

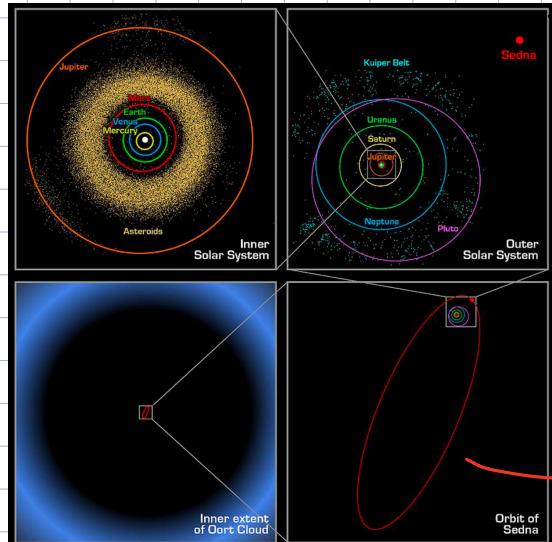
INTRODUZIONE AL SISTEMA SOLARE

→ compreso in circa 40AU
 [non visibile da Proxima Centauri]

- costituito da:
- Sole (classe G2-V)
 - 8 pianeti
 - 5 pianeti nani (Cerere, Plutone, Eris, Makemake, Haumea)
 - > 100 satelliti tra i vari pianeti (in scoperto)
 - piccoli corpi (asteroidi, comete, centauri...)
 - oggetti transnebuloziani (\approx Kuiper belt)
 - mezzo interplanetario (radiazione em., plasma caldo, polveri e campi magnetici)

Suddivisione dei pianeti in due gruppi secondo diversi criteri:

- PER COMPOSIZIONE: terrestri o rocciosi, ghiaccio o gassosi
- PER DIMENSIONE: piccoli ($d < 13000$ km) e giganti ($d > 48000$ km)
- PER POSIZIONE: pianeti interni e pianeti esterni divisi dalla posizione degli asteroidi



planeti interni rocciosi compresi tra 0.39AU e 1.52AU

planeti esterni gassosi (Gigante e Saturno) e ghiaccioi (Urano e Nettuno) tra 5.2 AU e 30.1 AU
 posso di Jupiter 40AU -> 50AU (nella quale vi è anche Plutone) → struttura Toroidale
 nube di Oort: comete a lungo periodo ($\approx 100\ 000$ AU dal Sole)

→ limiti della inner Oort cloud non chiari

SEDNA corpo della Kuiper belt con orbita fortemente ellittica

Definizione di pianeta (dal congresso Astronomical Union del 2006 RESOLUTION 5A)

- **PIANETA**: corpo celeste orbitante attorno al Sole, masso sufficiente per raggiungere equilibrio idrostatico e che abbia "ripolito" la sua orbita
 - **PIANETA NANO**: corpo celeste orbitante attorno al Sole, masso sufficiente per raggiungere equilibrio idrostatico, ma non ha ripolito la sua orbita e non è un satellite
- la differenza sta nell'aver ripollo la sua orbita

Tutti i pianeti orbitano nella stessa direzione su orbite quasi circolari e compiono i ruotazioni nella stessa direzione in cui si muovono sulla loro orbita ...

→ ordine e simmetrie devono essere spiegate da una teoria di formazione comprendendo anche la disposizione e la composizione dei pianeti e dei corpi minori

- TEORIE DI FORMAZIONE →
- Laplace nebula Theory
 - Jeans Tidal Theory (Roche limit)
 - Solar nebula Theory → ad oggi la più accreditata

ROCHE LIMIT → distance at which a satellite begins to be tidally destroyed

consider H with 2 satellites of mass m and radius r orbiting at distance R

Roche limit is reached when m is more attracted to H than to m

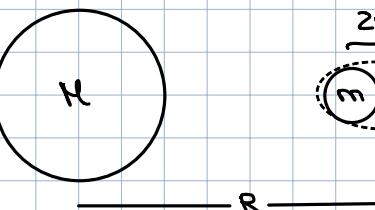
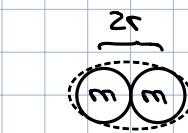
Occurs when $F_{\text{tidal}} > F_{\text{binding}}$

$$F_b = \frac{Gm^2}{(2r)^2}$$

F attraction between H and nearer m

is $\frac{Gkm}{(R-r)^2}$ and more distant $\frac{Gkm}{(R+r)^2}$

$$\begin{aligned} F_t = Gkm \left(\frac{1}{(R-r)^2} - \frac{1}{(R+r)^2} \right) &= \frac{Gkm}{R^2} \left(\left(\frac{R-r}{R} \right)^{-2} - \left(\frac{R+r}{R} \right)^{-2} \right) \\ &= \frac{Gkm}{R^2} \left(\left(\frac{R+2r}{R} \right) - \left(\frac{R-2r}{R} \right) \right) \\ &\implies F_{\text{tidal}} = \frac{4Gkmr}{R^3} \end{aligned}$$



