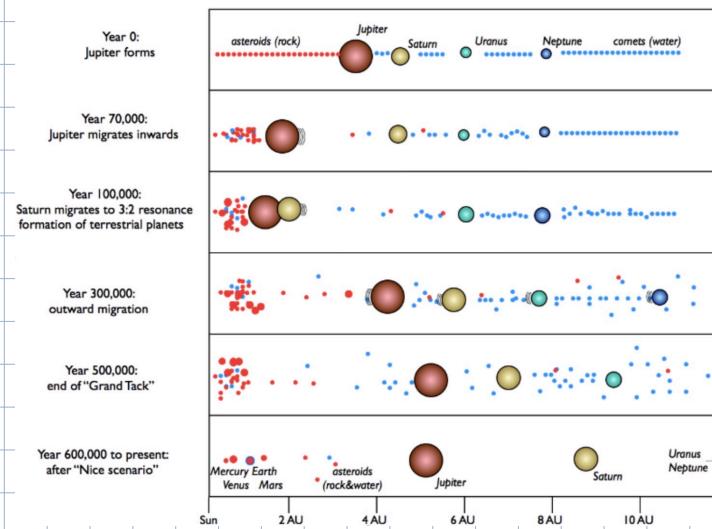


Teorie nebulae non sufficiente per spiegare alcune evidenze del Sistema Solare
(es: main belt, Kuiper Belt, Oort's cloud)

→ MODELLI DI MIGRAZIONE PLANETARIA

→ dovute all'interazione gravitazionale tra planeti e materiale del disco protoplanetario (= planetesimi, e gpa)



- Gas interno vicino allo Stellha velocità maggiore quindi trasferisce momento angolare al pianeta
⇒ momento Torcente Ti che tende a spingere il pianeta verso l'esterno (positivo)
- Gas esterno di pianeta è più lento del pianeta perde momento angolare
⇒ momento Torcente negativo che spinge il pianeta verso l'esterno

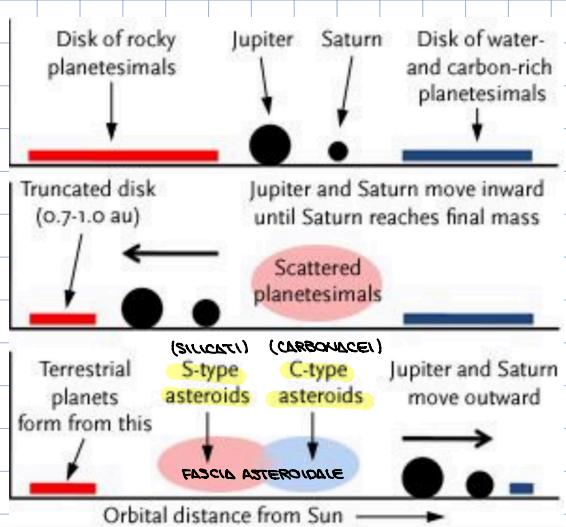
↳ migrazione del pianeta dipende dalla risorsa

Dominano le migrazioni verso l'interno

- **MIGRAZIONI DI 1° TIPO**: planeti poco massivi, non modificano la forma del disco, abbastanza rapide (Tempi inferiori ai 100 000 anni) avviene verso l'interno
- **MIGRAZIONE DI 2° TIPO**: planeti massivi, producono un gap nel disco protoplanetario e migrano verso l'interno, processo lento a causa della massa del pianeta ⇒ all'aumentare della massa diminuisce la velocità
- **MIGRAZIONE DI 3° TIPO**: planeti con massa di Saturno, producono un gap più piccolo di quello di Giave e hanno velocità maggiori, può avvenire verso l'interno o verso l'esterno [ma più raro]

Ci sono due modelli più accreditati:

MODELLO GRAND TACK



→ migrazione di Giave e Saturno nel disco protoplanetario ricco di gas Tra i 20 e gli 80 milioni di anni prima della formazione della Terra

CONDIZIONI INIZIALI (PLANETI)

Giave

$$M = 10M_{\oplus}$$

$$a_0 = 3.5 \text{ AU}$$

Type II migration ($\approx 10^5$ yr)

