Università "Primo Levi"

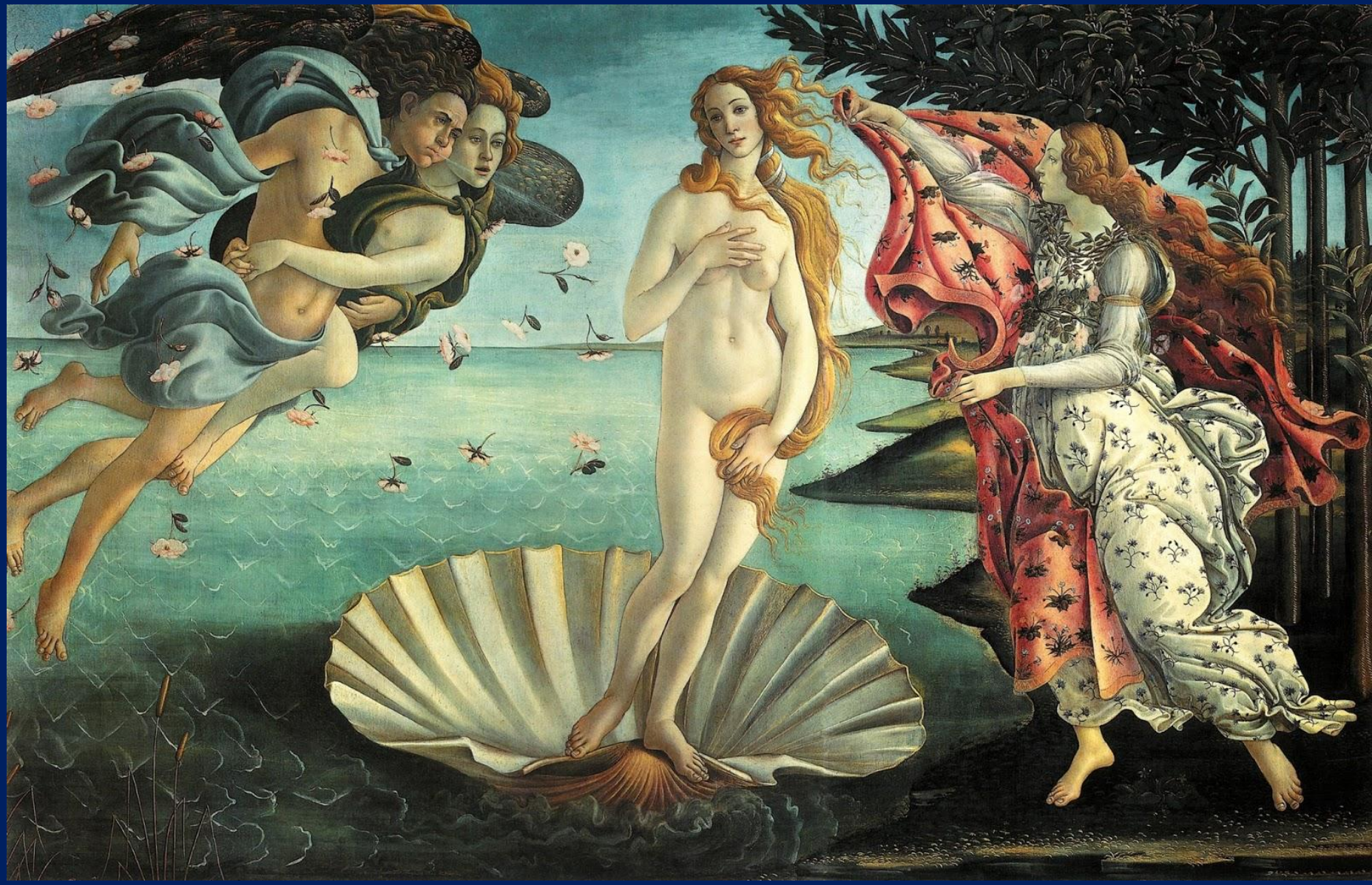
23 Febbraio 2018

L'acqua nel Sistema solare

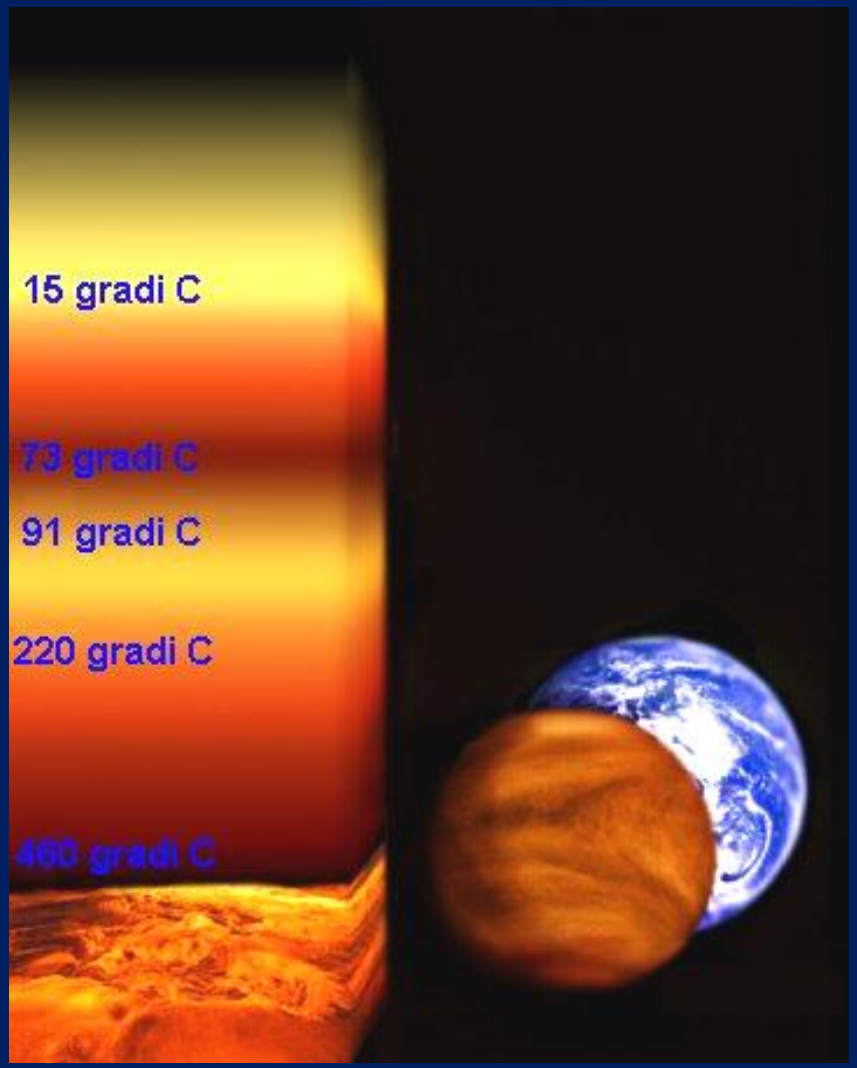
Bedogni Roberto INAF Osservatorio Astronomico di Bologna
http://www.bo.astro.it/~bedogni/

email: roberto.bedogni@oabo.inaf.it oppure robob5206@gmail.com

Venere



Vapor d'acqua nell'atmosfera di Venere



Pressione superficiale 92 bars ~ 100 atm

Densità superficiale ~ 65 kg/m^3

Altezza di scala 15,9 km

Massa totale ~ 4,8 x 10^{20} kg

Temperatura media 464 ^oC

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

Peso molecolare medio 43,45 gr/mole

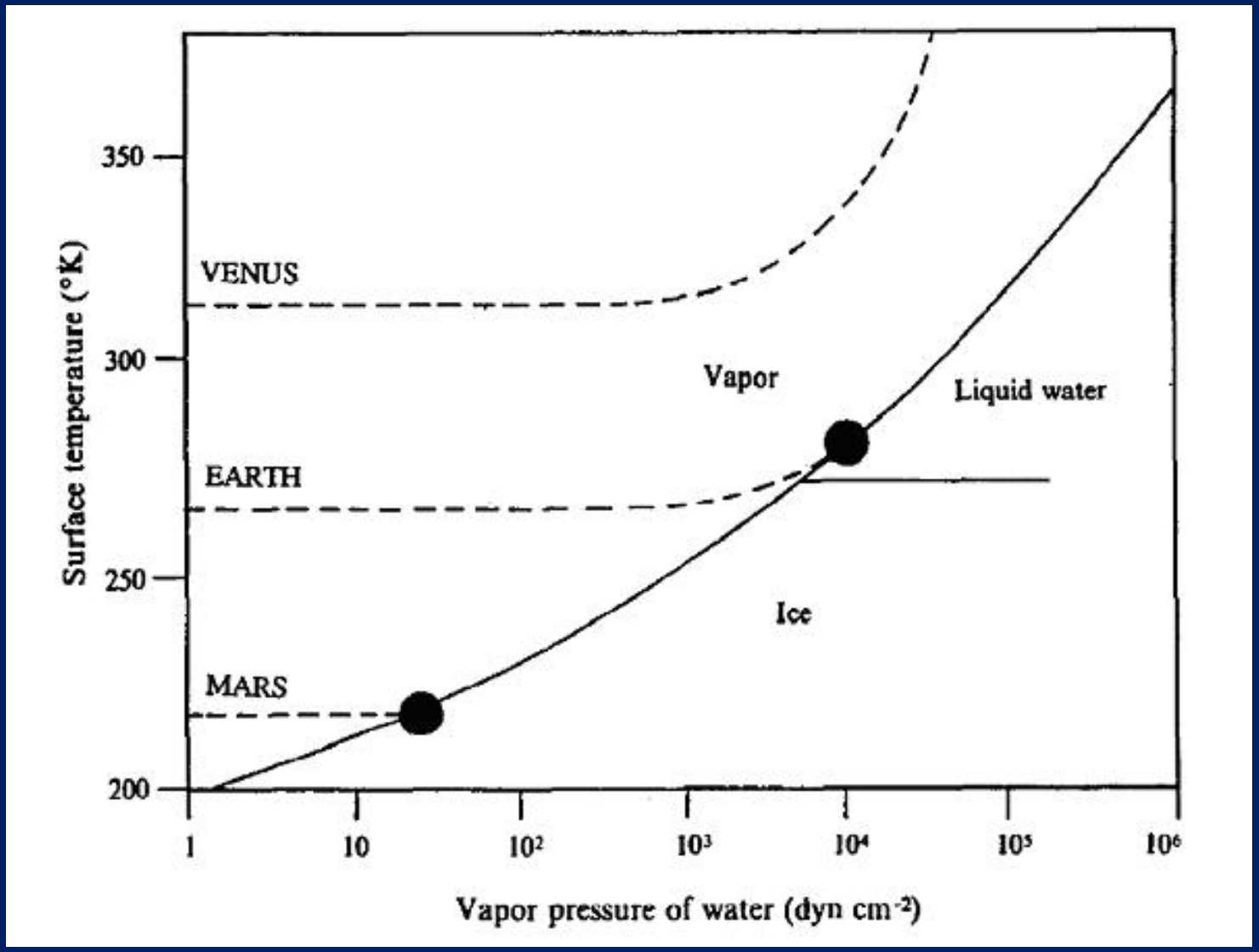
Composizione CO_2 96,5 %, N_2 3,5 %

in ppm SO_2 150, Ar 70, H_2O 20

CO 17, He 12, Ne 7

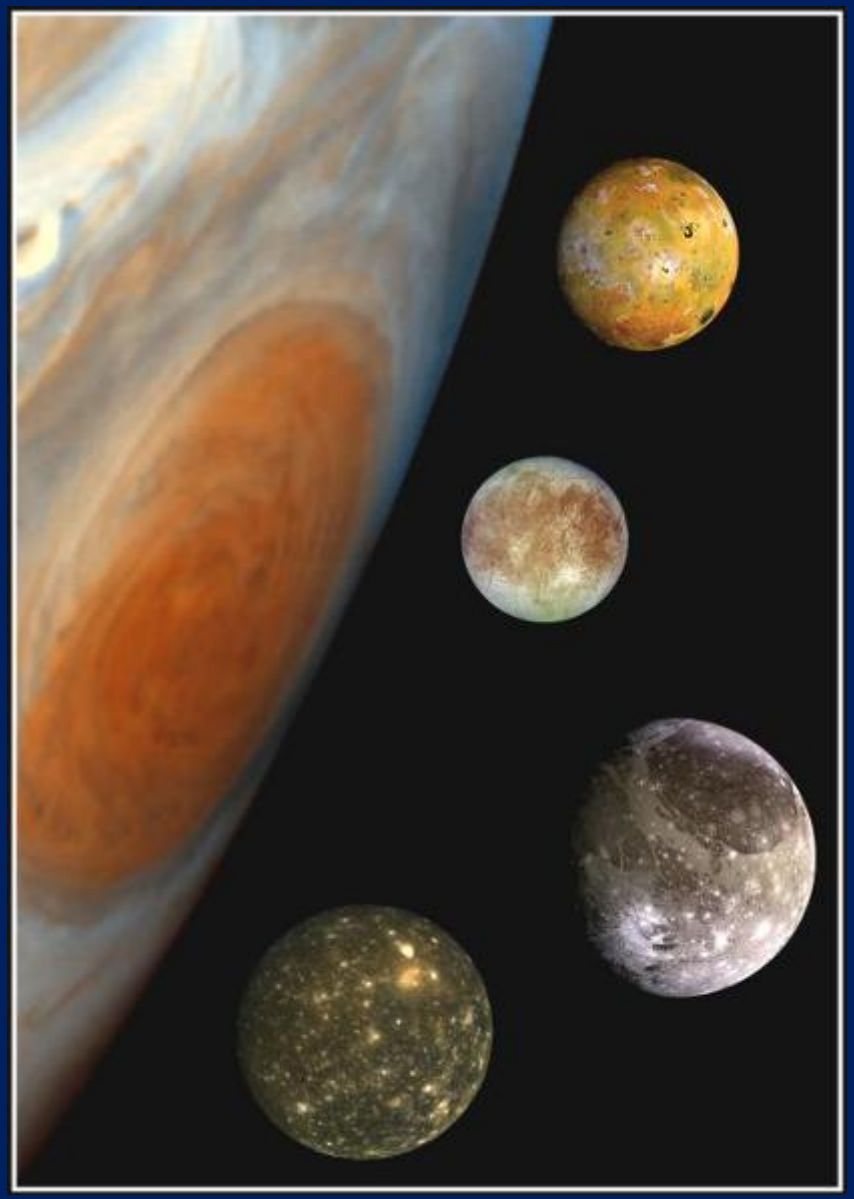
NB il valore 20 ppm si riferisce alla bassa atmosfera ma diminuisce a 3 ppm ad un'altezza di 90 km

