

Formazione planetaria

Lezione SP 8
G. Vladilo

Astronomia Osservativa C, SP 8, Vladilo (2011)

1

8.1 Vincoli osservativi sulla formazione planetaria nel Sistema Solare

2

Vincoli cinematici

- **Moti orbitali dei pianeti**
 - Coplanari tra loro e rispetto all'equatore solare
 - Progradi rispetto alla rotazione solare
- **Tali caratteristiche cinematiche suggeriscono un'origine comune di Sole e pianeti mediante un processo in cui si è conservato il momento angolare**
 - Consistente con un'origine in una “nebulosa solare” in forma di disco
 - Ipotesi già avanzata, in forma semplificata, da Laplace
 - Nebula che si contrae formando un disco da cui nascono i pianeti

3

Il problema del momento angolare

Se la conservazione del momento angolare ha giocato un ruolo decisivo nella formazione del Sistema Solare, è importante capirne la distribuzione

- **Attualmente il 98% del momento angolare del Sistema Solare si trova concentrato nei pianeti giganti**
 - Il Sole ha probabilmente perso momento angolare dal momento della sua formazione
 - Una perdita di momento angolare potrebbe essere avvenuta durante il processo di formazione, ad esempio per alimentare un processo di “outflow” analogo a quello che osserviamo oggi in oggetti stellari giovani
 - Nel corso dell'evoluzione del Sole, parte dell'energia di rotazione è stata trasformata in campi magnetici e vento solare, mediante vari meccanismi di produzione e trasporto energetico tra cui il meccanismo dinamo

4

Vincoli sulla nebulosa solare: il gradiente di densità

- **Distribuzione della massa della nebulosa solare**

- Stima approssimata basata sulle seguenti ipotesi:

Ciascun pianeta, all'atto della propria formazione, ha raccolto tutta la massa disponibile nella propria zona di influenza della nebulosa solare

I pianeti rocciosi hanno perso i composti volatili, pertanto la massa di nebulosa nella loro zona di influenza va estrapolata aggiungendo gli elementi volatili sulla base dell'abbondanza misurata di composti refrattari

THE DISTRIBUTION OF MASS IN THE PLANETARY SYSTEM AND SOLAR NEBULA

S. J. WEIDENSCHILLING

*Dept. of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington,
Washington, D.C., U.S.A.*

(Received 19 February, 1977)

5

Vincoli sulla nebulosa solare: il gradiente di densità

- **Distribuzione della massa della nebulosa solare**

- Si ottiene un profilo di densità di massa superficiale (minima) della nebulosa solare

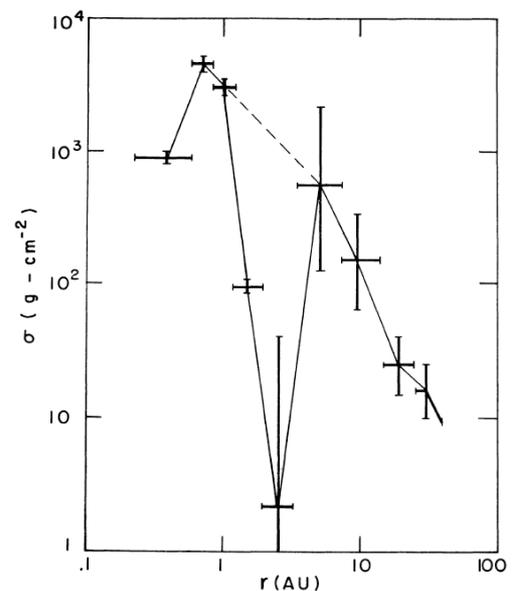
Profilo con gradiente negativo di densità, in accordo con l'aspettativa che la nebulosa fosse più densa nelle regioni centrali

Integrando tale profilo si ottiene che un valore minimo di massa della nebulosa solare tra 0.01 e 0.07 M_{solare}

- **Concetto importante per motivi storici**

- Oggi sappiamo che le ipotesi sono troppo semplici

Per esempio si assume che non ci sia stata alcuna migrazione radiale dei pianeti nel corso dell'evoluzione del Sistema Solare

