Modelli di formazione planetaria

Lezione SP 8
G. Vladilo

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

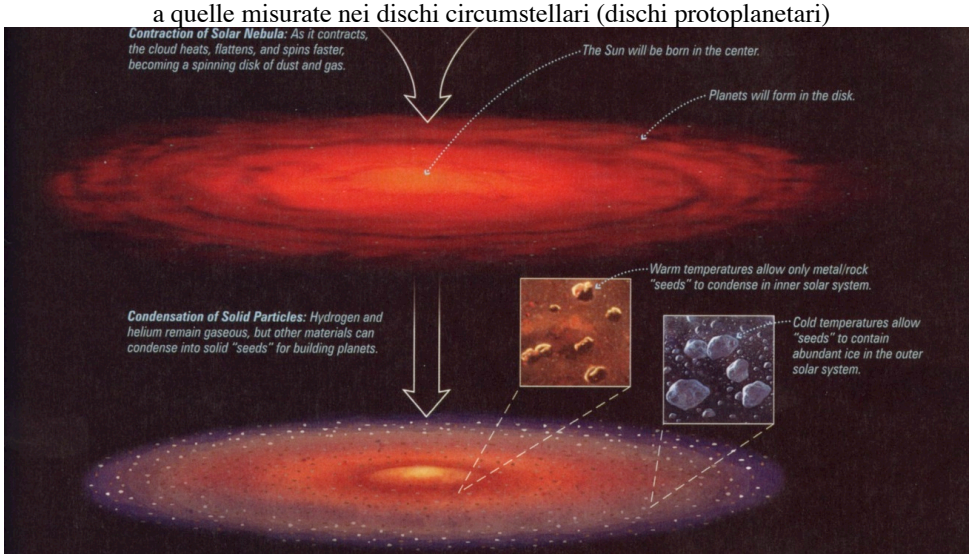
- Moti orbitali dei pianeti
  - Coplanari tra loro e rispetto all'equatore solare
  - Progradi rispetto alla rotazione solare
- Composizione chimica
  - Origine comune dei corpi planetari e del Sole
- Gradiente di densità del gas
  - Decrescente allontanandosi dal Sole
- Gradienti radiali di elementi refrattari e volatili
  - Pianeti e corpi minori rocciosi vicini al Sole
  - Pianeti e corpi minori gassosi/ghiacciati lontani dal Sole

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

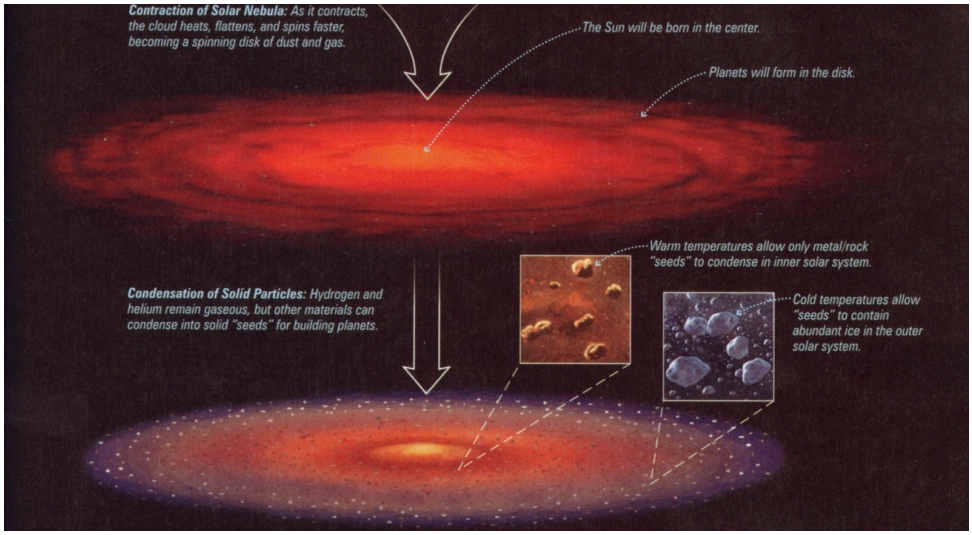
Questo spiega le orbite coplanari e prograde con il Sole
Massa e dimensione stimate per la Nebulosa Solare sono simili
a quelle misurate nei dischi circumstellari (dischi protoplanetari)