Pressione di vapore

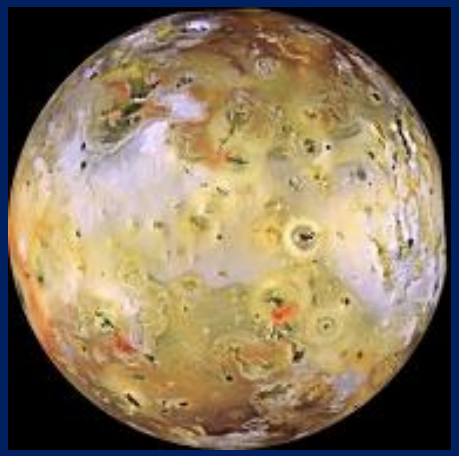


Acqua nella fascia esterna

Giove ed i pianeti medicei visti dalla sonda Galileo

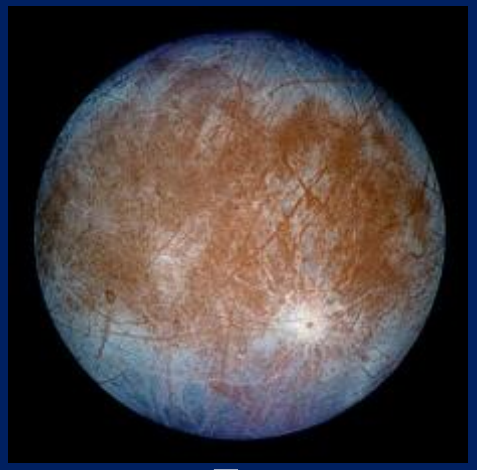


Callisto



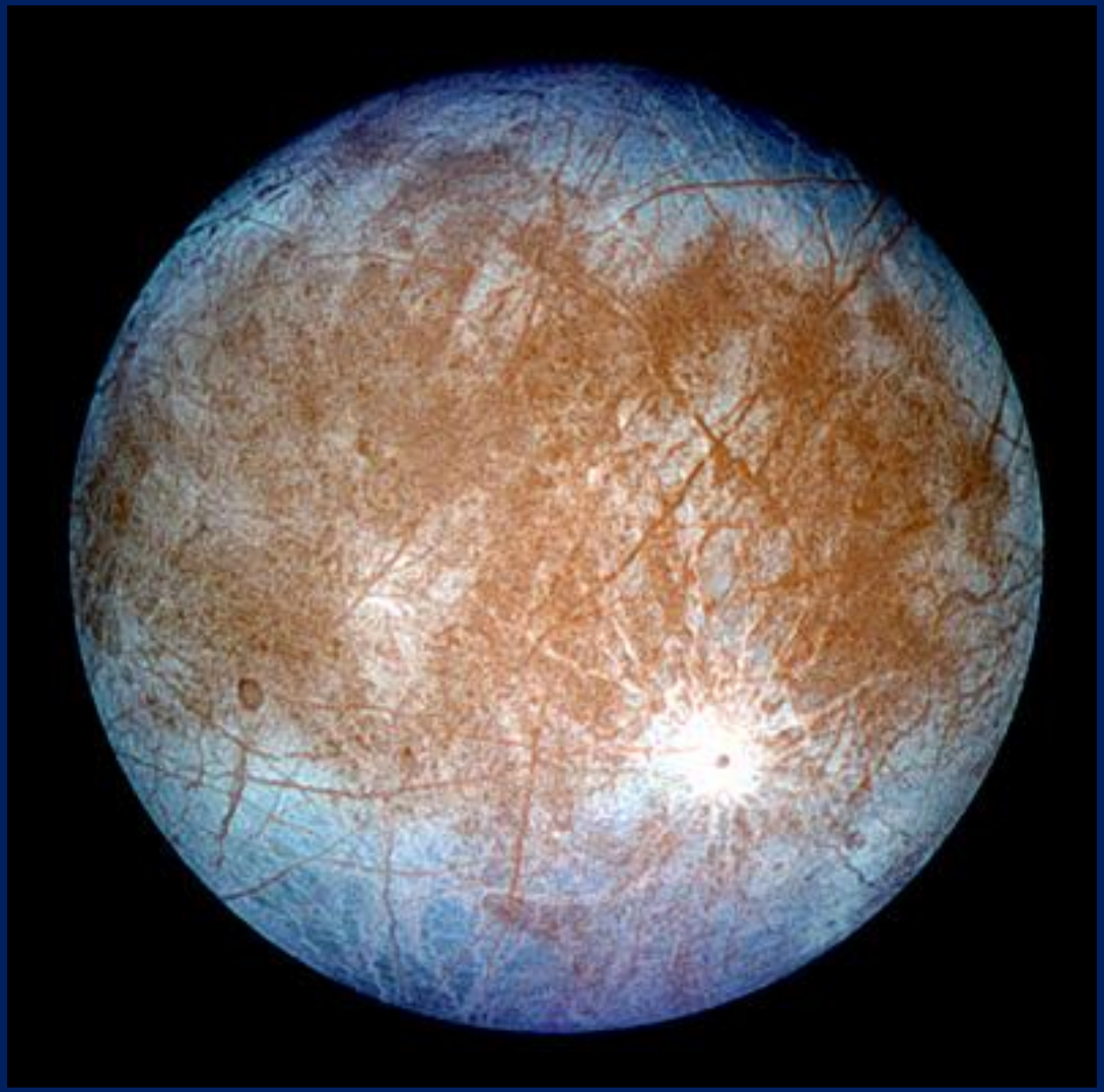
Io

Ganimede



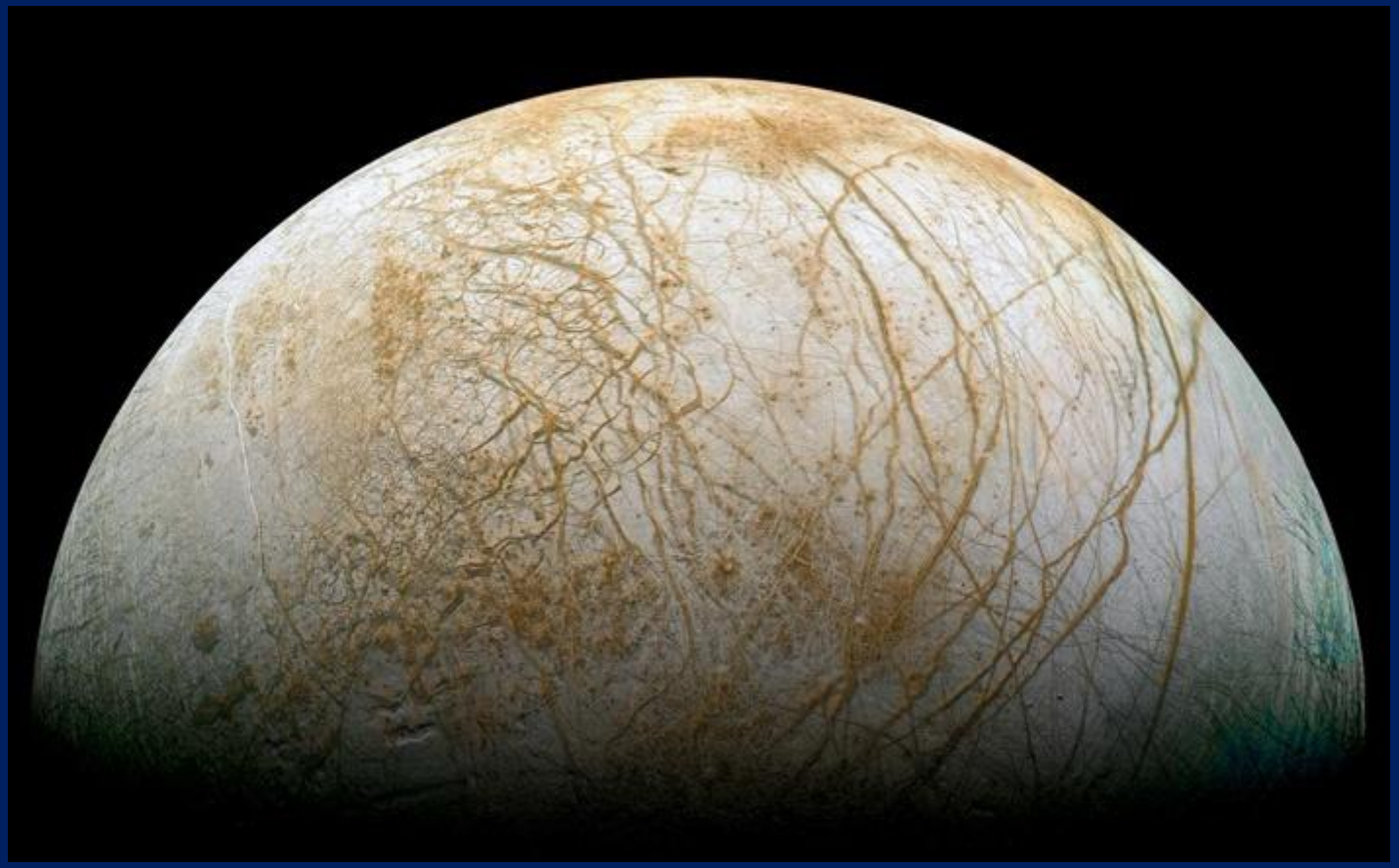
Europa

Europa un satellite di “ghiaccio”



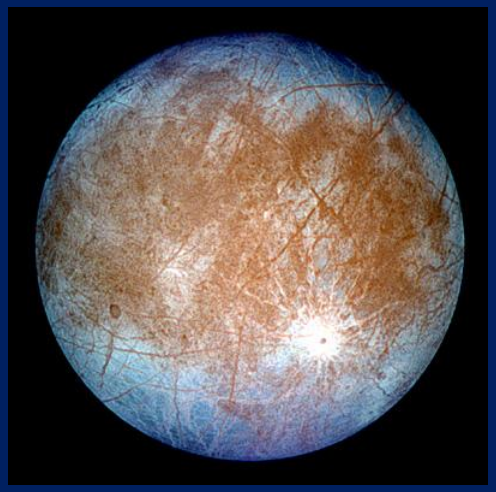
Europa mostra dettagli della sua superficie, confermati dalla missione Galileo, che suggeriscono l’esistenza di uno strato di ghiacchio sotto il quale si trovi un’altro strato di acqua liquida profondo decine di km

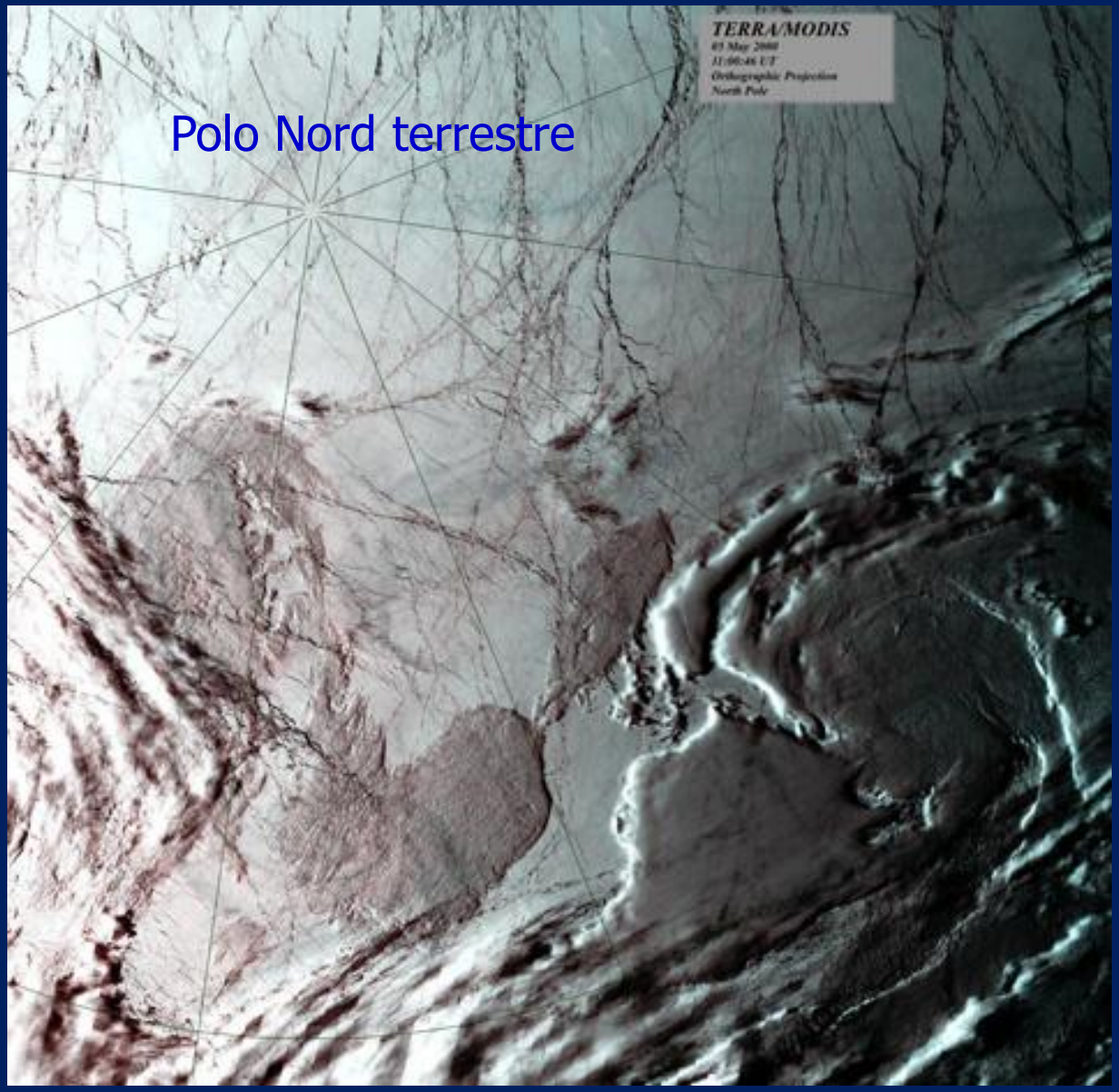
Acqua su Europa



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

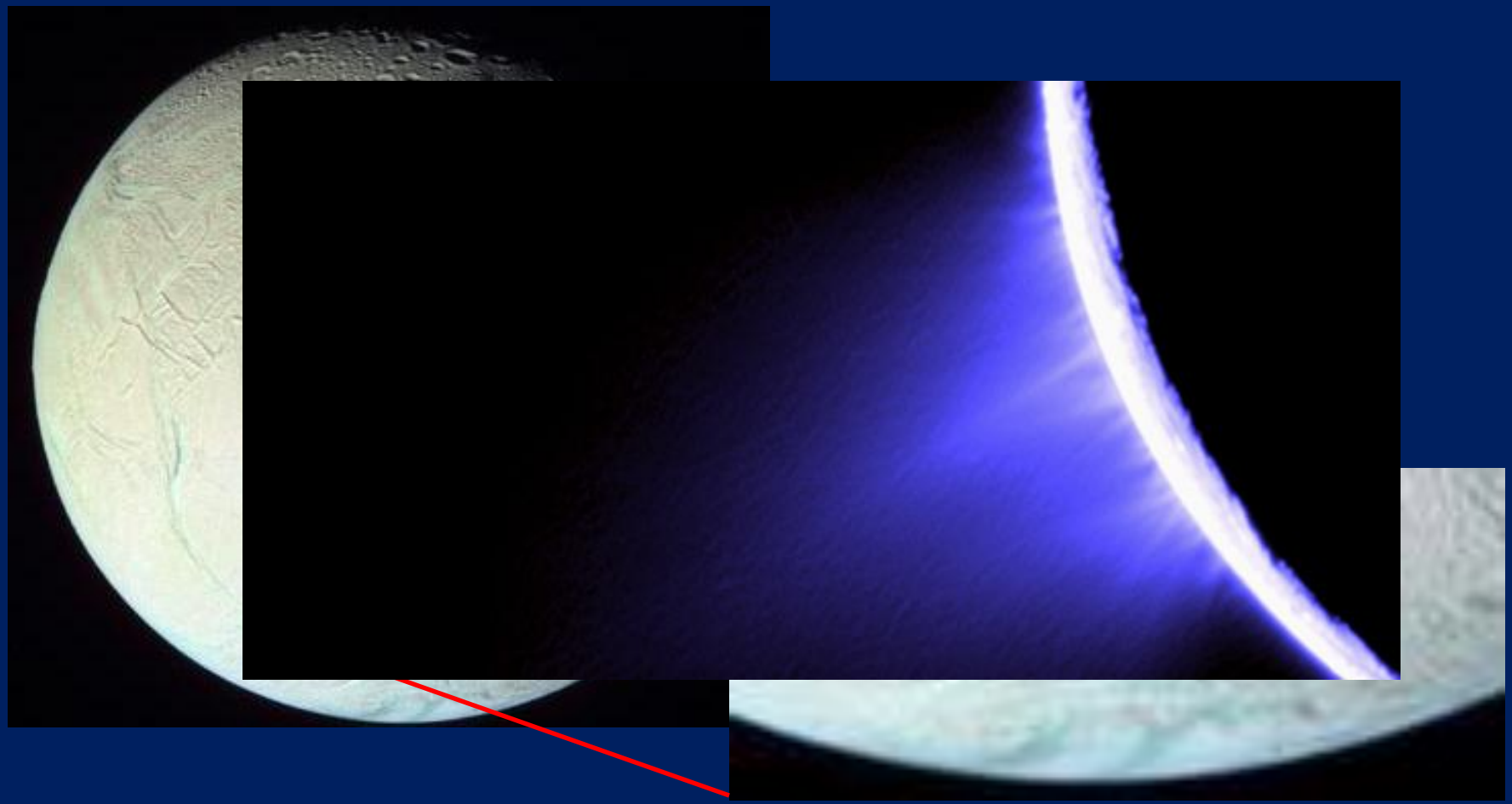
Confronto con la superficie ghiacciata al Polo Nord terrestre





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

Acqua nel sistema Solare

Acqua liquida nel Sistema solare

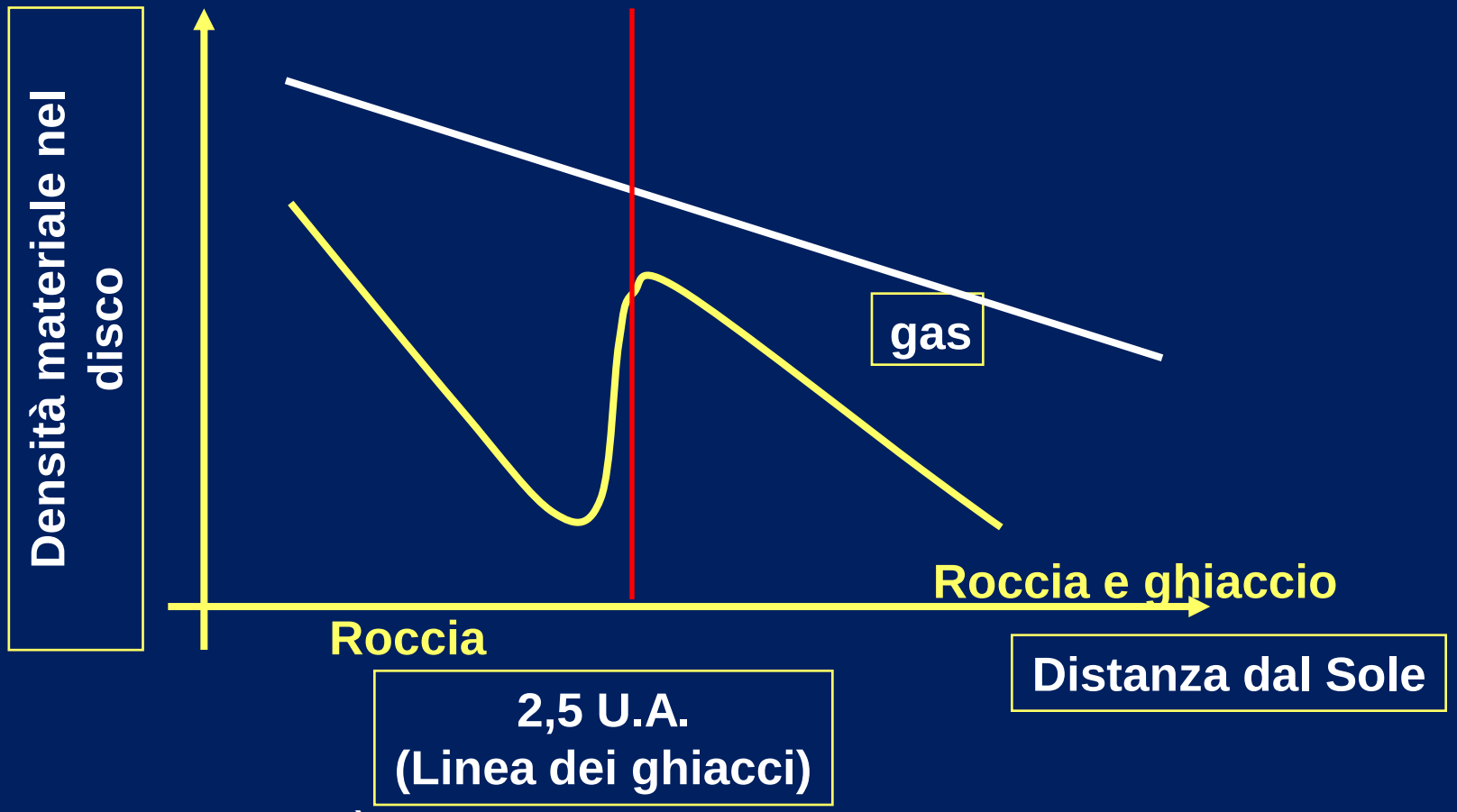
Dove si trova, nel Sistema solare, l'acqua allo stato liquido ??

