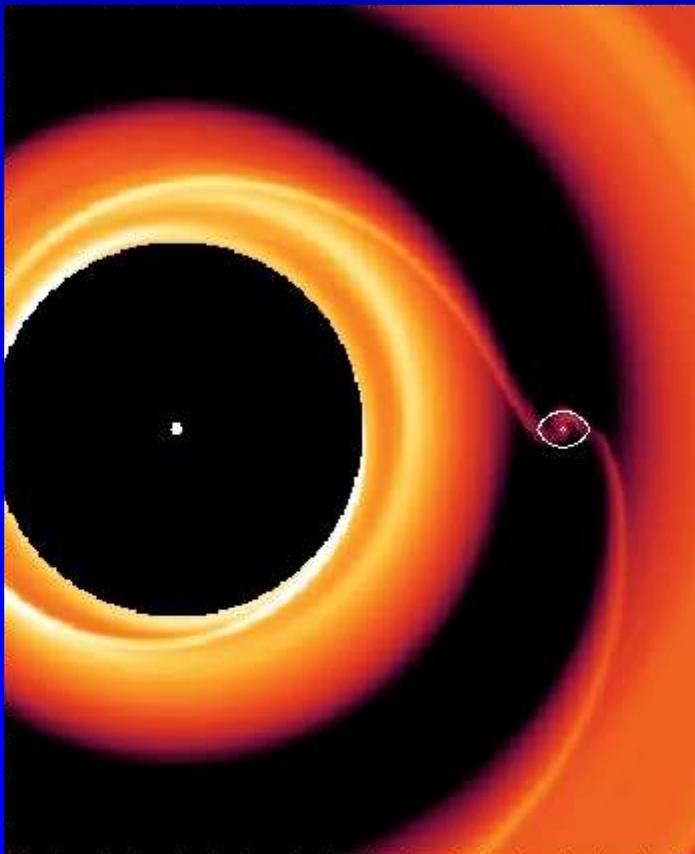


*Corso di aggiornamento UNICAM per docenti di Scuola Secondaria Superiore  
Camerino (MC)  
Febbraio – Maggio 2011*

# ***LA FORMAZIONE DEL SISTEMA SOLARE***



*Manlio Bellesi*



*L'idea che il Sole e i pianeti si siano formati dalla stessa nube di gas non è nuova. Nel passato esistevano tre teorie:*

- MAREALE: i pianeti si formano da gas in condensazione strappati via in qualche modo da un Sole già formato*
- CATTURA : nel corso di un incontro stellare ravvicinato il Sole cattura materiale, da cui si formano successivamente i pianeti*
- NEBULARE : i pianeti si sono formati insieme al Sole nella stessa nube*