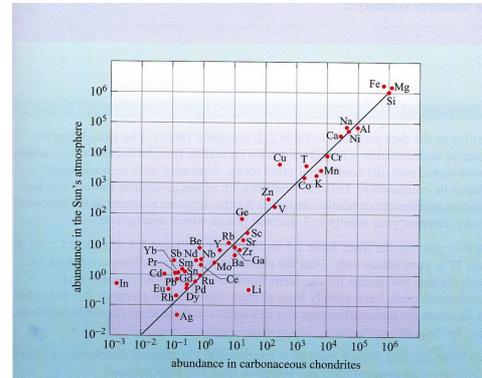


6

Vincoli di composizione chimica

- Se l'ipotesi nebulare è corretta, la composizione chimica dei pianeti e del Sole devono essere entrambe riconducibili alla composizione chimica della nebulosa solare
- Il fatto che le condriti carbonacee abbiano composizione chimica identica a quella dell'atmosfera solare supporta tale ipotesi
 - Si ritiene che tali meteoriti siano l'esempio più prossimo a materiale primordiale (poco processato) del Sistema Solare
- In generale, la composizione chimica dei corpi del Sistema Solare può essere ricondotta a una primitiva composizione solare, modificata successivamente da processi di differenziazione e di fuga di composti volatili

Confronto tra la composizione chimica dell'atmosfera solare e delle condriti carbonacee



7

Gradienti radiali di elementi refrattari e volatili

- I pianeti rocciosi, costituiti principalmente di composti refrattari, si trovano più vicini al Sole rispetto ai pianeti giganti, costituiti principalmente di composti volatili
 - Un simile risultato si ha dallo studio di corpi minori: gli asteroidi, più vicini al Sole, sono rocciosi e ricchi di refrattari, mentre le comete, più distanti, sono ghiacciate e ricche di volatili
- Tali semplici fatti osservativi suggeriscono l'esistenza di un gradiente radiale del grado di volatilità dei materiali nei corpi del Sistema Solare
 - I materiali refrattari sono più vicini al Sole, quelli volatili più lontani
 - Tale gradiente è in accordo con l'esistenza di un gradiente negativo di temperatura con la distanza dal sole nella nebulosa solare, quale ci si aspetta a causa del gradiente di flusso di radiazione
 - I refrattari resistono alle alte temperature anche vicino al Sole, mentre i volatili riescono a resistere solo a grandi distanze dal Sole

8

Temperatura di condensazione

- Studi della temperatura di condensazione permettono di quantificare la relazione tra temperatura e grado di volatilità
 - T_{cond} introdotta nella lezione sulle deplezioni nel mezzo interstellare
- Ingredienti pianeti rocciosi:
 - Mantelli di silicati e core di Fe-Ni hanno $T_{\text{cond}} > 10^3$ K
- Ingredienti principali pianeti giganti e loro satelliti
 - Componenti volatili e ghiacci di vario tipo: $T_{\text{cond}} \sim 10^2$ K

Substance	Formula	Temperature of condensation ^a (K)
<i>ionic substances</i>		
corundum	Al ₂ O ₃	1758
perovskite	CaTiO ₃	1647
spinel	MgAl ₂ O ₄	1513
nickel-iron metal	Ni, Fe	1471
pyroxene (diopside)	CaMgSi ₂ O ₆	1450
olivine (forsterite)	Mg ₂ SiO ₄	1444
alkali feldspars	(Na,K)AlSi ₃ O ₈	<1000
troilite	FeS	700
hydrated minerals ^b	(variable)	550–330
<i>molecular substances</i>		
water	H ₂ O (as an ice)	180
ammonia	NH ₃ .H ₂ O (ice)	120
methane	CH ₄ .6H ₂ O (ice)	70
nitrogen	N ₂ .6H ₂ O (ice)	70

^a The temperatures of condensation given are those that would occur if the pressure in the nebula had been about 10⁻³ bar (10² Pa). At lower pressures, the condensation temperatures would have been reduced slightly.

^b Hydrated minerals are chiefly silicates with OH or H₂O in their formulae.