Scenario di formazione del Sistema Solare

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

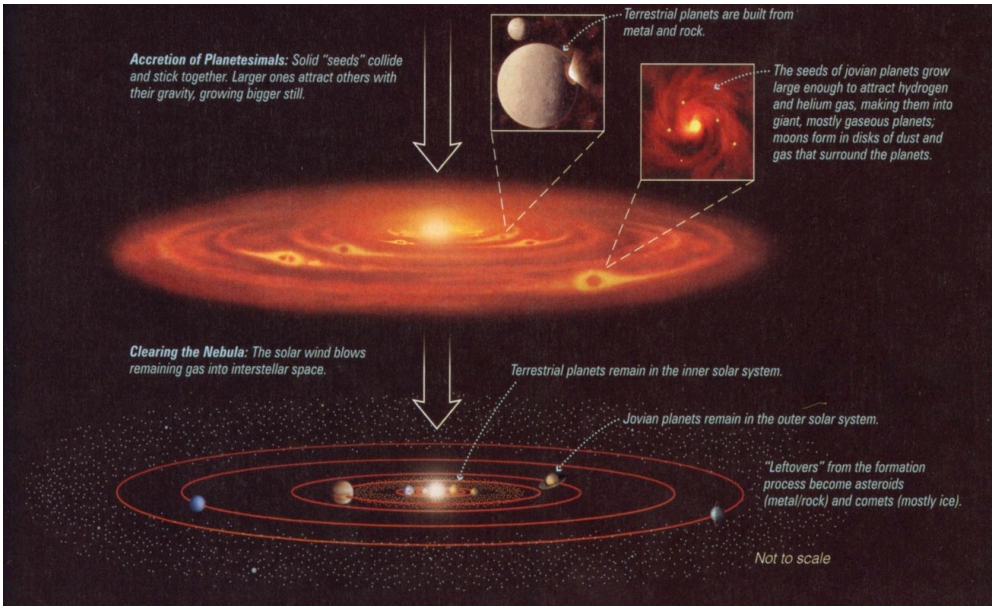
Vicino al protosole solo solidi di composti refrattari,
lontano dal protosole anche solidi di composti volatili



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



I <u>modelli</u> che spiegano le diverse fasi di formazione del Sistema Solare sono estremamente complessi

Prima di descriverli, vediamo quali altri tipi di vincoli osservativi devono soddisfare, più in generale, i modelli di formazione planetaria

Nuovi vincoli osservativi sui modelli di formazione planetaria sono stati ottenuti

dallo studio dei <u>pianeti extrasolari</u>

Modelli di formazione planetaria

Vincoli osservativi 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

Modelli di formazione planetaria

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

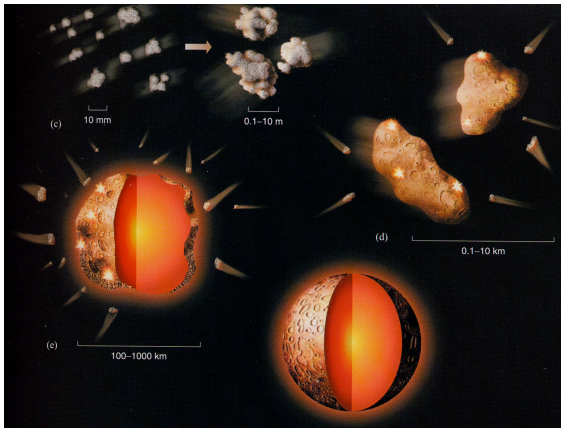
Modelli per pianeti terrestri
Modelli per pianeti giganti

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
  - $a \sim R_{\text{Terra}}$



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 $a > 10$ km
  - Anche le interazioni tra componente solida e gas cambiano a seconda del valore di *a*
- Nei modelli si rende spesso 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
  - Effetti 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

