A detailed illustration of the solar system. At the top center is a bright yellow Sun. Several planets are shown in elliptical orbits around it. From left to right, the planets are Mercury (small, reddish), Venus (greyish), Earth (blue and white), and Mars (reddish). Further out, the gas giants are shown: Jupiter (orange and white), Saturn (yellowish with prominent rings), Uranus (light blue), and Neptune (dark blue). The background is a dark space filled with stars and a glowing yellowish nebula. The text "The Solar System" is written in white, sans-serif font across the middle of the image.

# The Solar System

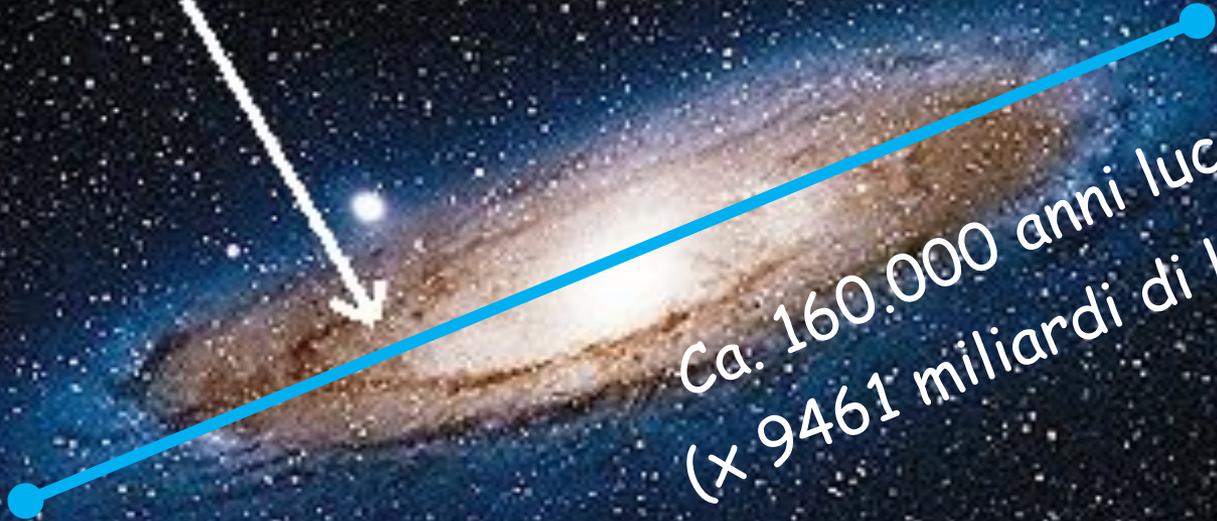
- ✦ Età Universo  $\approx 13.7$  Ga, poco meno di 10 Ga più vecchio della Terra.
- ✦ Il primo Universo aveva solo nuclei di H e He, il resto particelle elementari e radiazione.
- ✦ Prime stelle: H e He, il resto degli elementi formati nelle protostelle da processi di nucleosintesi.
- ✦ Stelle con una certa criticità in termini di grandezza esplosero/esplodono come supernuove, disperdendo H, He & gli elementi di neo-formazione come "polvere intergalattica". Altre stelle formarono buchi neri, ecc.
- ✦ Le disomogeneità delle nuvole di polvere portarono alla formazione di stelle secondarie, simili al nostro SOLE, che potrebbero contenere debris orbitanti dagli elementi delle stelle di 1<sup>a</sup> generazione.



# La formazione del Sistema Solare



voi siete qui



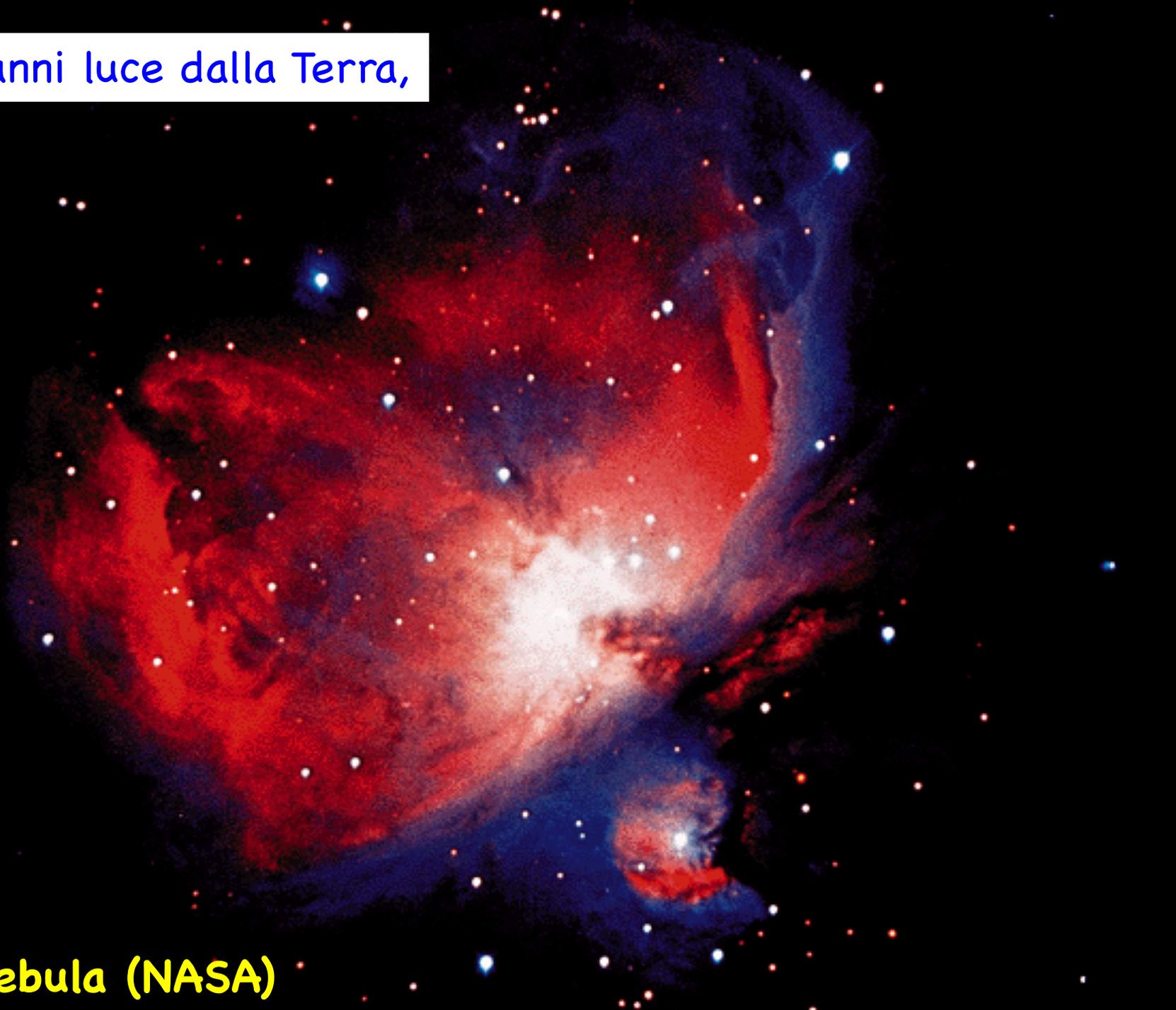
Ca. 160.000 anni luce  
(x 9461 miliardi di km)

# Via Lattea

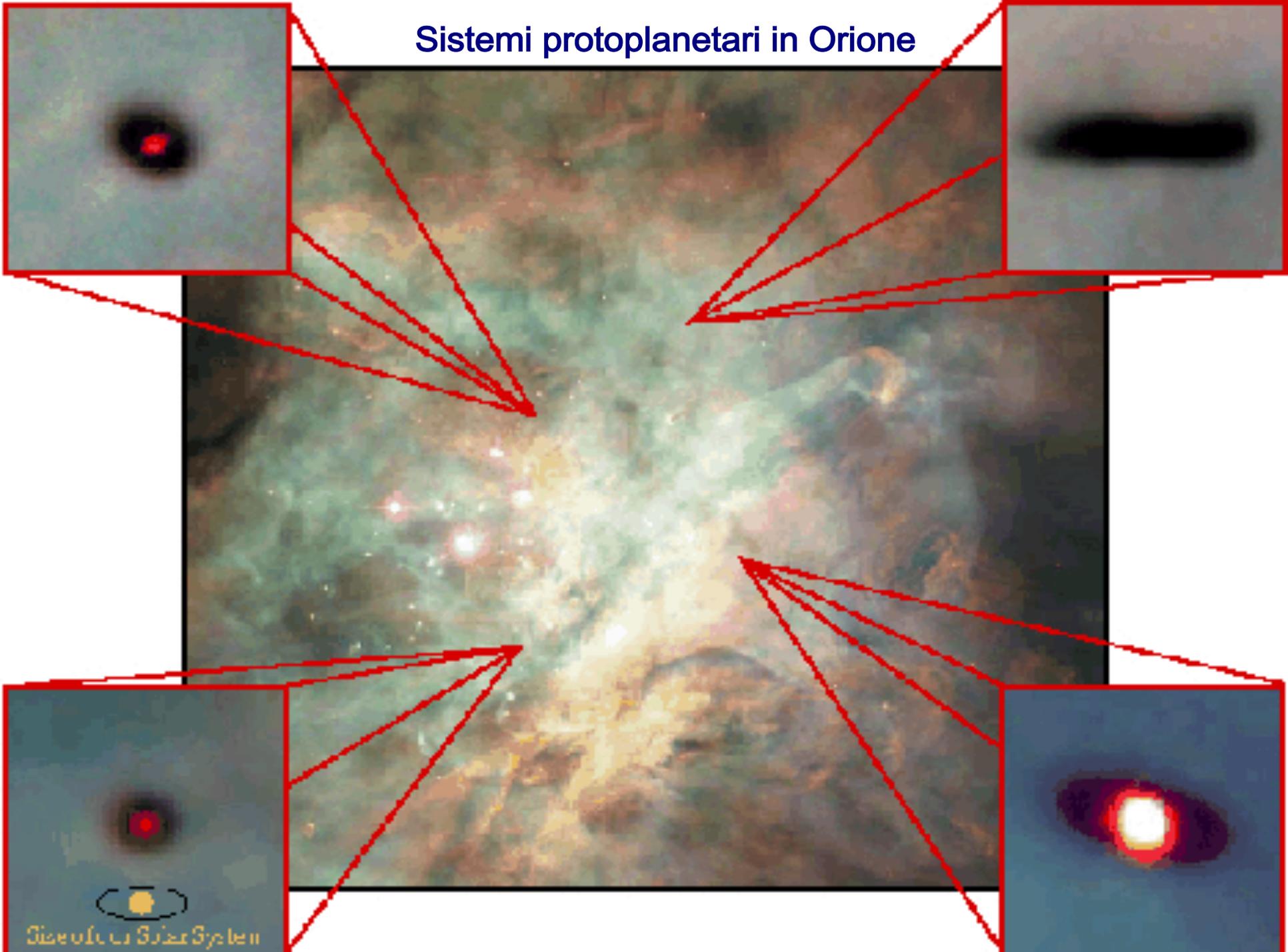
Zona d'ombra del Centro Galattico

1.270 anni luce dalla Terra,

**Orion Nebula (NASA)**



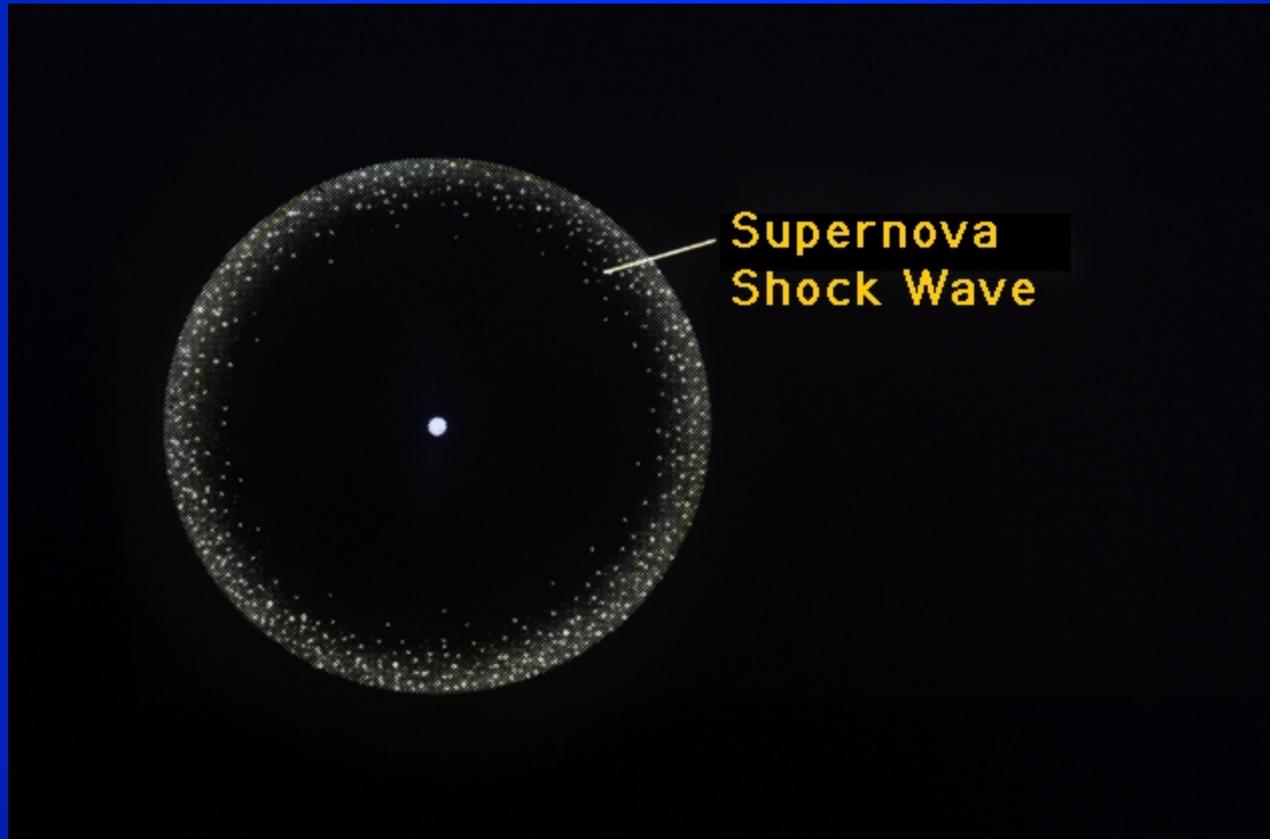
# Sistemi protoplanetari in Orione



Size of our Solar System



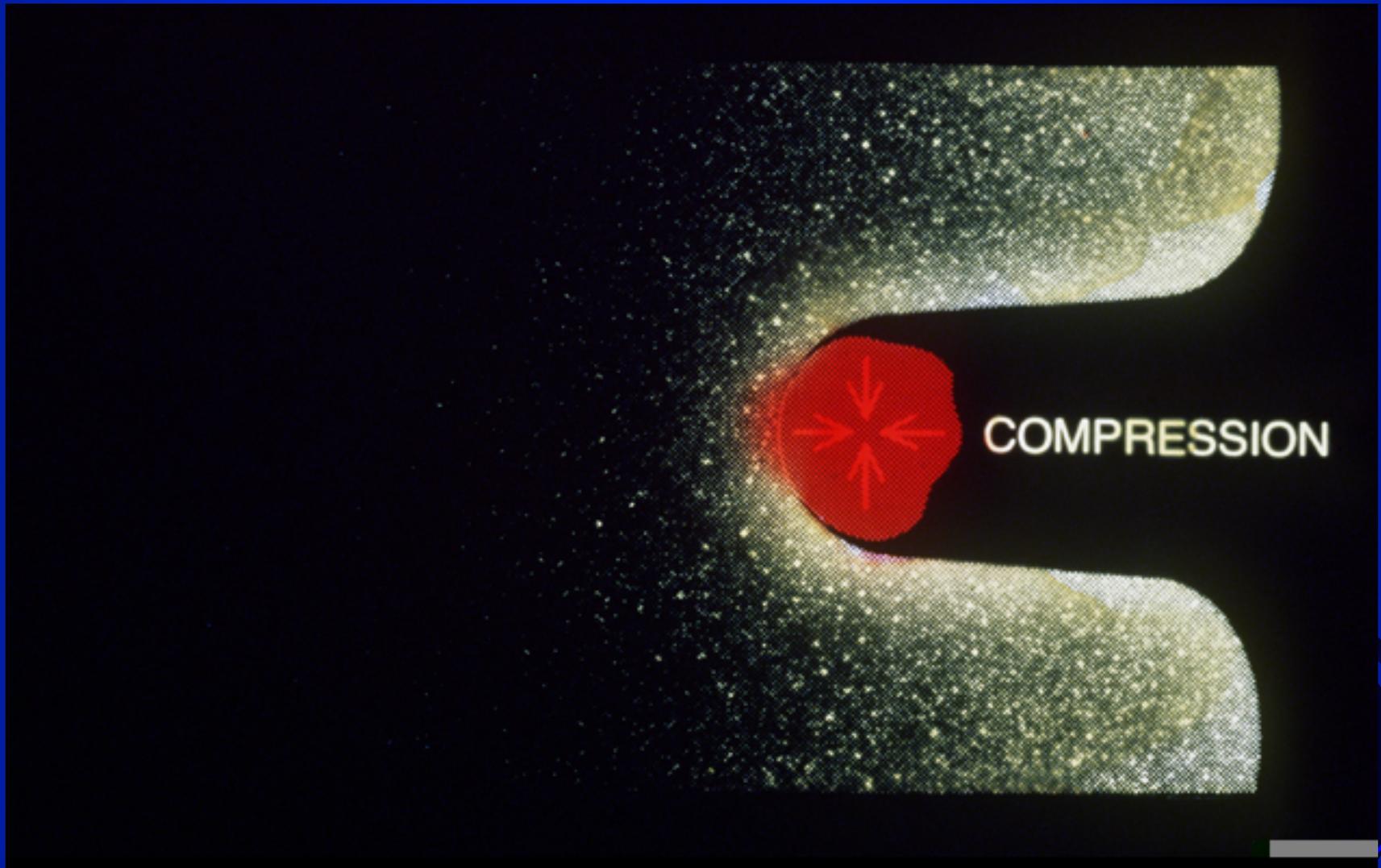
# Shock Wave da Supernova



Scudo di gas emessi da una supernova come una shock wave.