# TEORIE MAREALI

**G.-L. Leclerc, Comte de Buffon (1707-1788)**

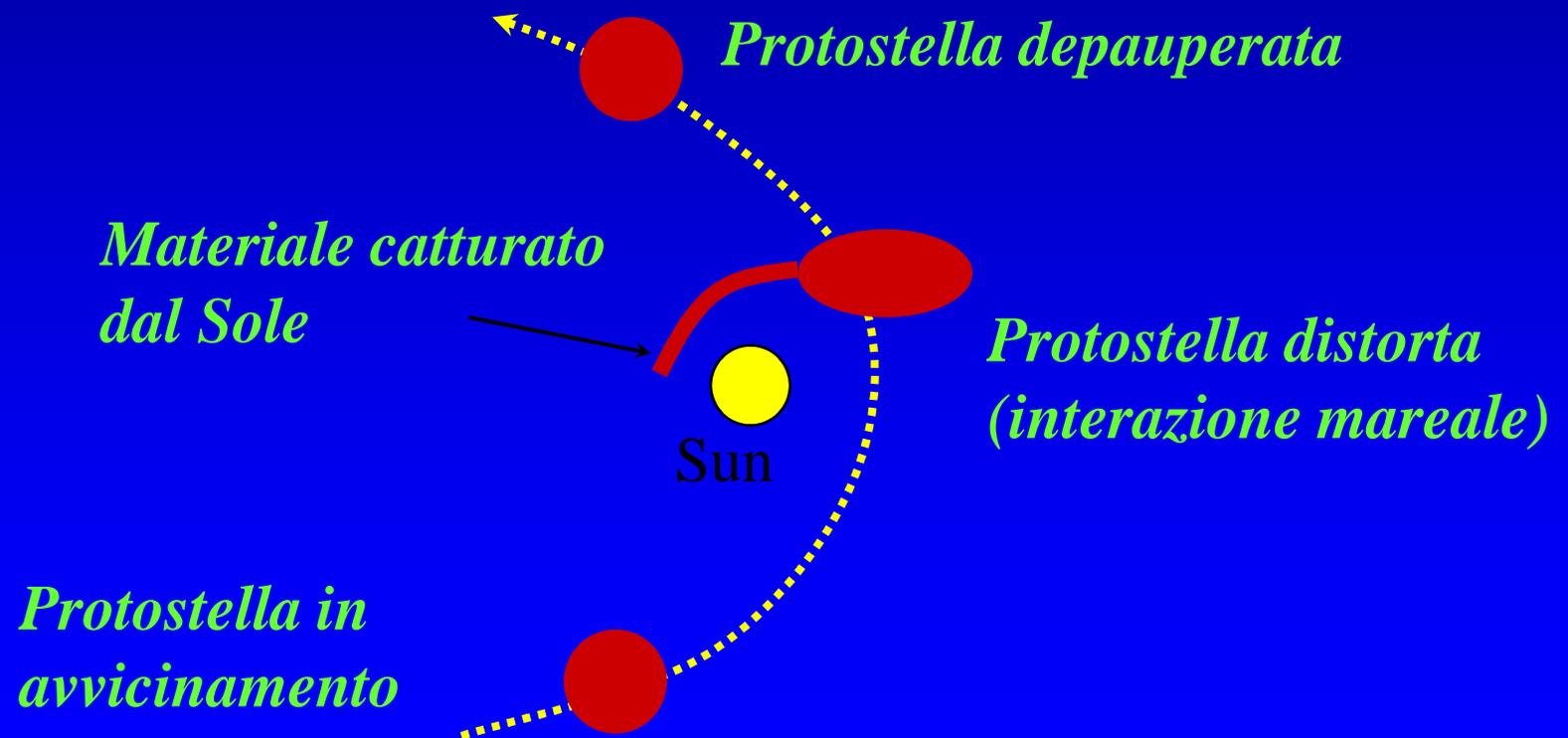
*il materiale che ha formato i pianeti è stato 'strappato' al Sole da una cometa in collisione con esso, circa 70000 anni fa*

**Bickerton (1880), Chamberlain (1901), Jeans (1917)**

*versione 'moderna': la cometa viene sostituita da una stella (molto più massiccia)*



- **1964: M. Woolfson** *presenta l'ipotesi della CATTURA*
  - *variante della teoria mareale*
  - *interazione mareale tra il Sole e una protostella, di massa ridotta, in collasso*



# PROBLEMI

*Né la teoria della cattura, né quella mareale godono attualmente di grande credito, PERCHÉ:*

- il materiale caldo strappato al Sole si disperderebbe con grande facilità nello spazio anziché formare pianeti*
- incontri ravvicinati con stelle massicce sono rarissimi (i sistemi planetari **NO** )*
- non si formerebbero la nube di Oort e la fascia di Edgeworth-Kuiper*
- appare come una coincidenza troppo speciale che il Sole e i pianeti abbiano la stessa età ( $4,55 \pm 0,05$  miliardi di anni)*

# *LA TEORIA NEBULARE*

- **1755:** Immanuel Kant *suggerisce che il Sistema Solare si sia formato per collasso di una nube di gas*
- **1796:** P. S. de Laplace *considera l'idea dal punto di vista matematico, includendo anche l'effetto della rotazione*
- **1854:** R. Roche *discute il problema del momento angolare (non ancora completamente risolto): la nube si deve necessariamente appiattare a disco*

- *Il Sole si forma al centro del disco, con quasi tutta la massa*
- *I pianeti nascono attraverso un processo complicato, in un'area estesa a gran parte del disco e su un periodo di tempo piuttosto lungo (migliaia o milioni di anni, secondo i casi)*

*(1) grani solidi (“polvere”) si condensano dal gas nebulare  
(processo chimico complesso)*

*(2) i grani si accrescono progressivamente → planetesimi  
(processo dinamico collisionale - anch'esso complesso)*

*(3) i planetesimi si urtano e si fondono → protopianeti*

*(4) i protopianeti inglobano altro materiale → PIANETI*

*→ PROCESSO TROPPO COMPLICATO PER ESSERE  
DETERMINISTICO IN SENSO STRETTO!*

# *LA CONDENSAZIONE DAL GAS*

*La TEMPERATURA è il parametro fondamentale:*

*- alta verso il centro del disco (dove la protostella si sta formando)*

*- bassa verso l'esterno. Da essa dipende il tipo di composti che possono condensare dalla nebulosa:*