1. Sotto la superficie- Europa, Cerere, Encelado
2. Sulla superficie-Terra per miliardi di anni
3. Marte nella fase primordiale

Il volume di acqua presente sulla Terra è stimato in 1 360 000 000 km^3; di questi:

- 1 320 000 000 km^3 sono acque marine (in maggioranza oceano).
- 25 000 000 km^3 sono nei ghiacciai e nelle calotte polari.
- 13 000 000 km^3 sono nel suolo, nelle falde acquifere.
- 250 000 km^3 sono acque dolci nei laghi, nei mari interni e nei fiumi.
- 13 000 km^3 sono vapore acqueo nell'atmosfera.

La linea dei ghiacci

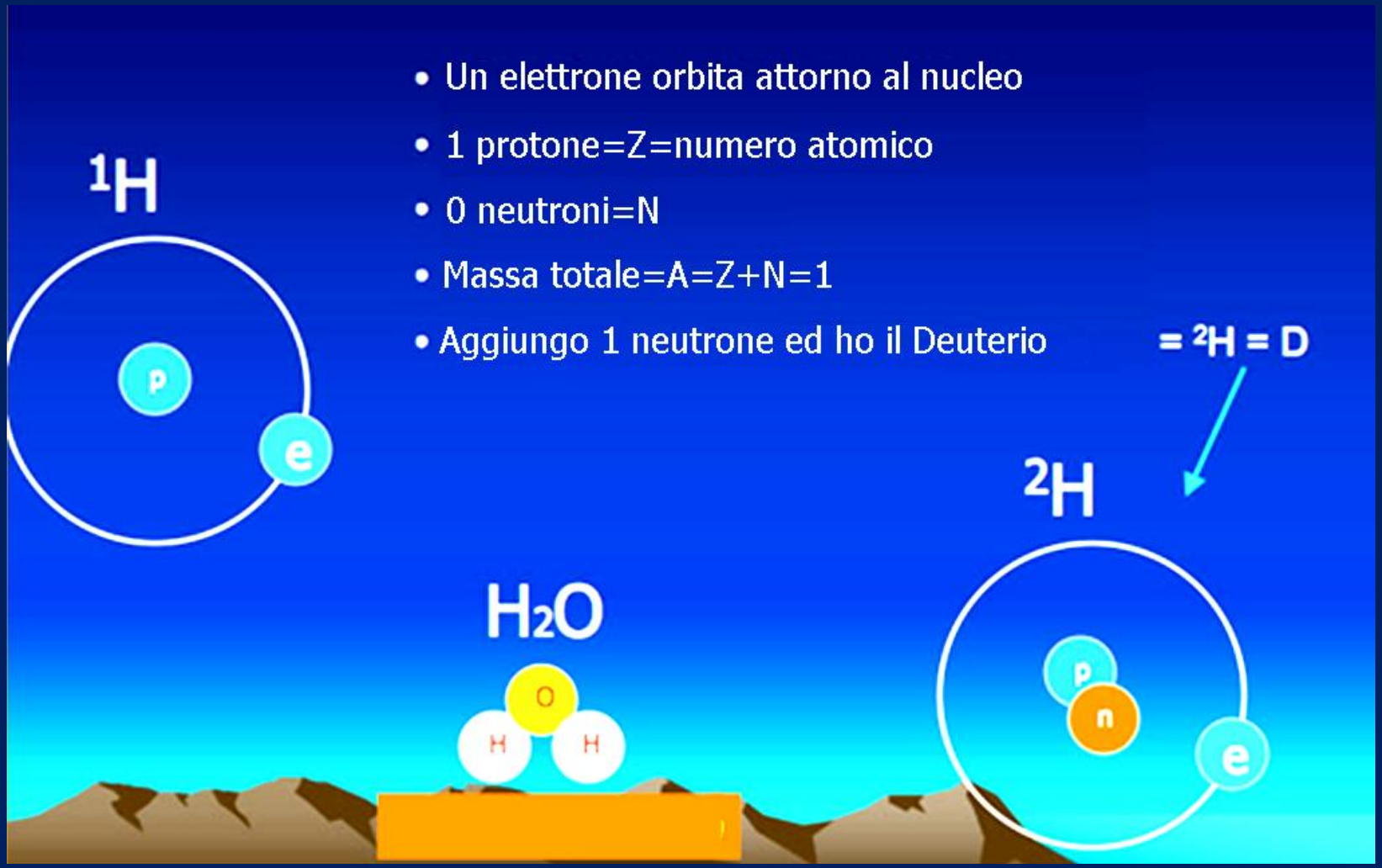


Oggi la linea dei ghiacci è collocata oltre 2 o 2,5 UA mentre si ritiene che al momento della formazione degli embrioni era più distante tra 4 e 5 UA

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

Idrogeno deuterio ed acqua



Comete e Meteoriti

Abbondanza di deuterio nelle comete

Cometa di Halley

Hyakutake

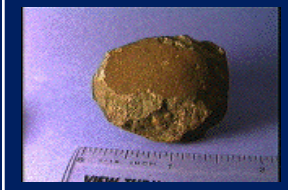
Hale-Bopp

Nelle comete Halley, Hyakutatke 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)

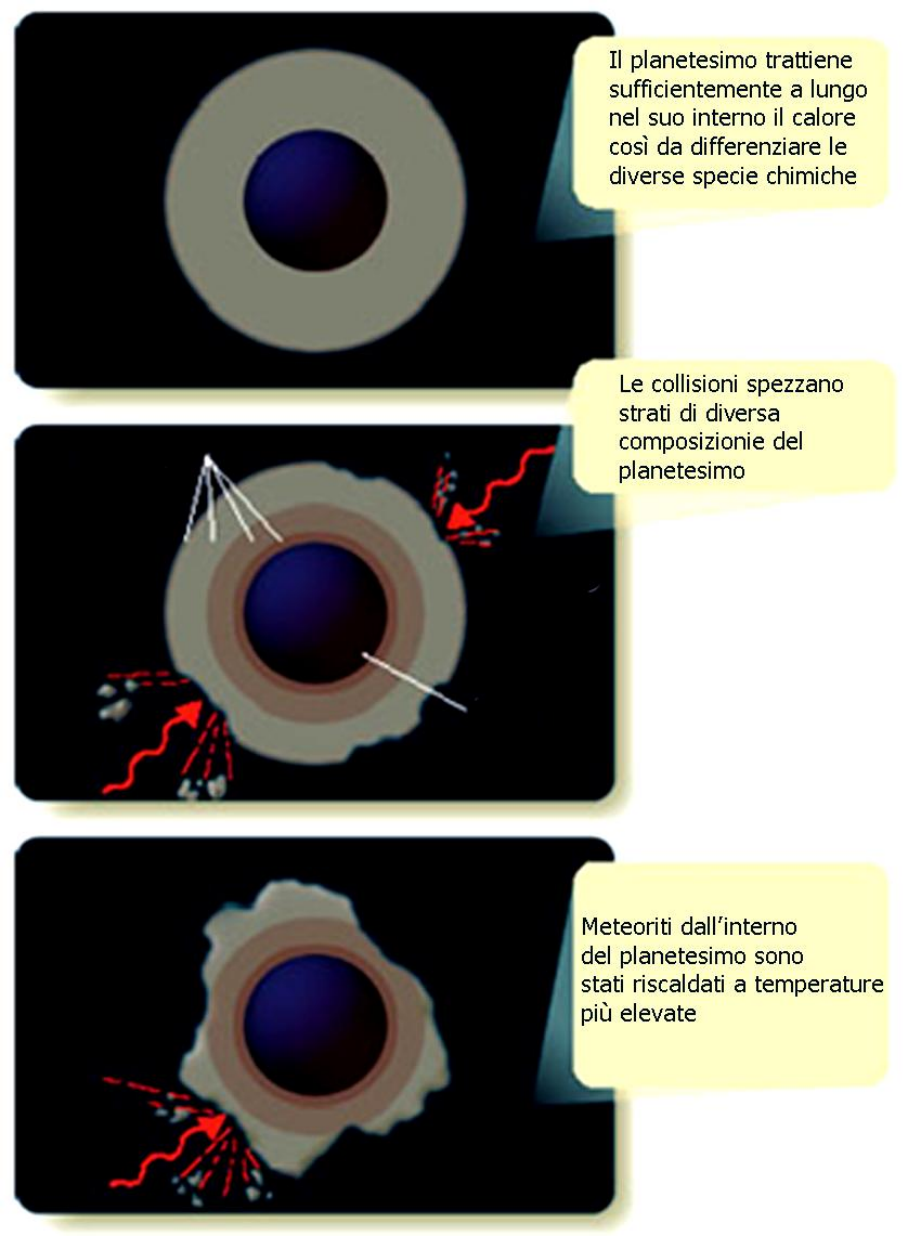
NB:

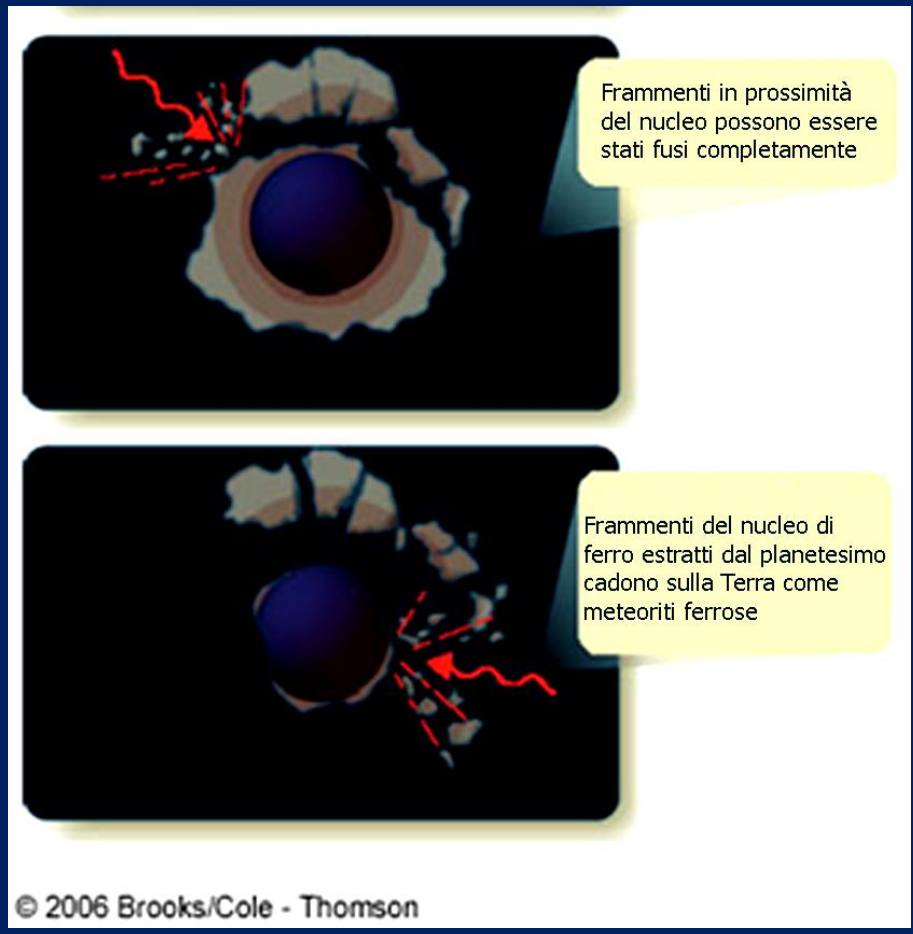
1. L'eccesso rispetto al valore protosolare ci dà un'informazione sulla temperatura di formazione (bassa) del ghiaccio d'acqua cometario
2. L'eccesso rispetto al valore terrestre è un'indicazione del fatto che l'acqua terrestre NON può venire tutta dalle comete

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 meteorite Allende-condrite carbonacea

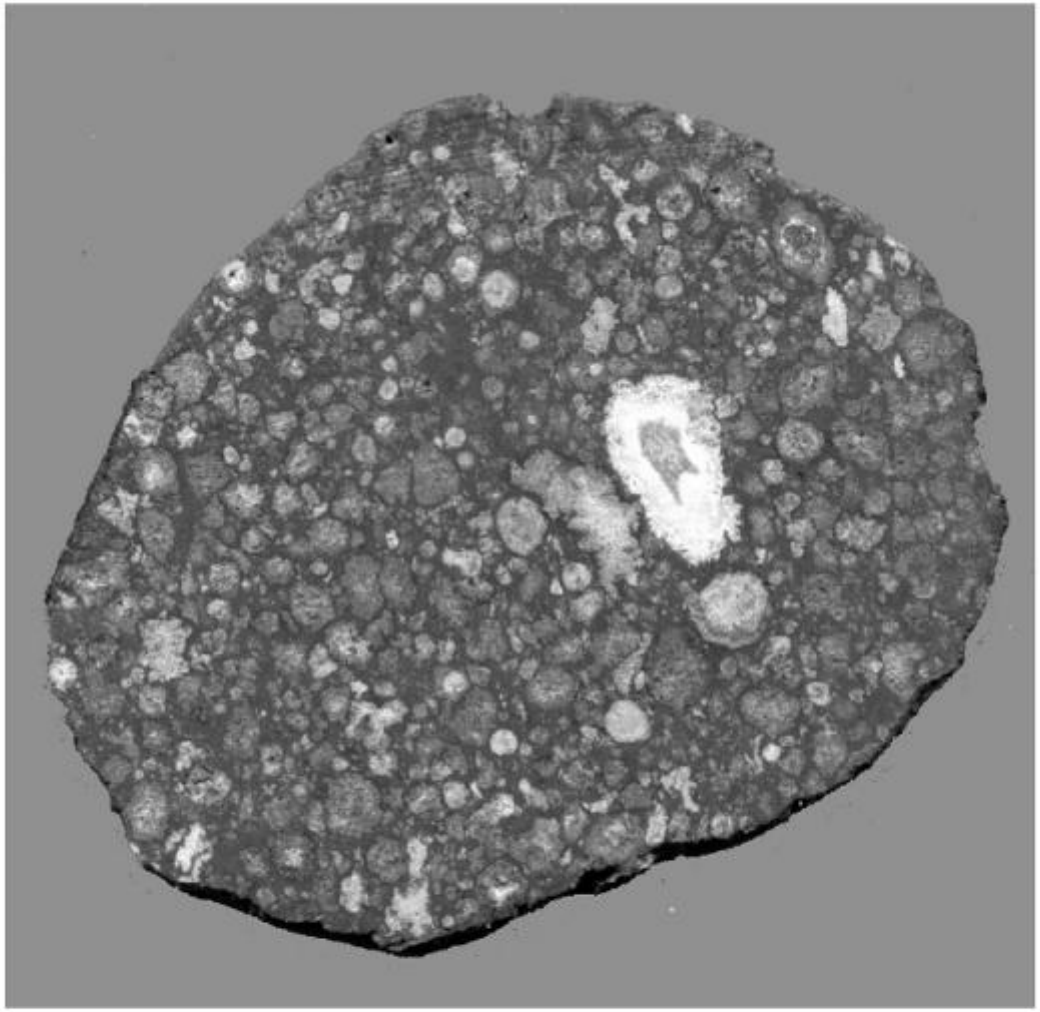


Fig. 5.1. The undifferentiated carbonaceous chondrite Allende. This rock was probably never heated to temperatures above 500° C. It preserves a variety of primitive, pre-accretionary components, such as chondrules, and Ca-Al-rich inclusions, the oldest known material in our Solar System. Meteorite collection,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