Saturno

$$M = 30M_{\oplus}$$

$$a_0 = 4.5 \text{ AU}$$

Type I migration
($60M_{\oplus}$, $\approx 10^5$ yr)

Urano → no initial mig → Netuno

$$M = 5M_{\oplus}, a_0 = 8 \text{ AU}?$$

$$M = 5M_{\oplus}, a_0 = 8 \text{ AU}?$$

durante la sua formazione Giove forma un gap nel disco protoplanetario e migra verso l'interno (II tipo)

→ se non ci fosse stato Saturno migrazione sarebbe continuata fino ad un'orbita stretta attorno alla Terra (= "Giove caldo")

Saturno raggiunge la sua massa finale di $60 M_{\odot}$ e inizia una migrazione del I tipo verso l'interno muovendosi più velocemente di Giove

⇒ durante la migrazione Saturno fu costretto in una **risonanza di moto medio 3:2 con Giove** (periodi orbitali stanno in un rapporto di numeri interi fissi) aprendo un gap parziale che si chiuse a quella prodotta da Giove

→ doppia circolazione modifica in modo radicale l'evoluzione dinamica del sistema Giove - Saturno - disco, il gas si trova ad interagire con un **unico sistema di corpi accoppiati dalla risonanza orbitale**

⇒ attorno l'equilibrio dei momenti, Giove e Saturno cominciano a migrare verso l'esterno [virto = TACK]

→ la fusione del gap rimuove il gas tra Giove e Saturno i pianeti continuano a migrare verso l'esterno accoppiati in risonanza fino allo scomparsa del gas presente nel disco, il che arresta lo spostamento radiale dei due pianeti. (Tesi Pierens e Raymond)

Le migrazioni prima verso l'interno e poi verso l'esterno comportavano disordine tra i pianeti primi dando origine alla **possiede asteroidale** con oggetti silicatici e carbonacei entro le snow line

→ motivo dell'inversione: creazione di un unico gap attorno Giove e Saturno e il loro accoppiamento in risonanza

REQUISITI DEL MODELLO

- **masso ottimale** di Saturno per compensare il momento angolare
- **sincronizzazione** dell'evoluzione di Giove e Saturno

PUNTI FORTI DEL MODELLO

- spiega perché non esiste un gigante gassoso vicino al Sole
- riproduce adeguatamente diverse **proprietà dei pianeti interni**, come orbite, masse, tempi-scuola di accrescimento e presenza di H_2O (MATERIALE DA REGIONI ESTERNE GHIACCIATO)
- fa conto della **piccola massa di Marte**
- spiega la **struttura della fascia asteroidale**: coesistenza di asteroidi di tipo S e di tipo C

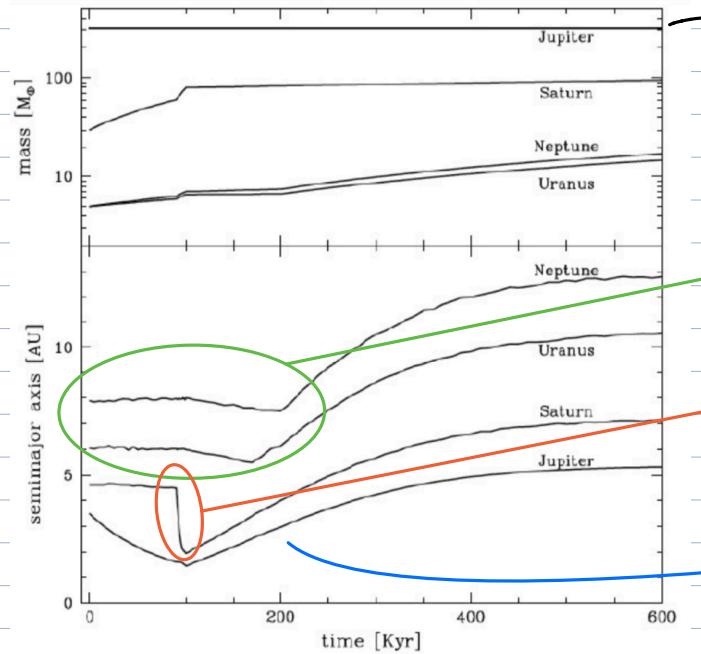
PROBLEMA DELLA MASSA DI MARTE

→ migrazione di Giove verso l'interno provoca una modifica della distribuzione del materiale nella regione $\approx 1.5 AU$ proiettando il materiale nella regione interna del disco



originariamente vi erano $\approx 0.5 - 1 M_{\oplus}$, molto più alto dell'attuale massa di Marte ($\approx 0.107 M_{\oplus}$)