9

Origine del gradiente radiale del grado di volatilità

- Due possibili ipotesi
 - Portano a risultati simili; non sono necessariamente antitetiche
 - Polvere di origine interstellare incorporata nella nebulosa
 - la componente refrattaria della polvere resiste anche nelle vicinanze del protosole, mentre quella volatile si distrugge a causa delle temperature elevate
 - la componente volatile resiste solo se lontana dal protosole
 - A una distanza di ~1AU la temperatura può raggiungere i 2000 gradi, sufficiente perché la polvere interstellare ereditata dal mezzo interstellare sublimi
 - Condensazione di polvere in situ nella nebulosa
 - la componente refrattaria condensa anche nelle vicinanze del Sole, mentre quella volatile solo lontano, oltre la linea dei ghiacci
 - Man mano che la nebulosa solare diventa più trasparente, il gas si raffredda e gli atomi cominciano a condensare, formando nuove particelle di polvere.
 - I processi di condensazione hanno luogo per i diversi materiali a temperature diverse, a iniziare con quelli refrattari; i materiali volatili condensano a ~5 AU

10

Sommario dei vincoli osservativi sui modelli di formazione planetaria ottenuti dallo studio del Sistema Solare

Moti orbitali dei pianeti

- Coplanari tra loro e rispetto all'equatore solare

- Progradi rispetto alla rotazione solare

Gradiente di densità del gas

- Decrescente allontanandosi dal Sole

Composizione chimica

- Origine comune dei corpi planetari e del Sole

Gradienti radiali di elementi refrattari e volatili

- Pianeti e corpi minori rocciosi vicini al Sole

- Pianeti e corpi minori gassosi/ghiacciati lontani dal Sole

11

8.3

Vincoli osservativi sulla formazione planetaria ottenuti dallo studio di pianeti extrasolari

- **Proprietà di pianeti extrasolari con implicazioni sui modelli di formazione planetaria**
 - Hot Jupiters
 - La presenza di giganti gassosi in orbite prossime alla stella ($a < 1$ AU) ci induce a considerare l'esistenza di meccanismi di migrazione radiale dei pianeti
 - Non considerati originariamente negli studi di formazione del Sistema Solare
 - Picco nella distribuzione dei periodi orbitali a $P \sim 3$ giorni
 - Ci induce a considerare meccanismi di frenamento dei meccanismi di migrazione
 - in assenza di tali meccanismi i pianeti continuerebbero ad avvicinarsi alla stella su orbite sempre più brevi
 - Dispersione dei valori di eccentricità
 - L'esistenza di un grande rango di valori di eccentricità ci induce a considerare l'esistenza di meccanismi di diffusione delle orbite planetarie

Modelli di formazione planetaria

Vincoli osservativi ottenuti dallo studio di pianeti extrasolari

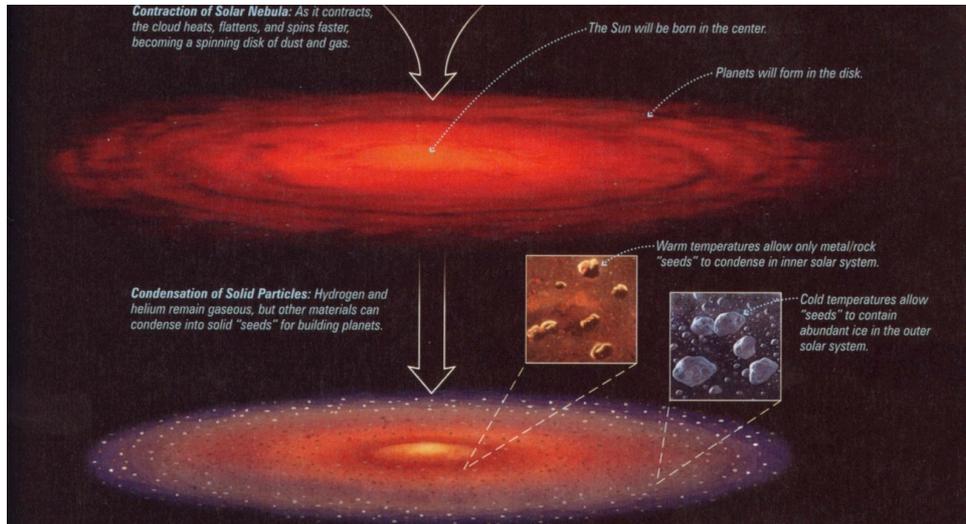
- **Proprietà di pianeti extrasolari con implicazioni sui modelli di formazione planetaria**
 - Diversità del tipo di pianeti
 - L'esistenza di pianeti come le “Super-Terre” o gli “Inflated Jupiters” ci induce a esplorare modelli di formazione planetaria capaci di riprodurre tali tipi di pianeti, diversi da quelli del Sistema Solare
 - Si stanno inoltre considerando altri tipi di pianeti, nè gassosi, nè rocciosi: ad esempio “Ocean planets” (Leger et al. 2004, Icarus, 169, 499)
 - Metallicità delle stelle ospiti
 - La maggior frequenza di pianeti giganti in stelle di alta metallicità ci induce a introdurre nei modelli una dipendenza dalla metallicità del processo della formazione di pianeti giganti