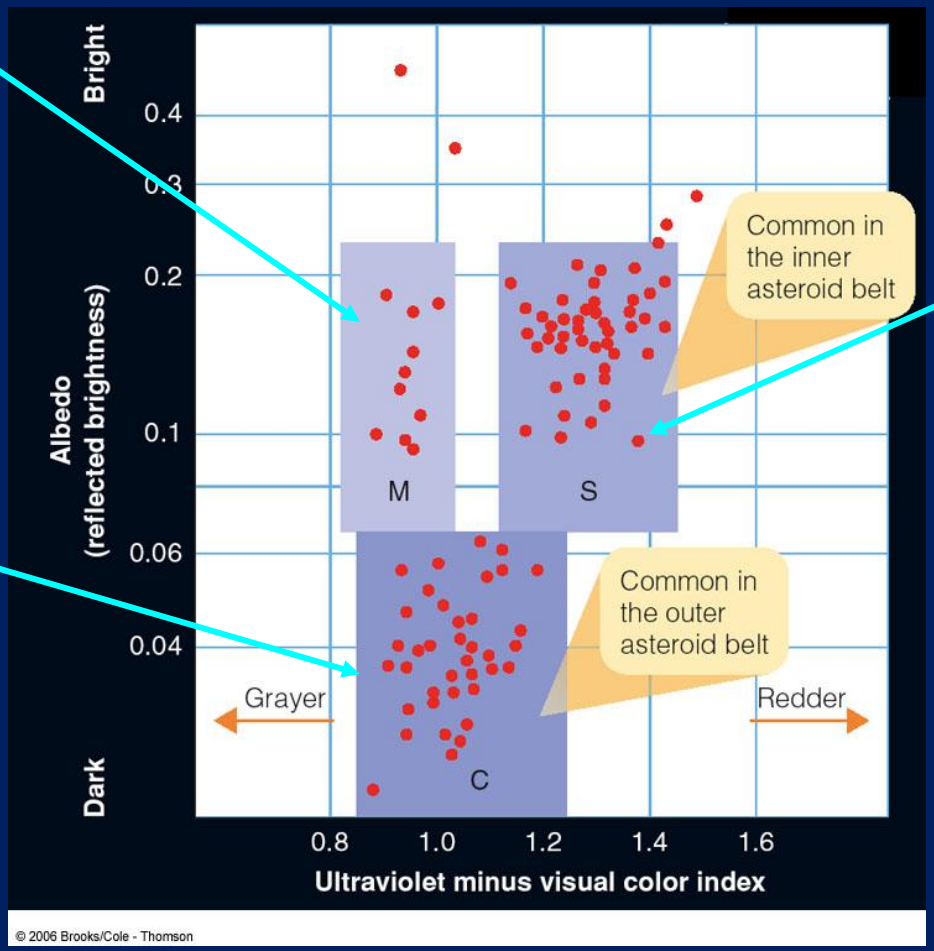
Asteroidi- i blocchi per la costruzione del Sistema solare

Il colore degli Asteroidi

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

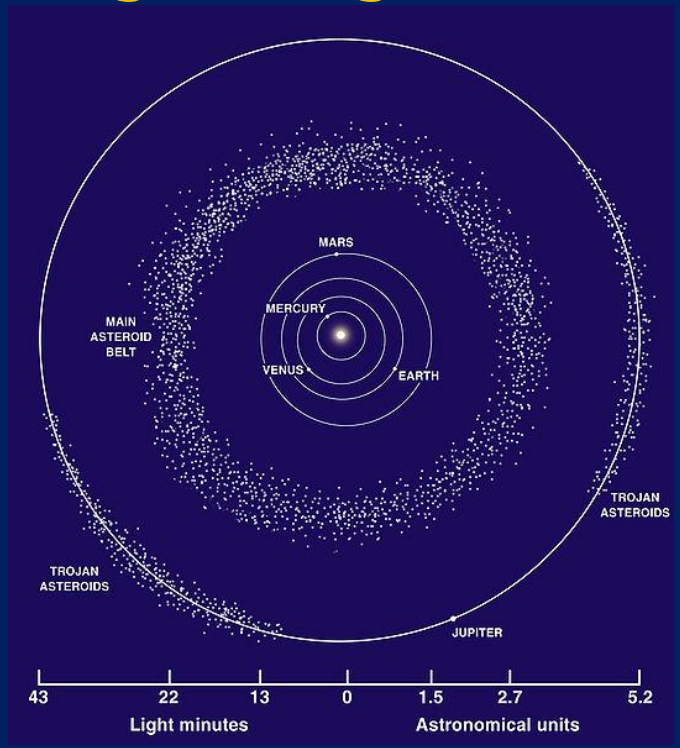
Tipo M: Asteroidi brillanti «poco rossi» ricchi di metalli probabilmente nuclei di Asteroidi frammentati

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 odierna 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.

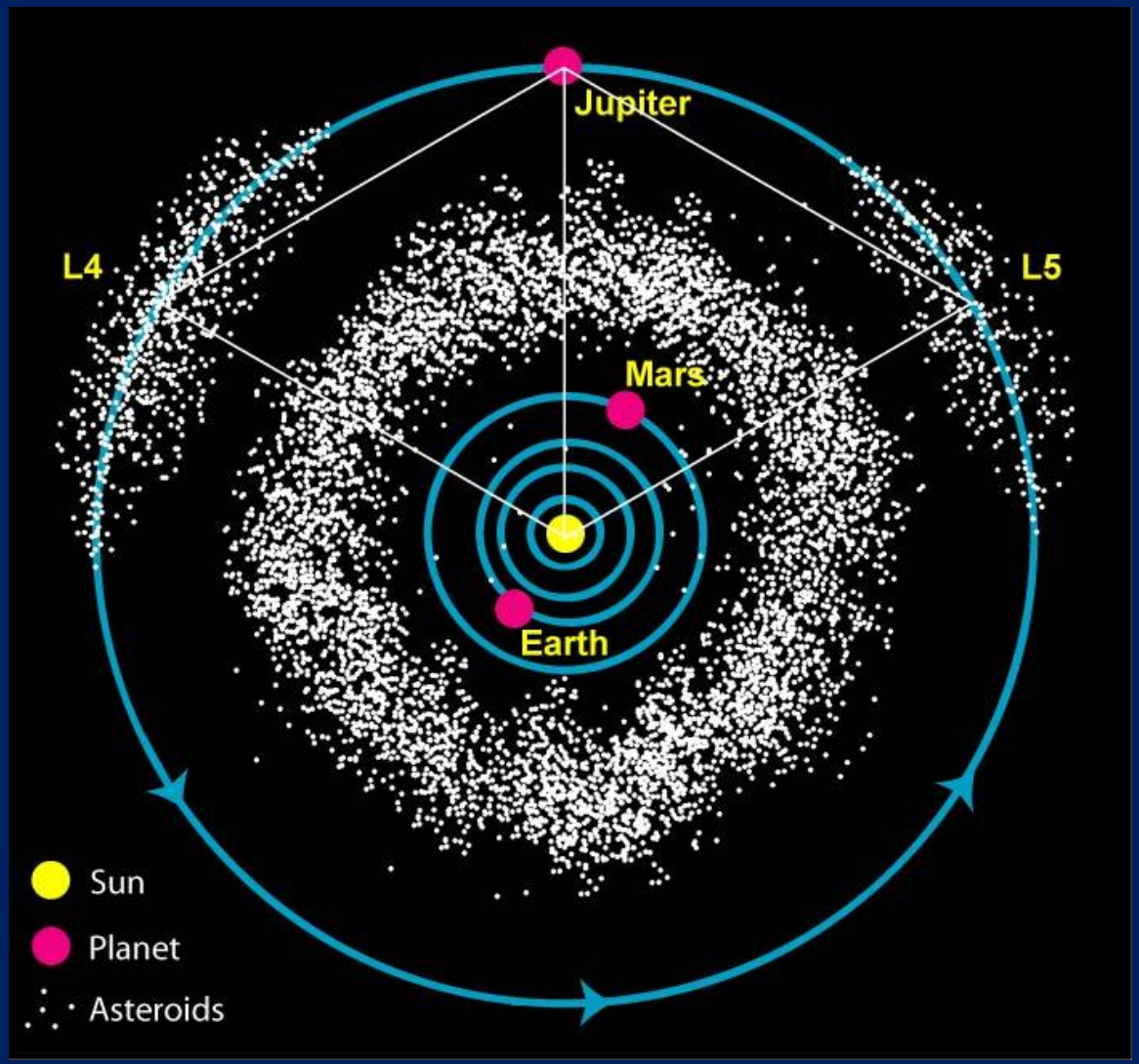
Asteroidi quasi-terrestri: quelli che si avvicinano all'orbita terrestre.

- *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

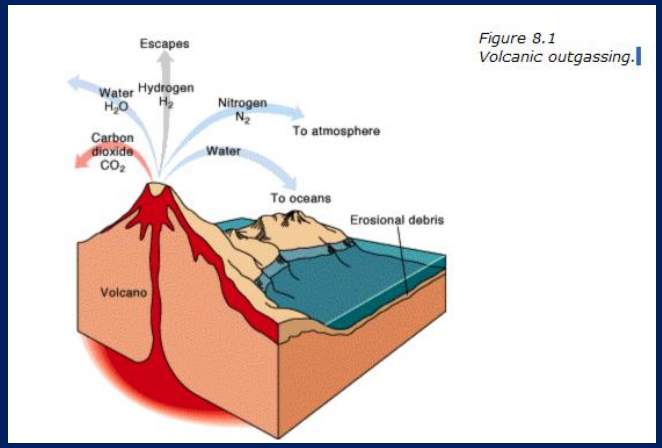


Figure 8.1
Volcanic outgassing.

L'acqua nella fascia interna del Sistema Solare è scarsa

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.

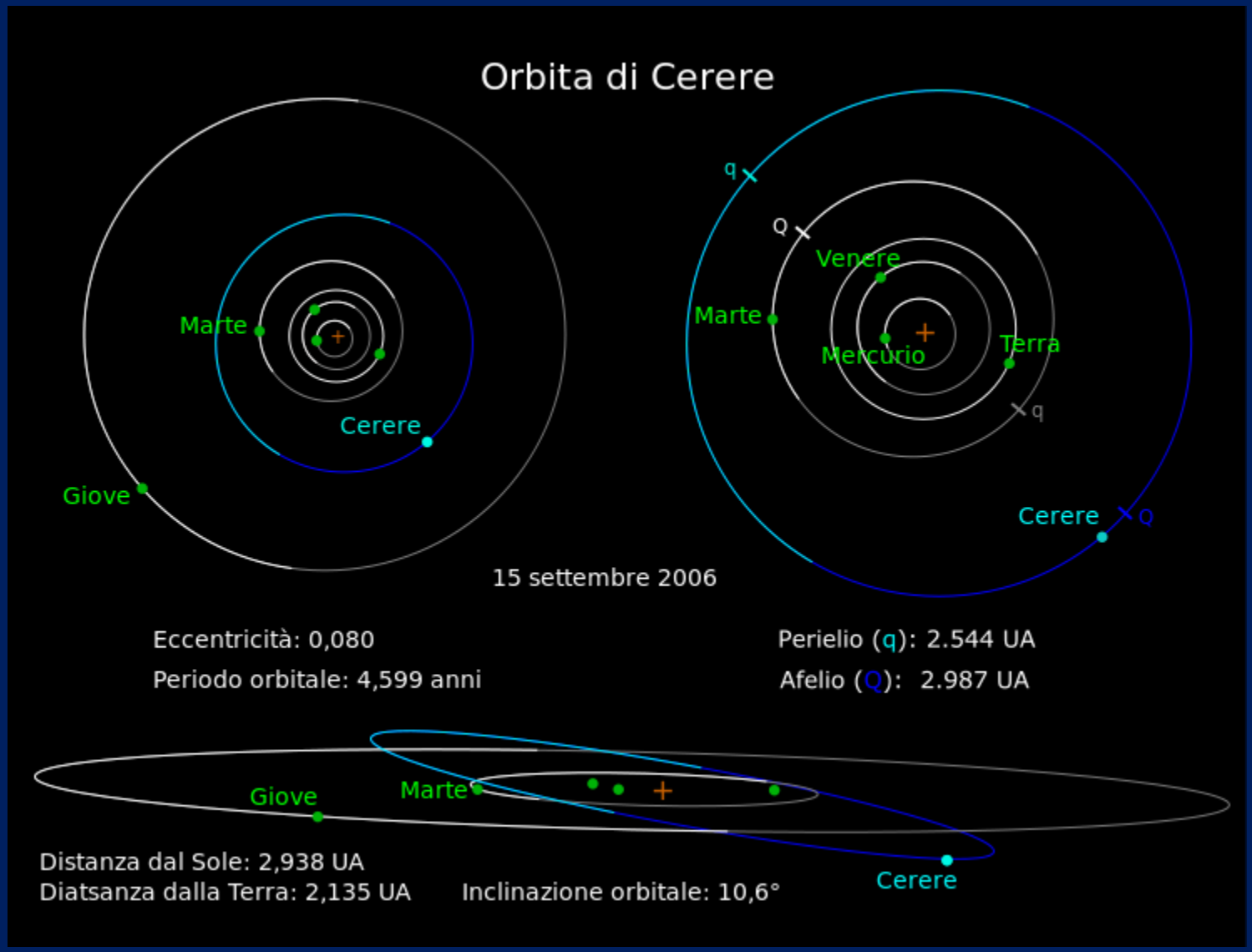
Il rapporto D/H delle condriti CC3 è analogo a quello terrestre (SMOW pari a 1.5×10^{-4}) NB la metà di quello cometario

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

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

I Pianeti Nani

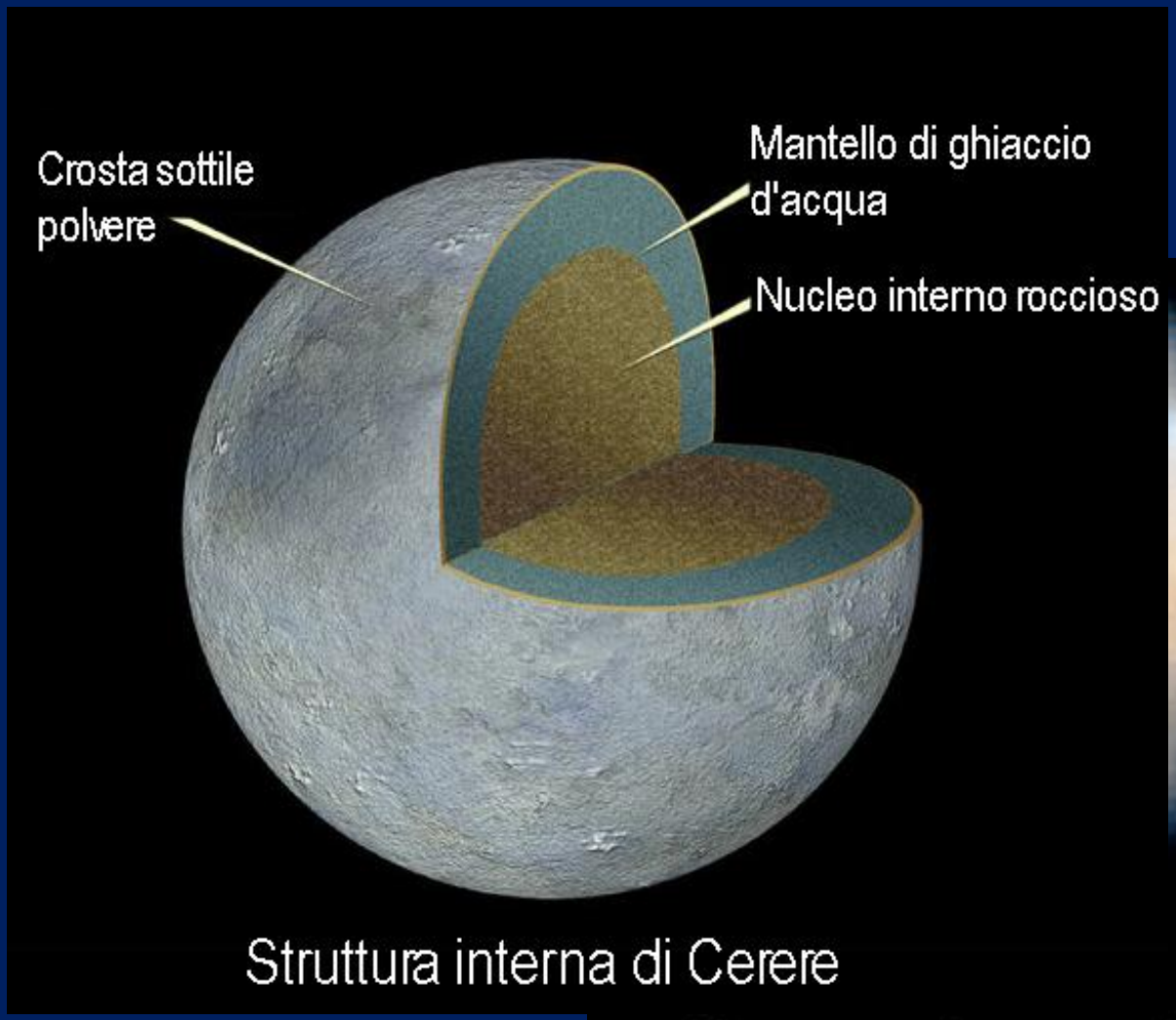
Cerere Pianeta Nano -orbita



Cerere –dati fisici

Diametro equat.	(974,6 ± 3,6) km
Diametro polare	(909,4 ± 3,2) km
Diametro medio	952,4 km
Superficie	$2{,}85 \times 10^{12}$ m²
Massa	$9{,}43 \times 10^{20}$ kg
Densità media	$(2{,}077 \pm 0{,}036) \times 10^{3}$ kg/m³
Acceleraz. di gravità in superficie	0,278 m/s²
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 ± 0,0033 (geometrica, visibile)