r^2 trascurabile su R^2

$$F_t > F_b \quad \frac{4Gkmr}{R^3} \geq \frac{Gm^2}{4r^2}$$

rearranging it gives

$$R_{\text{Roche}} = \left(\frac{16kr^3}{m} \right)^{1/3}$$

$$\text{as } H = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_H \quad [R = \text{radius main planet}]$$

$$m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_m$$

$$\implies R_{\text{Roche}} = 2.520R \left(\frac{\rho_H}{\rho_m} \right)^{1/3} \quad \rightarrow \text{approximate Roche limit}$$

[if $\rho_H \approx \rho_m$ $R_{\text{Roche}} \approx 2.520R$

Earth's Roche limit is $\approx 18.470 \text{ km}$

Quando un corpo arriva al limite di Roche si disgrega e le particelle più vicine al corpo maggiore hanno velocità maggiore. Le diverse velocità orbitali possono causare la formazione di anelli.

TEORIA NEBULARE → il Sistema Solare si è formato da una nube di

gas e polveri in lenta rotazione (non rare nella Galassia)

[$\rho \approx 1000 \text{ molecole cm}^{-3}$ composte principalmente da

H e He + elementi pesanti da stelle precedenti.]

cinque step: 1) riscaldamento e collasso ($\approx 10^5 \text{ anni}$)

2) aumento velocità di rotazione

3) appiattimento

4) condensazione

5) accrescimento / accrescione

} formazione pianeti

① **RISCALDAMENTO** → a causa di eventi esterni la nebulosa viene turbata e inizia a collassare per effetto della sua stessa gravità

- collasso inizia quando non viene rispettato il **teorema del viriale**
 $|E_g| > 2E_k$ (E_g = potenziale gravitazionale, E_k = cinetico)
 → ignorando pressioni magnetiche ed esterne queste quantità dovrebbero essere uguali ($\dot{E}_k = \dot{E}_g$)

La massa minima per avere una situazione del genere è chiamata

Jean's mass → $M_g = \frac{9}{4} \left(\frac{1}{2\pi n} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{m^2} \cdot \left(\frac{kT}{G} \right)^{3/2}$

n = densità particolare
 m = massa media part.

Quando la gravità supera la pressione interna la nube entra in una condizione di free-fall. Durante il collasso la temperatura aumenta (**contrazione Kelvin-Helmholtz / contrazione al centro**)

- ⇒
 - energia irradiata attraverso la nube trasparente
 - centro della nube in equilibrio idrostatico (inizio formazione Sole)
 - a $10^6 K$ inizia il bruciamento del deuterio, a $10^7 K$ quella dell'idrogeno

Il collasso iniziale è durato circa **100 000 anni**

TEOREMA DEL VIRIALE: dato un sistema di masse le cui interazioni reciproche sono di tipo gravitazionale e tali che i loro moti avvengono in una porzione limitata di spazio allora

$$2\bar{K} + \bar{U} = 0$$

con K che corrisponde all'energia cinetica del sistema e U che corrisponde all'energia gravitazionale
 (sottolineature = quantità mediate su un lungo intervallo di tempo)

- ② **ROTAZIONE** → dopo collasso comincia a ruotare più velocemente per conservazione del momento angolare



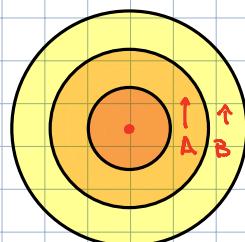
$$L_f = L_i \quad m\omega_f r_f = m\omega_i r_i \\ mr^2 \omega_f = m\omega_i^2 r_i \quad \Rightarrow \omega_f = \omega_i \left(\frac{r_i}{r_f} \right)^2$$

per la rotazione aumenta anche **energia termica**. Non tutto il materiale del disco ha protetto a causa del momento angolare che fa espandersi il disco → disco costituito da polvere e gas considerabile come fluido viscoso

le molecole sono in orbita kepliana quindi

$$V = \sqrt{GM/r} \quad \rightarrow \text{le particelle ruotano verticalmente intorno alla stella}$$

Trasporto del momento angolare verso l'esterno



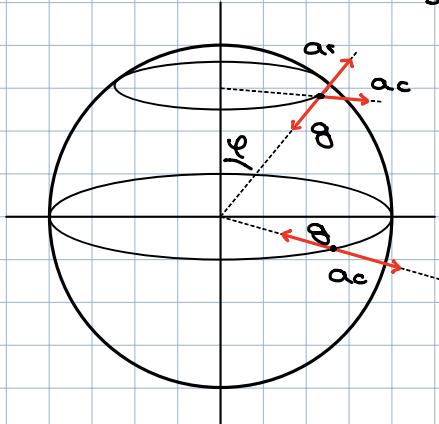
→ cerchio A accelerato di più rispetto di cerchio B e la pressione T_{SO} → due tende a rovesciare A e velocizzare B