Scenario di formazione del Sistema Solare

Alla luce dei vincoli osservativi finora considerati si considera il seguente scenario di formazione del Sistema Solare

1. Formazione della Nebulosa Solare in forma di disco

Questo spiega le orbite coplanari e prograde con il Sole
Massa e dimensione stimate per la Nebulosa Solare sono simili a quelle misurate nei dischi circumstellari (dischi protoplanetari)

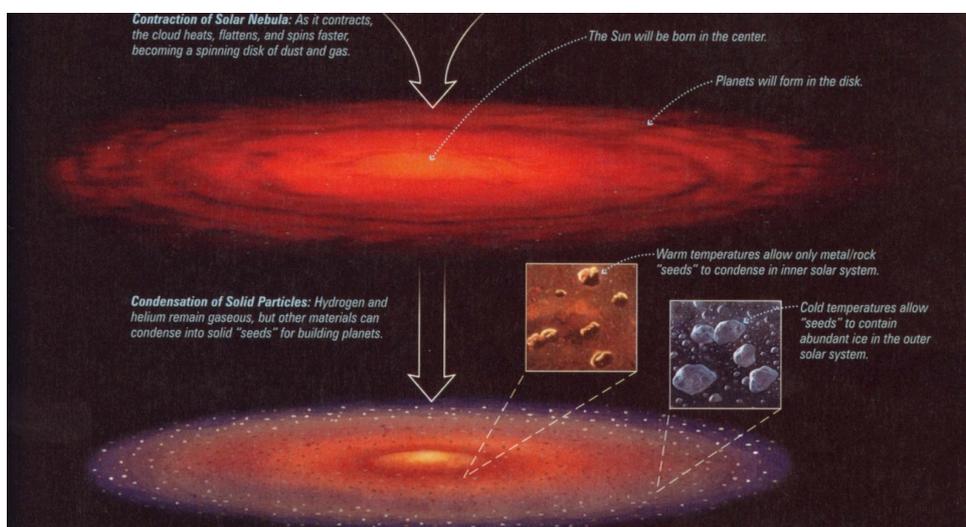


15

Scenario di formazione del Sistema Solare

2. Condensazione di solidi con un gradiente radiale del grado di volatilità

Vicino al protosole solo solidi di composti refrattari,
lontano dal protosole anche solidi di composti volatili