Struttura interna di Cerere e contenuto d'acqua



Struttura interna di Cerere

Le comete

Descrizione delle comete

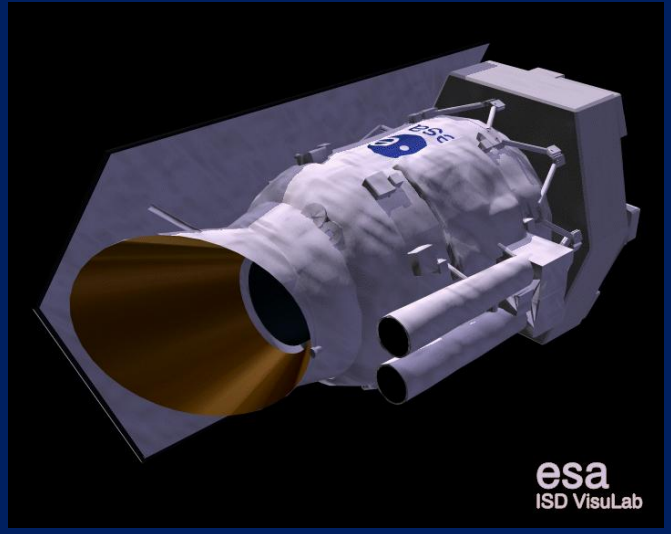
La cometa Hale-Bopp

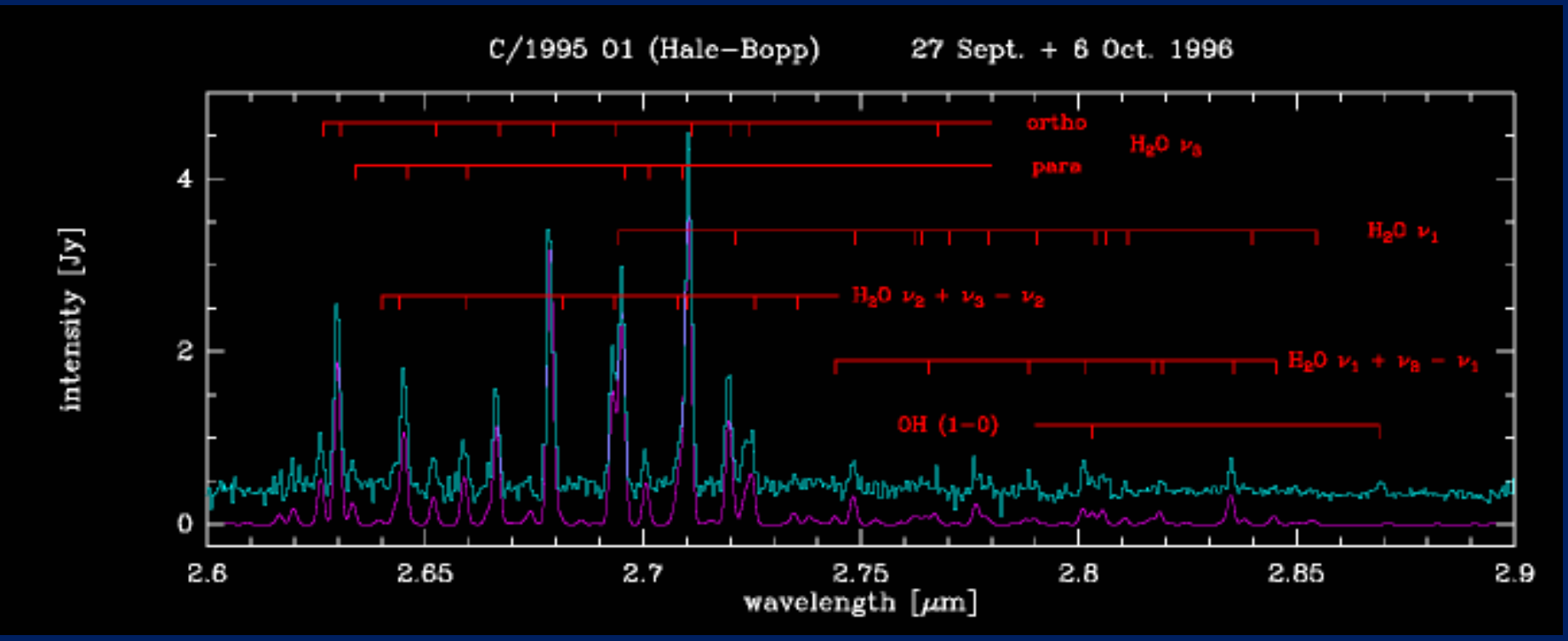
Bande del vapor d'acqua nella cometa Hale-Bopp

ISO : Bande

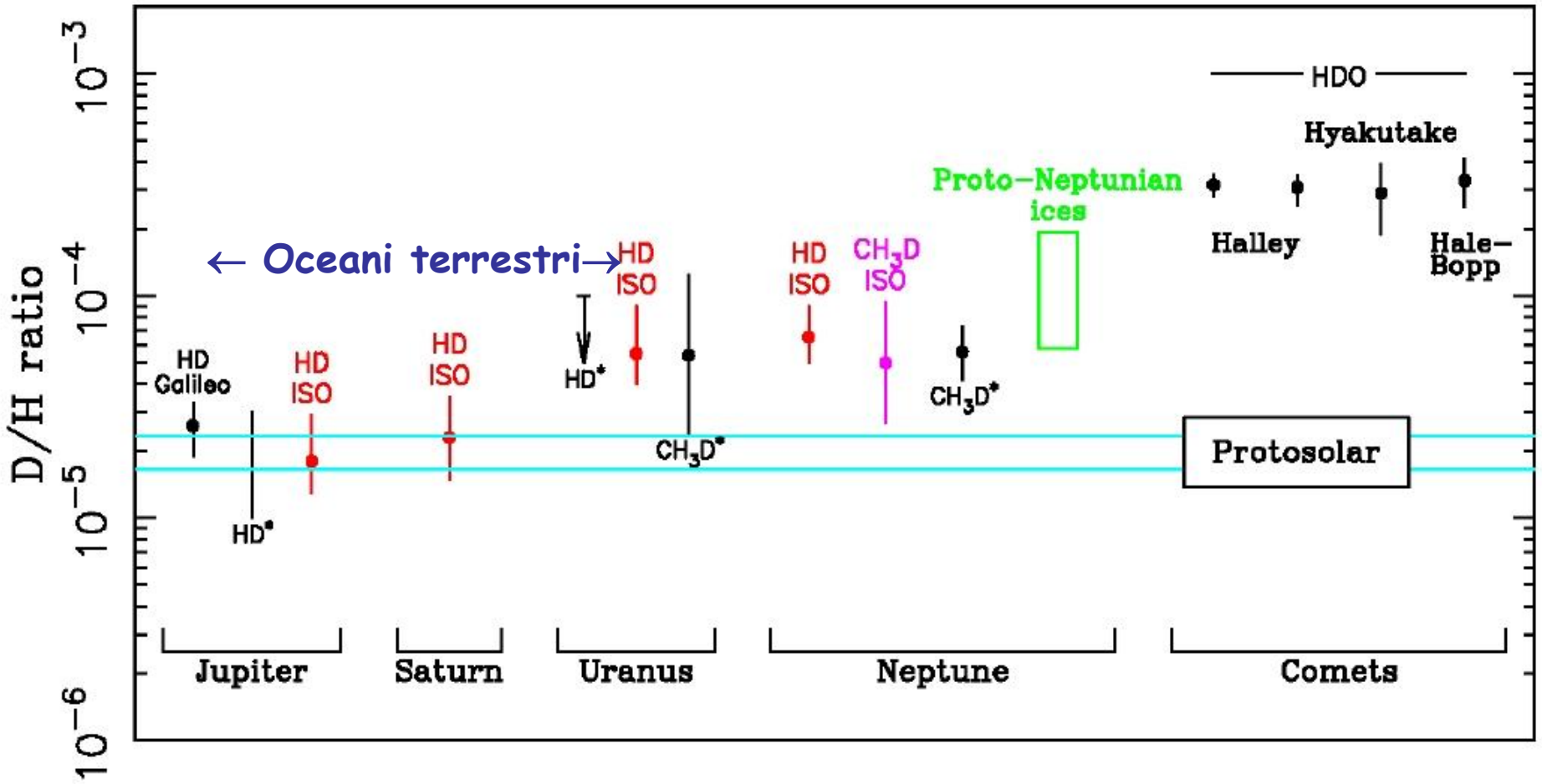
Crovisier et al. 1997

Science, **275**, 1904





Rapporto D/H nelle comete e nel Sistema solare

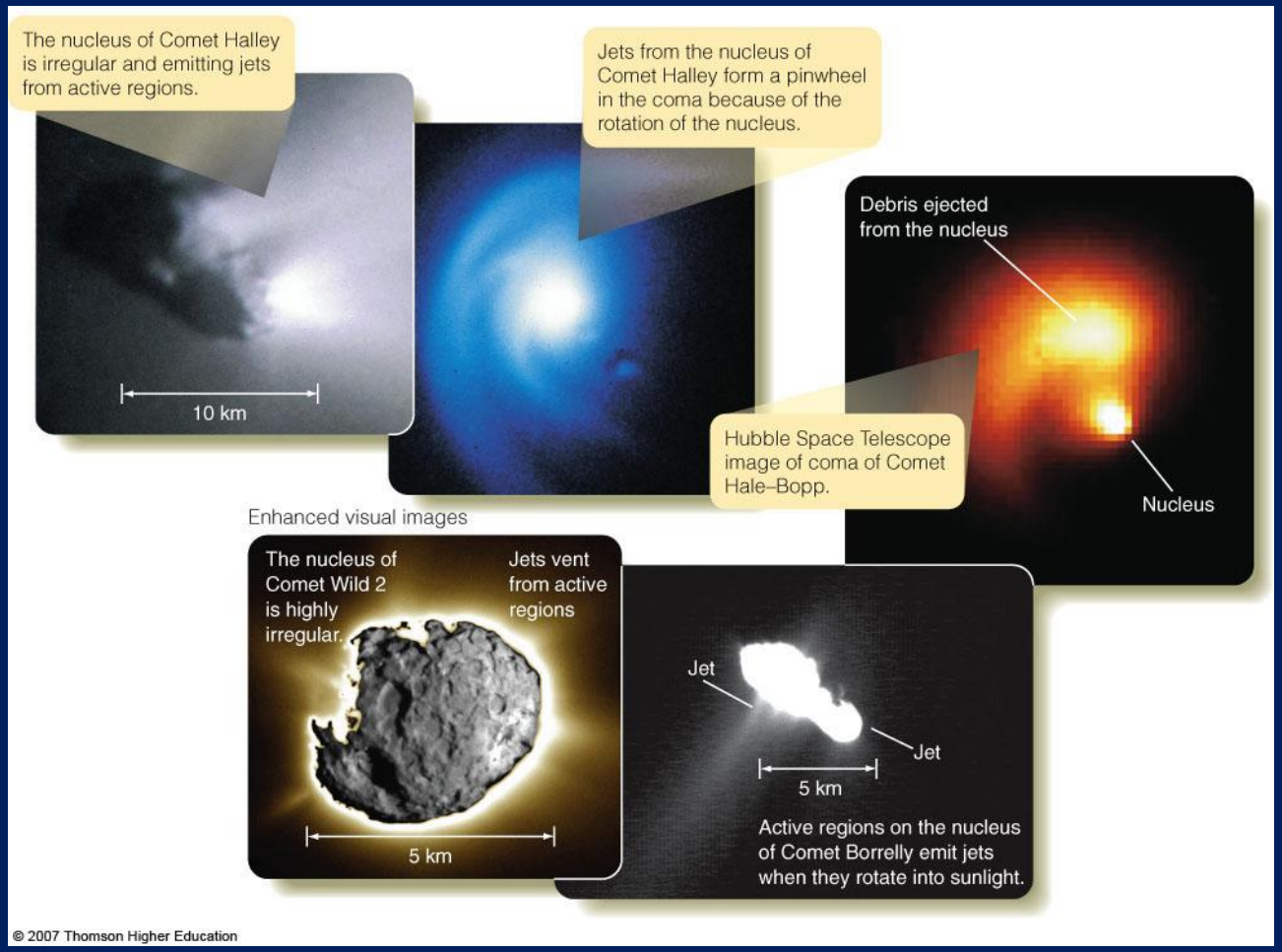


Composizione del nucleo cometario

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 :