*Sotto ~ 2000 K condensano composti di silicati (roccia) e di ferro-nichel*

*Sotto ~ 270 K condensano composti di carbonio (CO, CO<sub>2</sub>) e miscugli di vari ghiacci (acqua, metano, azoto, ammoniaca, ...)*

# *LA SEQUENZA DI CONDENSAZIONE PER I PIANETI*

---

<i>Composto o Minerale</i>	<i>Temperatura (K)</i>
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>1743</i>
<i>Fe - Si</i>	<i>1458</i>
<i>FeS (troilite)</i>	<i>703</i>
<i>Composti di carbonio</i>	<i>373 - 473</i>
<i>Ghiacci di vario tipo</i>	<i>&lt; 273</i>

---

# *LA DICOTOMIA*

## *PIANETI INTERNI / ESTERNI*

- *Pianeti INTERNI (Mercurio, Venere, Terra, Marte):  
nuclei di ferro e mantelli rocciosi*
- *Pianeti ESTERNI (Giove, Saturno, Urano, Nettuno):*
  - Per Giove e Saturno: grandi nuclei di roccia e ghiaccio, circondati da involucri molto estesi*
  - Per Urano e Nettuno: grandi nuclei di roccia e ghiaccio, circondati da involucri poco estesi*

*Le differenze tra i pianeti si spiegano con il luogo dove si sono formati*

*- Per i pianeti **INTERNI**:*

*Temperatura della nebulosa  $> 400\text{ K}$*

*→ silicati e ossidi metallici*

*- Per i pianeti **ESTERNI**:*

*Temperatura della nebulosa  $< 300\text{ K}$*

*→ silicati e ghiacci*

*Un'equazione approssimata per l'andamento della temperatura nella nebulosa protosolare, al variare della distanza dal Sole, ha la forma*

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

*dove R è espressa in unità astronomiche*

*–Il punto della nebulosa dove si può formare ghiaccio ( $T = 273 K$ ) si trova a circa 3 UA dal Sole (fascia degli asteroidi)*

*– Oltre questa “linea del ghiaccio” i nuclei planetari si accrescono rapidamente e possono catturare **ENORMI** quantità di gas (soprattutto H e He, i maggiori costituenti della nebulosa)*

# *TEMPERATURE NELLA NEBULOSA PROTOSOLARE (ricostruzione)*

---

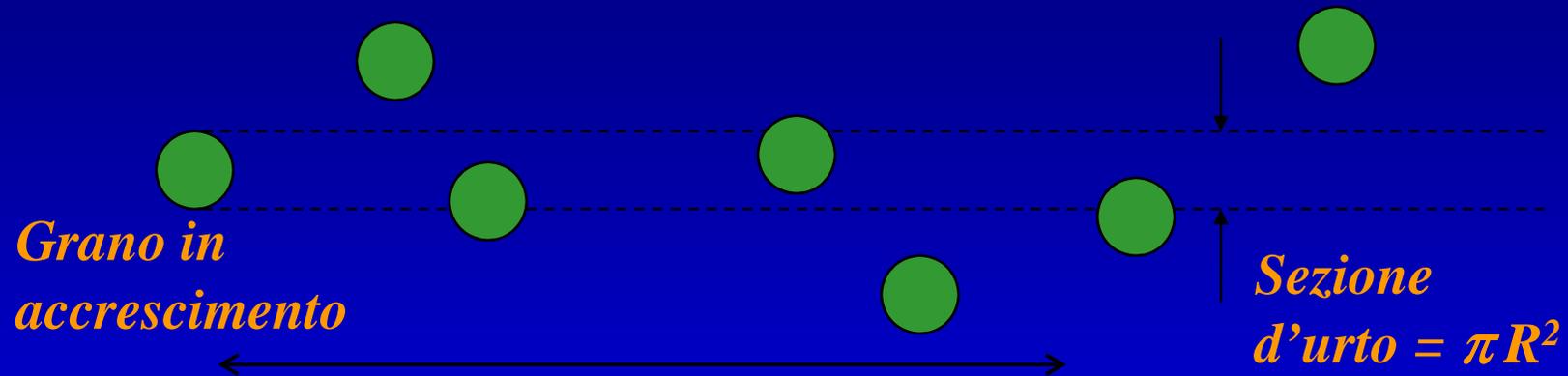
<i>Pianeta</i>	<i>Distanza (UA)</i>	<i>Temperatura (K)</i>
<i>Mercurio</i>	<i>0,387</i>	<i>1400</i>
<i>Venere</i>	<i>0,723</i>	<i>900</i>
<i>Terra</i>	<i>1,000</i>	<i>600</i>
<i>Marte</i>	<i>1,524</i>	<i>400</i>
<i>Giove</i>	<i>5,203</i>	<i>200</i>