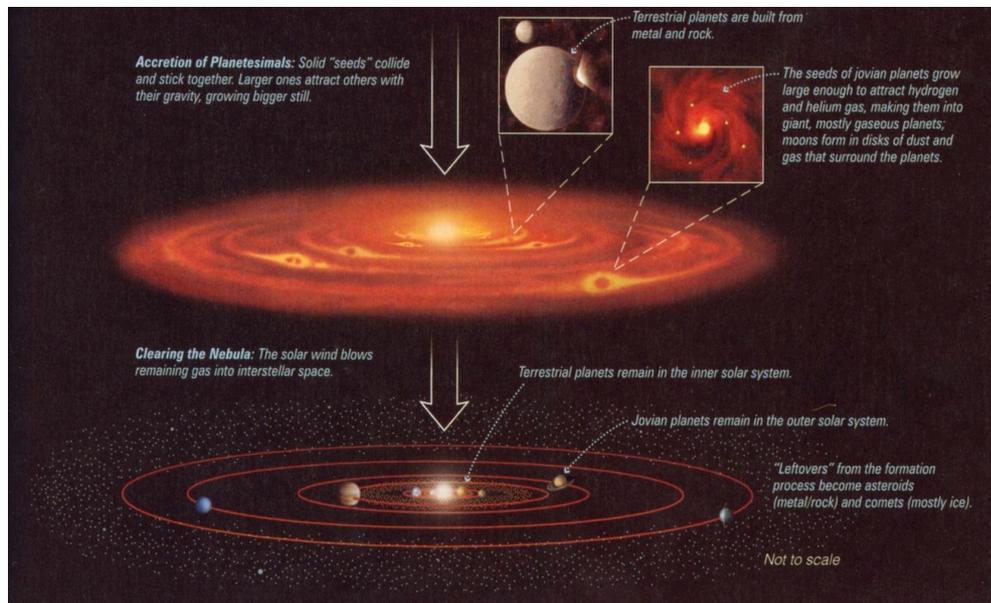


16

Scenario di formazione del Sistema Solare

3. Formazione di pianeti da processi di accrescimento della componente solida e gassosa della Nebulosa Solare

Tali processi danno finalmente luogo al Sistema Solare che oggi conosciamo



17

Modelli di formazione planetaria

Armitage 2009, Lecture notes on the formation and early evolution of planetary systems

L'impossibilità, o estrema difficoltà, dell'osservazione diretta delle fasi formazione planetaria rende fondamentale l'uso di modelli

per pianeti terrestri

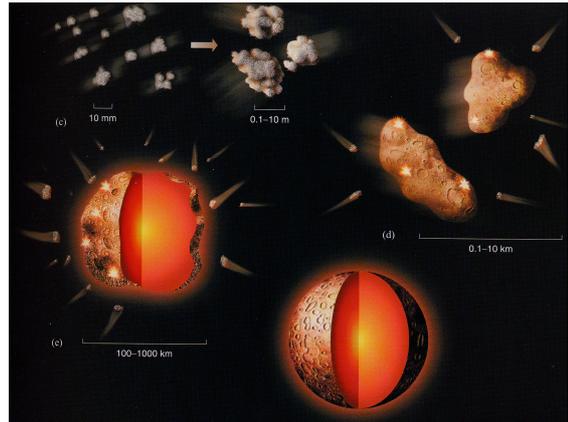
per pianeti giganti

Modelli di formazione di pianeti terrestri

- **Ipotesi planetesimale**
 - La protostella è circondata da un disco di gas e polvere (disco protoplanetario)
 - La componente solida si agglomera fino a formare corpi delle dimensioni dell'ordine di alcuni km, chiamati planetesimi
 - Collisioni e interazioni gravitazionali tra planetesimi producono embrioni planetari di dimensioni comprese tra quelle della Luna e quelle di Marte
 - Gli embrioni collidono fino a formare pianeti

Possiamo distinguere i seguenti regimi nella dimensione media, a , della componente solida

- **Polvere**
 - $0.1 \mu\text{m} \leq a \leq 1 \text{ cm}$
- **Rocce**
 - $a \sim 1 \text{ m}$
- **Planetesimi**
 - $a \sim 10 \text{ km}$
- **Embrioni planetari**
 - $a \sim R_{\text{Luna}}$
- **Pianeti**
 - $a \sim R_{\text{Terra}}$



Astronomia Osservativa C, SP 8, Vladilo (2011)

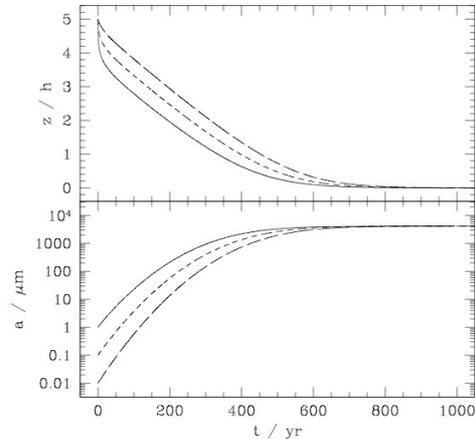
Modelli di formazione di pianeti terrestri

La formazione di pianeti a partire da particelle di polvere richiede un processo di accrescimento che si estende su più di 12 ordini di grandezza nella dimensione media, a , della componente solida

- **I meccanismi fisici che governano l'accrescimento sono distinti a seconda del valore di a**
 - Le forze gravitazionali tra particelle entrano in gioco quando $a > 10 \text{ km}$
 - Le interazioni tra componente solida e gas cambiano a seconda del valore di a
- **Nei modelli si rende quasi sempre necessario trattare separatamente le diverse fasi del processo**
 - Nella realtà i processi che avvengono nelle diverse fasi si sovrappongono spazialmente e temporalmente
- **Gli effetti dell'intensa attività protostellare sui processi di formazione planetaria sono raramente incorporati nei modelli**
 - Estremamente complessi e difficile da modellare
 - In prima approssimazione, i getti non interagiscono con il disco protoplanetario
 - Invece l'effetto dei forti campi magnetici e dell'emissione protostellare, anche in bande spettrali di alta energia, è probabilmente importante