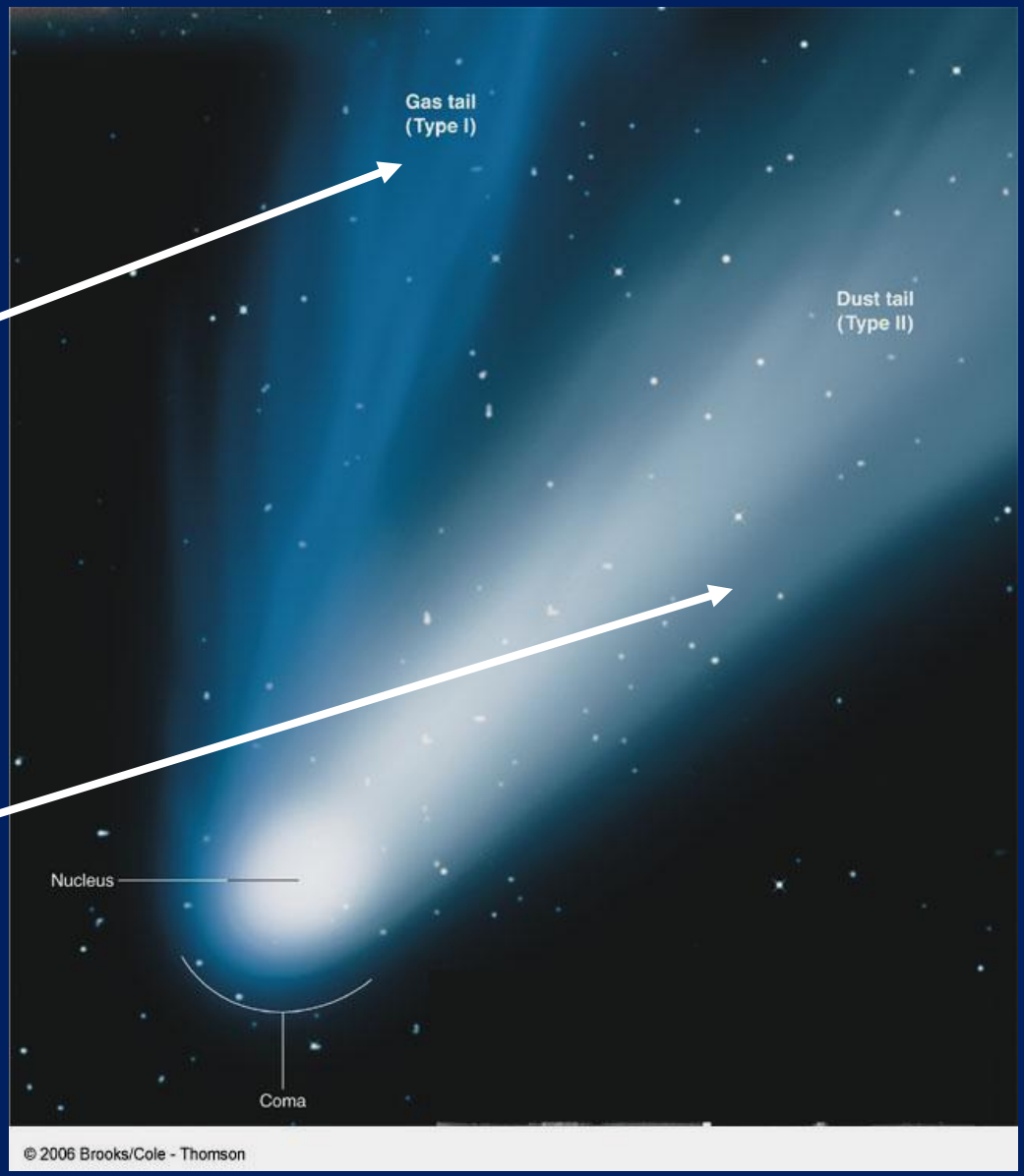
~ 0,1 – 0,25 g/cm^3



Due tipi di code cometarie

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

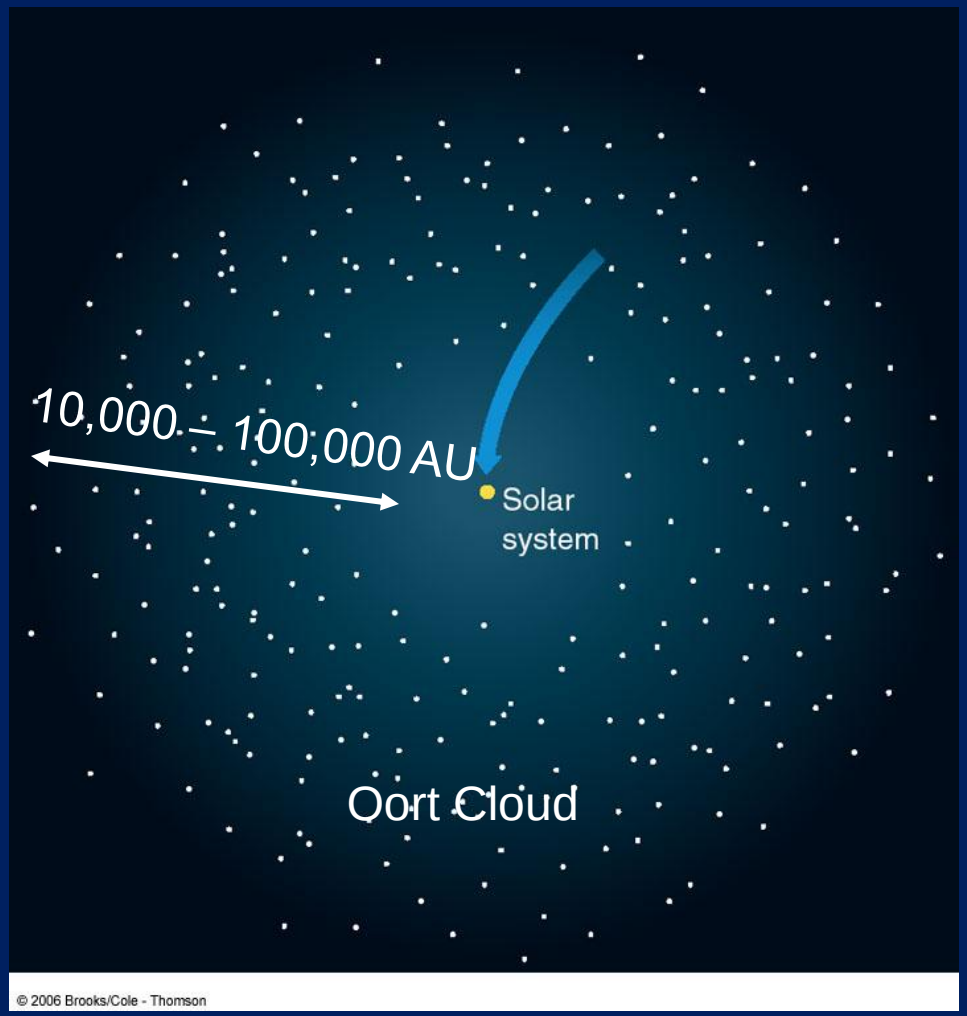
Coda di polvere e ghiaccio che segue la traiettoria della cometa spinta dalla pressione di radiazione del Sole



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.

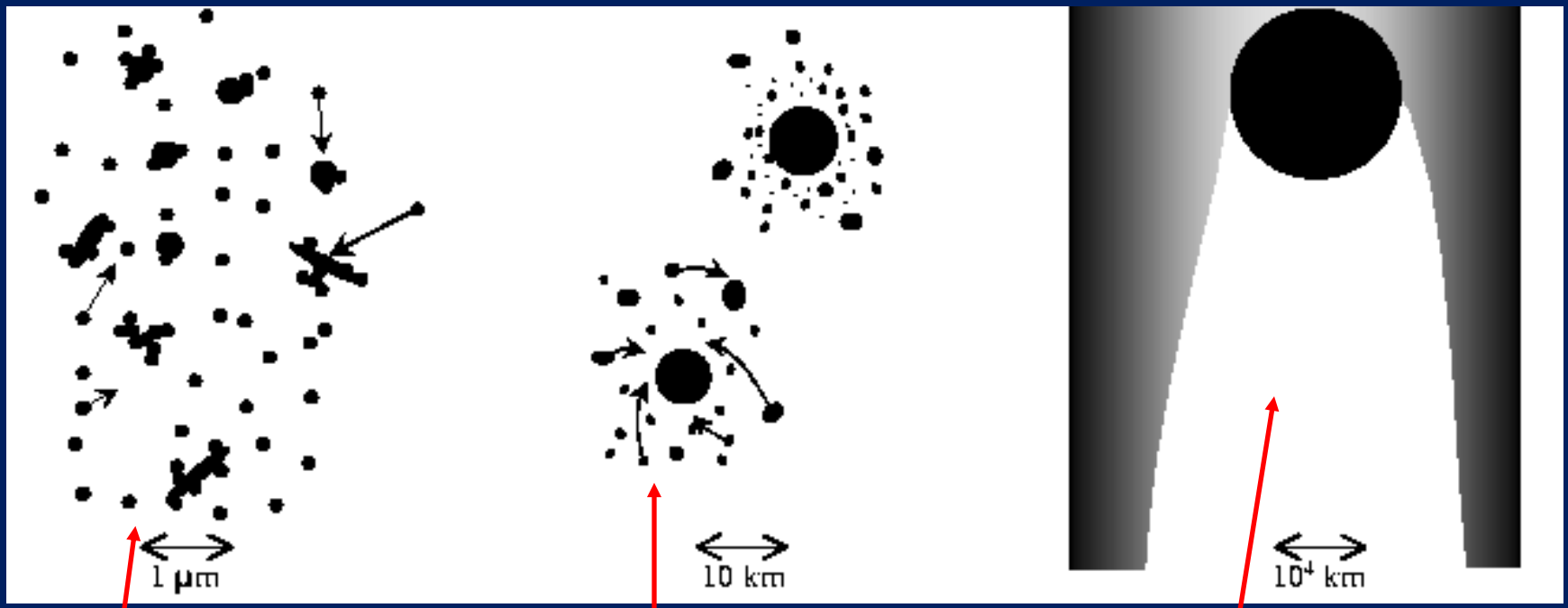


Le stelle perturbano la loro stabilità e le immettono nel Sistema solare

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

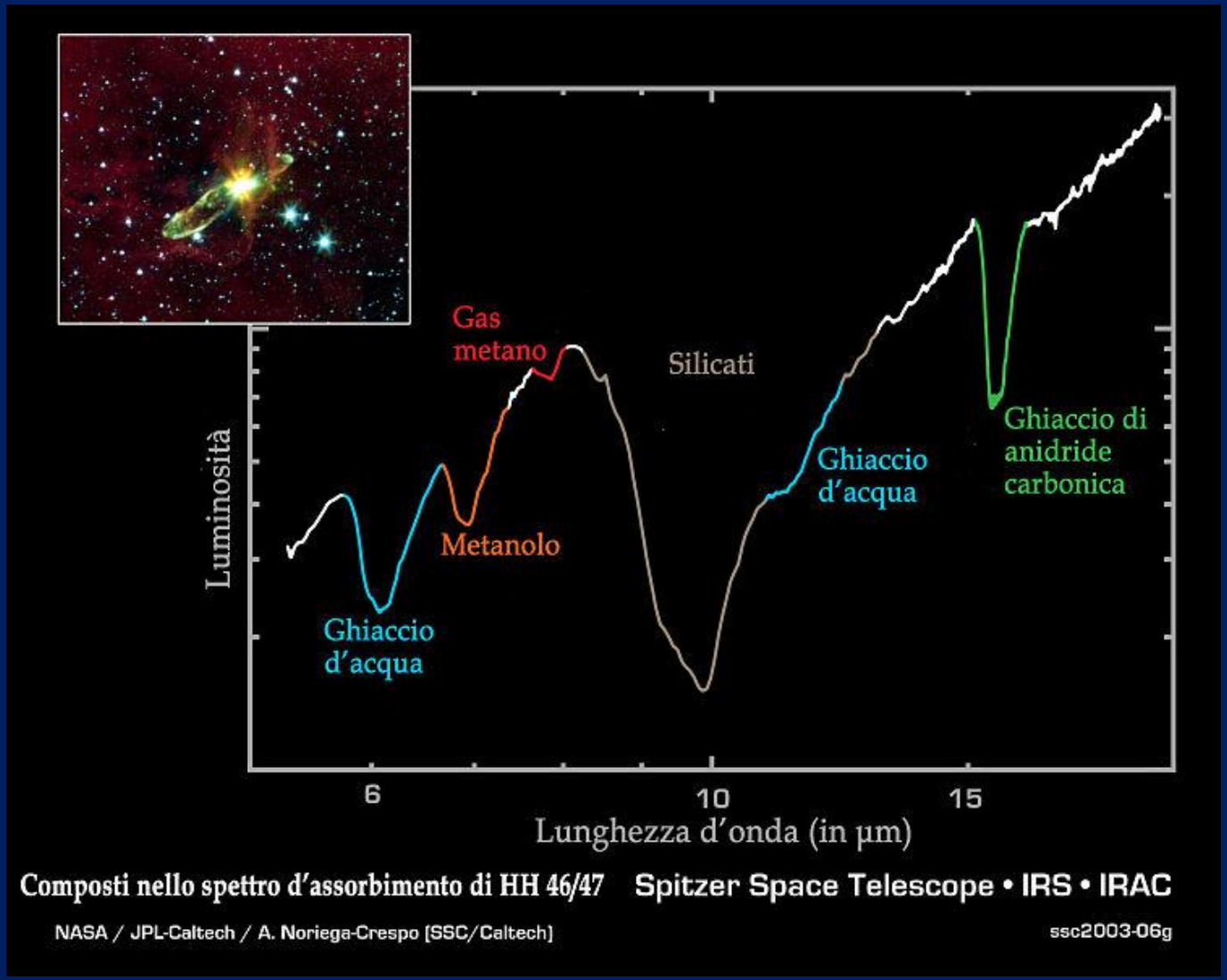
Ce ne è traccia nel Sistema solare ??

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 = 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

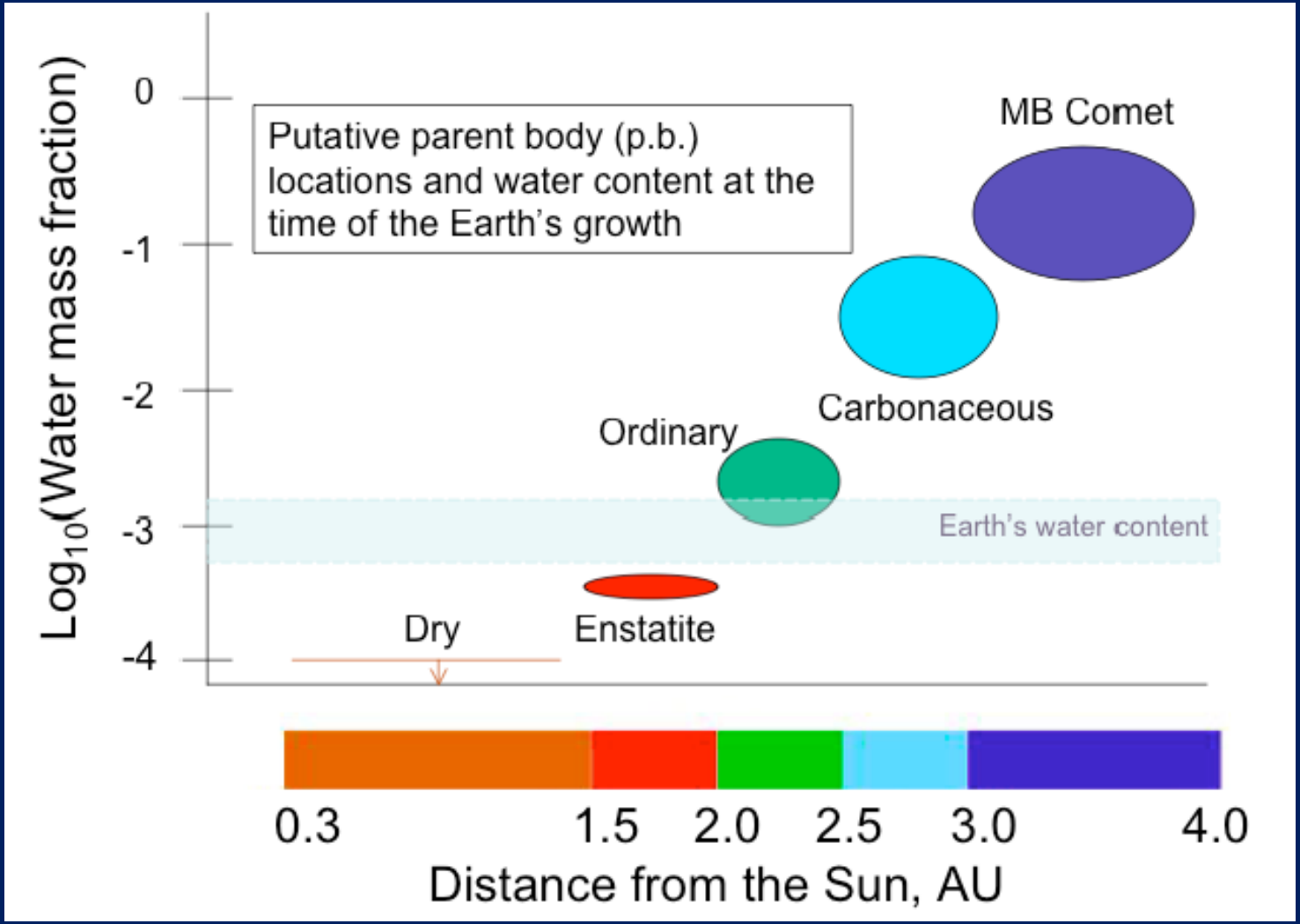
Crescita per collisioni ⇒ Crescita dinamica ⇒ Planetesimi Embrioni

Acqua nello spettro di HH 46/47

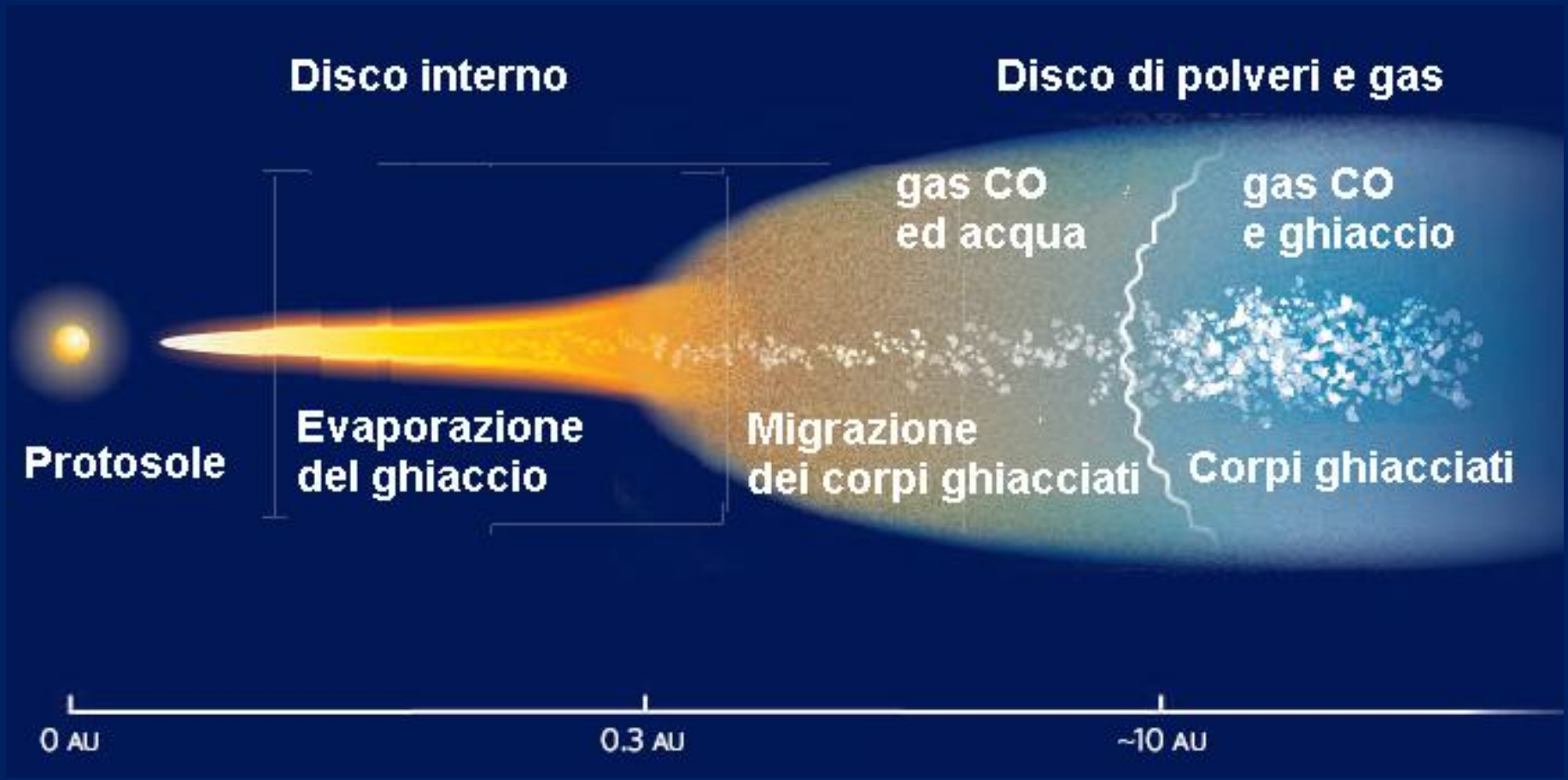


I costruttori di terre

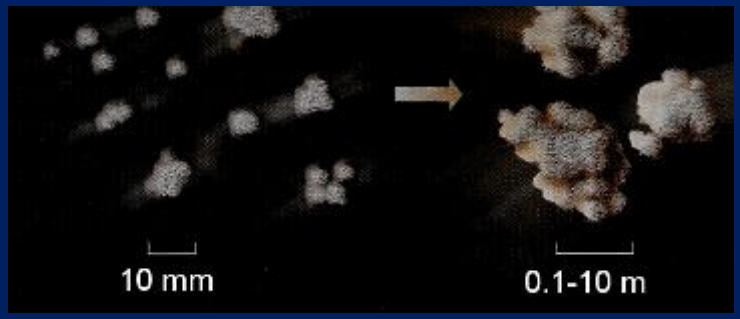
Dove e quanta acqua al tempo della formazione della Terra