⇒ momento angolare trasferito

da A a B
 (per disco kepliano $L = r\Omega p = r^2 \Omega_K = \sqrt{GM_* r}$)

⇒ se il disco A perde momento ma è costretto a rimanere in un orbita kepleriana si muove verso l'interno mentre l'anello B si muove verso l'esterno

- ③ APPATTOIMENTO → la collisione tra particelle appiattisce la nube in un disco e le particelle cominciano ad orbitare mantenendosi su un piano



$$g = \frac{GM}{r^2}$$

è diretta radialmente verso il centro

$a_c = r\omega^2$ è perpendicolare all'asse di rotazione
e la componente radiale è $a_r = r\omega^2 \sin\varphi$

⇒ accelerazione radiale netta è

$$a(r) = g - a_r$$

$$a(r) = \frac{GM}{r^2} - r\omega^2 \sin\varphi$$

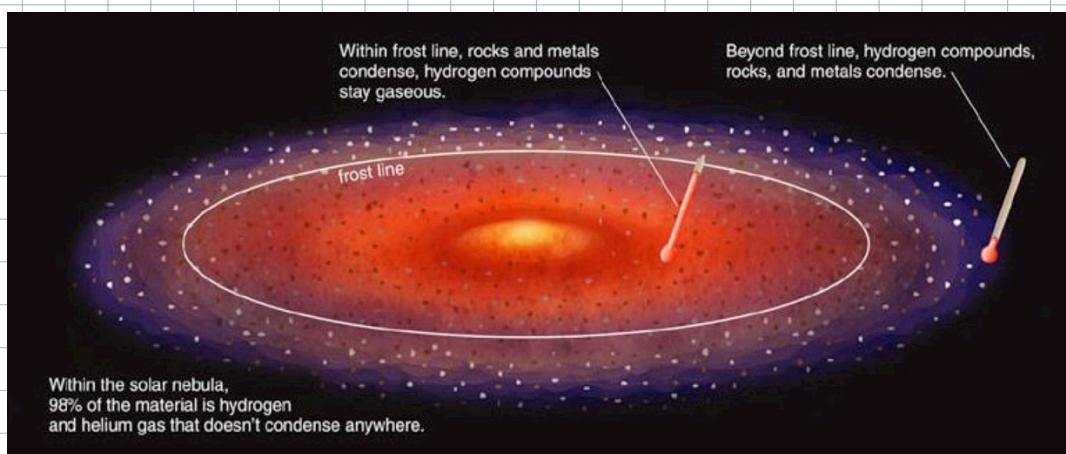
$$\text{al polo } \varphi = 0 \Rightarrow a(r) = \frac{GM}{r^2}$$

$$\text{all'equatore } \varphi = 90^\circ \Rightarrow a(r) = g - r\omega^2$$

Nel disco c'è una distanza da cui $g = r\omega^2$: in questo punto la contrazione si ferma

→ durante il collasso la nube diventa più ordinata e le collisioni tra il materiale in orbita molto ellittiche riducono la loro ellitticità diventando più circolari

⇒ la nube collassata forma uno protostella e il resto del gas orbita attorno ad esso (= disco di accrescimento) raffreddandosi. Si definisce un gradiente di temperatura e uno spazio di linea immaginaria chiamato FROST LINE all'interno della quale la temperatura non permette la formazione di ghiacci [frost line ≈ 3AU]



- inside the frost line: hydrogen compounds don't form ice
- outside the frost line: yes form, H and He remain gaseous

- ④ CONDENSAZIONE → servono degli oggetti iniziali che attraggono gravitaz. delle altre particelle
inizialmente i gas devono condensare in liquidi o gas