---

# ACCRESIMENTO

- *È la fase successiva alla condensazione e si realizza attraverso le collisioni: i grani aderiscono l'uno all'altro*
- *Si possono distinguere due momenti:*
  - *collisioni “geometriche” dirette*
  - *collisioni “gravitazionali” indirette (materiale catturato da una regione molto più grande della sezione d'urto del grano  $S = \pi R^2$ )*

# CRESCITA GEOMETRICA

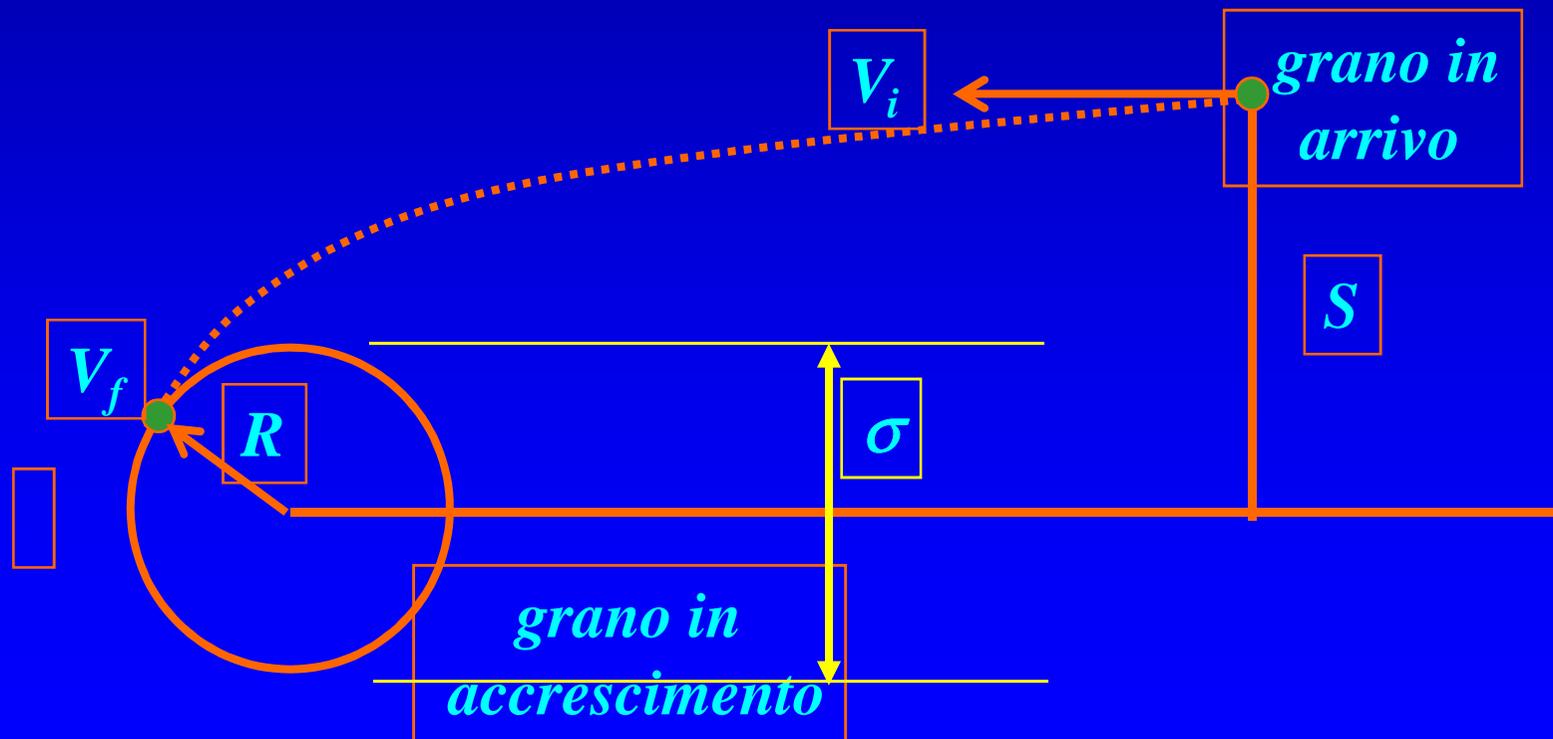


- *Tutte le particelle si suppongono delle stesse dimensioni*

- *La scelta del grano che si ingrandirà a spese degli altri è del tutto CASUALE*