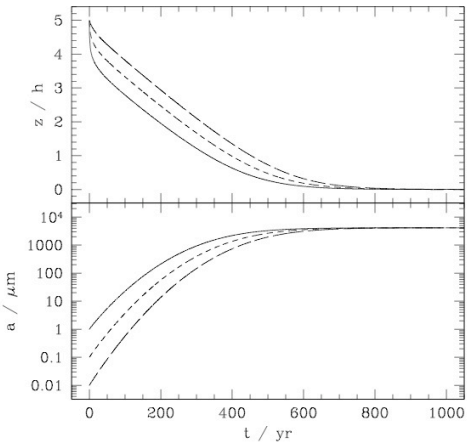
Dalla polvere ai planetesimi

  - In questi regimi le forze gravitazionali tra particelle solide sono trascurabili
- Dalla polvere alle "rocce"

  $a \sim 0.1\ \mu m \Rightarrow a \sim 1$ m
  - L'accrescimento delle particelle solide avviene per collisione e <u>coagulazione</u> (<u>agglomerazione</u>)

    La coalescenza delle particelle è determinata da <u>forze elettrostatiche</u>
  - Il processo di coagulazione avviene in concomitanza con la <u>sedimentazione</u> delle particelle di polvere nel piano centrale del disco protoplanetario
- Dalle "rocce" ai planetesimi

  $a \sim 1$ m $\Rightarrow a \sim 10$ km
  - Non è chiaro se la crescita in questo regime continui ad avvenire per <u>agglomerazione</u> o sia invece causata da un meccanismo di <u>instabilità di uno disco sottile di polveri</u>



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 $a \sim 10$ cm - 1m

    Le "rocce" di tali dimensioni sentono una sorta di "vento di testa" ("headwind") che le fa spiralare verso le parti più interne del disco su di un tempo scala brevissimo ~ 100 anni

Modelli di formazione di pianeti terrestri

Dalla polvere ai planetesimi

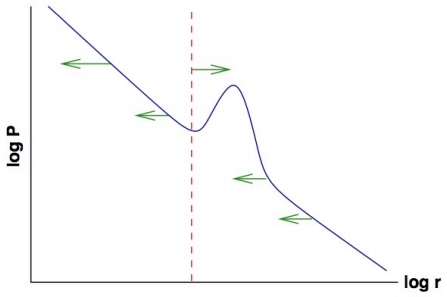
- Implicazioni del "drift" radiale veloce delle rocce
  - La brevissima scala di tempo di drift radiale per le "rocce" con $a \sim 1$ m porterebbe all'interruzione del processo di formazione planetaria
- Affinchè il processo di formazione planetaria non sia interrotto si considerano le seguenti possibilità
  - 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 <u>massimi locali di pressione</u> 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

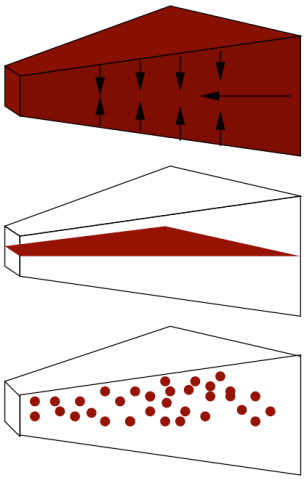
    I modelli recenti di formazione planetaria invocano questo tipo di effetto per superare il problema



Modelli di formazione di pianeti terrestri

Formazione dei planetesimi

- Il problema del "drift" radiale veloce delle rocce potrebbere 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

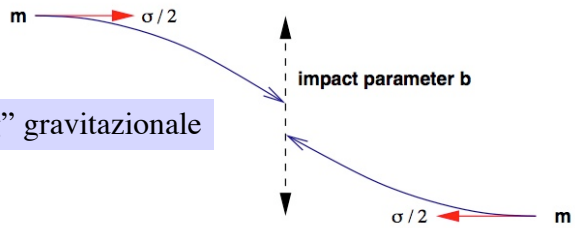


Modelli di formazione di pianeti terrestri

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 ~10^{26} -10^{27} g
    - ossia le dimensioni di Mercurio o di Marte
  - La scala dei tempi è dell'ordine di 10^6 anni