Modelli di formazione di pianeti terrestri Dalla polvere ai planetesimi

- In questi regimi le forze gravitazionali tra particelle solide sono trascurabili
- Dalla polvere alle “rocce”
 - $a \sim 0.1 \mu\text{m} \Rightarrow a \sim 1 \text{ m}$
 - L'accrescimento delle particelle solide avviene per collisione e coagulazione (agglomerazione)
 - La coalescenza delle particelle è determinata da forze elettrostatiche
 - Il processo di coagulazione avviene in concomitanza con la sedimentazione delle particelle di polvere nel piano centrale del disco protoplanetario
- Dalle “rocce” ai planetesimi
 - $a \sim 1 \text{ m} \Rightarrow a \sim 10 \text{ km}$
 - Non è chiaro se la crescita in questo regime continui ad avvenire per agglomerazione o sia invece causata da un meccanismo di instabilità di uno disco sottile di polveri



Astronomia Osservativa C, SP 8, Vladilo (2011)

Modelli di formazione di pianeti terrestri Dalla polvere ai planetesimi

- Il drift radiale
 - Le particelle solide tendono a muoversi alla velocità kepleriana, V_k
 - Determinata dall'equilibrio tra gravità e forza centrifuga
 - $V_k^2/r = GM_*/r^2$
 - Come effetto del gradiente di pressione, il gas tende a muoversi a velocità leggermente inferiore a quelle kepleriana
 - Tenendo in conto della condizione di equilibrio idrostatico, si ha
 - $V_g^2/r = GM_*/r^2 + (1/\rho) dP/dr$
 - Poichè la pressione nel disco gassoso decresce con la distanza, $dP/dr < 0$, il gas tende a muoversi a velocità $V_g < V_k$
 - Le particelle solide perdono momento angolare a causa dell'attrito con il gas e subiscono quindi una deriva (“drift”) radiale verso l'interno del disco
 - L'effetto dipende dalle dimensioni delle particelle solide
 - L'effetto aumenta con a , fino a raggiungere un massimo per $a \sim 10 \text{ cm} - 1 \text{ m}$
 - Le “rocce” di tali dimensioni sentono una sorta di “vento di testa” (“headwind”) che le fa spiralarle verso le parti più interne del disco su di un tempo scala brevissimo $\sim 100 \text{ anni}$

Astronomia Osservativa C, SP 8, Vladilo (2011)

Modelli di formazione di pianeti terrestri Dalla polvere ai planetesimi

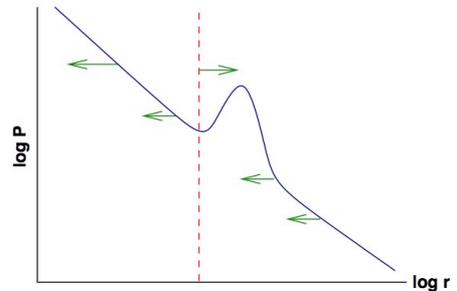
- Implicazioni del “drift” radiale veloce delle rocce
 - La brevissima scala di tempo di drift radiale per le “rocce” con $a \sim 1$ m porterebbe all’interruzione del processo di formazione planetaria
- Affinchè il processo di formazione planetaria non sia interrotto si considerano le seguenti possibilità

- La fase che porta all’assemblamento dei planetesimi a partire dalle rocce è estremamente veloce
 - Una volta assemblati, i planetesimi non risentono in maniera significativa dell’effetto dell’attrito con il gas
- L’eventuale esistenza di massimi locali di pressione nel disco porterebbe ad un accumulazione di materiale solido che non spirala all’interno del disco

La componente solida di piccole dimensioni tende a muoversi verso il massimo di pressione del gas

Se esiste un massimo di pressione locale, la componente solida tenderà ad accumularsi all’interno di tale massimo

I modelli recenti di formazione planetaria invocano questo tipo di effetto per superare il problema



Astronomia Osservativa C, SP 8, Vladilo (2011)

Modelli di formazione di pianeti terrestri Formazione dei planetesimi

- Il problema del “drift” radiale veloce delle rocce potrebbe anche essere aggirato mediante un altro tipo di meccanismo