# CRESCITA GRAVITAZIONALE

*Quando la gravità diventa importante un grano in accrescimento “spazza” un’area molto maggiore rispetto alla fase di crescita geometrica*



# CONDIZIONI DI CATTURA

- *Sfruttando le leggi di conservazione (energia e momento angolare) è possibile determinare le condizioni di velocità iniziale per le quali la particella in arrivo viene catturata*
- *Si può così calcolare il tasso di accrescimento del grano in funzione delle sue dimensioni*
- *È facile convincersi che la crescita gravitazionale deve presto o tardi diventare il processo dominante*

# ***DIFFERENZE FISICHE TRA I DUE PROCESSI DI CATTURA***

- *Per la cattura **geometrica** il tasso di accrescimento è proporzionale a  **$R^2$**  (**R** è il raggio della particella)*
- *Per la cattura **gravitazionale** il tasso di accrescimento è invece proporzionale a  **$R^4$***
- *All'aumentare delle dimensioni (espresse da **R**) la cattura gravitazionale domina e il grano attraversa una fase di accrescimento esponenziale rapidissimo*

# *LA CRESCITA ESPONENZIALE*

- *Una volta che la transizione tra i due tipi di accrescimento si è verificata le simulazioni al calcolatore mostrano che si formano rapidamente oggetti di alcuni km (**PLANETESIMI**)*



# L'EPOCA DEGLI IMPATTI

- *Gli stadi finali dell'accrescimento di un pianeta di tipo terrestre devono essere violenti e drammatici*
- *Grandi protopianeti di dimensioni paragonabili a quelle di Marte ( $M_{TERRA} \approx 9 M_{MARTE}$ ) si urtano in modo catastrofico, producendo corpi come la Terra o Venere*

PLANETESIMI



PROTOPIANETI



PIANETI

# *INDIZI DELL'EPOCA DEGLI IMPATTI*

## *- FORMAZIONE DELLA LUNA*

- perdita del mantello esterno della proto-Terra*
- accelerazione della rotazione terrestre*