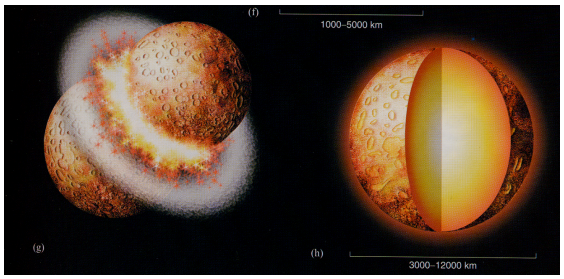
"Focusing" gravitazionale



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

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

Modelli di formazione dei pianeti giganti

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

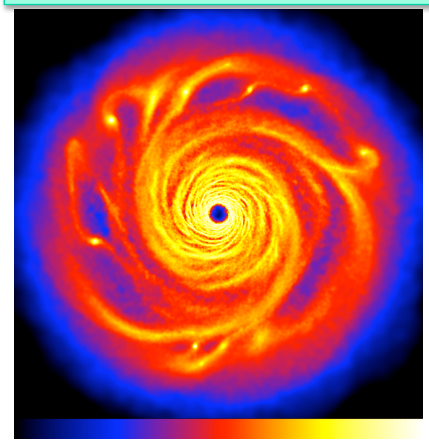
- Esistono due modelli antagonisti
  - Modello di instabilità gravitazionale
  - Modello "core accretion"

- 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



Modelli di formazione dei pianeti giganti

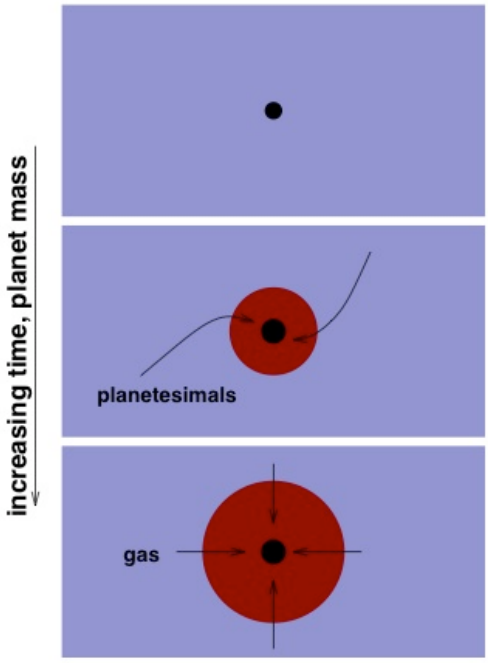
- Modello "core accretion"

  Modello di tipo "bottom-up"

  - Un nucleo solido di massa $M_{core} \sim 10\ M_{terra}$ 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 inviluppo gassoso

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

Evoluzione di sistemi planetari

- Una volta assemblati i pianeti, le loro orbite possono evolvere a causa di tre tipi di meccanismi
  - Interazioni tra i <u>pianeti e il gas nel disco</u> protoplanetario
  - Interazione tra i <u>pianeti e planetesimi</u> ancora presenti nel disco
  - Interazione con un <u>sistema instabile di pianeti massicci</u>
- Tali meccanismi sono supportati da argomenti teorici e dalle proprietà osservate nel Sistema Solare e nei sistemi planetari extrasolari
  - Gli ultimi due meccanismi sono invocati per spiegare, ad esempio, la grande <u>dispersione dei valori di eccentricità</u> degli esopianeti
  - A titolo di esempio, approfondiamo il primo di tali meccanismi, fondamentale per spiegare il fenomeno della <u>migrazione planetaria</u>

Interazioni tra i pianeti e il gas del disco

- Portano a migrazione orbitale
  - Conseguenza dello scambio di momento angolare tra il pianeta e il gas nel disco

    Predetta in tempi non sospetti! Goldreich & Tremaine, 1980
  - Problema complesso da modellare

    L'eventuale migrazione avviene su scale di tempo talvolta comparabili con quelle dei processi di formazione planetaria e di evoluzione del disco gassoso

    Tutti e tre i processi andrebbero modellati simultaneamente per ottenere una predizione autoconsistente
- I modelli predicono due tipi di meccanismi
  - Migrazione di Tipo I
  - Migrazione di Tipo II
- Per poterli descrivere, dobbiamo prima capire in che modo i pianeti interagiscono con il gas