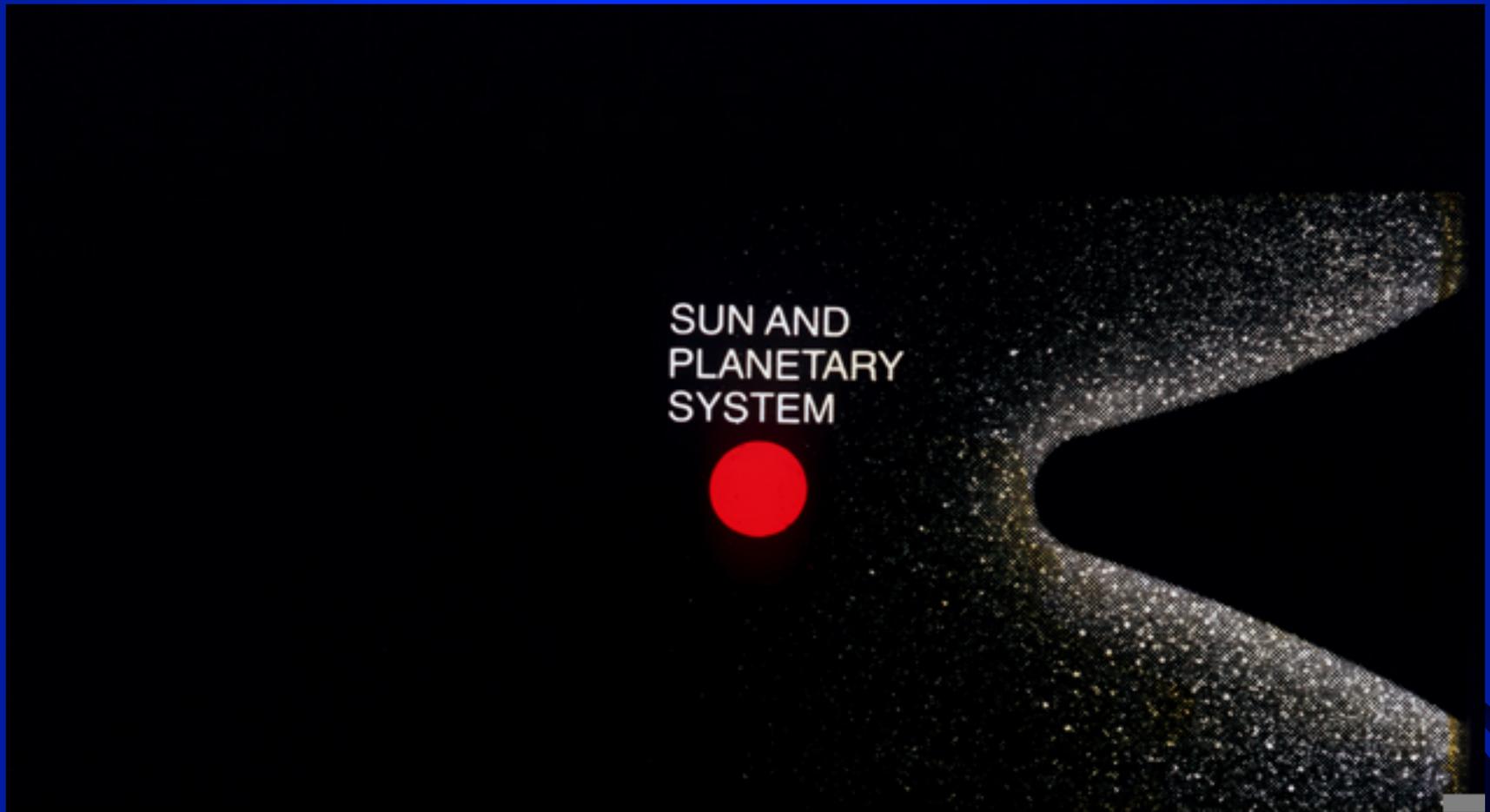


# Compressione di una nebulosa per Shock Wave



L'interazione causa una contrazione della nebulosa.

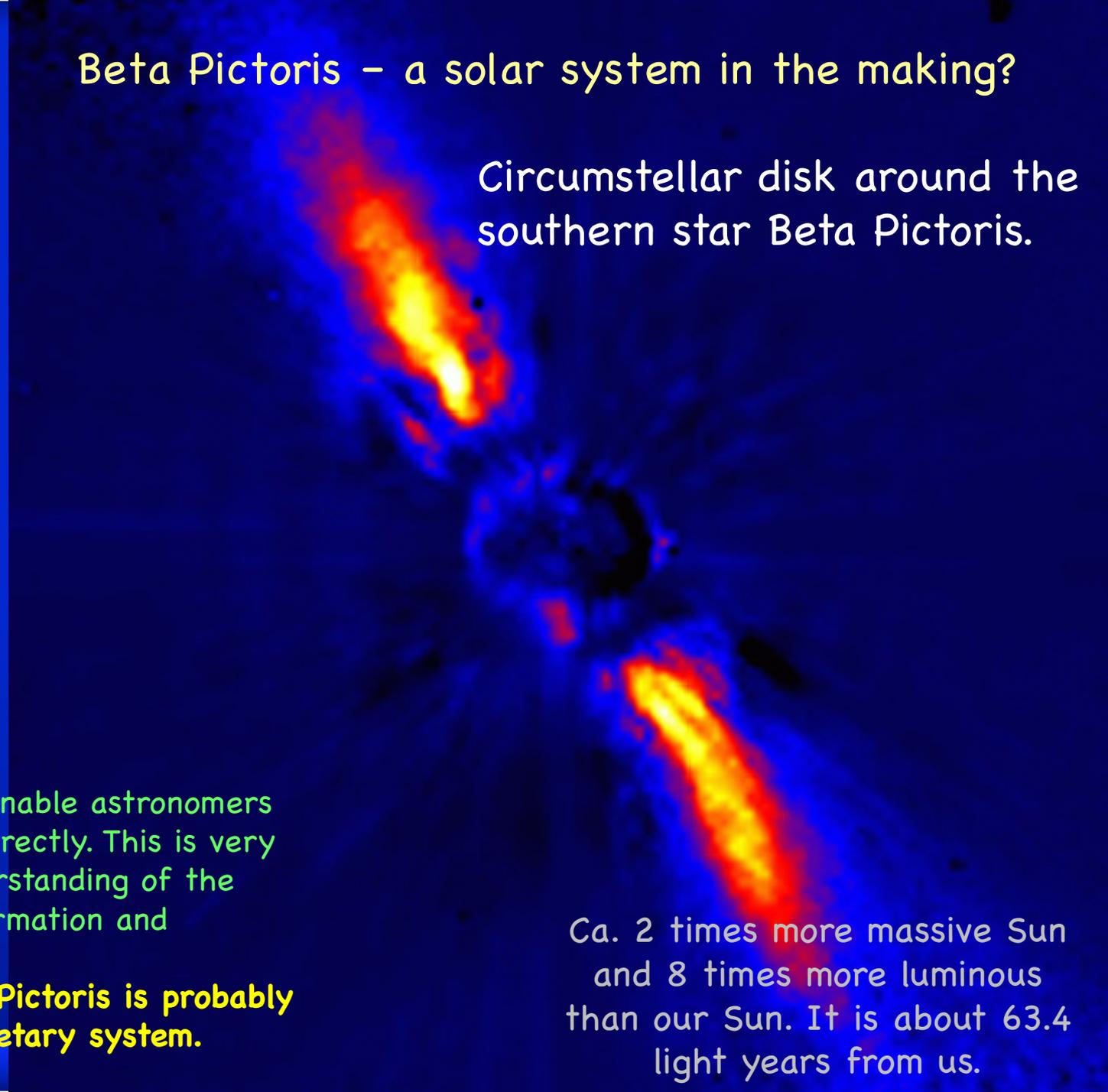
# Passaggio della Shock Wave



La shock wave passa lasciando un sistema proto-planetario

## Beta Pictoris – a solar system in the making?

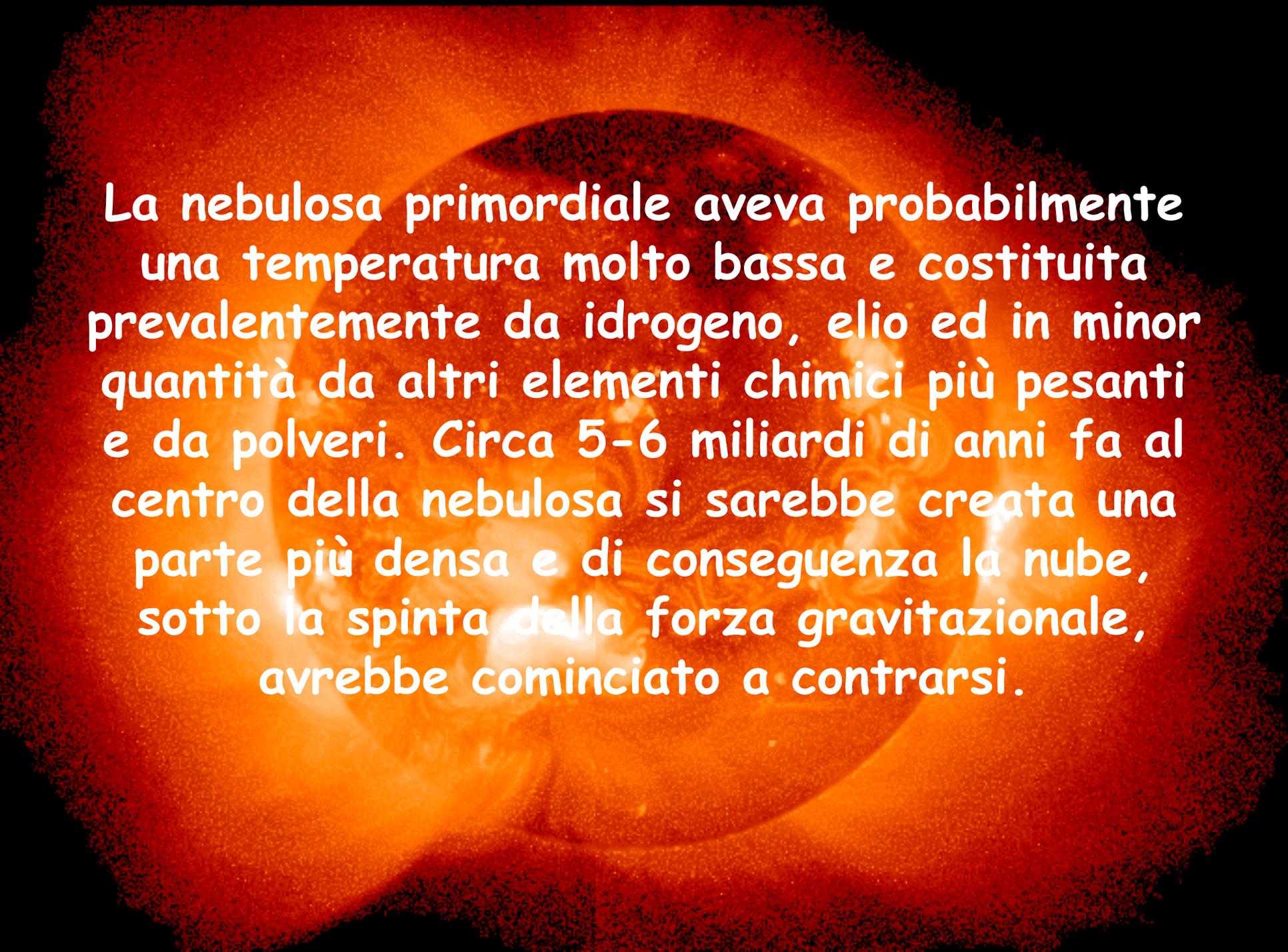
Circumstellar disk around the southern star Beta Pictoris.



Coronagraphic images enable astronomers to detect dusty disks directly. This is very important for our understanding of the physics of planetary formation and evolution.

**The disk around Beta Pictoris is probably connected with a planetary system.**

Ca. 2 times more massive Sun and 8 times more luminous than our Sun. It is about 63.4 light years from us.



La nebulosa primordiale aveva probabilmente una temperatura molto bassa e costituita prevalentemente da idrogeno, elio ed in minor quantità da altri elementi chimici più pesanti e da polveri. Circa 5-6 miliardi di anni fa al centro della nebulosa si sarebbe creata una parte più densa e di conseguenza la nube, sotto la spinta della forza gravitazionale, avrebbe cominciato a contrarsi.

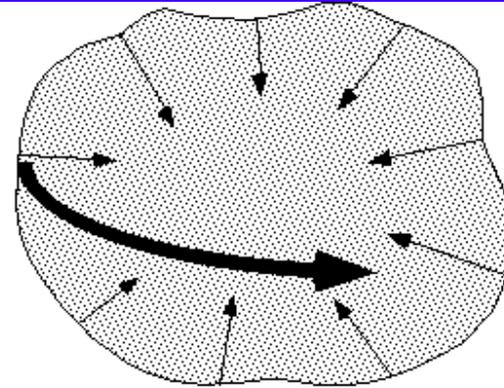
# Il Sistema Solare

Accrezione della Nebula

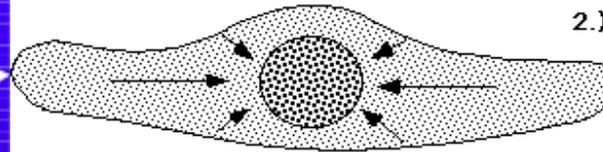
Planetesimali ed appiattimento

Innesco del Sole e allontanamento della materia

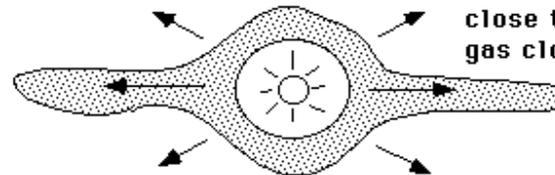
Sistema solare oggi



1.) There is a slowly rotating cloud of gaseous molecules called a "nebula". This nebula begins to collapse.



2.) A "Protostar" forms out of gas, and planetesimals or "planetismals" form out of dust, as the cloud continues to condense and flatten into a pancake shape.

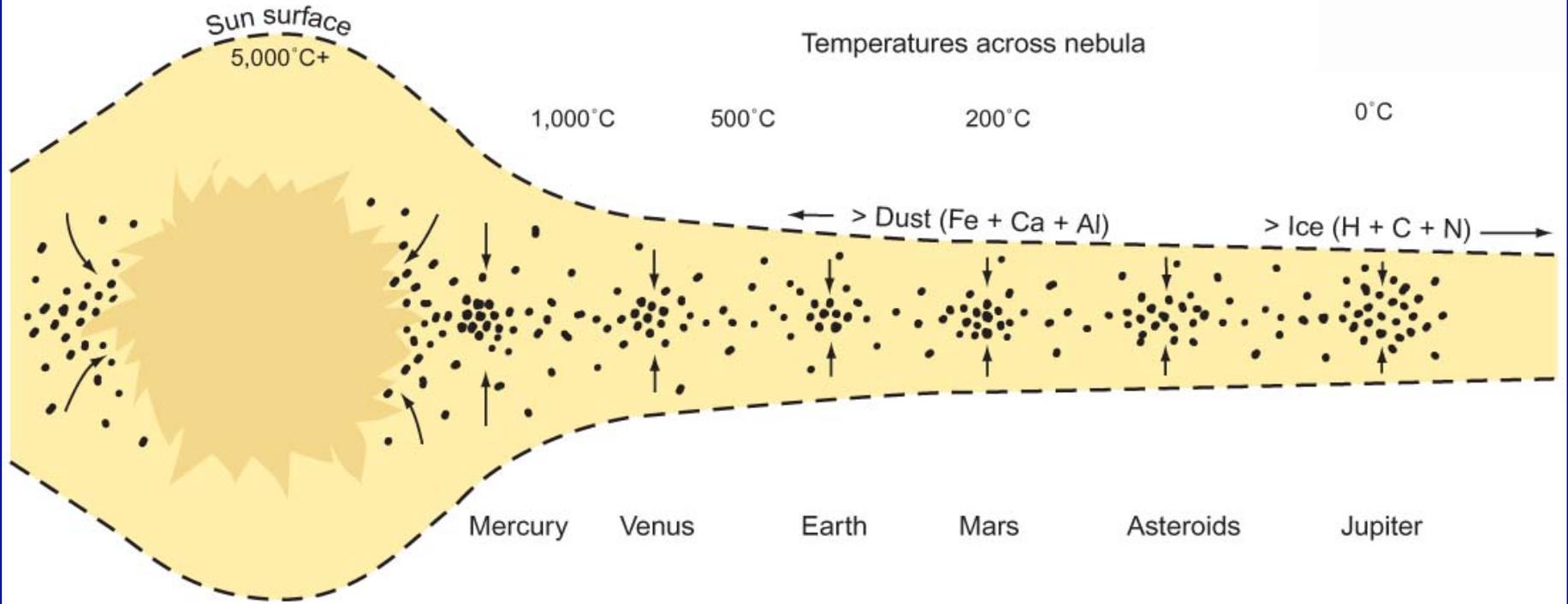


3.) The protostar "turns on" and becomes a star. When this happens, dust close to the star is vaporized, and gas close to the star is blown away.



4.) The nebula clears away and only the star, and planets which formed out of the planetesimals are left.

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



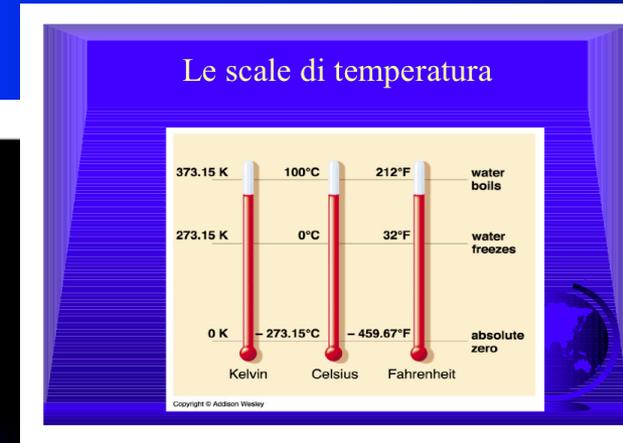
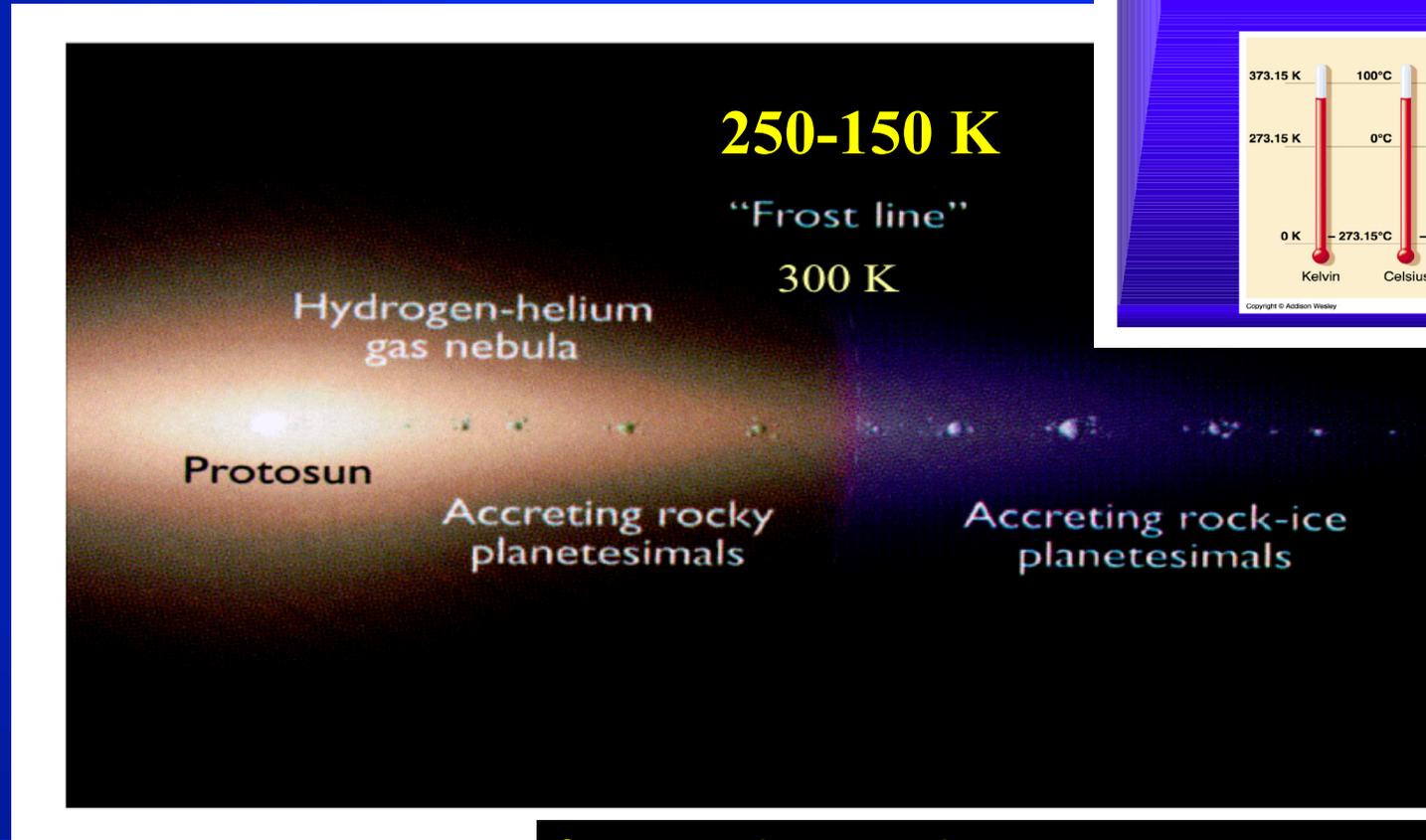
Sezione di una nebula che porta alla formazione di pianeti per condensazione di planetesimali. Le temperature si riferiscono alle condizioni iniziali di condensazione.