## *– ANOMALIE NEL SISTEMA DI URANO*

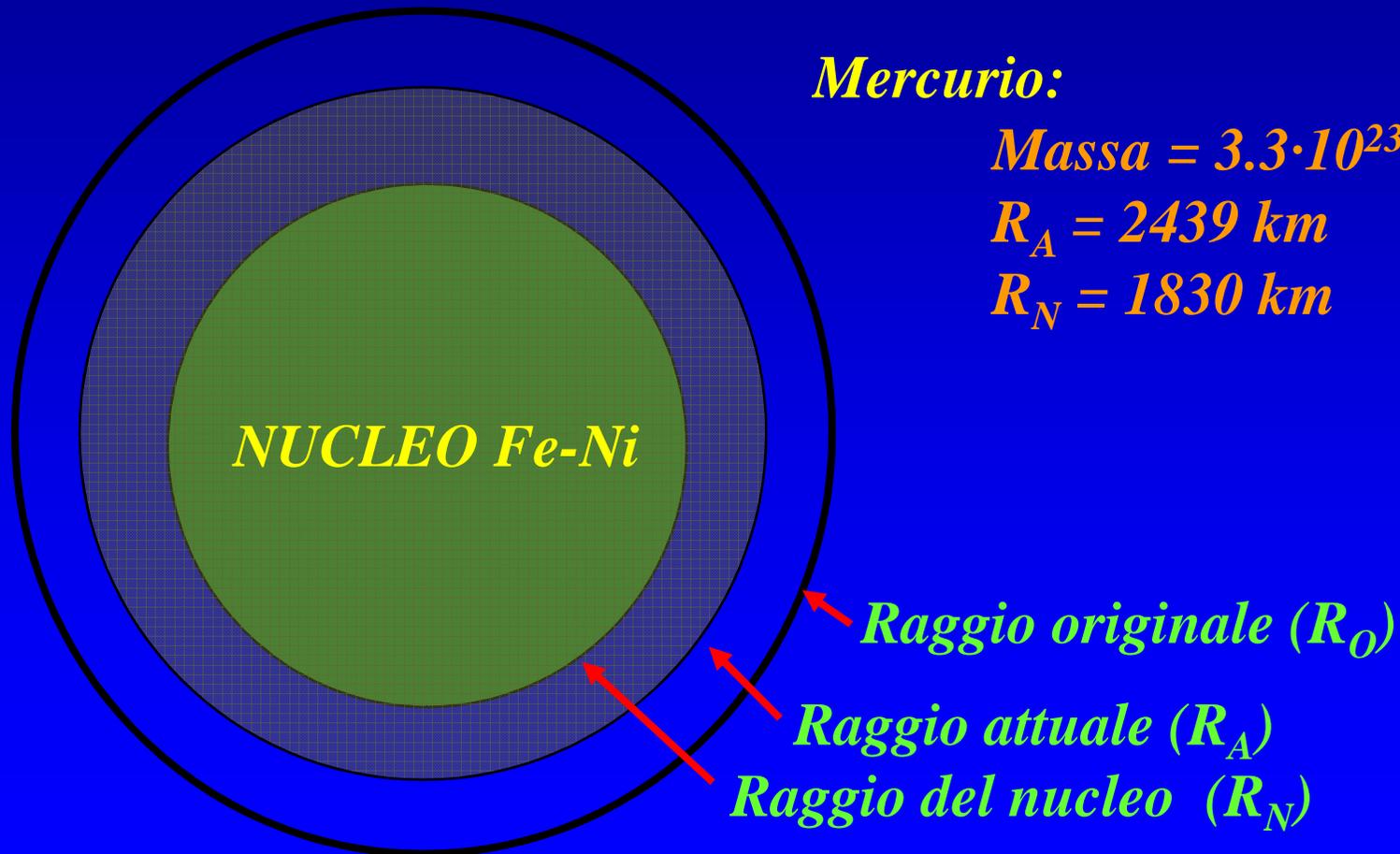
- l'asse di rotazione è inclinato di  $97,9^\circ$  sul piano orbitale*
- aspetto “Frankenstein” del satellite Miranda*