variazione della temperatura

$$T(R) \approx 631 / R^{0.77}$$

con R in AU

• $T < 2000$ K formazione di silicati e composti Nickel-Iron

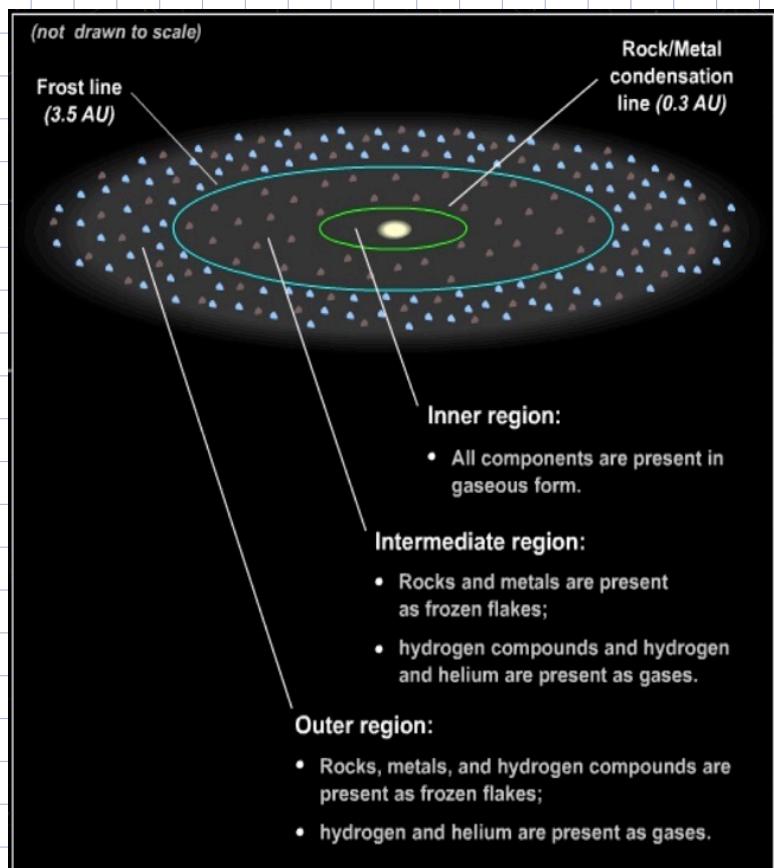
• $T < 770$ K formazione di composti del carbonio, silicati e ghiaccio

planeti interni $\rightarrow T > 400$ K silicati e metalli

planeti esterni $\rightarrow T < 300$ K silicati e ghiaccio

Materiale della nebulosa solare:

- METALLI = Fe, Ni, Al che solidificano a $1000 - 1600$ K ($< 0.2\%$ della massa della nebulosa)
- ROCCE = per lo più silicati ($\approx 0.4\%$ della massa della nebulosa)
- COMPOSTI DELL'IDROGENO = principalmente H_2O , CH_4 , NH_3 ($\approx 1.4\%$ della massa della nebulosa) ghiaccio a < 150 K
- GAS LEGGERI = 98% della nebulosa solare, non solidificano mai nella nebulosa



$T \approx 1500 - 2000$ K alla presente orbita di Mercurio

\rightarrow metalli cominciano ad aggregarsi
a distanze maggiori si aggregano materiali rocciosi

La maggior parte dei materiali rocciosi e metallici condensa nella presente orbita di Marte ($T \approx 500$ K)

\Rightarrow planeti interni hanno alto contenuto metallico e roccioso e pochi materiali volatili

Grandezza e composizione dei pianeti primi dipende dalla **Temperatura** e dalla **distanza dal Sole**

- SISTEMA SOLARE INTERNO:

- entro la frost line solo **rocce e metalli** si possono aggregare
- sono costituiti da $\approx 0.6\%$ della materia disponibile
 \Rightarrow per questo motivo i pianeti rocciosi sono più **piccoli** e crescono più **lentamente**

- SISTEMA SOLARE ESTERNO:

- oltre la frost line condensano **rocce, metalli e ghiaccio**, quindi i pianeti primi contengono questi materiali

- sono costituiti da $\approx 2\%$ del materiale disponibile
 \Rightarrow si formano più velocemente e sono più grandi

Questo processo costituisce **model** (core) dei pianeti.

La densità e le distanze degli oggetti nel Sistema Solare supportano questo teorema di condensazione:

- pianeti **terrestri** $\rightarrow \rho = 3-6 \text{ g cm}^{-3}$, principalmente rocce e metalli
- pianeti **giganti** $\rightarrow \rho = 1-2 \text{ g cm}^{-3}$, abbondanza di ghiaccio e gas
- asteroidi interni \rightarrow contengono grani metallici in materiali rocciosi
- asteroidi esterni \rightarrow meno metalli e molti composti del carbonio

⑤ **ACCRESCIMENTO** \rightarrow dopo la condensazione le particelle solide crescono a causa delle collisioni

\hookrightarrow l'accrescimento è la crescita dei grani a causa delle collisioni.

Le particelle più grandi si formano sia a partire sia da **condrilli** ($\approx 1 \text{ mm}$) e da **aggregati molecolari** porosi tenuti insieme da forze di **Van der Waals**

L'accrescimento procede in due modi:

- 1) collisione davanti alla **geometric cross section** (= impatto diretto dei "semi" sui grani)
- 2) collisione davanti all'**attrazione gravitazionale**.

[FINIRE: RIVEDI DA VIDEO]