# Dai granuli ai planetesimali

Granuli con bassa velocità di collisione si possono agglutinare per formare porzioni più grandi.

- Oltre la "frost line", l'accrezione è maggiore per la condensazione di materiale ghiacciato.



$$^{\circ} \text{C} = (150 \text{ K}) - 273.15 = -123.15$$

# Dai granuli ai planetesimali

Granuli con bassa velocità di collisione si possono agglutinare per formare porzioni più grandi.

-Oltre la "frost line", l'accrezione è maggiore per la condensazione di materiale ghiacciato.

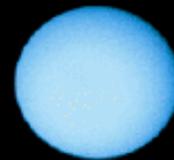
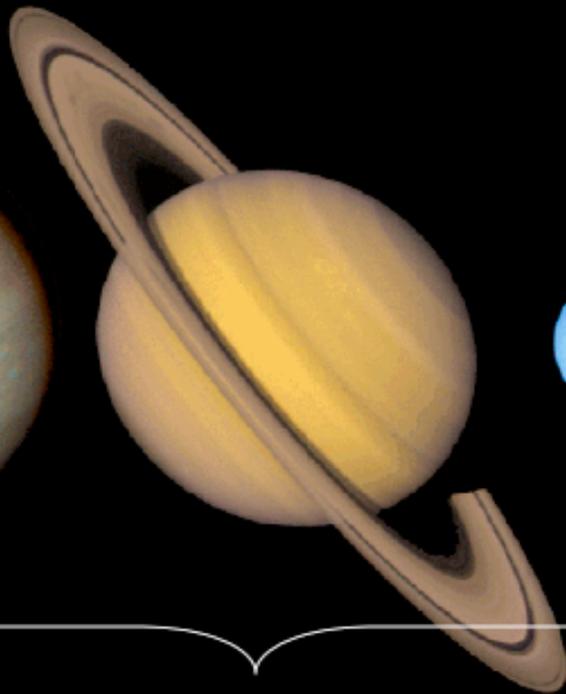
La crescita continua sino a quando la mutua forza gravitazionale lo permette, accelerando il processo di aggregazione:

- I planetesimali sono agglomerati/frammenti di dimensioni chilometriche che possono essere formati circa 1000 anni dalla fase iniziale

L'assemblaggio planetario ha necessitato probabilmente di 100 Ma. Per circa 1 Ga si è assistito ad un forte bombardamento dei pianeti da parte degli "avanzi"!



Pianeti rocciosi



Icy  
Pluto



Pianeti giganti gassosi. Prevalentemente H, He & Ghiaccio



# Sizes of the Rocky Planets and The Moon



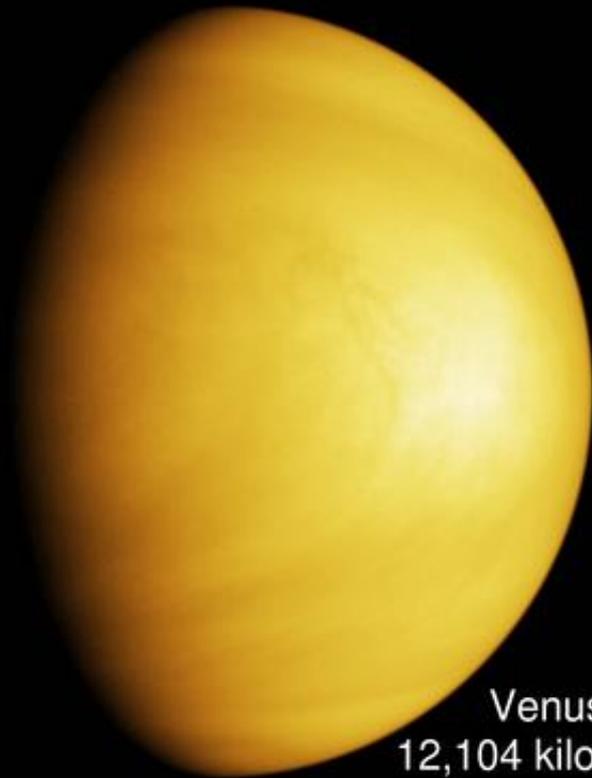
Mercury  
4,880 kilometers



Mars  
6,792 kilometers



The Moon  
3,476 kilometers



Venus  
12,104 kilometers

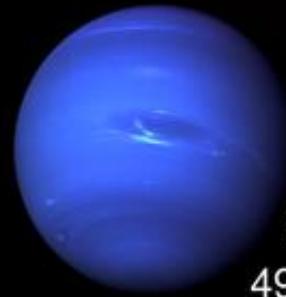


Earth  
12,756 kilometers

# Sizes of the Gas Giant Planets and Earth



Jupiter  
142,984 kilometers



Neptune  
49,532 kilometers



Earth  
12,756 kilometers



Uranus  
51,118 kilometers



Saturn  
120,536 kilometers  
273,600 kilometers (rings)

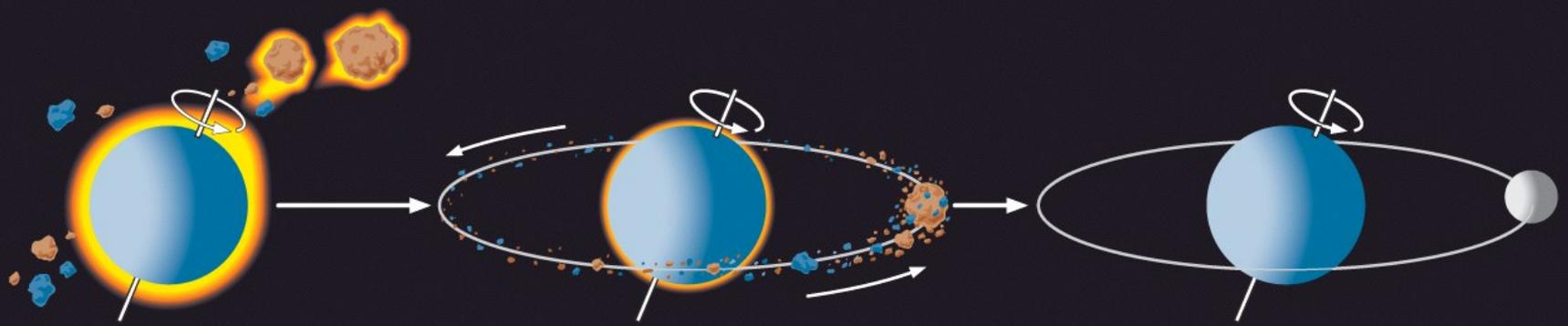
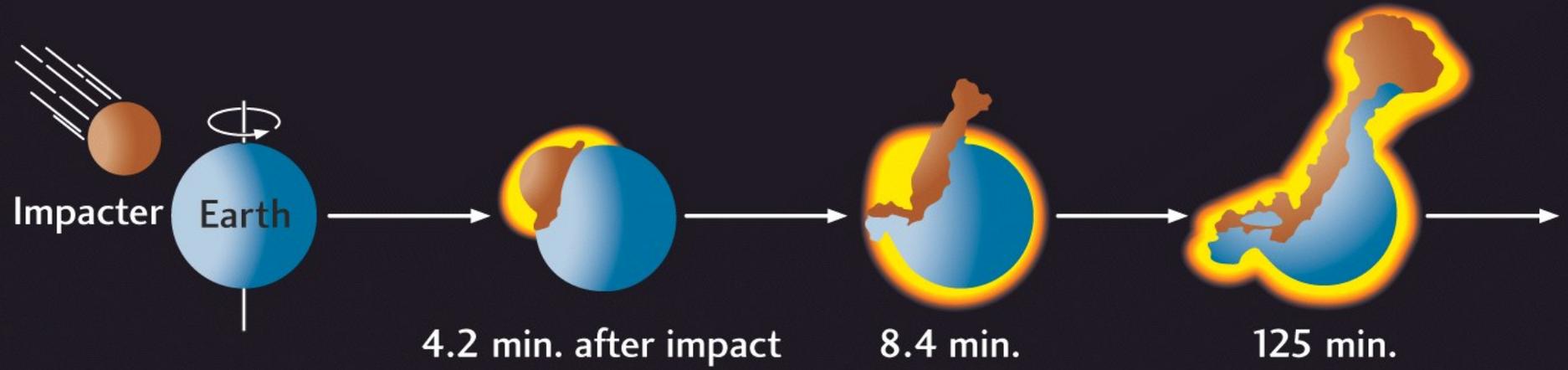
# L'origine della Luna

Le dimensioni della Luna pongono un problema nello scenario planetario:

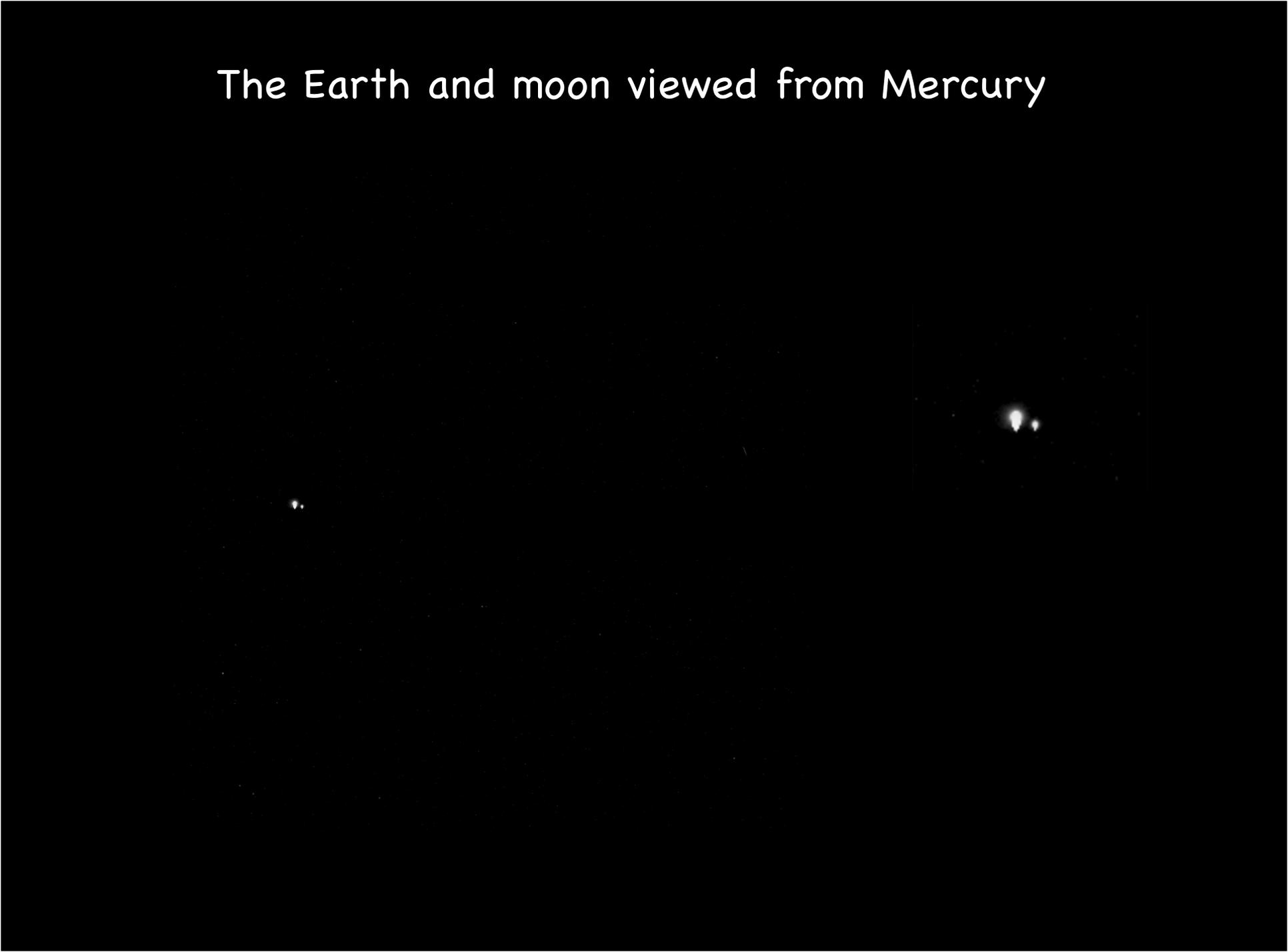
- a) La Terra e la Luna si sono formate assieme.
- b) La Terra ha catturato la Luna.
- c) La Luna si è staccata dalla Terra
- d) La Luna si è formata per l'impatto di un meteorite gigante con la Terra.







# The Earth and moon viewed from Mercury





# Earth



# Moon



12,756.3 km - diameter

23 degree axis tilt (seasons!)

Surface temps  $-73$  to  $48^{\circ}$  C

Thick atmosphere, mild  
greenhouse effect

Liquid water - lots! - at  
surface

3476 km - diameter

7 degree tilt (no seasons)

Surface temps - 107 to  $-153^{\circ}$  C

No atmosphere

No liquid water ... Ice at poles in  
shadows?