*./.*

## - “SOTTIGLIEZZA” DEL MANTELLO DI MERCURIO

*Nucleo in Fe-Ni (75% del raggio)*

*→ un impatto gigantesco ha rimosso parte del mantello?*



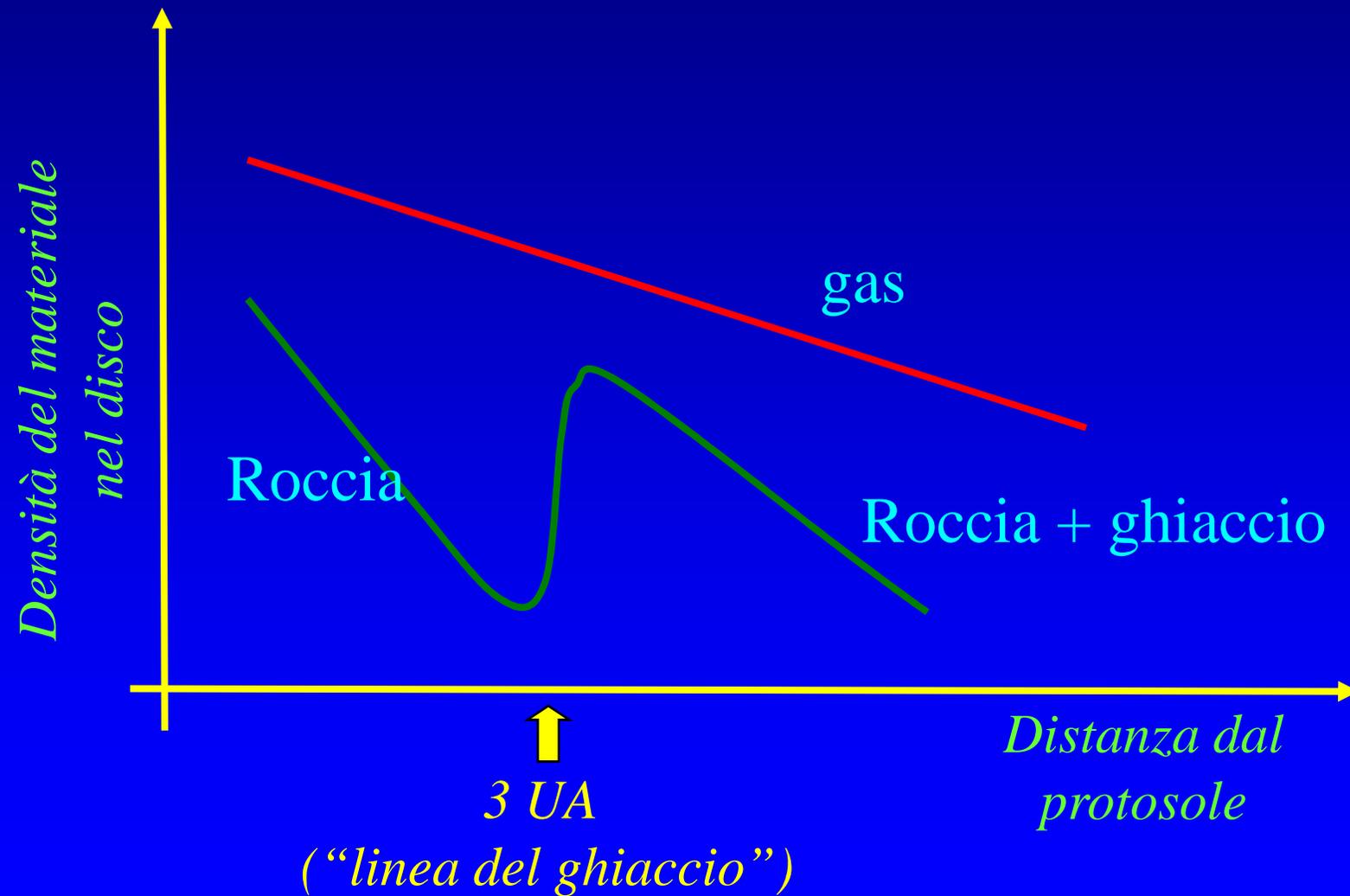
# *LA “DISCARICA” DEI PLANETESIMI*

- *È la fascia degli asteroidi, deposito dei planetesimi (già passati attraverso il primo stadio di cattura, ma che non hanno vissuto l'epoca degli impatti catastrofici)*
- *La massa totale presente nella fascia degli asteroidi è stimata in circa  $5 \cdot 10^{21}$  kg (circa 1/15 della massa della Luna)*
- *Il maggiore degli asteroidi, Cerere, ha un diametro di 940 km e una massa di  $\sim 10^{21}$  kg (1/5 di tutta la fascia)*
- *Non si è formato un pianeta probabilmente a causa della rapida formazione di un pianeta molto massiccio come GIOVE*

# *LA FORMAZIONE DEI PIANETI ESTERNI*

- *I pianeti di questo tipo devono essersi formati in maniera più semplice rispetto a quelli interni*
- *Le massicce quantità di ghiaccio disponibili oltre le 3 UA di distanza dal Sole si sono unite ai grani in grandi nuclei misti (roccia + ghiaccio), capaci di catturare e trattenere grandi involucri di gas della nebulosa protosolare*
- *Dati stimati per Giove:*
  - *Nucleo di roccia e ghiaccio ~ 35 masse terrestri*
  - *$M_{\text{GIOVE}} \sim 318$  masse terrestri → la maggior parte del pianeta è nell'involucro di idrogeno ed elio*

# MAGGIORE CAPACITÀ DI ACCRESCIMENTO PER IL GHIACCIO



# TEMPI CARATTERISTICI DI ACCRESCIMENTO

*Tempi di accrescimento  
in anni*

*Pianeti terrestri*

$10^6 - 10^7$

*Giove*

$10^3 - 10^6$

*Urano e Nettuno*

$10^7 - 10^8$

**PROBLEMA:** *la durata della fase T Tauri **LIMITA** il tempo disponibile a soli  $\sim 10^7$  anni! Non è stato ancora risolto*

# *INEFFICIENZA DEL PROCESSO DI FORMAZIONE DI PIANETI*

- *La massa del Sistema Solare (Sole escluso) è  $\sim 0,0013 M_{\odot}$*
- *Studi dei dischi attorno a giovani stelle in formazione indicano che la massa “tipica” per un disco varia tra  $0,01$  e  $0,1 M_{\odot}$*
- *Dunque  $M_{\text{disco}} / M_{SS} \sim 8 - 80$*
- ***CONSEGUENZA:** se il processo di formazione fosse ripetuto molte volte potrebbero saltar fuori diversi pianeti come Giove! È proprio questa (guarda caso) la situazione di diversi sistemi planetari recentemente scoperti (per esempio Upsilon Andromedae)*