Scambio di momento angolare tra pianeta e gas

- Scambi di momento angolare e risonanze
  - Per orbite circolari, si può dimostrare che lo scambio di momento angolare tra il pianeta e il gas avviene in corrispondenza delle risonanze di *Lindblad*

$$m(\Omega_g - \Omega_p) = \pm k_0$$

m: intero; Ω_g: frequenza angolare del gas; Ω_p: frequenza angolare del pianeta; k_0: frequenza *epiciclica* (contiene una dipendenza dal potenziale gravitazionale stellare)

  - Se il gas si muove esattamente a velocità kepleriana, allora $k_0 = \Omega_g$;

in questo caso le risonanze si trovano ai valori di raggio

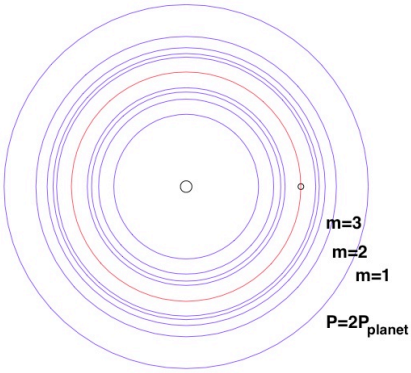
$$r_L = (1 \pm 1/m)^{2/3}\, r_p$$

r_p: raggio orbitale del pianeta

  - A seconda del valore del segno, esistono pertanto risonanze interne ($r_L < r_p$) e risonanze esterne ($r_L > r_p$)

Scambio di momento angolare tra pianeta e gas

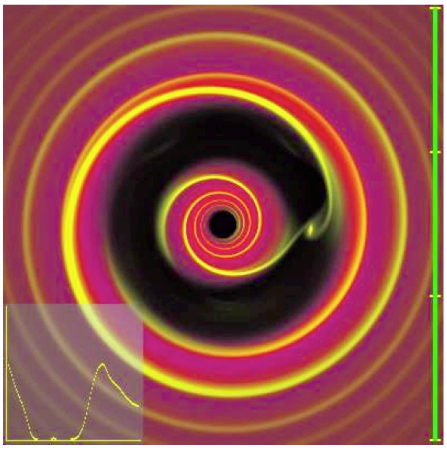
- Le interazioni con le risonanze interne ($r_L < r_p$) fanno guadagnare momento angolare al pianeta
  - il gas perde momento angolare
- Le interazioni con le risonanze esterne ($r_L > r_p$) fanno perdere momento angolare al pianeta
  - il gas guadagna momento angolare
- L'effetto netto di questi scambi mareali è controintuitivo: il pianeta tende a "respingere" il gas
  - Questo succede solo se tali forze mareali superano le forze viscose del disco



In figura si mostrano solo alcune risonanze di ordine basso; le altre risonanze si addensano in prossimità dell'orbita planetaria (in rosso)

Migrazione di pianeti in un disco protoplanetario

- Migrazione di Tipo I
  - Pianeti di piccola massa ($\sim M_{Terra}$) non riescono ad aprire un gap all'interno del disco gassoso
    - Il gas resta al suo posto e tutte le risonanze contribuiscono allo scambio di momento angolare
  - Non esiste un modo di predire quali risonanze sono dominanti
    - I calcoli mostrano però che le risonanze esterne tendono a dominare e pertanto il pianeta perde momento angolare migrando verso l'interno
  - Processo veloce
    - $\sim 10^5$ anni per un disco con massa $\sim 0.01\ M_\odot$
  - Problema: distruggerebbe i pianeti di piccola massa e i cores di pianeti giganti prima che la stella perda il suo disco gassoso
    - Predizione inconsistente con i risultati degli esopianeti
    - Calcoli più recenti indicano che i tempi di migrazione potrebbero essere più lenti

Migrazione di pianeti in un disco protoplanetario

- Migrazione di Tipo II
  - Il pianeta è sufficientemente massiccio (~ M_{Giove}) da aprire un gap nel disco gassoso
    - Le forze mareali superano quelle viscose
  - Il gap inibisce il meccanismo di migrazione veloce di tipo I
    - Il processo è più lento essendoci meno risonanze disponibili
    - Il pianeta migra verso l'interno, trascinandosi dietro il gap, sulla scala di tempo di evoluzione del disco
    - Materiale può continuare a entrare nel gap
  - Meccanismo invocato per spiegare i "giovi caldi"
    - Problema tuttora aperto:
    - Il meccanismo di stop della migrazione