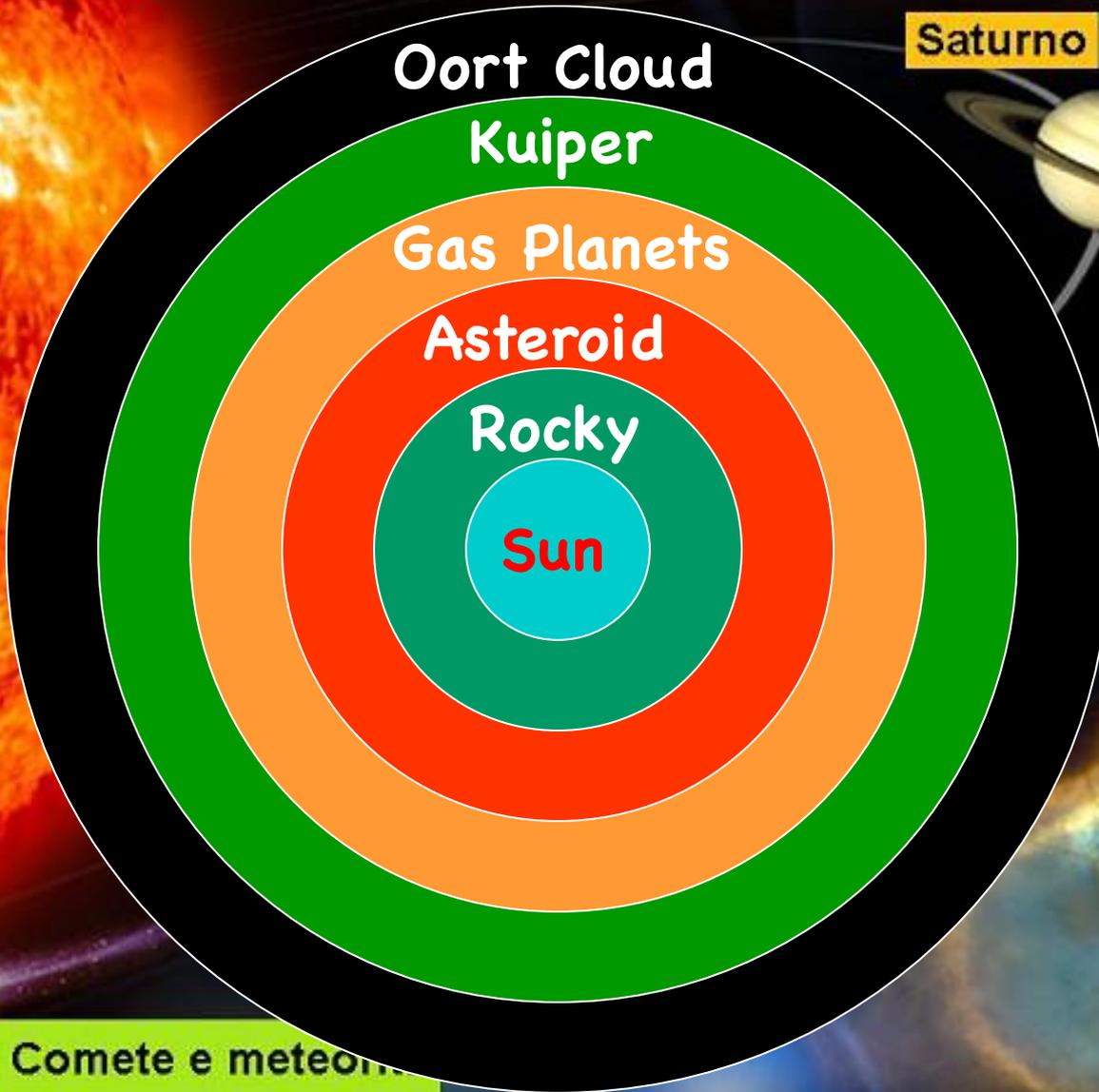
Sole

# Il Sistema Solare del 21<sup>imo</sup> Secolo

Nettuno

Plutone

Saturno



Sun

Rocky  
Planets

Asteroid  
Belt

Gas Giant  
Planets

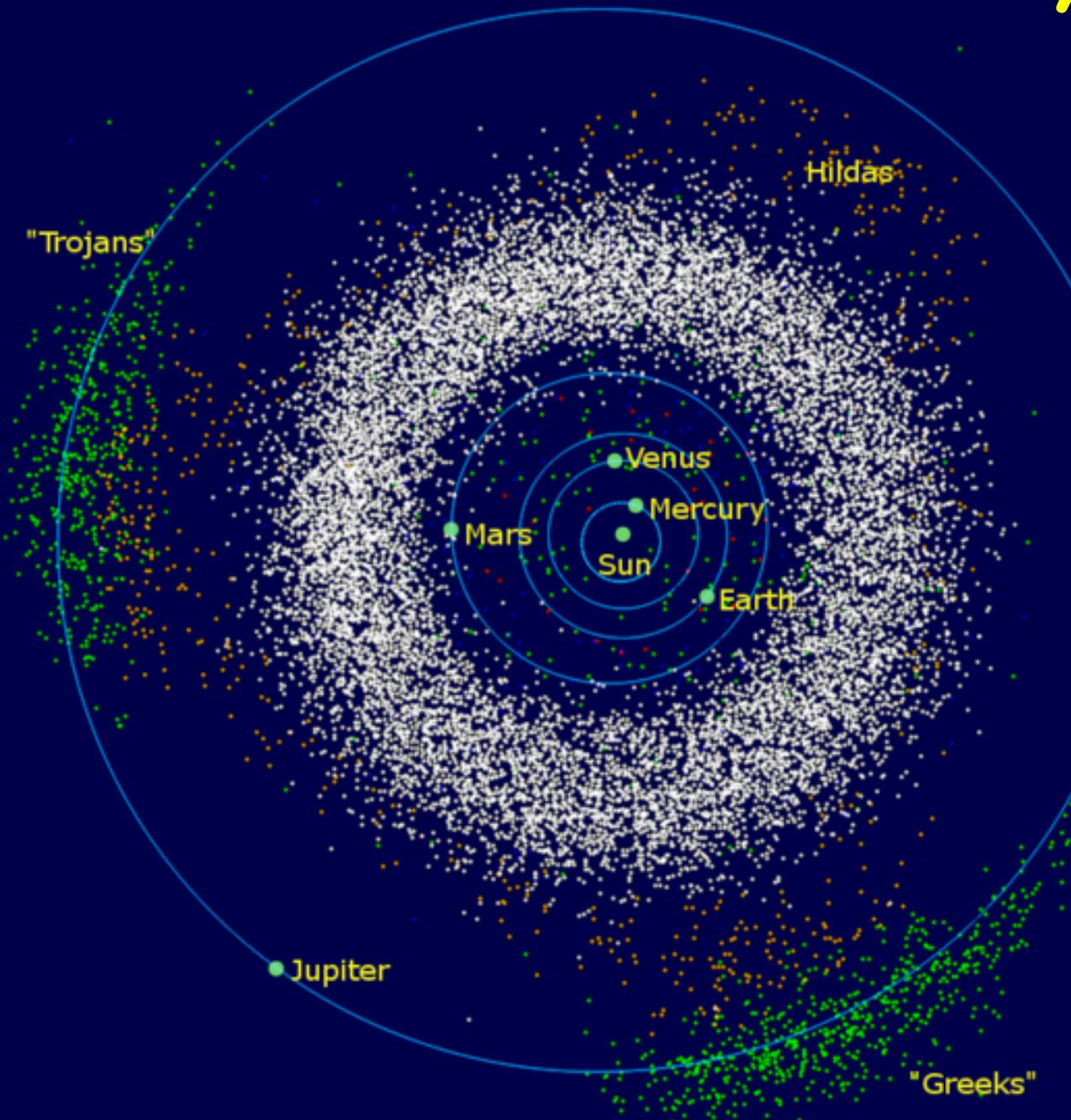
Kuiper Belt

Oort Cloud

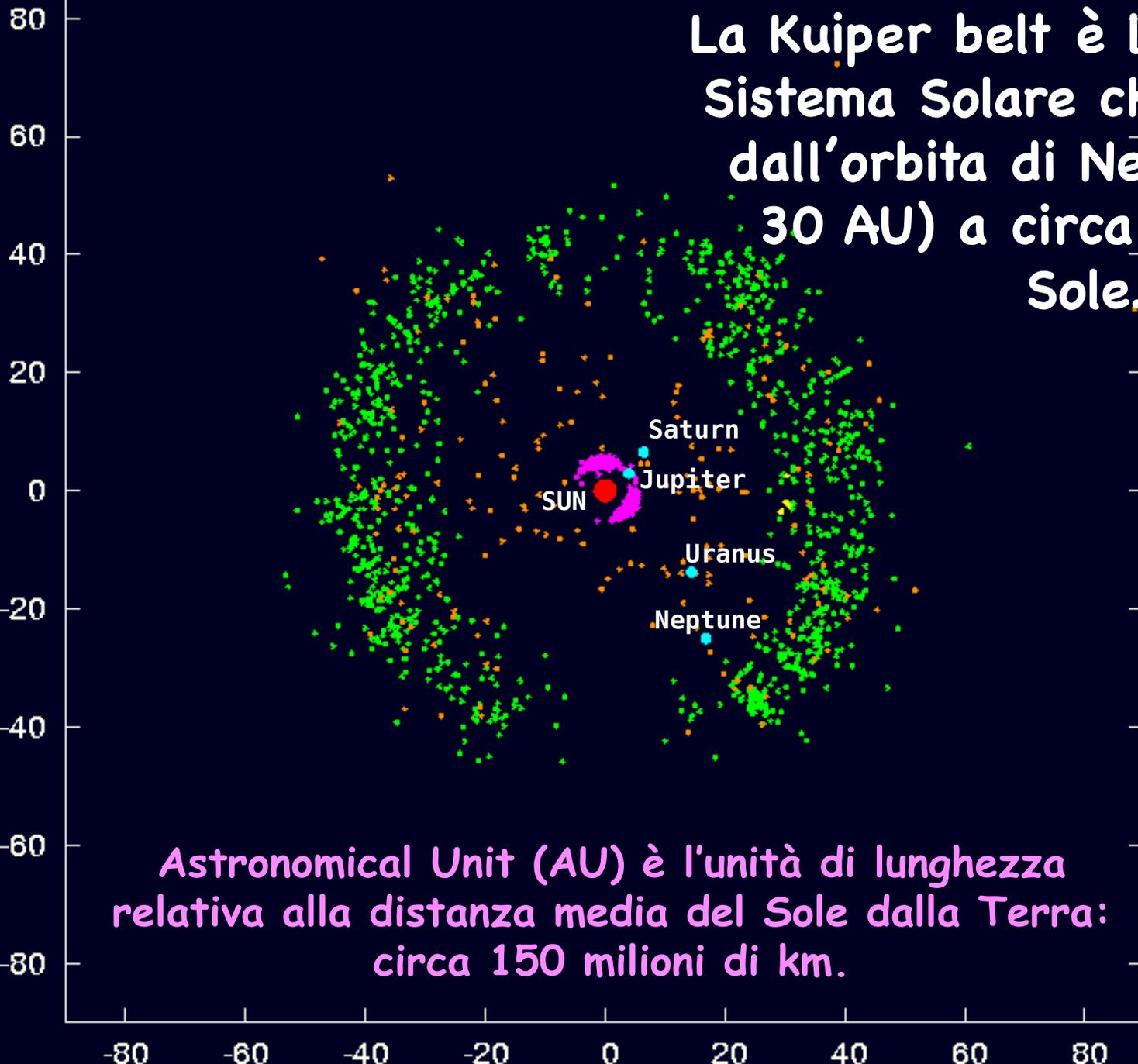
Comete e meteoroidi

# Asteroid Belt

Si trova tra le orbite di Marte e Giove. Racchiude numerosi corpi irregolari detti "asteroidi" o "pianeti minori". Viene detta anche "THE MAIN BELT". Più della metà della massa è contenuta in 4 oggetti: Ceres, Vesta, Pallas e Hygiea.

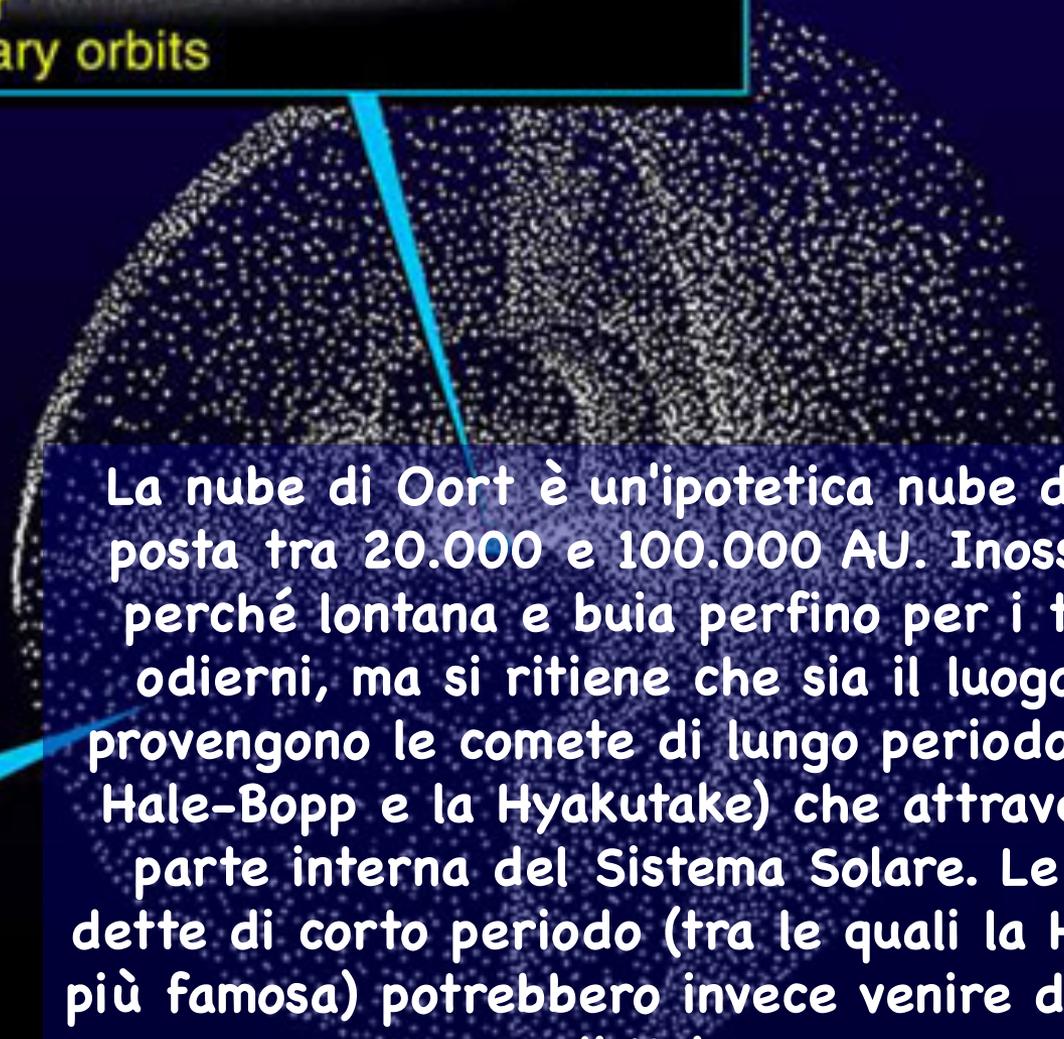
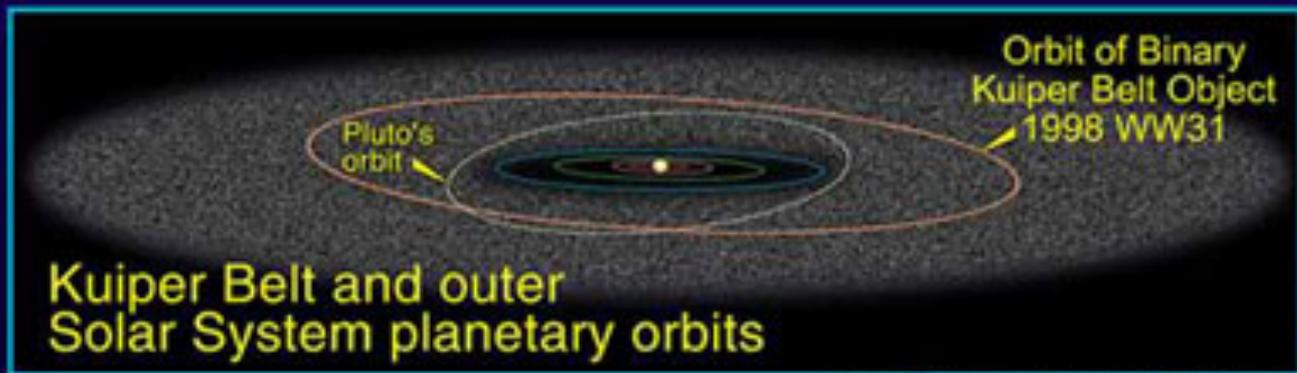


La Kuiper belt è la regione del Sistema Solare che si estende dall'orbita di Nettuno (circa 30 AU) a circa 55 AU dal Sole.



Astronomical Unit (AU) è l'unità di lunghezza relativa alla distanza media del Sole dalla Terra: circa 150 milioni di km.

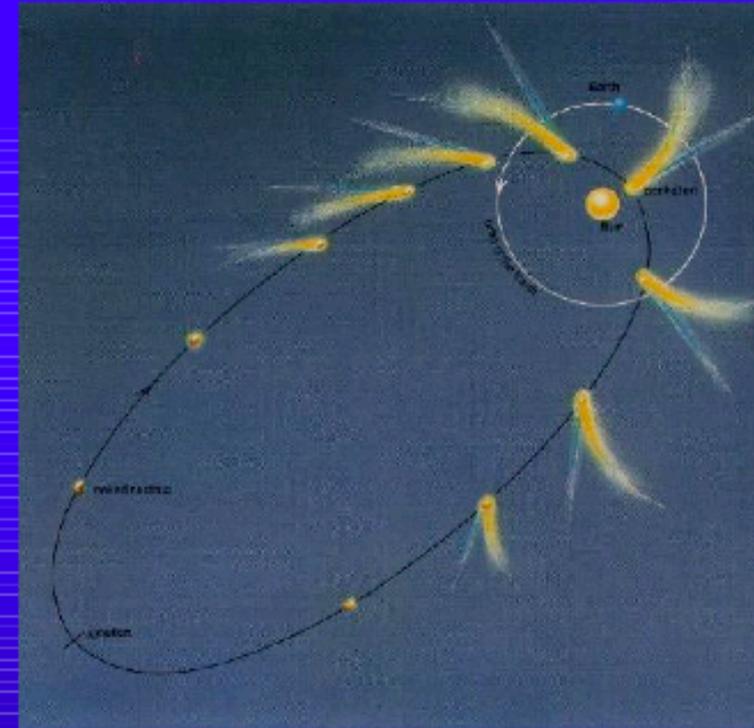
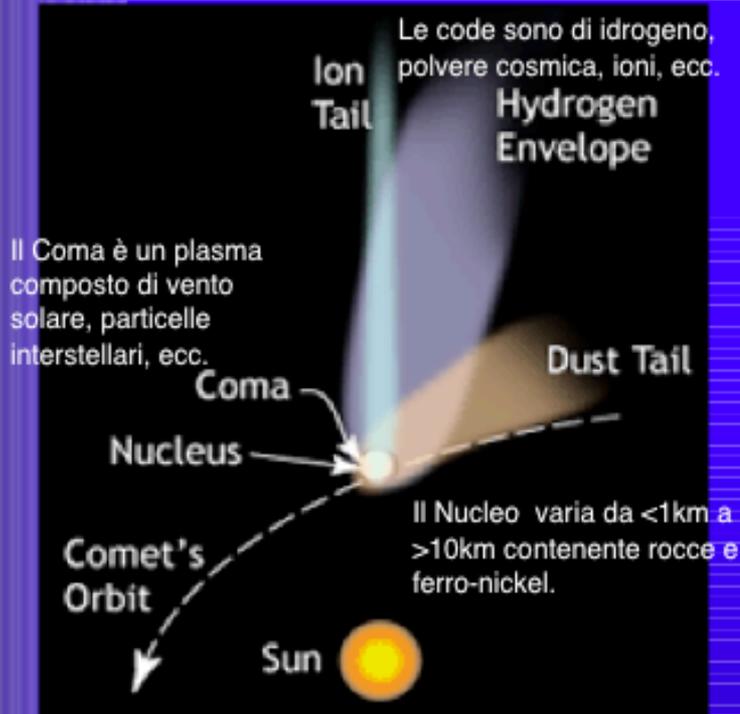




The Oort Cloud  
(comprising many billions of comets)

La nube di Oort è un'ipotetica nube di comete posta tra 20.000 e 100.000 AU. Inosservabile perché lontana e buia perfino per i telescopi odierni, ma si ritiene che sia il luogo da cui provengono le comete di lungo periodo (come la Hale-Bopp e la Hyakutake) che attraversano la parte interna del Sistema Solare. Le comete dette di corto periodo (tra le quali la Halley è la più famosa) potrebbero invece venire dalla fascia di Kuiper .

# Le comete



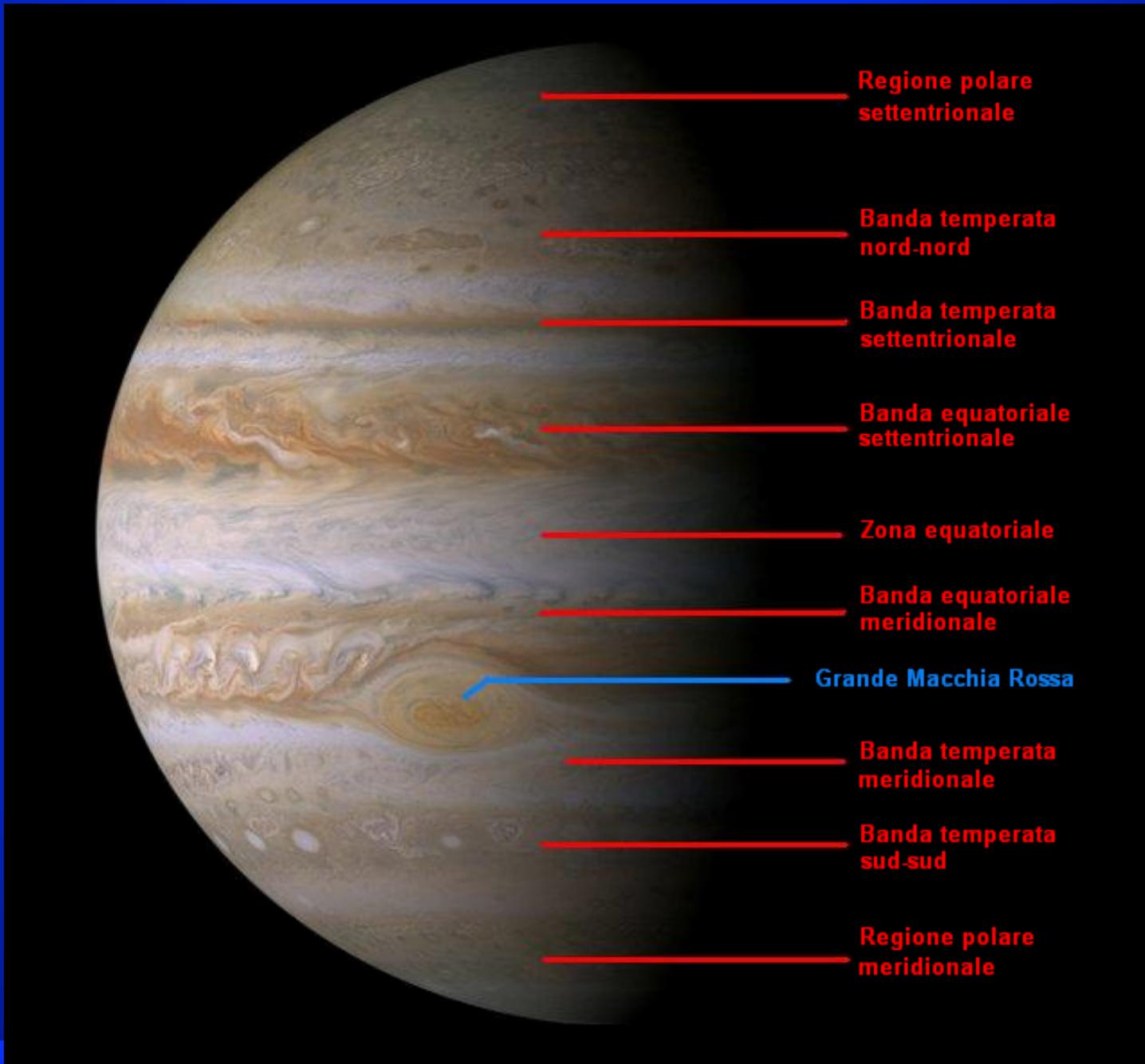
La maggior parte delle comete nella Nuvola di Oort (Oort Cloud) si erano formate vicino o emessa da Urano e Nettuno. Le comete nella Cintura di Kuiper si sono formate vicino a dove le vediamo oggi.

**Cometa:** oggetto celeste composto prevalentemente di ghiaccio. Le orbite delle comete si estendono oltre quelle di Plutone. Sono composte per la maggior parte di  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  con mescolati aggregati di polvere e vari minerali. La sublimazione delle sostanze volatili quando la cometa è in prossimità del Sole causa la formazione della coda. Sono residui rimasti dalla condensazione della nebula solare. Le zone periferiche di tale nebulosa sarebbero state abbastanza fredde da permettere all'acqua di trovarsi in forma solida.