# *LA FASE T TAURI*

- *Molta parte del materiale residuo della nebulosa protosolare (soprattutto gas) viene disperso da un intenso vento stellare nel corso della “prima infanzia” del Sole (detta fase T Tauri)*
- *Il nome è quello del capostipite: una giovanissima stella variabile, T, nella costellazione del Toro*
- *Tale fase ha luogo prima che la stella inizi la combustione nucleare dell'idrogeno (sequenza principale): la sua durata non supera i  $10^7$  anni*
- *Le T Tauri perdono molta massa ( $\sim 10^{-8} M_{\odot}$ /anno)*

# *LA FORMAZIONE DELLA LUNA*

- Il sistema Terra-Luna è davvero particolare nell'ambito del Sistema Solare, perché il rapporto di massa satellite / pianeta è eccezionalmente elevato (unico altro esempio: Plutone e il suo satellite Caronte... ma Plutone non è più considerato un pianeta!). Alcuni valori:*

$$\text{Ganimede / Giove} = 8 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{Titano / Saturno} = 2 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Titania / Urano} = 4 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{Tritone / Nettuno} = 2 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Luna / Terra} = 0,01$$

$$\text{Caronte /Plutone} = 0,08$$

- La Luna è un satellite MOLTO MASSICCIO*

- *La Luna, inoltre, ha una composizione inusuale:*
  - *Superficie basaltica, molto povera di ferro*
  - *Densità BASSA rispetto ai pianeti interni*

---

<i>Oggetto</i>	<i>Densità (kg/m<sup>3</sup>)</i>
<i>Mercurio</i>	<i>5420</i>
<i>Venere</i>	<i>5250</i>
<i>Terra</i>	<i>5520</i>
<i>Luna</i>	<i>3340</i>
<i>Marte</i>	<i>3960</i>

---

# *LA FORMAZIONE DEI SATELLITI*

- *La teoria nebulare suggerisce che satelliti dei pianeti giganti si formarono all'interno di dischi orbitanti intorno ad essi, in una riproduzione ridotta della nebulosa protosolare*
- *Questo non è certo potuto accadere per la Terra (troppo vicina al Sole e troppo piccola)*
- *Quindi la Luna deve avere un'origine DIVERSA*

# *LE IPOTESI PER LA FORMAZIONE DELLA LUNA*

- ***FISSIONE:** la Luna si è separata da una giovane Terra in rapidissima rotazione (che così ha potuto rallentare)*
- ***CATTURA:** la Terra ha catturato una Luna “già pronta” (un piccolo protopianeta)*
- ***IMPATTO CATASTROFICO:** un urto “laterale” fra la Terra appena formata e un protopianeta delle dimensioni di Marte*

# *PRO E CONTRO...*

- *FISSIONE*

*P la Luna sarebbe composta di rocce del mantello terrestre*

*P si spiega la scarsità di ferro della Luna*

*C non è chiaro perché la Terra dovesse ruotare rapidamente  
(la teoria richiede un giorno di ~ 6 ore!)*

- *CATTURA*

*C improbabile dal punto di vista dinamico*

*C non spiega le particolarità della composizione delle rocce  
lunari (rapporto isotopico dell'ossigeno, meno ferro, più  
titanio ...)*

# *IMPATTO CATASTROFICO*

- *la collisione deve essere stata TREMENDA*
- *si sono vaporizzati sia il corpo, sia il mantello terrestre*
- *il materiale vaporizzato era impoverito in ferro rispetto alla Terra (il cui ferro è QUASI tutto nel nucleo)...*
- *...e si è posto in un disco orbitante attorno al nostro pianeta. Simulazioni numeriche mostrano che la Luna si accresce molto rapidamente all'interno del disco*

# *IL RUOLO VITALE DELLA LUNA*

- *L'ipotesi dell'impatto non spiega solo l'origine della Luna, ma potrebbe anche render conto di due cose:*
  - *la rotazione piuttosto rapida (24 h) della Terra*
  - *l'inclinazione dell'asse terrestre*
- *Simulazioni numeriche indicano che:*
  - *senza la Luna l'inclinazione varia in modo caotico (esempio: Marte)*
  - *tale variazione finisce per destabilizzare il clima terrestre*

***FINE***