→ il 4% del disco spostato verso l'esterno



→ moto di Giove invariato nel tempo

} masse di Saturno, Urano e Nettuno crescono nel tempo

Nettuno e Urano inizialmente non migrano poi cominciano a spostarsi influenzati da Giove e Saturno

Saturno si avvicina molto velocemente al Sole per ad essere influenzato da Giove

Giove e Saturno si spostano come unico corpo dopo essere entrati in resonanza

STRUTTURA E MASSA DELLA FASCIA PRINCIPALE DEGLI ASTEROIDI

Durante la loro migrazione Giove e Saturno spostarono le orbite di molti asteroidi. Inizialmente i planetesimi si trovavano in orbite di basso eccentricità ed inclinazione e la loro composizione dipendeva unicamente dalla distanza dal Sole

- * planetesimi rocciosi (Tipo S, silicatici) dominavano la regione entro la snow line
- * planetesimi carbonacei (Tipo C) contenenti grandi quantità di materiali volatili ghiacciati predominavano nelle regioni esterne

Giove attraversò due volte la zona della fascia principale degli asteroidi quindi prima si mosse verso l'esterno e poi verso l'interno impoverendo la loro popolazione

Successivamente Giove e Saturno superarono la snow line entrando nella regione degli asteroidi di tipo C. Lo 0,5% di essi venne spostato in orbite più strette popolando la odierna Fascia Principale degli asteroidi. Altri planetesimi ricchi di ghiaccio finirono in orbite ancora più interne ed eccentriche nella regione di formazione dei pianeti terrestri dove, impattandovi, fornirono loro grandi quantità di H₂O

⇒ fascia asteroidale ha piccola massa, ampi intervalli di inclinazioni ed eccentricità e popolazione mista di asteroidi S e C

MODELLO DI NICE (NICE MODEL)

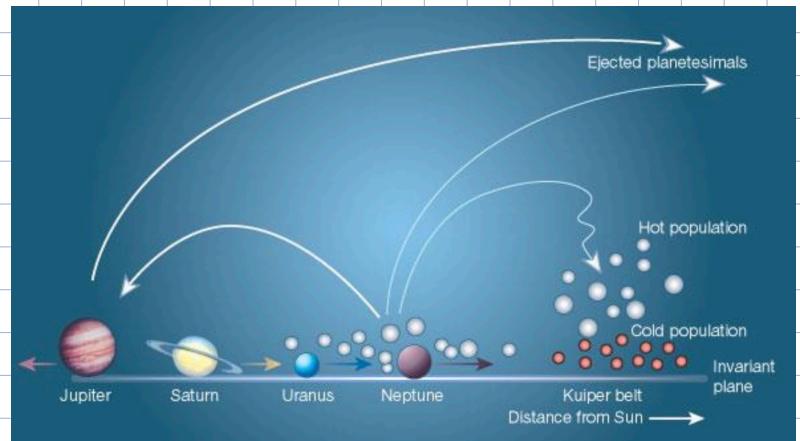
→ evoluzione orbitale dei pianeti giganti dopo la dispersione del gas presente nel disco protoplanetario a causa della loro interazione gravitazionale e dell'interazione con un disco di planetesimi ghiacciati presente a oltre 20 AU dal Sole

Tiene conto della Kuiper Belt, dei satelliti irregolari dei giganti e del lento pesante bombardamento tardivo Heavy Bombardment (LHB) sui pianeti terrestri e sulla Luna (3.9 mil. anni)

Oriiginariamente i 4 pianeti

giganti erano all'interno
dell'orbita attuale di Urano (≈ 19 AU)
su orbite quasi circolari,
complanari e poco distanti tra
loro in condizioni di risonanza
orbitale stabile.

Oltre i giganti c'era una regione
di planetesimi ghiacciati di cui
la fascia di Kuiper rappresenta
il residuo.