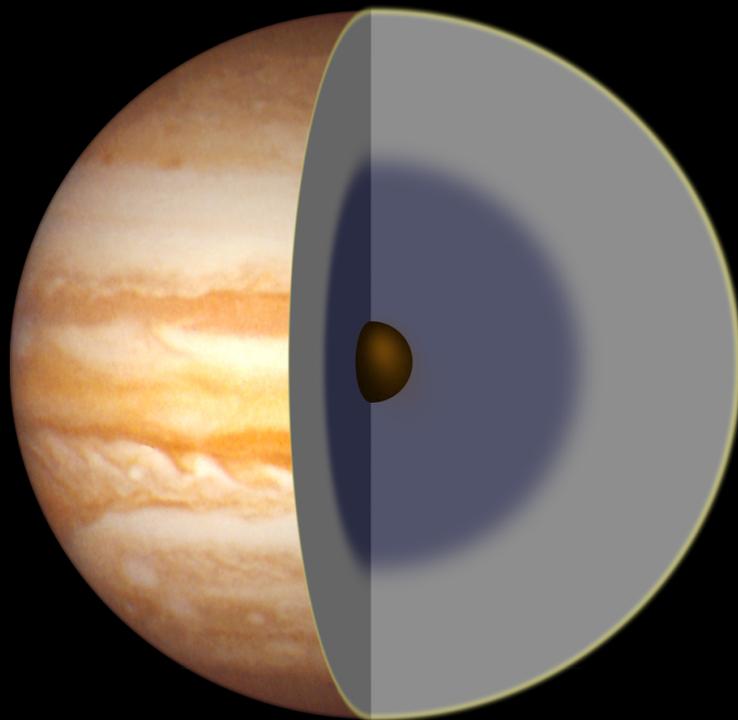
# GIOVE



Giove, con composizione simile al Sole, è costituito principalmente da idrogeno ed elio, ammoniaca, metano ed acqua. L'atmosfera esterna è caratterizzata da numerose bande e zone di tonalità variabili dal color crema al marrone, costellate da formazioni cicloniche ed anticicloniche, tra cui la Grande Macchia Rossa.



$H_{2(l)} = -252.87 \text{ } ^\circ \text{ C}; H_{2(s)} = -259.14 \text{ } ^\circ \text{ C}$   
 $He_{(l)} = -269 \text{ } ^\circ \text{ C}; He_{(s)} = -272 \text{ } ^\circ \text{ C}$

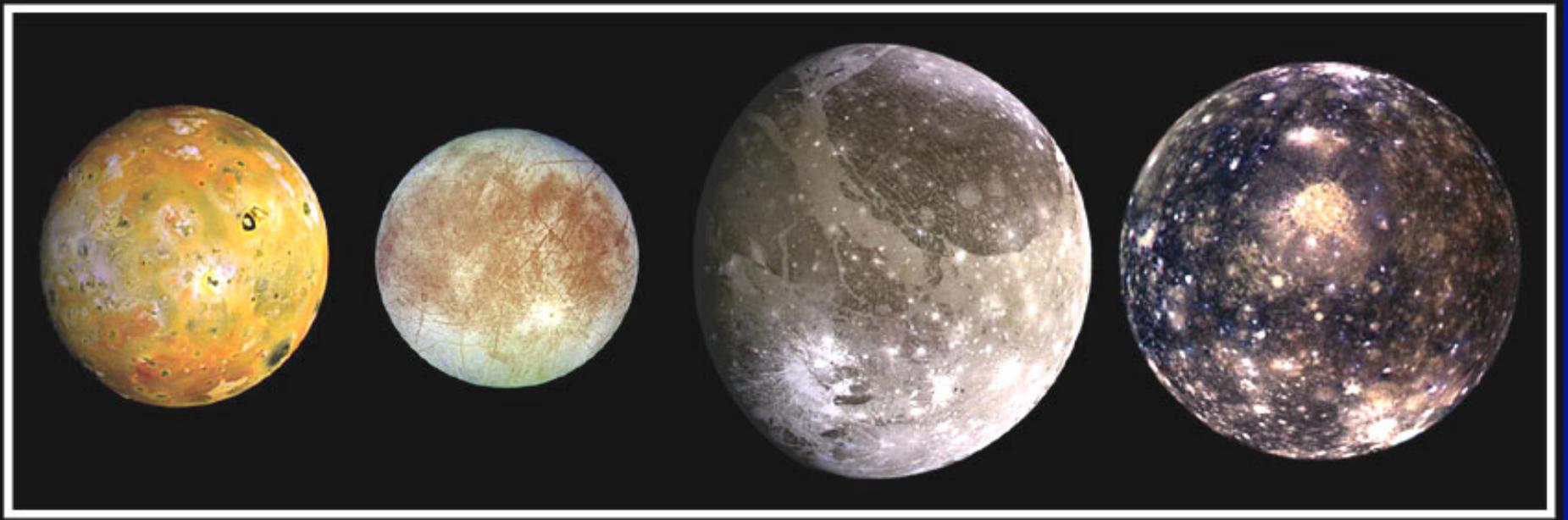


**Giove**

-  **Atmosfera**
-  **Idrogeno molecolare ed elio liquidi**
-  **Idrogeno metallico**
-  **Nucleo solido (ferro + silicati)**
-  **Terra (per raffronto)**



# Jupiter's Galilean Satellites – Worlds of their own!



Io

Europa

Ganymede

Callisto

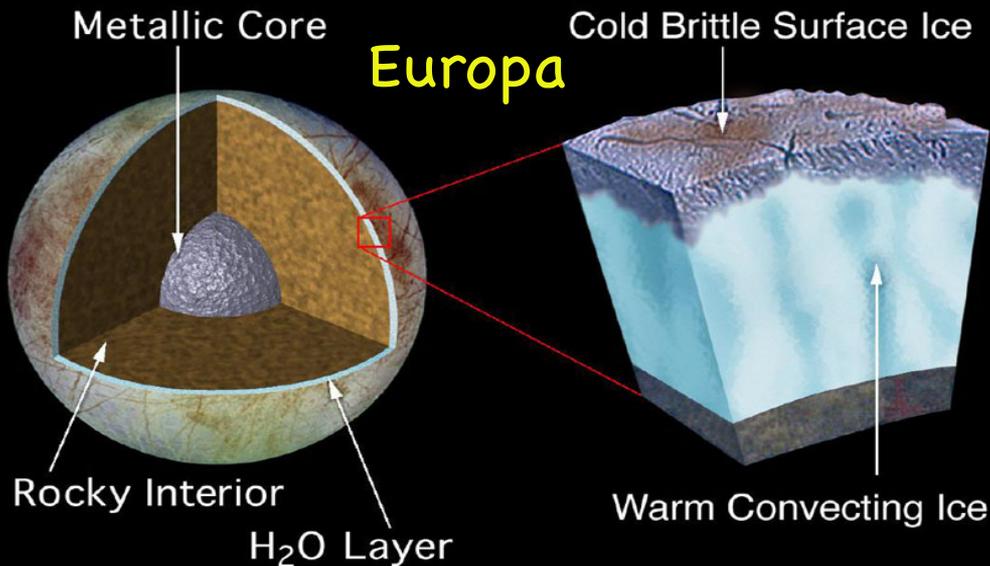
← To Jupiter



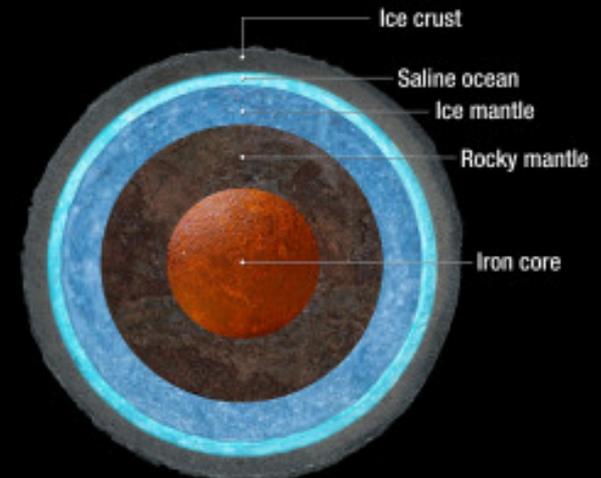


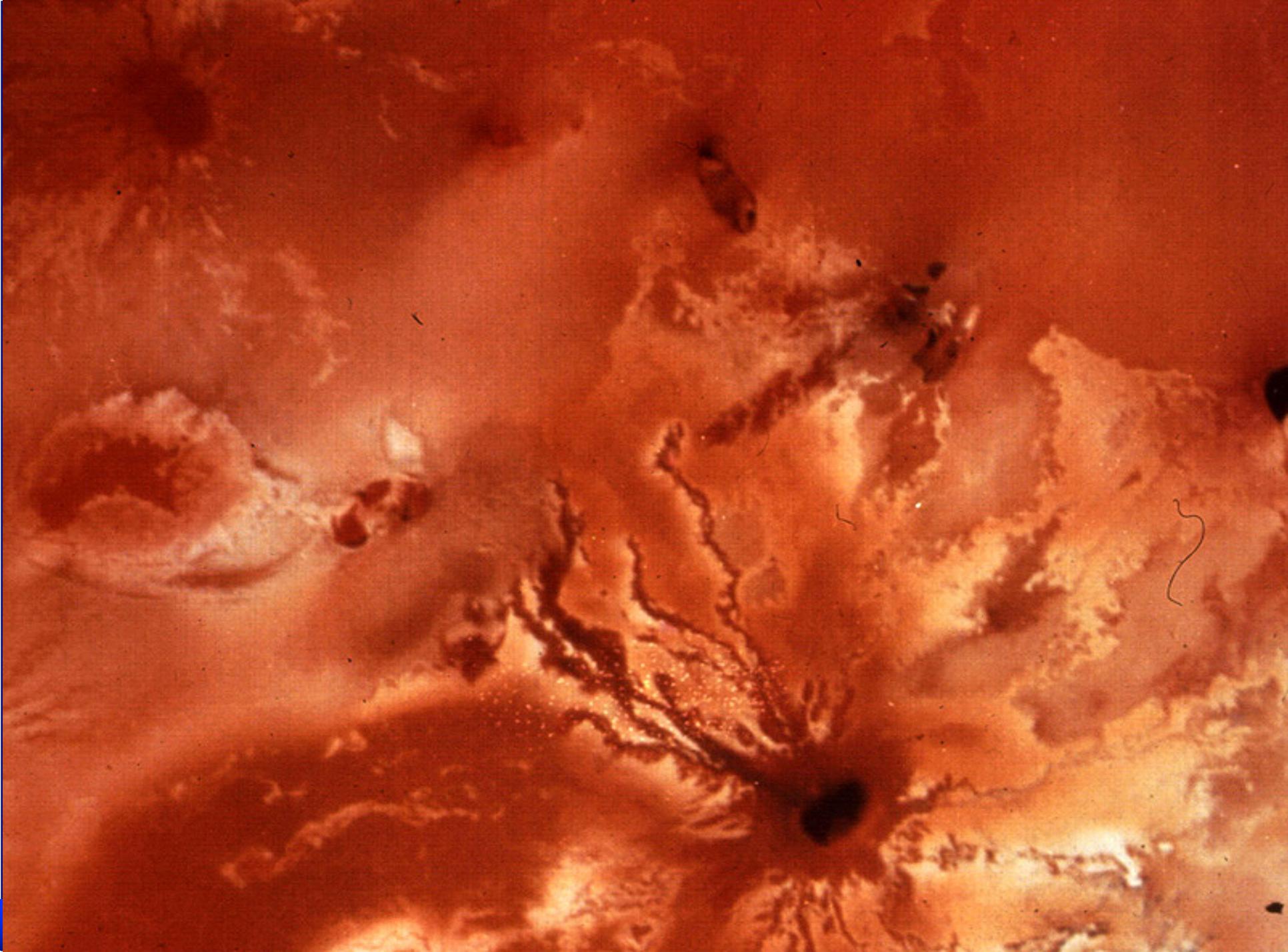
Jupiter's moon Io,  
volcanologically the most active  
body in our Solar System.

- 1) Color - sulfur!
- 3) No impact craters - fresh surface
- 4) Recent lava flows
- 5.) Numerous calderas
- 6) Numerous active volcanoes, spewing out sulfur and silicate lava



### Ganymede Interior





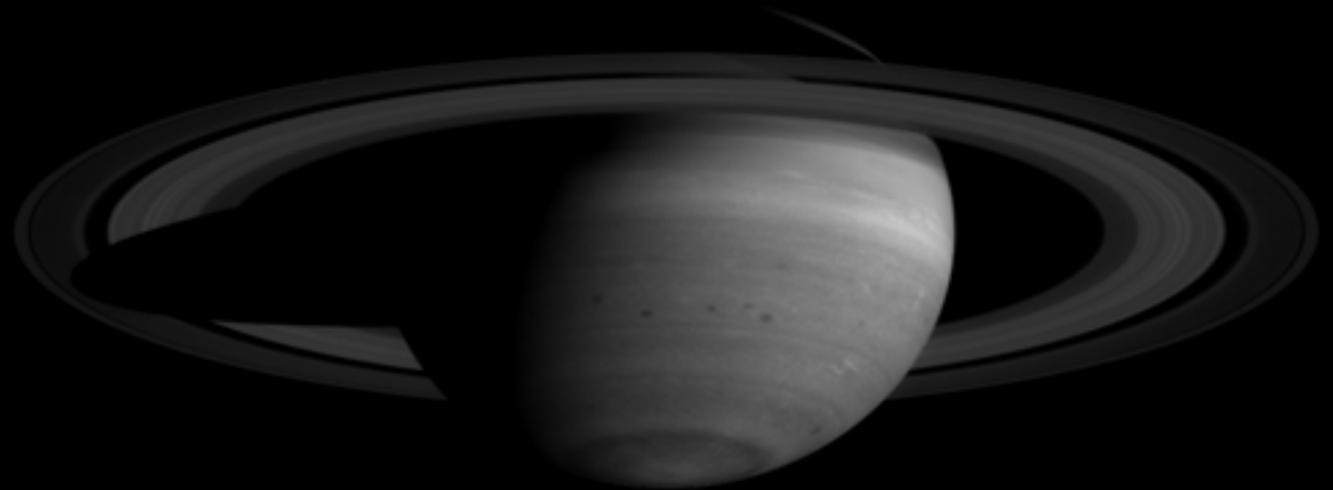
# Ganymede - frost-covered ridges



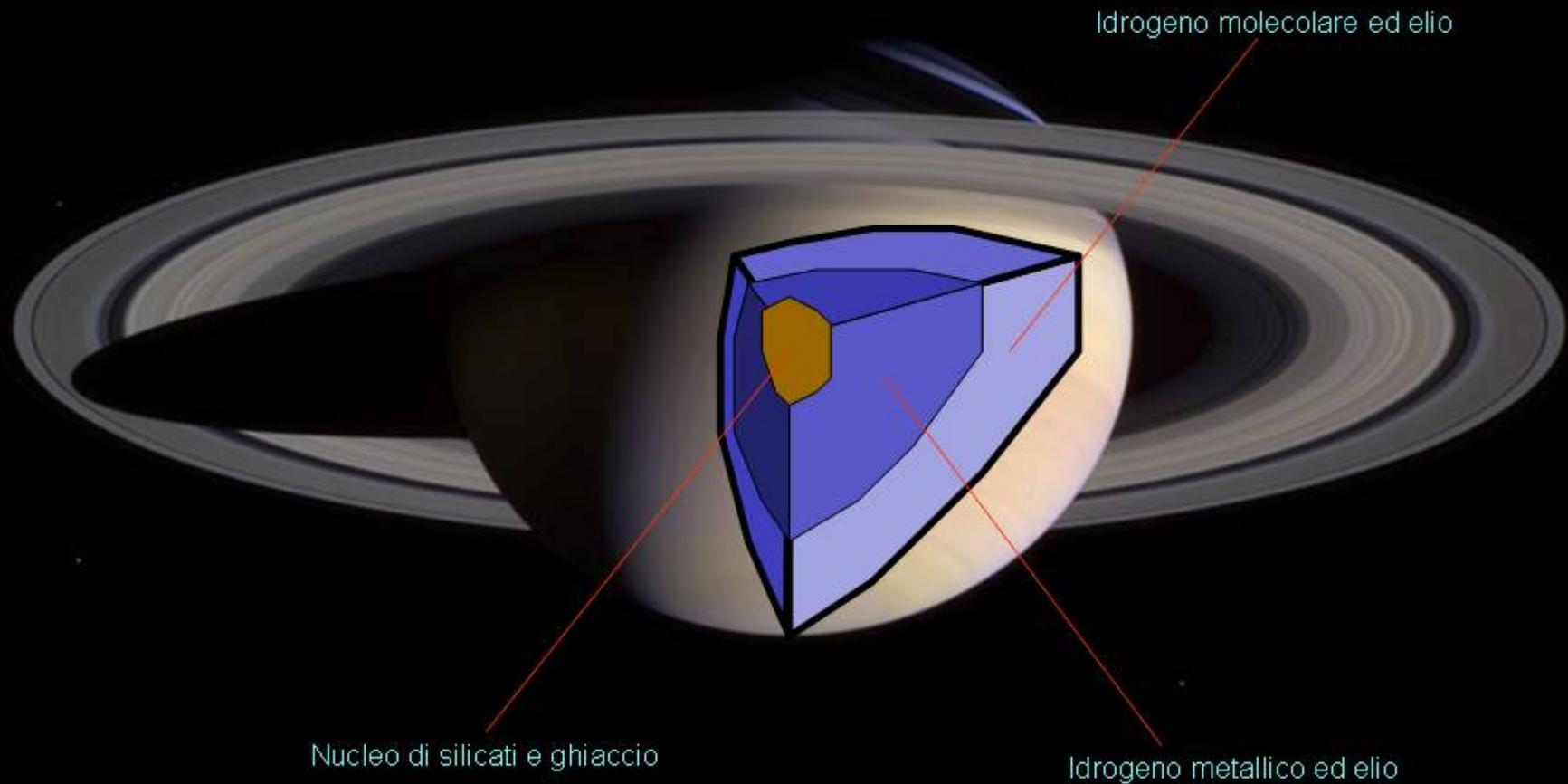
Highly reflective frost covers a series of ridges, or grooves, running for hundreds of miles and probably formed when tectonic forces pulled apart Ganymede's icy surface. Similar sets of faults occur in rift zones on Earth, as in eastern Africa. Ganymede is Jupiter's largest moon and is larger than the planet Mercury. Much of the surface of Ganymede is covered by water ice and has no known atmosphere.

Anelli: a) distruzione di un satellite di Saturno, ad opera di una collisione con una cometa o con un altro satellite, b) "avanzo" del materiale da cui si formò Saturno che non è riuscito ad assemblarsi in un corpo unico.