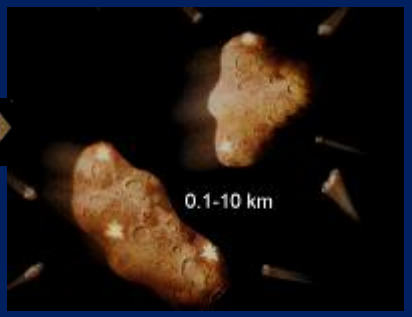


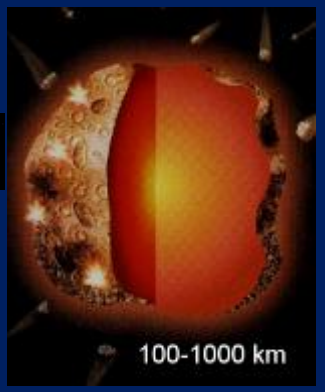
Andamento di densità nel disco e linea del " ghiaccio" selezione nella formazione dei pianeti interni rispetto ai pianeti esterni

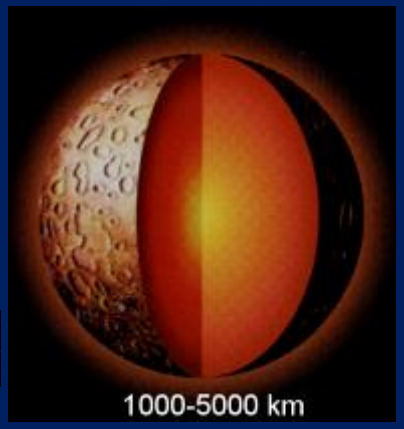


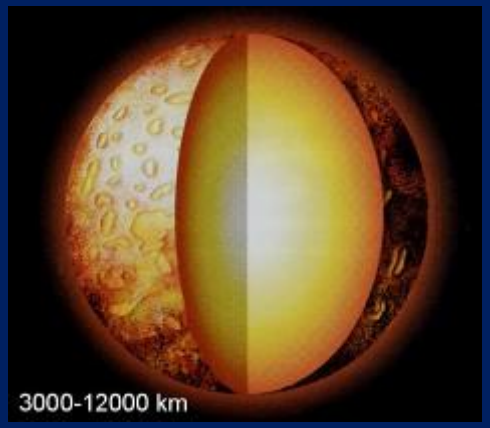
La sequenza di formazione del Sistema solare





