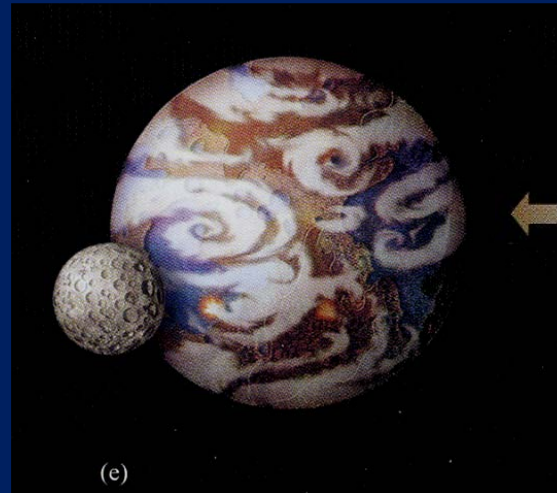
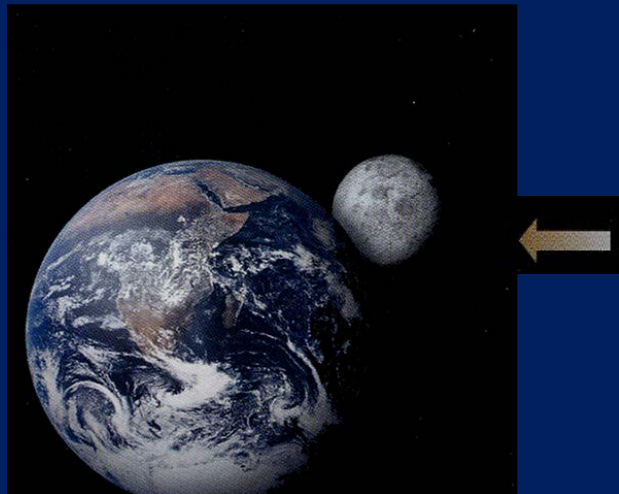
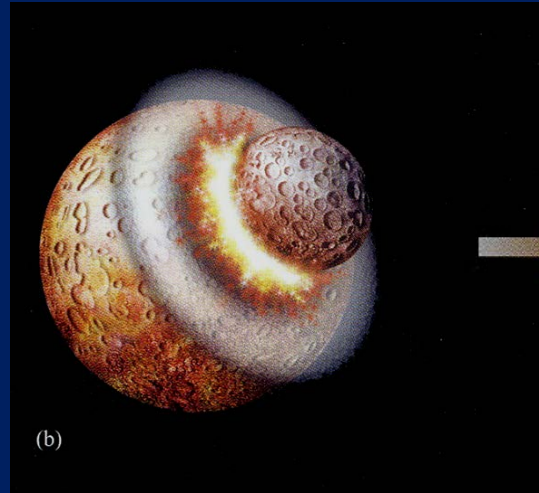
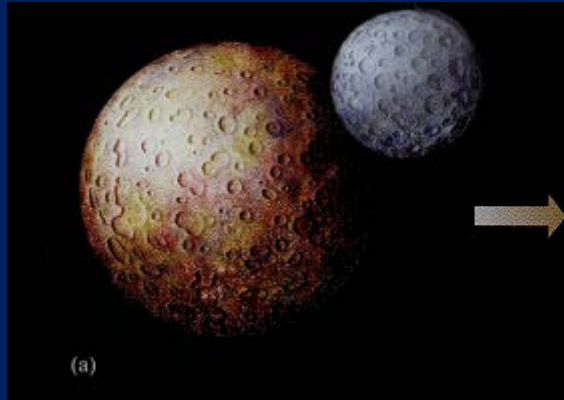
La **Terra** e **Marte** si trovano nell'ecosfera solare. **Marte** è appena fuori quest'area anche se la sua atmosfera (la cui densità è circa l'1 % quella dell'atmosfera terrestre) non trattiene sufficiente calore per mantenere oggi liquida l'acqua sulla sua superficie

Nel nostro **Sistema Solare** la zona di abitabilità si sposta verso l'esterno via via che il Sole si fa più caldo.

La Terra e la Luna un pianeta doppio



Il modello dell'Impatto Gigante



L'Impatto Gigante



Fine