I pianeti interagiscono con i planetesimi di questa zona causando la rottura delle risonanze stabili (= REGIME CAOTICO)

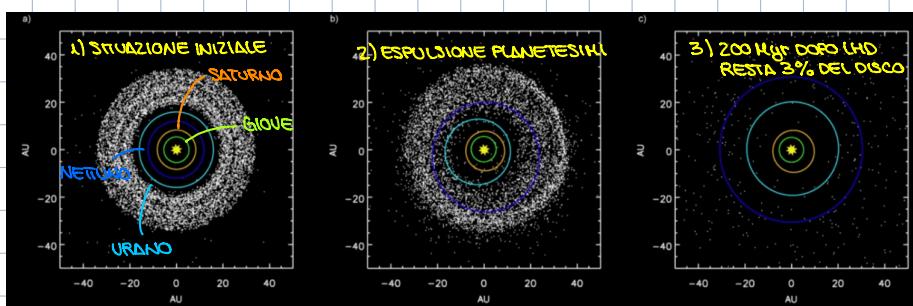
Jovere e Saturno entrano in risonanza di moto medio 1:2 producendo
un aumento delle eccentricità delle loro orbite

\Rightarrow Saturno si avvicina ad Urano e Netuno muore perdendone le
orbite e procedendo penetrare nella parte principale del
disco planetesimale (= discordine)

\Rightarrow corpi sfiduciosi verso il sistema Solare interno
dando luogo a LHB, circa parte verso l'esterno
(= nube di Oort)

DISCO GASSOSO

ASSENTE!)



I due modelli descrivono
due fasi diverse dell'evoluzione
del Sistema Solare

GRAND TACK $\approx 6\text{-}5$ Myr

prima alla scomparsa del disco
gassoso

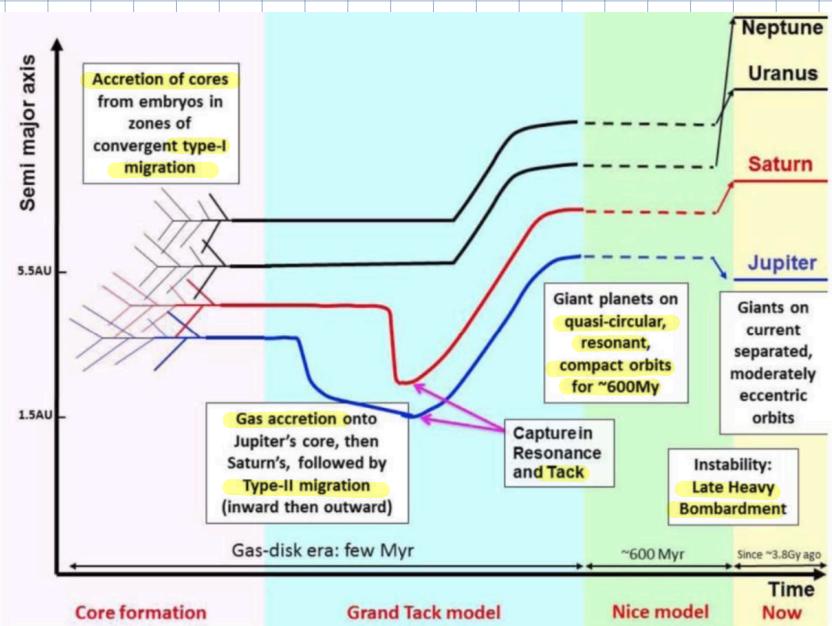
NICE MODEL $\approx 400\text{-}600$ Myr

quando disco gassoso era
assente

condizioni finali dei

Grand Tack sono le condizioni
iniziali del Nice Model

Simulazioni prevedono uno
scambio di posizione tra
Urano e Netuno (600 Myr
dopo la formazione del S.S.)
migrazione si spegne quando
Netuno raggiunge confine
esterno del disco



(EVOLUZIONE DINAMICA DEL SEMIASSE MAGGIORE DEI PLANETI GIGANTI IN
FUNKZIONE DEL TEMPO)

EVOLUZIONE:

1) Nebulosa solare dissipata dopo $\sim 10^7$ anni.