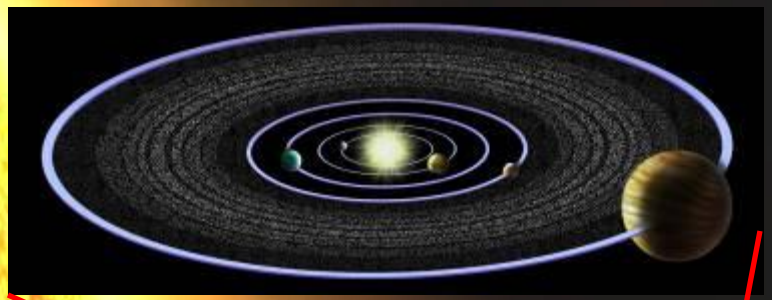






Il Sistema solare

I corpi del Sistema Solare



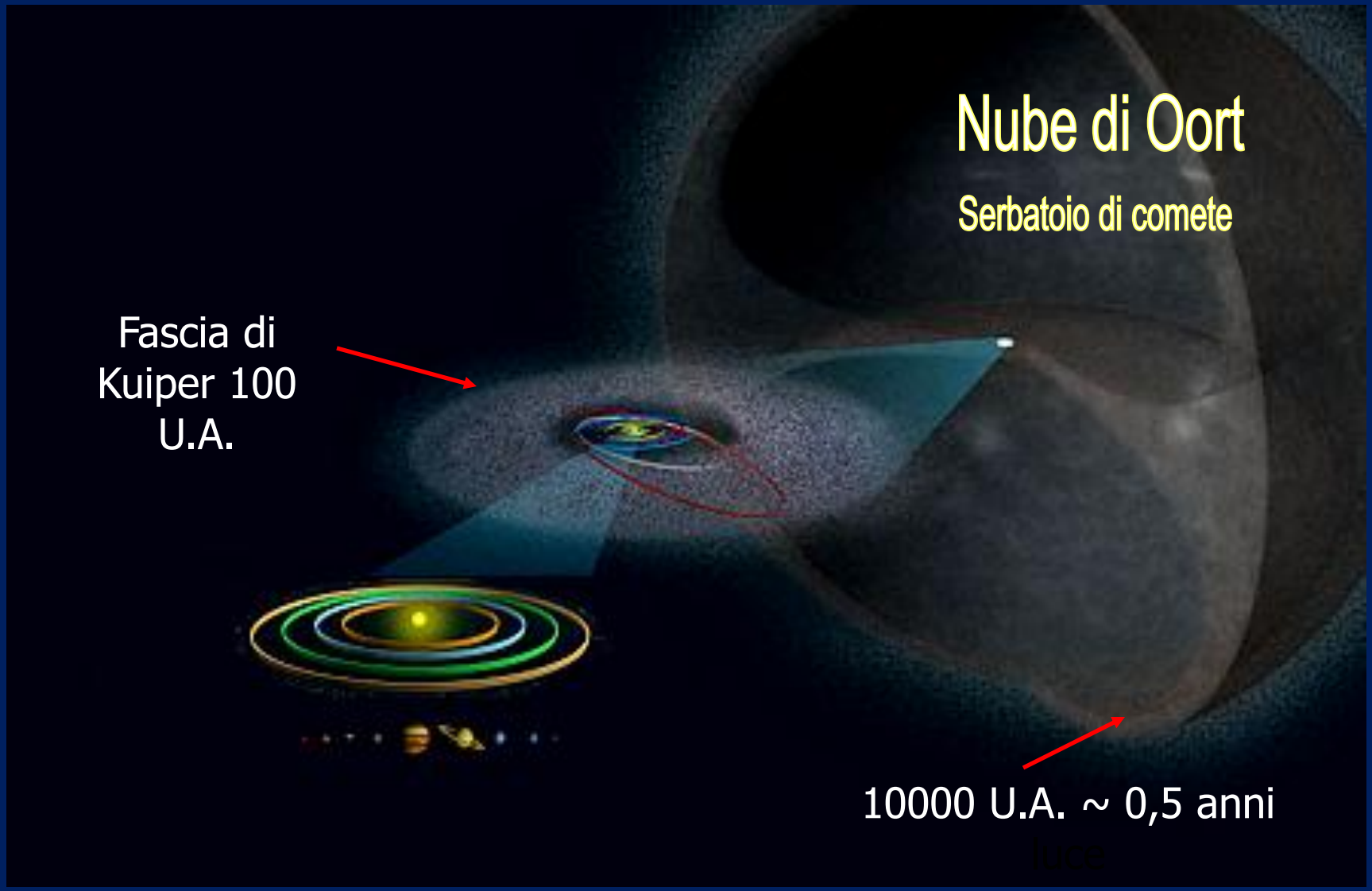
La fascia asteroidale tra Marte e Giove

Giove Saturno Urano Nettuno

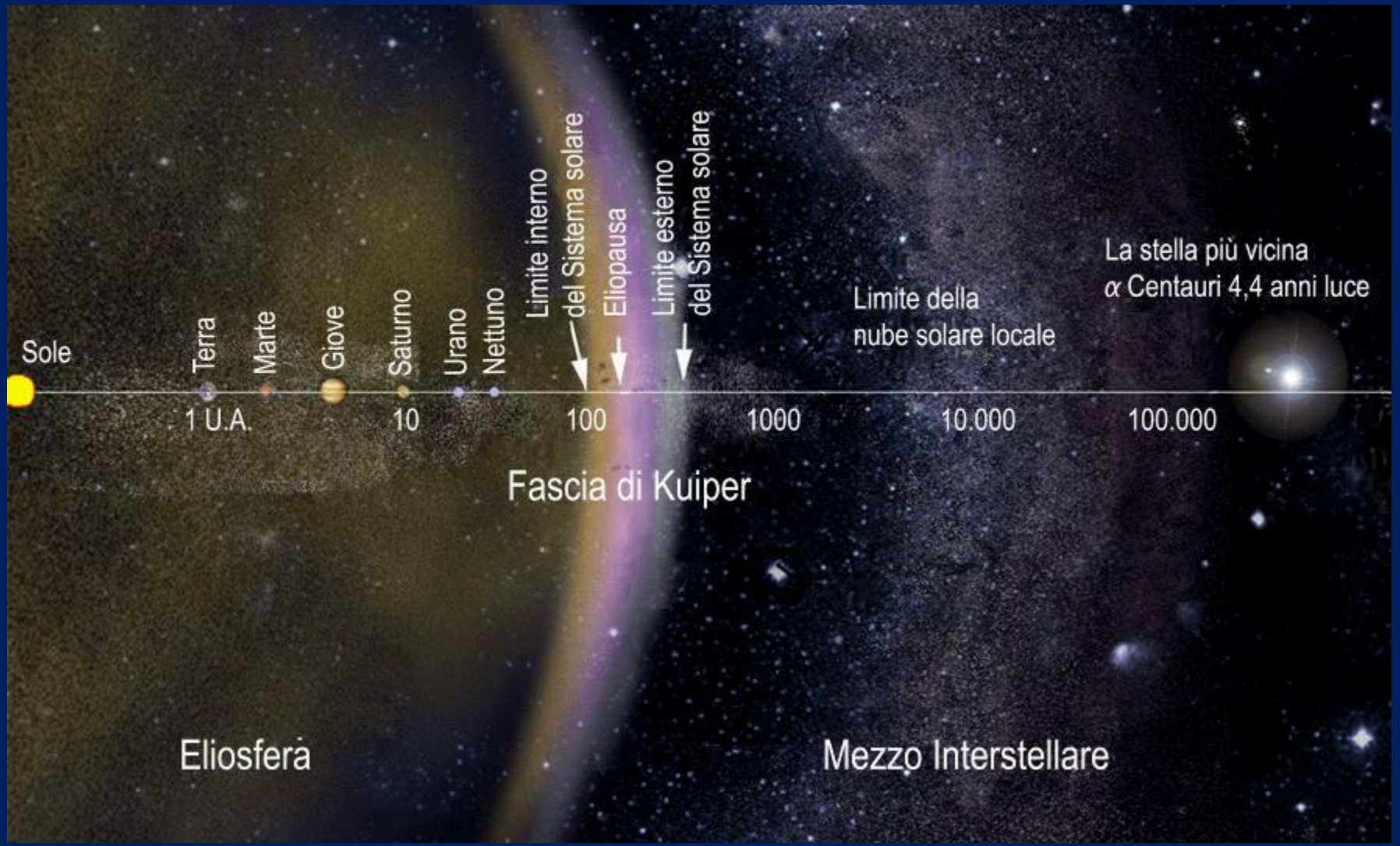
Mercurio Venere Terra Marte

Plutone e la fascia di Kuiper

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

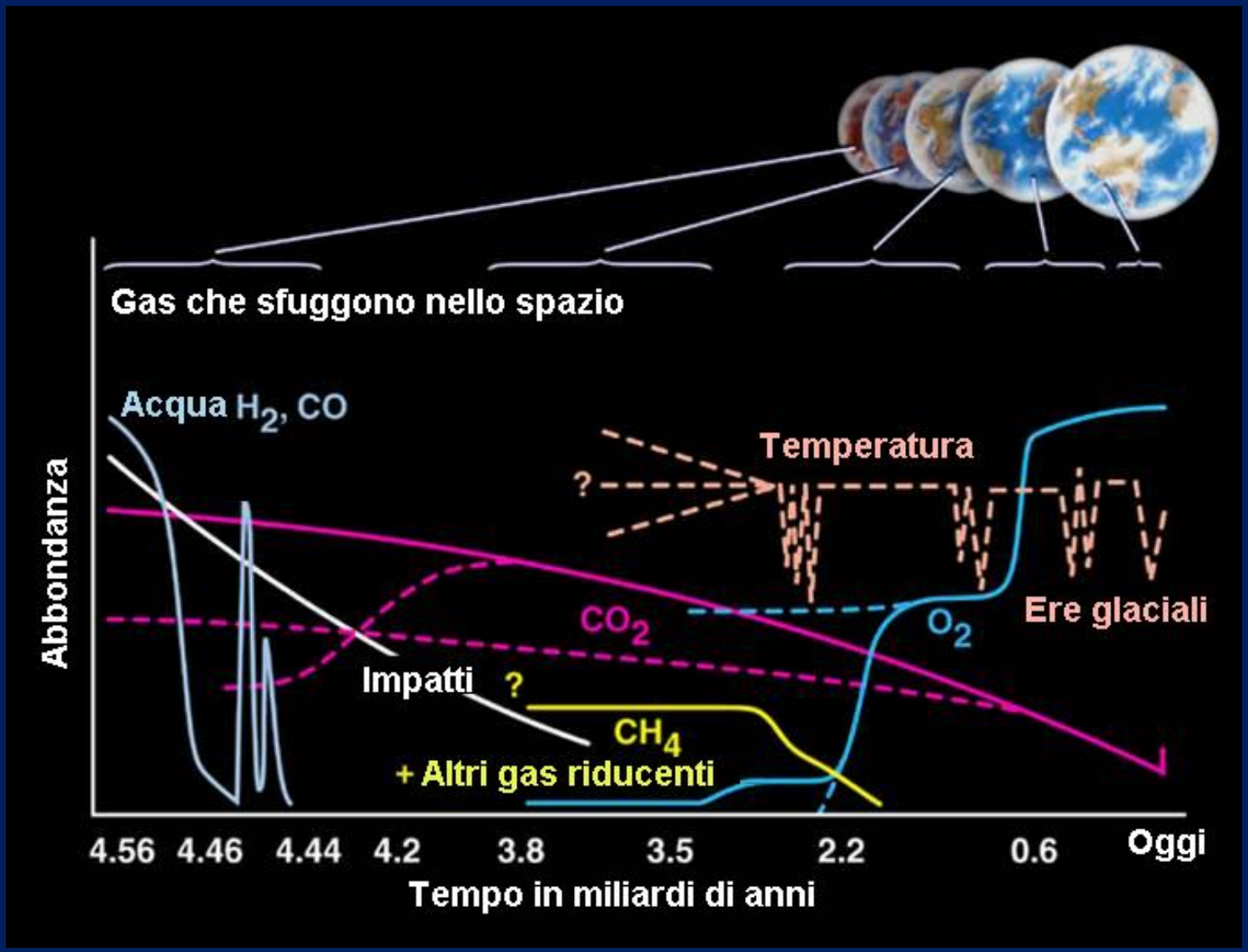


Una ricostruzione del Sistema solare oltre la fascia di Kuiper e la nube di Oort

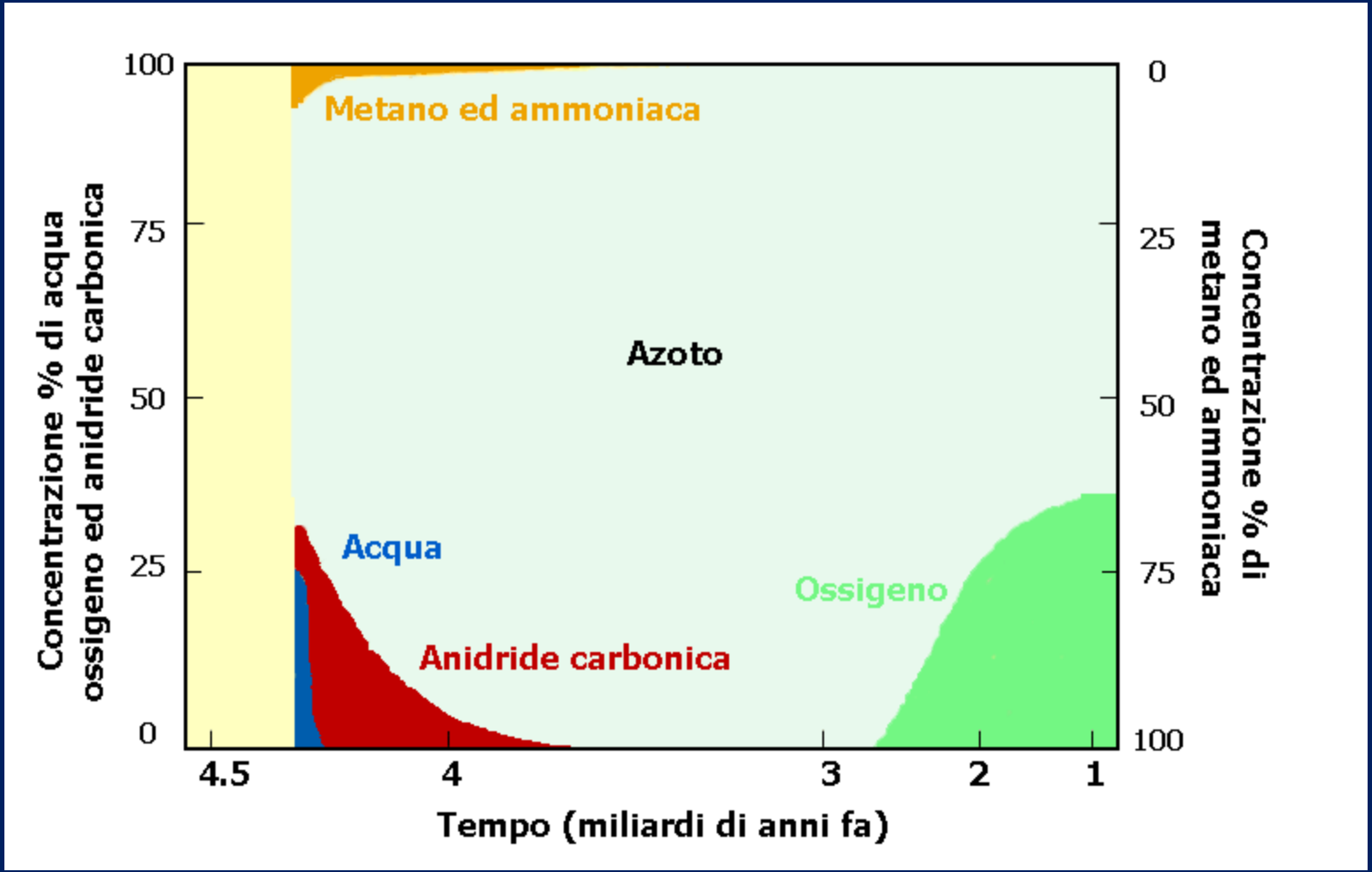


Terra

Acqua ed atmosfera terrestre

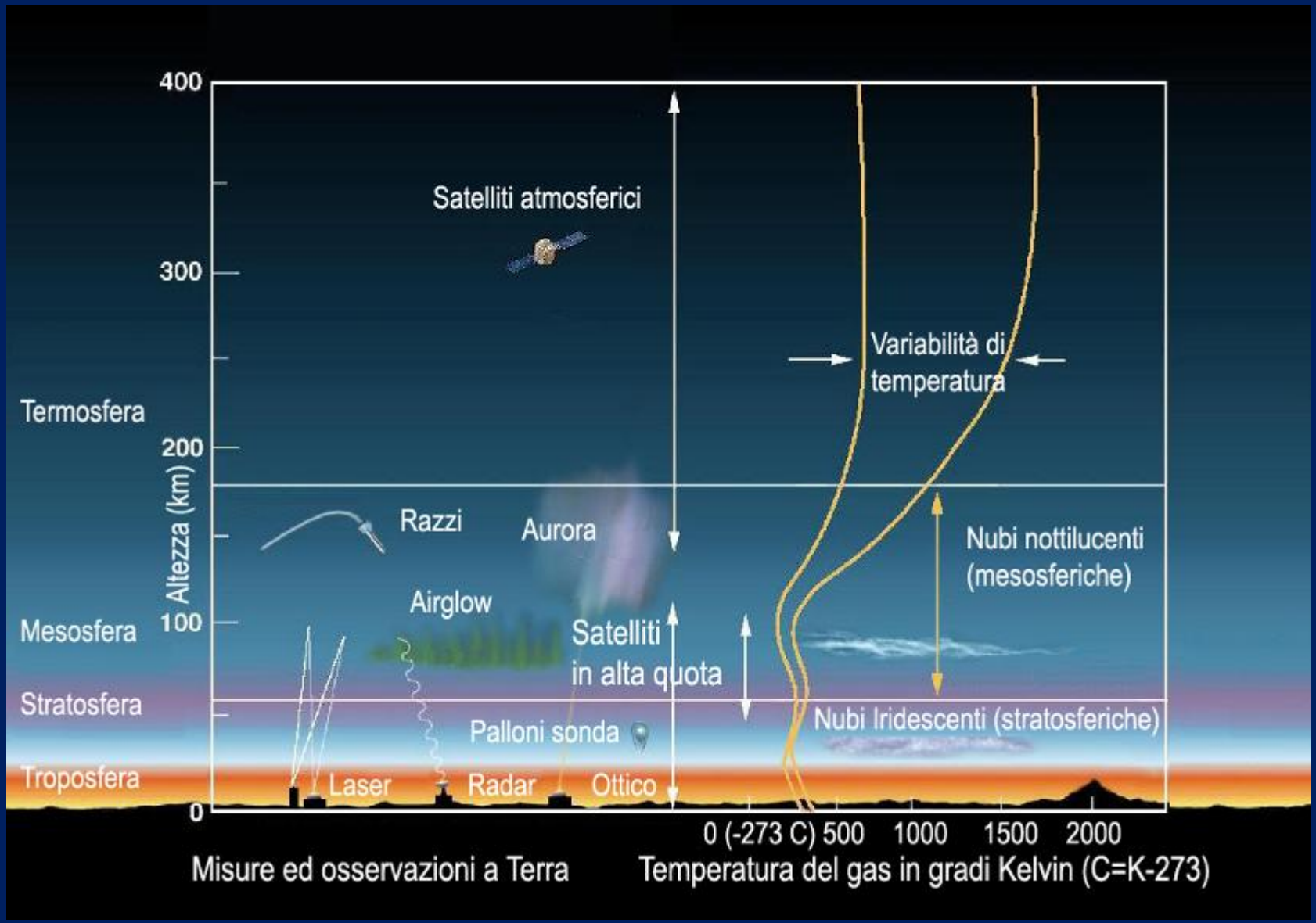


L'evoluzione dell'atmosfera terrestre

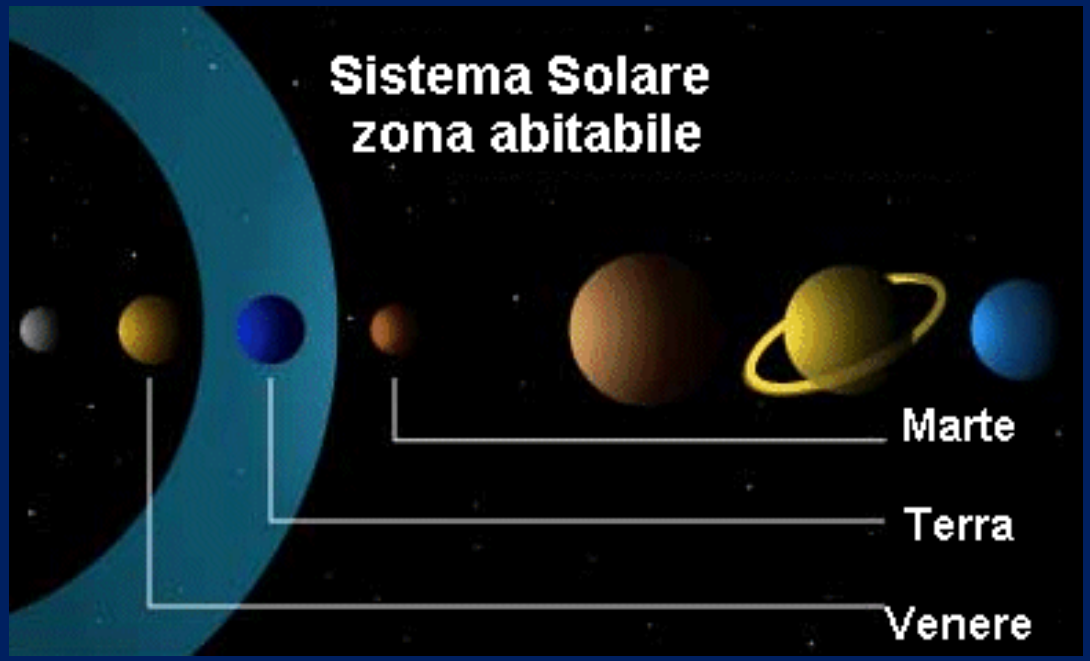


Dall'atmosfera primordiale (riducente) a quella attuale ricca di O_2 (ossidante)

L’atmosfera terrestre



Ecosfera planetaria e zona abitabile

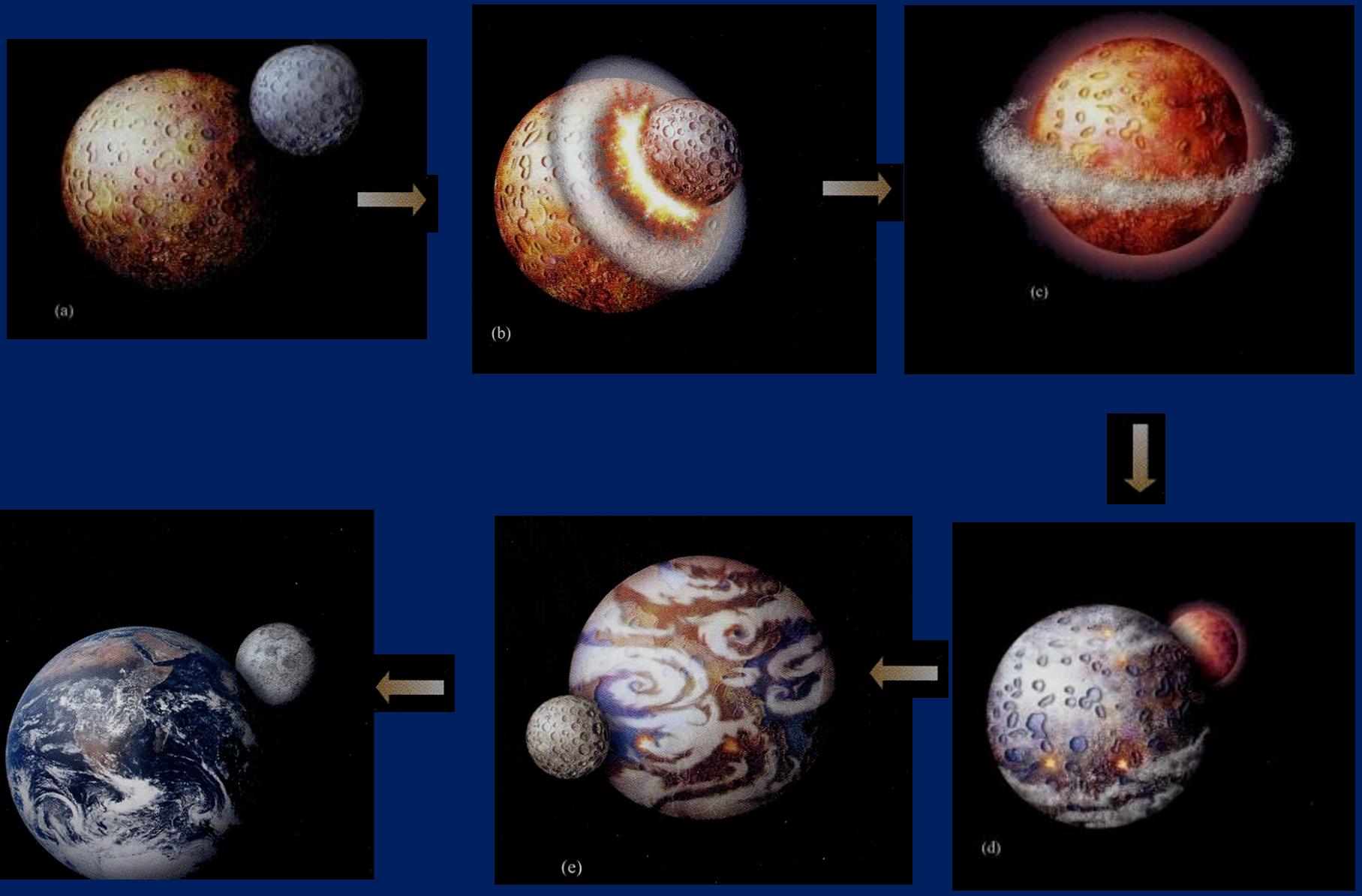


La Terra e Marte si trovano nell'ecosfera solare. Marte è appena fuori quest'area anche se la sua atmosfera (la cui densità è circa l'1 % quella dell'atmosfera terrestre) non trattiene sufficiente calore per mantenere oggi liquida l'acqua sulla sua superfice

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

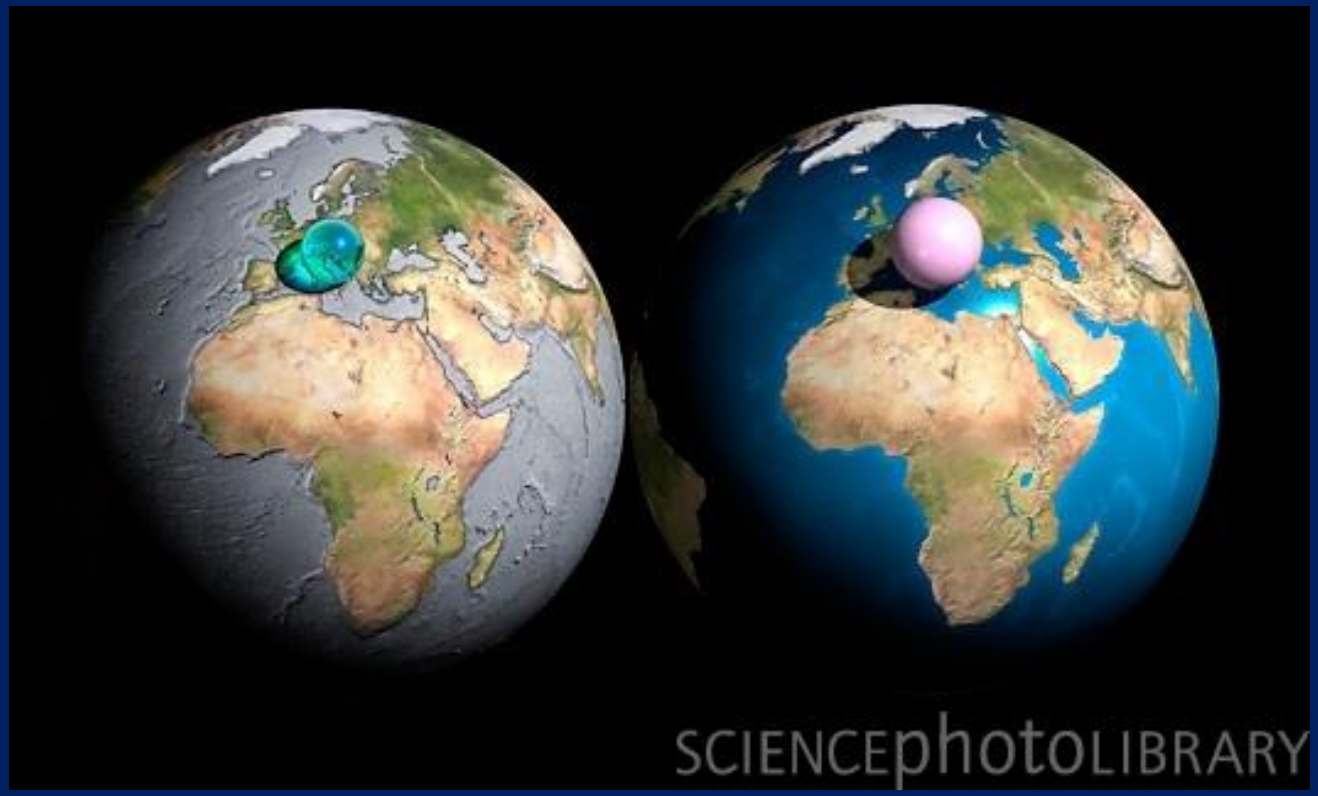
La Terra e la Luna un pianeta doppio

Il modello dell'Impatto Gigante



L’Impatto Gigante

Terra - acqua ed aria



Acqua: sfera di diametro di 1390 km con un volume di 1,4 miliardi di km^3 da cui $1{,}4\times10^{21}$ kg $\sim$0,023 % della massa terrestre $M_T = 5{,}9726 \times 10^{24}$ kg

Aria: sfera di diametro di 1999 km con un peso di 5140 trilioni di tonnellate $5140 \times 10^{12} \times 1000$ kg $= 5{,}140 \times 10^{18}$ kg

Fine