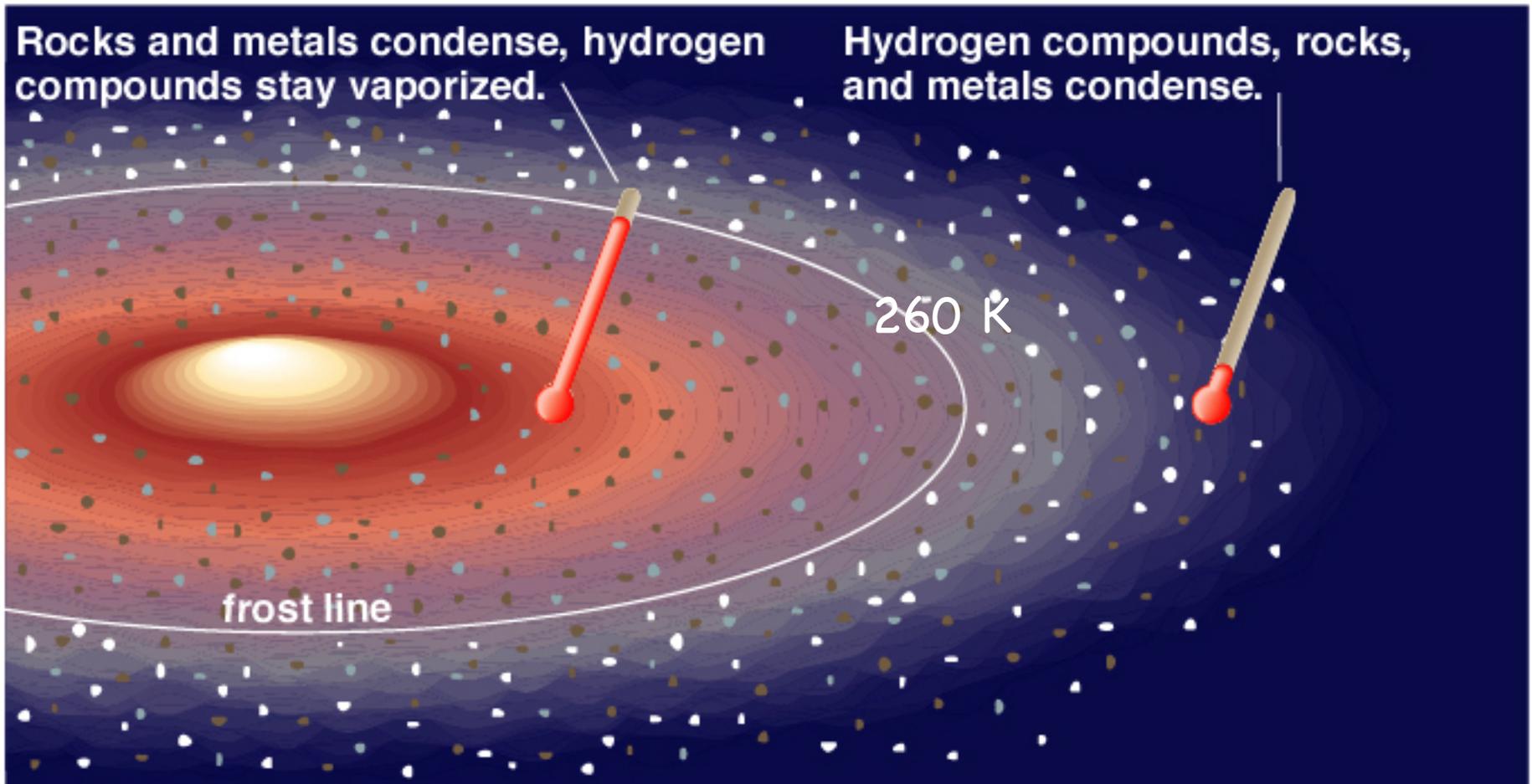
L' esteso e vistoso sistema di anelli consiste principalmente in particelle di ghiaccio e polveri di silicati.



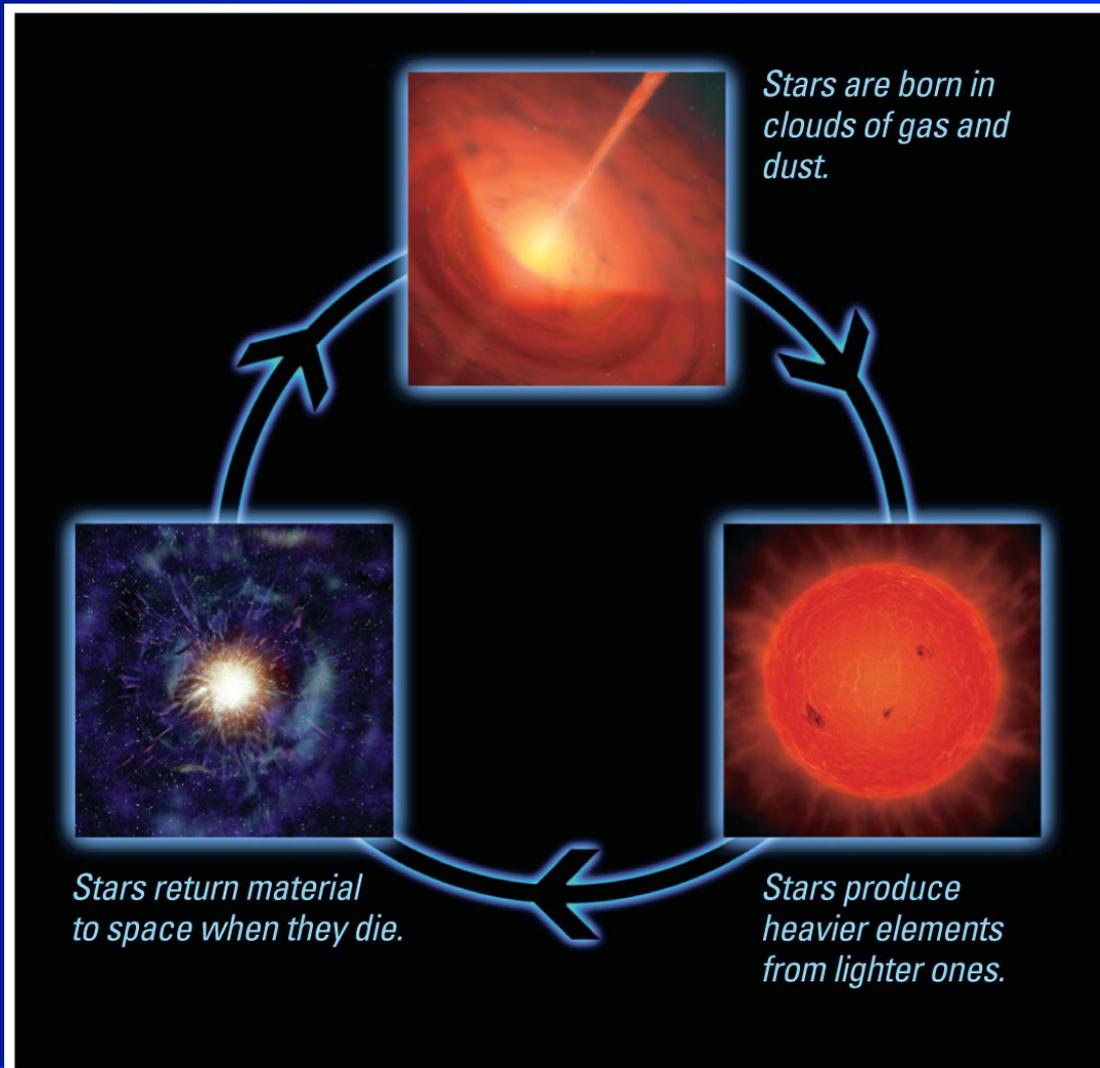
**Saturno**



# Frost Line: separazione fra pianeti rocciosi/metallici e gassosi/ghiacciati



# "We are made of star-stuff"



- Gli elementi di cui sono costituiti i pianeti furono prodotti in altre stelle e poi riciclate come processo di accrezione di frammenti nello spazio interstellare.
- Quindi, il SS è fatto di materiale derivante da:
  - Big Bang
  - Una proto-stella
  - Altre stelle
  - La sommatoria di cui sopra



An USA astronomer replied to his wife when she was asking for a glass of fresh water: *"Darling, are you sure that the water you'd like to drink is fresh? The hydrogen and oxygen of the water molecule might be formed billions of years ago?"*.



# Sulla Terra

Definiamo una sostanza chimica o un elemento "gas" quando sia presente allo stato gassoso alle condizioni standard (STP), e.g.  $H_2$ .

Definiamo una sostanza chimica o un elemento "volatile" quando tende a trasformarsi allo stato gassoso per le condizioni fisiche tipiche di alta temperatura (vulcani), e.g.  $H_2O$ .



**Accrezione** significa l'assemblaggio di piccoli frammenti per costituire un corpo celeste

## **Differenziazione:**

Rendere eterogeneo un corpo omogeneo.

Questo termine non implica nessuna tipologia di processo!

In campo igneo:

Un magma genitore produce una varietà di rocce.



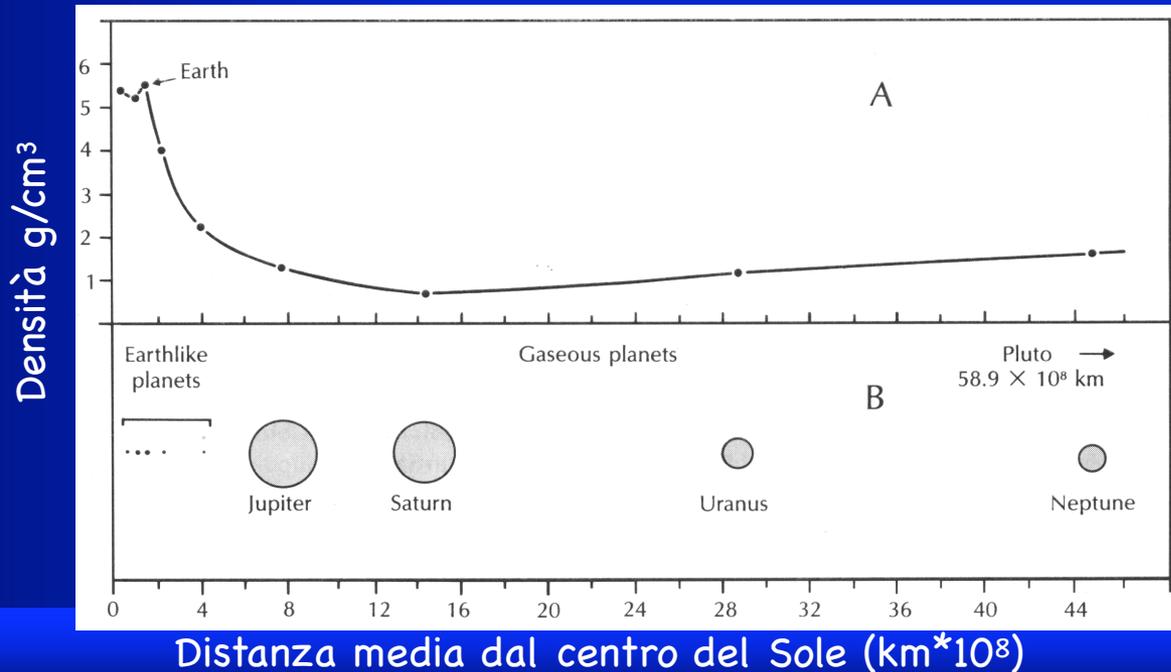
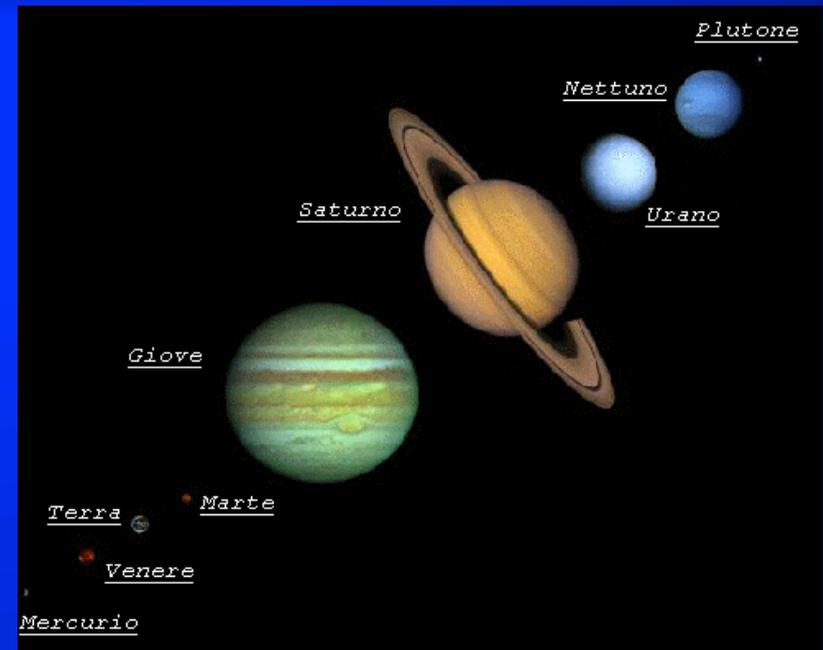
# Il Sistema Solare

Gas interstellare: Nebula solare

6\*10<sup>9</sup> anni fa da stelle  
ancestrali

Contrazione:  $\Delta$  di T, P e  
rotazione

Evaporazione pc solide. Rimangono elementi  
refrattari



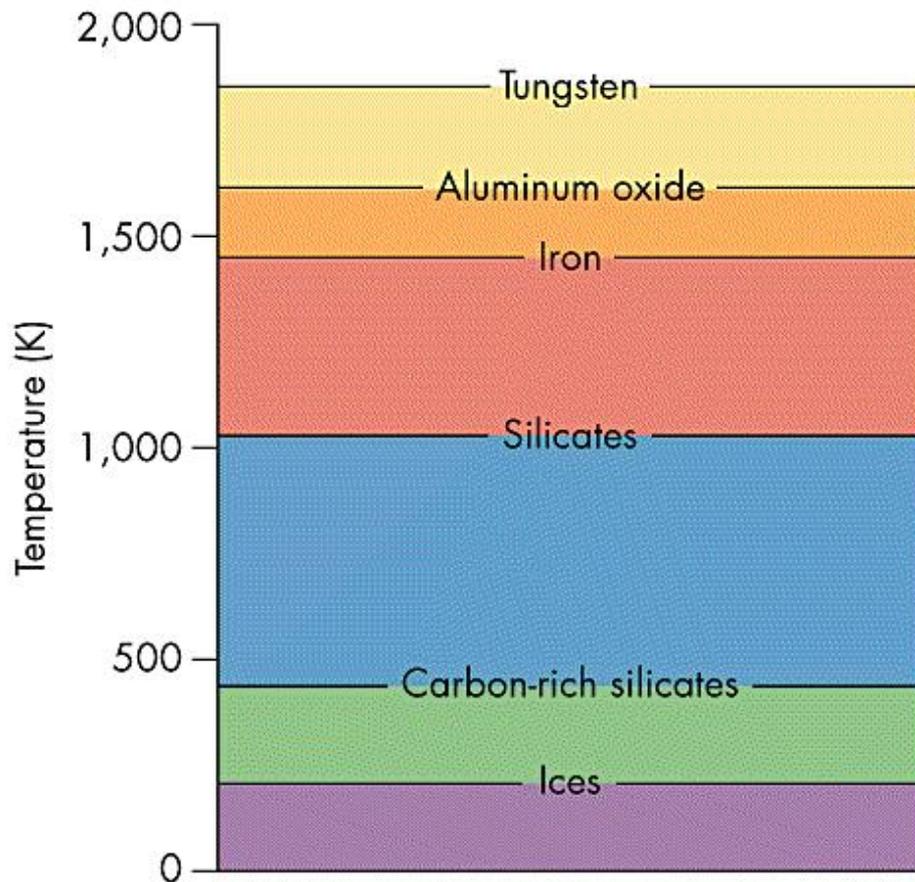
Leghe Fe-Ni, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO,  
ecc. nella parte centrale

Gradienti di P e T causano  
la prima differenziazione  
chimica

Composti a  
bassa  
pressione di  
vapore: polvere  
cosmica

Composti ad  
alta pressione  
di vapore nelle  
parti esterne  
più fredde

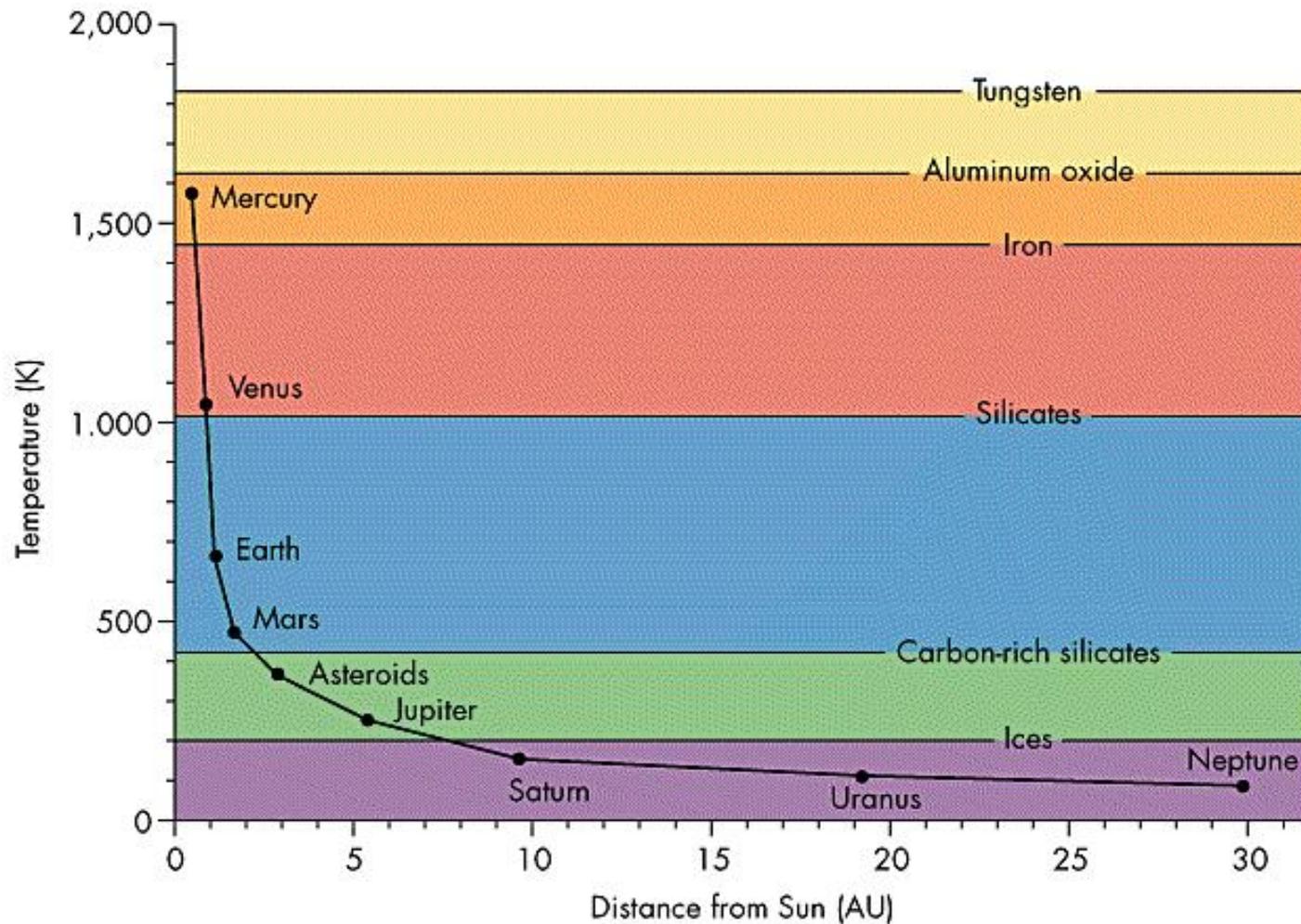
# Condensazione vs. Temperatura

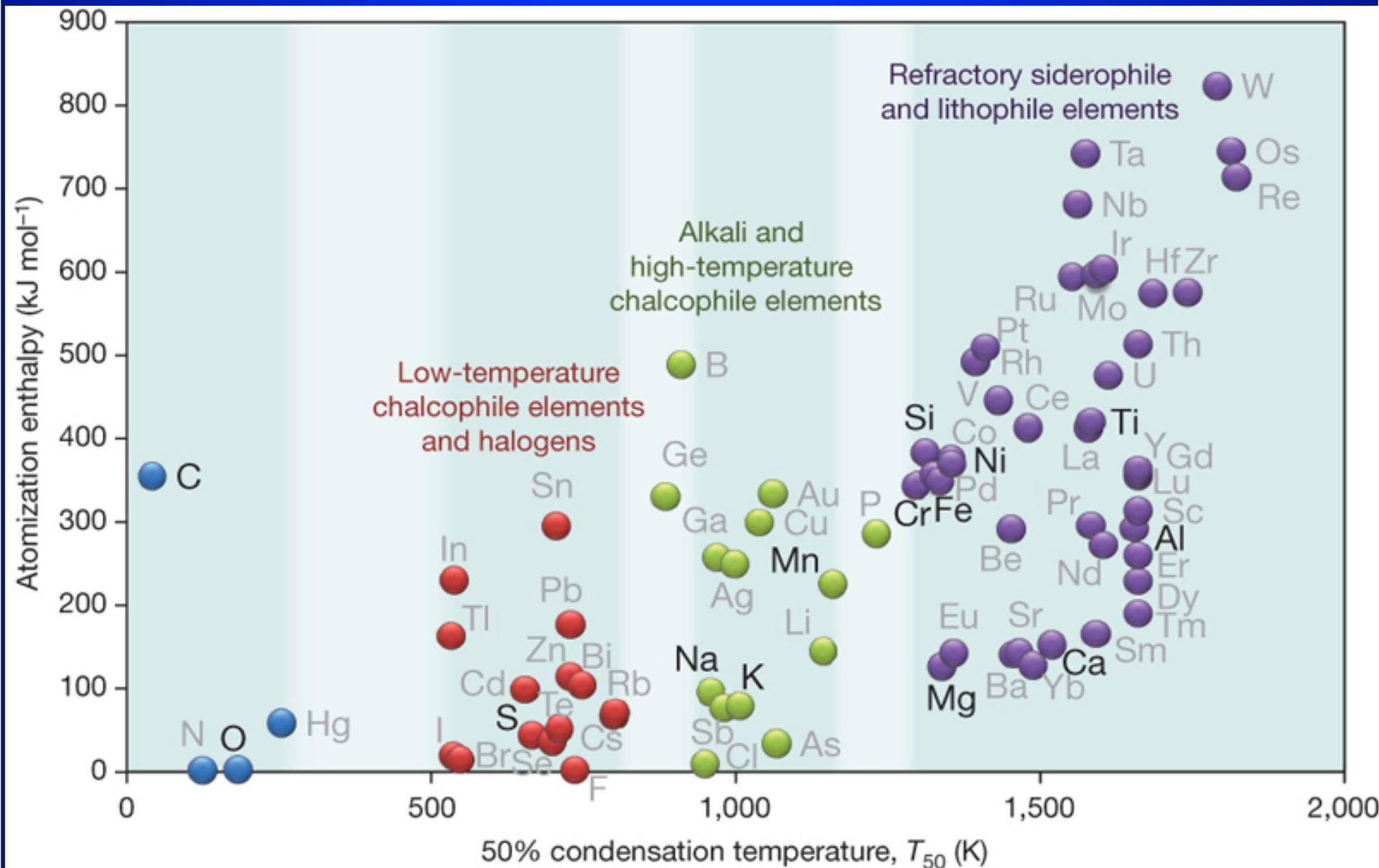


Gli elementi più pesanti tendono a condensare a più elevate temperature di quelli più leggeri. Questa ha la sua prova nella ramificazione della struttura del Sistema Solare.