→ il vento solare spazza via il gas, la migrazione si ferma e le posizioni planetarie si stabilizzano; i pianeti esistenti "puliscono" le orbite dai detriti.

2) Tra i protopianeti nella **zona terrestre** sono frequenti le collisioni che formano la Luna etc.

3) le collisioni nelle **regioni esterne** causano l'obliquità di Urano e lo scorrimento delle lune da parte dei giganti (Triton, Phoebe etc.)

==> Sistema Solare in cui il **99.85%** di tutto la **materia** si trova nel **Sole** e il **momento angolare** è trasferito quasi totalmente su **Giove**

DISTRIBUZIONE DELLA MATERIA:

- Pianeti : 0.135 %.
- altri corpi e mezzo interplanetario : 0.015 %

CONFERME DELLA TEORIA NEBULARE

1) Tutti i pianeti orbitano attorno al Sole nello stesso direzione e in senso **antiorario**.

2) le orbite giacciono quasi tutte sulla stessa piana.

3) quasi tutti i pianeti muovono su orbite praticamente **circulari** e lo spazio tra le orbite aumenta seguendo la legge empirica di Titius-Bode: $a^n = 0.4 + 0.32^n$ con $n = -\infty$ per Mercurio (eccezione per la fascia degli asteroidi).

4) la maggior parte dei pianeti ruota nel senso in cui orbita **Venere** e **Urano**.

5) quasi tutte le stelle orbitano attorno ai loro pianeti nello stesso direzione della rotazione del pianeta e vicino al piano equatoriale.

6) il Sole ruota nello stesso direzione in cui orbitano i pianeti.

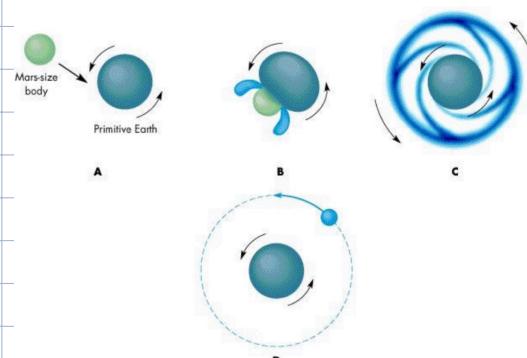
ECCEZIONI

-
- lento moto rotazionale retrogrado di Venere (-213 days)
 - peculiare rotazione retrogrado di Urano
 - assi di rotazione leggermente inclinati (es. estremo Urano)
 - alcune orbite lunari sono opposte alla rotazione dei pianeti (lune corrutte?)
 - alcuni pianeti ruotano più velocemente (impatti l'hanno velocizzati?)
 - grandi dimensioni della Luna

FORMAZIONE DELLA LUNA (Giant Impact Theory)

La Luna ha una composizione simile a quella del mantello terrestre (puro di metalli.)

- ==>
- 1) corpo delle dimensioni di Marte impatto con la Terra "scossa"
 - 2) parte del mantello va nello spazio e condensa formando la Luna



Terra - Luna come sistema doppio

$$\frac{M_T}{M_L} = \frac{56760 \cdot 10^{23}}{735 \cdot 10^{23}} = 81.2$$

differenza di meno di due ordini di grandezza

$$\frac{R_{Terra}}{R_Luna} \approx 3000$$

MARTE

$$\frac{M_{Giove}}{M_{Caronte}} = 12800 \longrightarrow \text{più di quattro ordini di grandezza}$$

(Ganimede satellite maggiore)

VALORI FONDAMENTALI

$$M_{\oplus} = 2 \cdot 10^{33} \text{ g}$$

$$M_{\odot} = 6 \cdot 10^{27} \text{ g}$$

$$M_{Giove} = 2 \cdot 10^{30} \text{ g}$$

$$R_{\oplus} = 700 \cdot 10^3 \text{ km}$$

$$R_{\odot} = 6378 \text{ km}$$

$$R_{Giove} = 70 \cdot 10^3 \text{ km}$$

$$\rho_{\oplus} = 1.4 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{\odot} = 5.5 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{Giove} = 1.3 \text{ g/cm}^3$$

Giove e il Sole hanno densità simile ma
la struttura della materia è totalmente diversa
(plasma nel Sole, materia ordinaria in Giove)