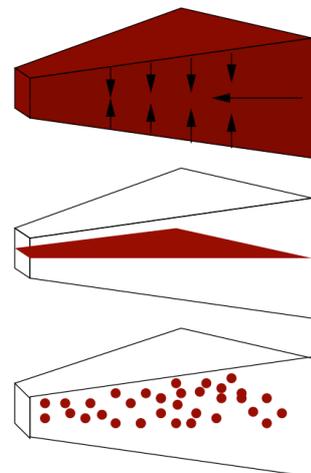
- Meccanismo di Goldreich-Ward

Si forma un (sotto-)disco sottile di materiale solido come conseguenza dei processi di sedimentazione, coagulazione e drift radiale

Se la densità del disco sottile di solidi diventa maggiore di quella del gas, tale disco diventa instabile gravitazionalmente e si frammenta

I frammenti dissipano energia per mezzo di collisioni e collassano per formare planetesimi

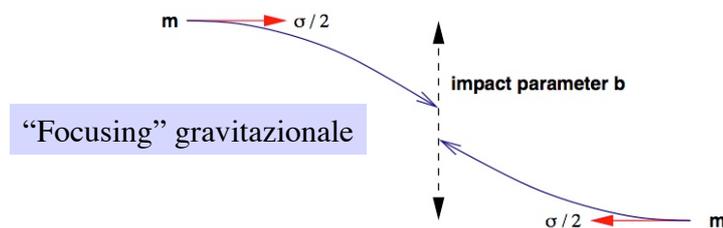
- Non è chiaro se tale meccanismo possa effettivamente funzionare



Astronomia Osservativa C, SP 8, Vladilo (2011)

Modelli di formazione di pianeti terrestri Dai planetesimi agli embrioni planetari

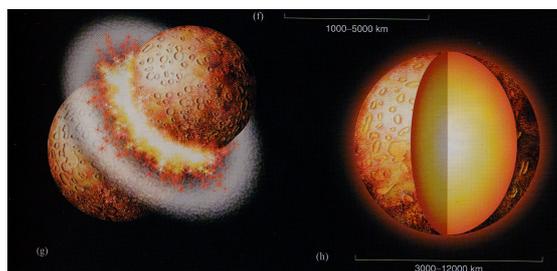
- Una volta formati i planetesimi entrano in gioco le perturbazioni gravitazionali
 - L'accoppiamento con il gas può essere trascurato
 - Questa fase può essere studiata, in linea di principio, come un problema a N corpi dominato da interazioni di tipo gravitazionali
- **Gravitational focusing**
 - Nella pratica il problema è complesso da trattare anche numericamente
- Attraverso questo processo si presume che si formino gli embrioni planetari
 - raggiungono raggi di ~ 4000 km e masse di $\sim 10^{26} - 10^{27}$ g
ossia le dimensioni di Mercurio o di Marte
 - La scala dei tempi è dell'ordine di 10^6 anni



Astronomia Osservativa C, SP 8, Vladilo (2011)

Modelli di formazione di pianeti terrestri Dagli embrioni planetari ai pianeti

- La fase finale dell'accrescimento planetario si ha con l'accumulazione di alcune decine di embrioni planetari in un piccolo numero di pianeti di $10^{27} - 10^{28}$ g
La scala dei tempi è di $10^7 - 10^8$ anni
- In questa fase due processi hanno particolare importanza:
 - L'elevata probabilità di impatti giganteschi fra gli embrioni planetari
Questi impatti quasi inevitabilmente portano a processi di fusione su scala planetaria, o, in qualche caso possono determinare la disintegrazione dei pianeti
 - Il processo di assemblaggio dei pianeti determina la dispersione della componente gassosa della nebulosa su una scala dei tempi di $10^6 - 10^7$ anni
La perdita della componente gassosa riduce il frenamento dei piccoli corpi ciò che, a sua volta, riduce la loro capacità di frenare le velocità degli embrioni planetari e quindi aumenta la probabilità di collisioni e impatti giganti



Astronomia Osservativa C, SP 8, Vladilo (2011)

Modelli di formazione di pianeti terrestri Scale di tempi

TABLE 2.3 Stages of planetary formation according to the “standard model” (Wetherill, 1990), applied to the terrestrial planets.