# I pianeti condensati a differenti temperature





**Table 3.1** Condensates from the Solar Nebula at Different Temperatures

Temperature, °C	Condensates
1325	refractory oxides: CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , REE oxides
1025	metallic Fe and Ni
925	enstatite (MgSiO <sub>3</sub> )
925–220	Fe forms FeO, which reacts with enstatite to form olivine [(Fe,Mg) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> ]
725	Na reacts with Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> and silicates to form feldspar and related minerals. Condensation of K and other alkali metals
400	H <sub>2</sub> S reacts with metallic Fe to form troilite (FeS)
280	H <sub>2</sub> O vapor reacts with Ca-bearing minerals to make tremolite
150	H <sub>2</sub> O vapor reacts with olivine to form serpentine
–100	H <sub>2</sub> O vapor condenses to form ice
–125	NH <sub>3</sub> gas reacts with water ice to form solid NH <sub>3</sub> · H <sub>2</sub> O
–150	CH <sub>4</sub> gas reacts with water ice to form solid CH <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O
–210 <sup>a</sup>	Ar and excess CH <sub>4</sub> condense to form Ar and CH <sub>4</sub>
–250 <sup>a</sup>	Ne, H, and He condense

<sup>a</sup>These reactions probably did not occur because the temperature in the planetary disk did not decrease to such low values.

I Pianeti "Earth-like" erano caldi al momento della loro formazione e la loro differenziazione geochimica interna può aver subito un'accrezione sequenziale

Planetesimali: accrezione dei "condensati" per formare corpi più grandi in risposta di forza magnetiche ed elettrostatiche

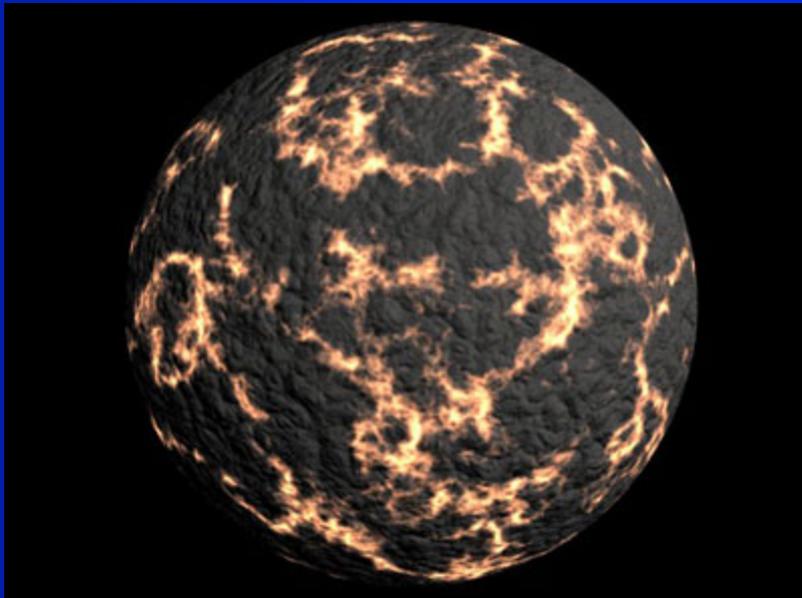


# La Terra



# La prima Terra si riscalda

I tre principali fattori che causano il riscaldamento e la fusione della Terra primordiale sono:



1. **Collisione (Trasferimento di energia in calore)**
2. **Compressione**
3. **Radioattività di elementi come U, Th e K**



4.5-4.0 Ga, Il nucleo della Terra è più caldo dell'attuale. Il solo meccanismo di dissipazione dell'energia è per **CONDUZIONE** (trasferimento di energia da molecola a molecola).

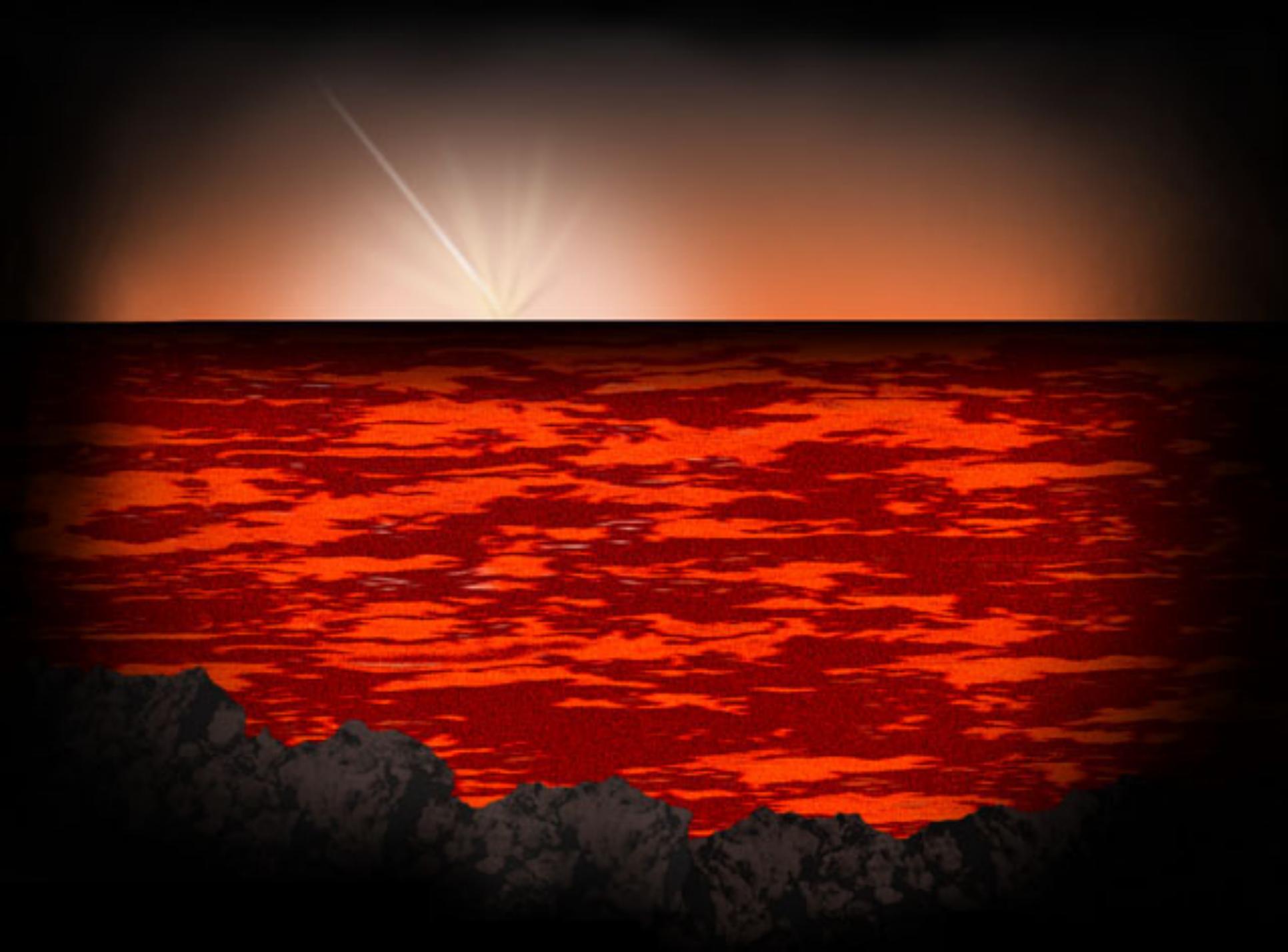
Poichè la conduzione è lenta, l'energia interna non si dissipa o lo fa in modo lento. Quindi, la **TERRA** si fonde e la superficie assume l'aspetto di un oceano magmatico.

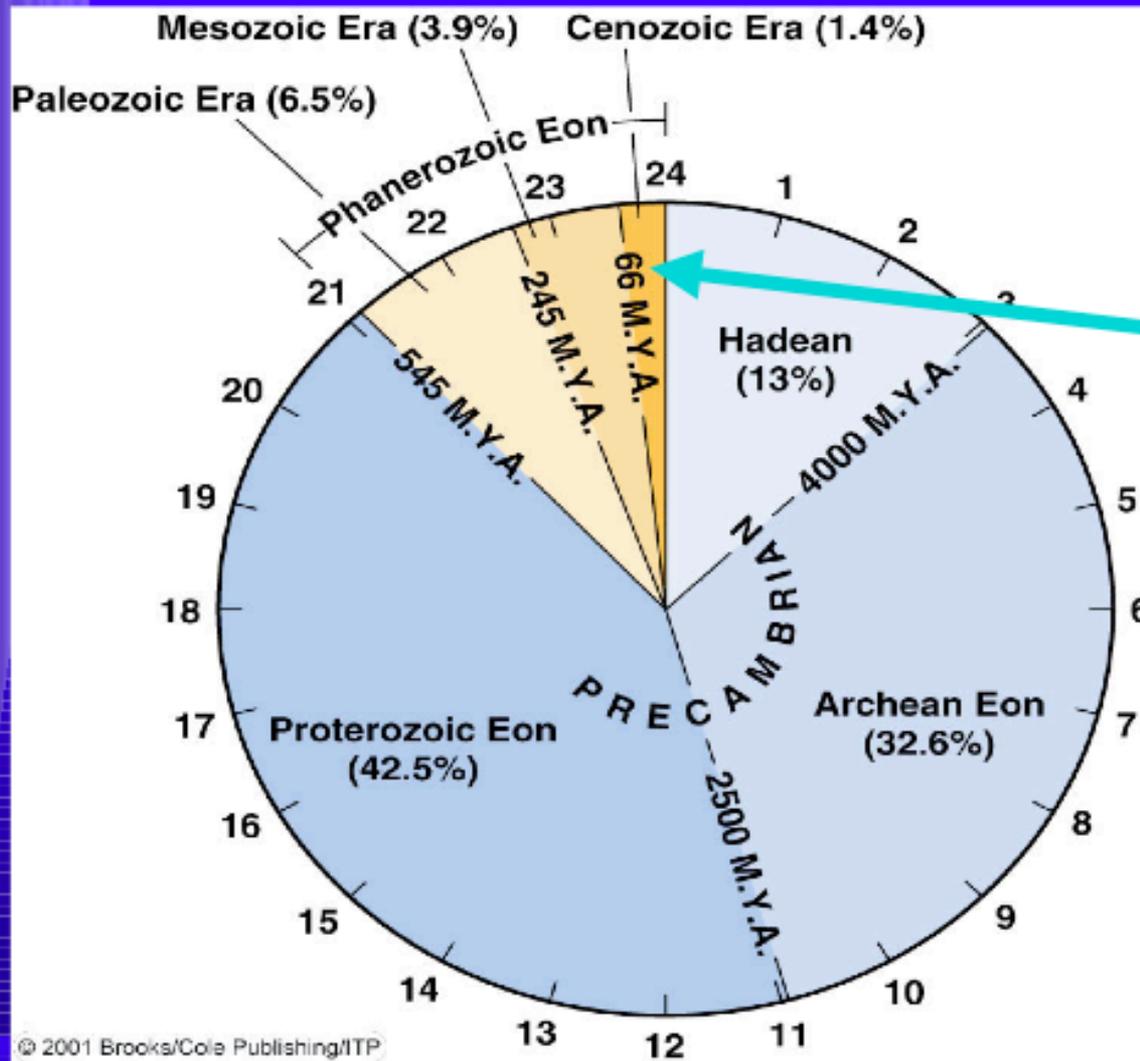
A quel punto (forse), si innesca un processo di trasferimento di energia per **CONVEZIONE**, per cui l'energia viene trasferita efficacemente alla superficie: movimento di massa delle molecole.

La convezione permette il rilascio di energia e il raffreddamento superficiale. Prende così forma la crosta terrestre 4.3-3.8 Ga.

Gli elementi più densi (Fe, Ni) si trasferiscono nel nucleo e quelli più leggeri (Si, Al, Na, Ca) in superficie.





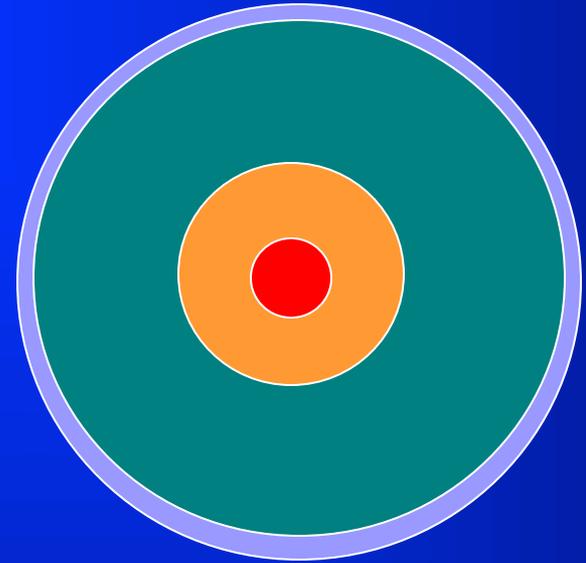
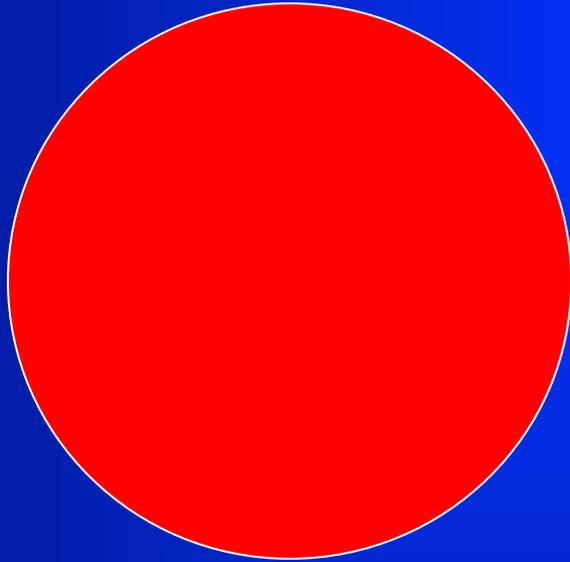


♦ L'età della Terra è di circa 4.55 Ga!

♦ A soli 66 Ma:

- Il Cenozoico è solo il 1.4% di tutti i tempi geologici
- o solamente 20 minuti del nostro orologio ricalcolato a 24h

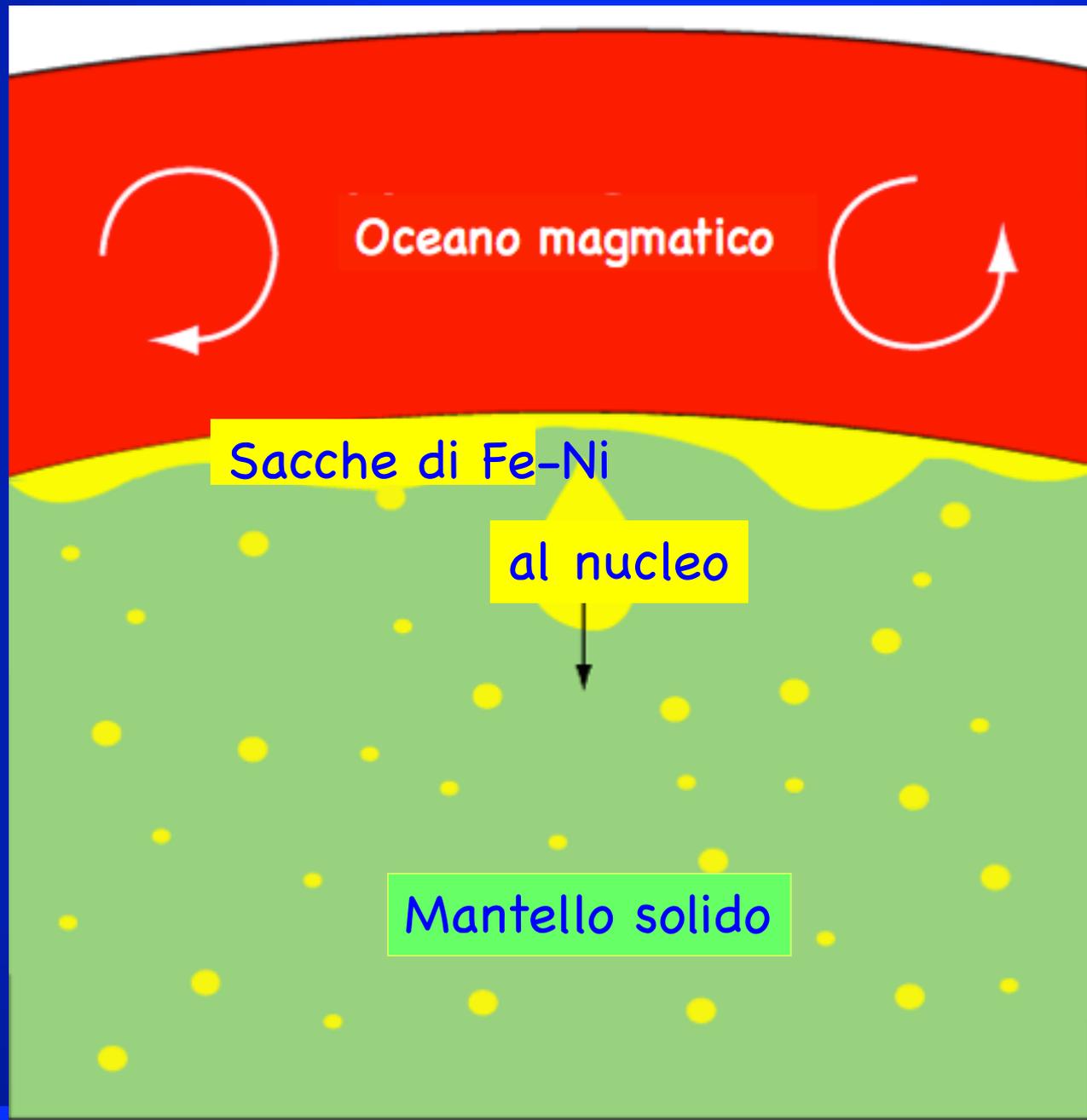




La Terra è fusa per gli impatti con planetesimali (inclusa quella che sarà la nostra Luna) e per decadimento radioattivo

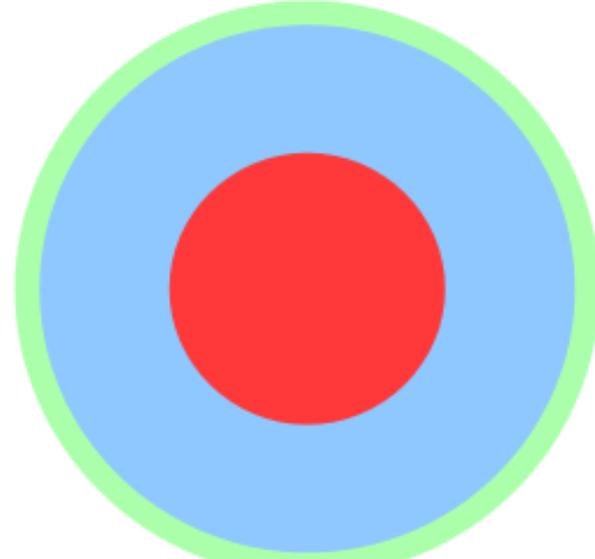
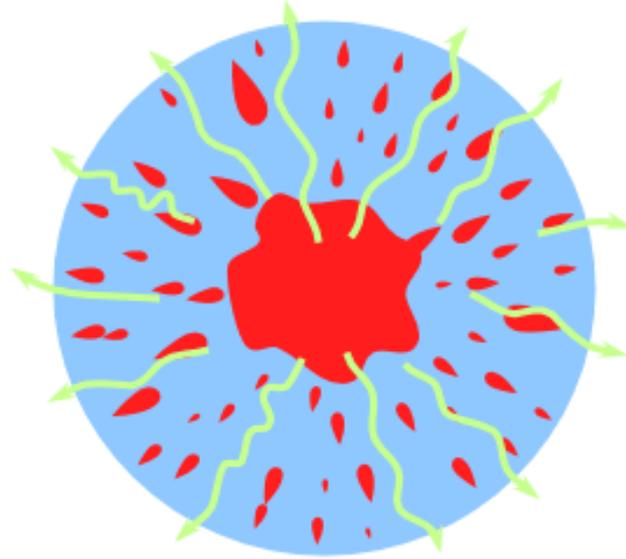
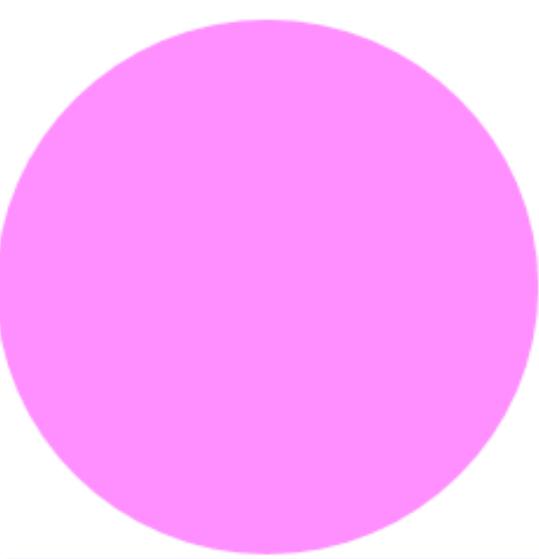
La Terra è differenziata (stratificata) dopo il raffreddamento





1000 km ?

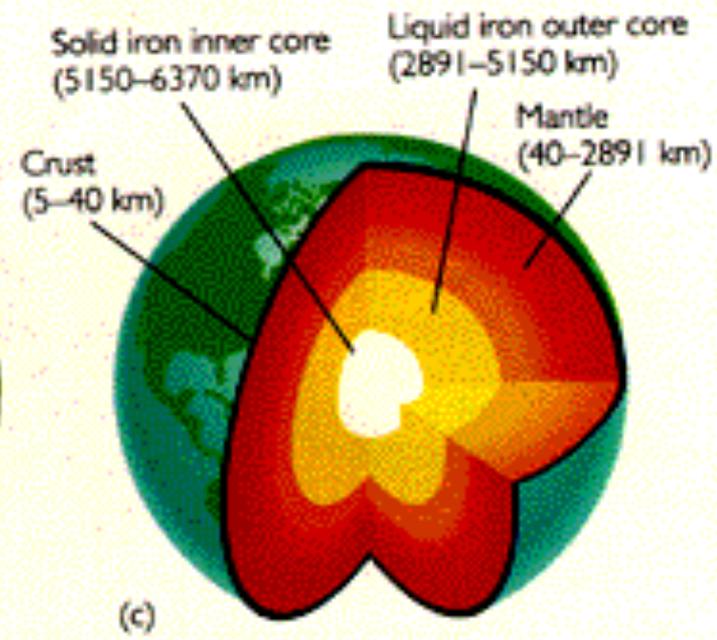
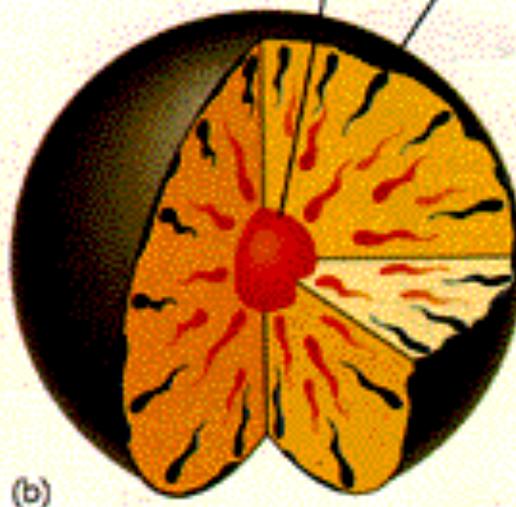
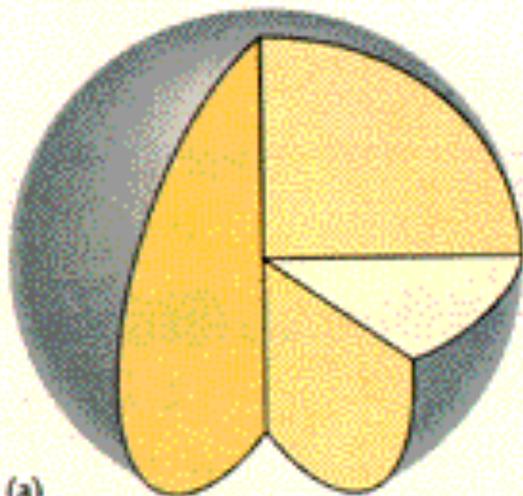




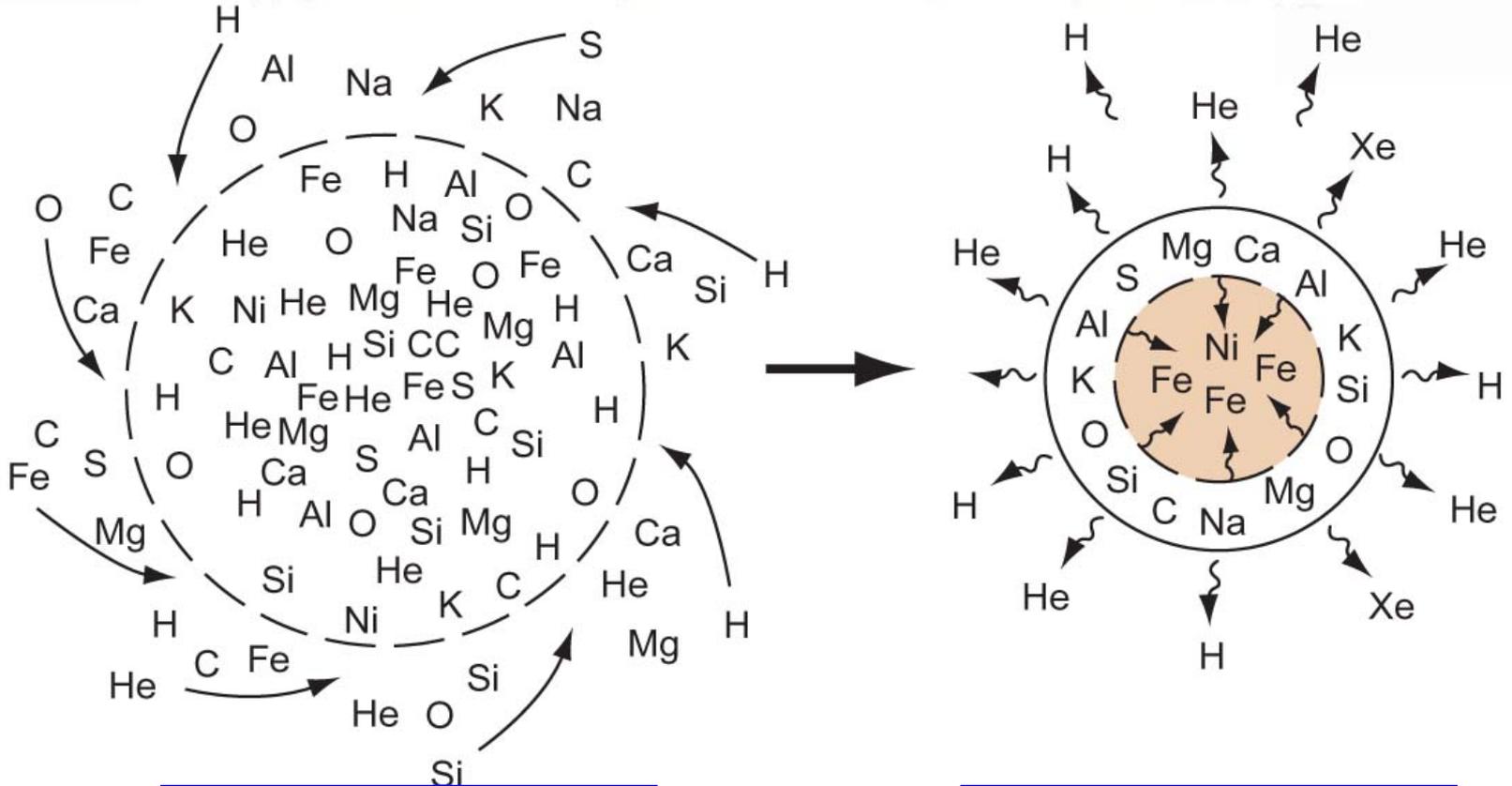
La composizione iniziale della Terra

Fusione: I gas vanno verso la superficie.

La prima Terra ha un nucleo a Fe-Ni, un



Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



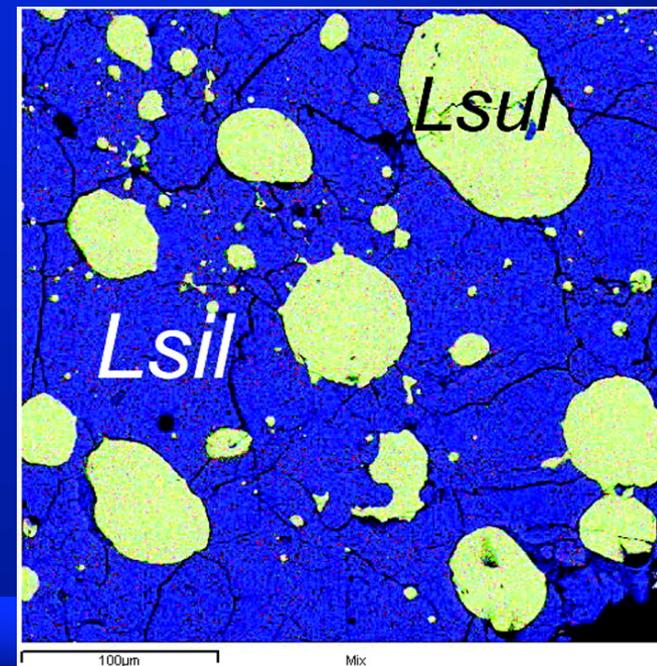
Accrezione  
iniziale

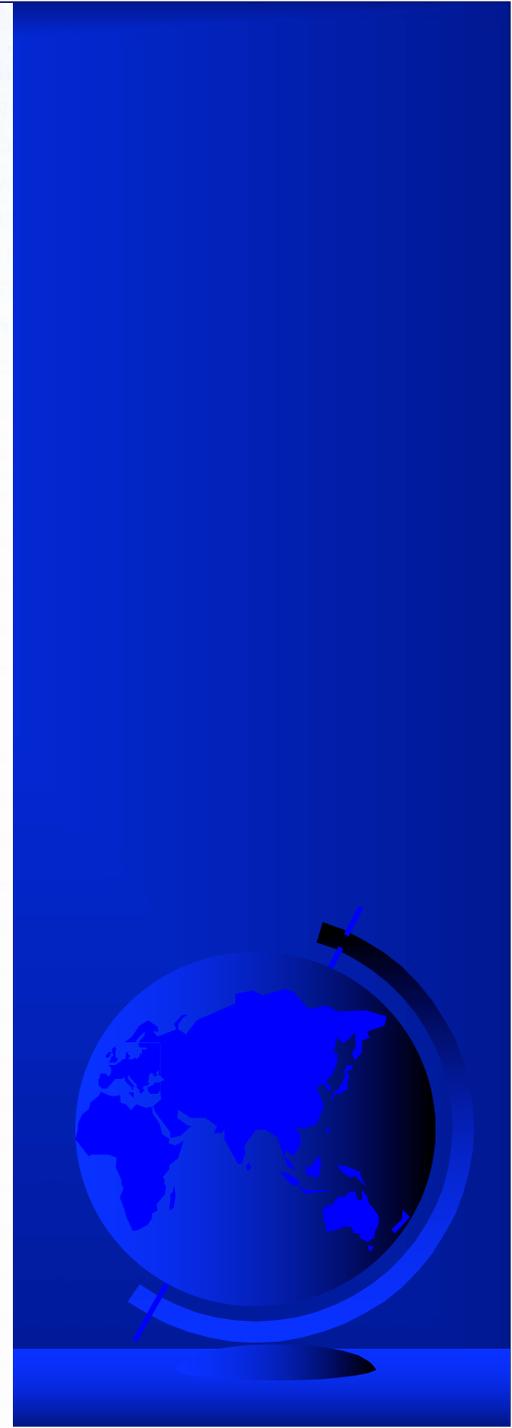
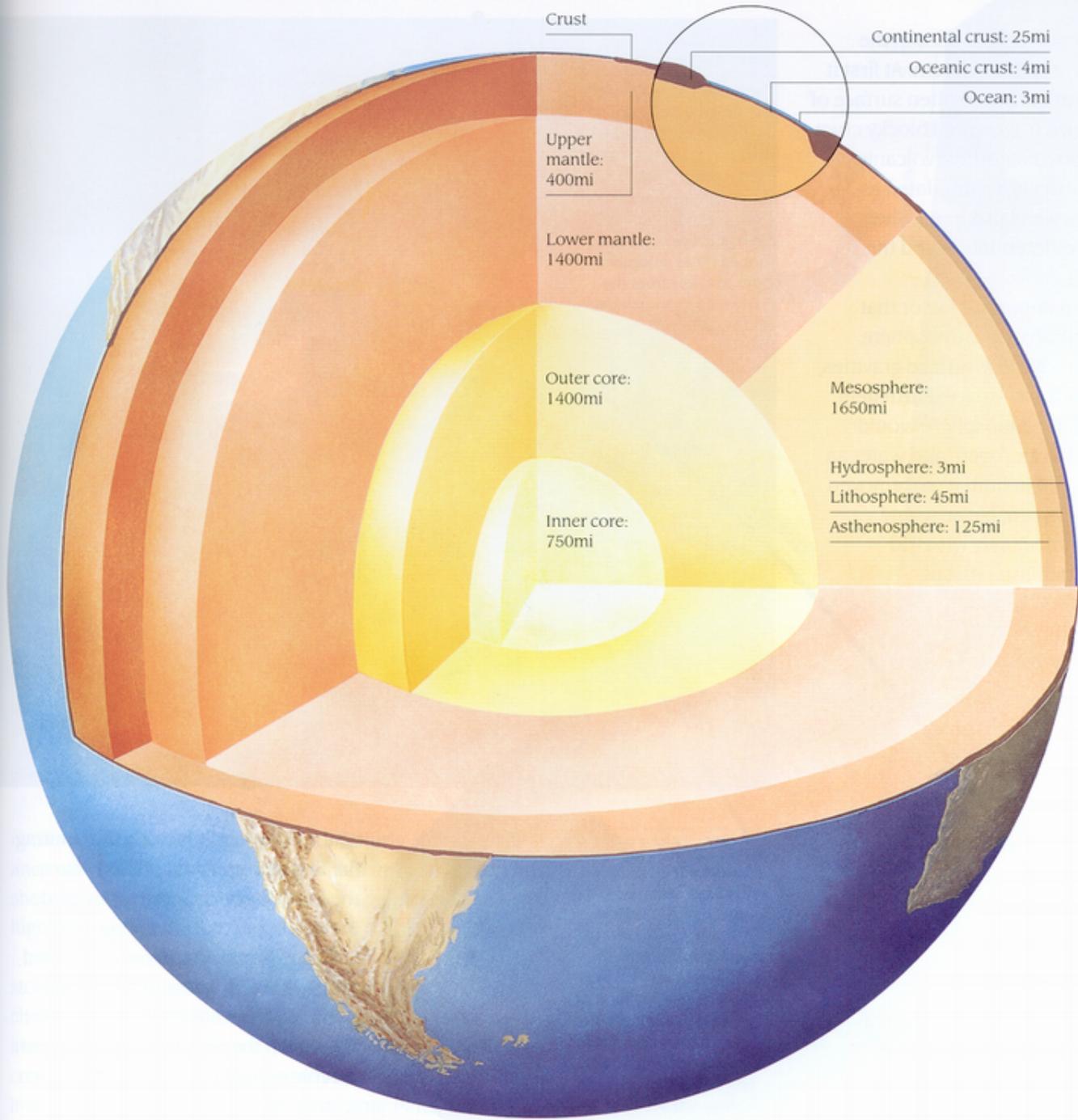
Contrazione e  
differenziazione



SCIENCEPHOTO LIBRARY

- Immiscibilità liquidi (silicati e leghe di Fe-Ni)
- Macrosegregazione per differente densità
- $3.0-3.5 \text{ g/cm}^3$  contro  $11 \text{ g/cm}^3$





- **Le rocce più vecchie sulla Terra** **4.0? Ga**
- **Le rocce più vecchie sulla Luna** **4.4 Ga**
- **Le meteoriti più vecchie** **4.6 Ga**
  - Avanzi dalla formazione del SS
- **Conclusione: le prime rocce nel SS condensarono circa 4.6 Ga**
- **Il confronto tra l'età dell'Universo (13.7Ga) e quella del SS indica un'età per quest'ultimo molto recente.**