Stage	Final mass (g)	Time taken (yr)	Main processes
1. Accretion of dust-sized particles into planetesimals.	10^{12} – 10^{18}	10^4	Nongravitational accumulation; particles coalesce through electrostatic forces
2. Accretion of planetesimals into planetary embryos	10^{26} – 10^{27}	10^6	Gravitational accretion aided by runaway growth
3. Accretion of planetary embryos into planets	10^{27} – 10^{28}	10^7 – 10^8	Giant impacts

$$M_{\text{Terra}} = 5.97 \times 10^{27} \text{ g}$$

Astronomia Osservativa C, SP 8, Vladilo (2011)

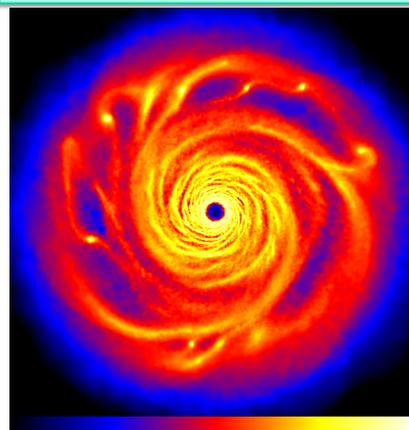
Modelli di formazione dei pianeti giganti

Boss 2004, Earth & Plan.Sci.Letters 202, 513

- **Storicamente esistono due modelli antagonisti**
 - Modello di instabilità gravitazionale
 - Modello “core accretion”

- **Modello di instabilità gravitazionale**
 - Modello di tipo “top-down”
 - Il disco gassoso diventa instabile e forma dei protopianeti giganti autogravitanti
 - Questa fase è seguita dalla sedimentazione di polvere e accrescimento di un nucleo solido centrale

Esempio di simulazioni che portano a instabilità gravitazionali in un disco protoplanetario.
Univ. California Riverside



Astronomia Osservativa C, SP 8, Vladilo (2011)

Modelli di formazione dei pianeti giganti

- **Modello “core accretion”**

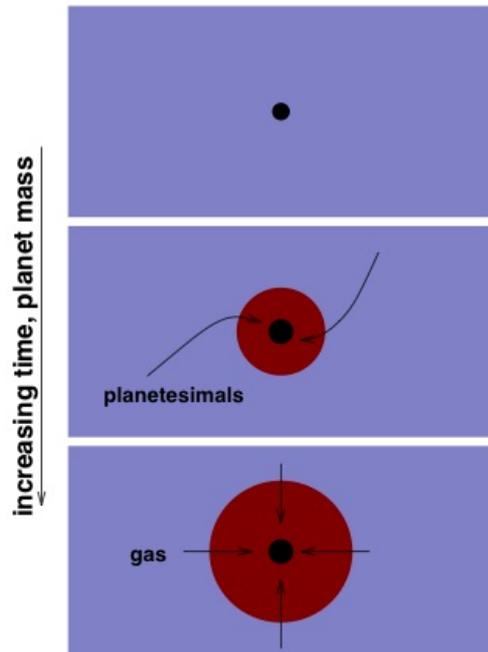
Modello di tipo “bottom-up”

- Un nucleo solido di massa $M_{\text{core}} \sim 10 M_{\text{terra}}$ si forma per accrescimento in maniera simile a quanto visto per i pianeti terrestri

Valgono tutte le considerazioni fatte a proposito dei modelli di formazione dei pianeti di tipo terrestre

- Tale nucleo cattura successivamente un involucro gassoso

Problema principale: il nucleo deve formarsi molto rapidamente, prima che il gas del disco protoplanetario sia esaurito, altrimenti non potrebbe esserci accrescimento dell’involucro gassoso



Modelli di formazione dei pianeti giganti

- **Test di confronto tra i due modelli**

- **Nel caso del Sistema Solare**

- La presenza di un core roccioso all’interno di Giove è un’evidenza a favore del modello “core accretion”

L’esistenza di tale core sembra essere confermata; è sicuramente presente negli altri pianeti giganti del Sistema Solare

- Le misure di abbondanze chimiche nell’atmosfera di Giove sono a favore del modello “core accretion”

Le sovrabbondanze degli elementi pesanti rispetto ai valori solari non supportano il modello di instabilità gravitazionale

- **Nei sistemi extrasolari**

- Parte dei giganti gassosi potrebbero essersi originati diversamente da Giove
- Non possiamo escludere che parte dei giganti gassosi extrasolari si siano formati per instabilità gravitazionale