

Formación Planetaria

Tema central a la astrobiología: Potencial único para el habitat de organismos

- ✓ Medio ambiente relativamente estable
- ✓ Ambiente rico en especies químicas, termodinámica apropiada para reacciones moleculares complejas
 - ✓ Fuente de energía permanente: Estrella central, actividad volcánica & tectónica

Existe una gran gama de tipos planetas.

¿Composición química de los sistemas planetarios?

¿Qué determina la arquitectura orbital de estos planetas?

Estos 2 puntos tienen gran impacto en las propiedades de su superficie...

Mecanismos de formación planetaria son, en este momento, *altamente inciertos*.

Considerable progreso en el desarrollo de los fundamentos físico-matemáticos: Teoría completa del proceso
Necesidad de tener una gran gama de “ejemplos”: Diferentes etapas evolutivas & diferentes condiciones iniciales

En esta clase veremos algunos ingredientes fundamentales, usando argumentos físicos básicos

Contexto: Nuestro propio Sistema Solar (¡efecto de selección!).

Nuestro SS: Gigantes de gas & gigantes de hielo

Los planetas *gigantes* dominan la masa planetaria de nuestro SS
Júpiter ($318M_{\oplus}$), Saturno ($95M_{\oplus}$), Urano ($15M_{\oplus}$) & Neptuno ($17M_{\oplus}$)

Extensas atmósferas dominadas por H_2 y He
¡Composición similar a la deducida de discos proto-estelares!

Júpiter y Saturno (*gigantes de gas*): La masa total esta dominada por su atmósfera
(núcleo de material rocoso $\sim 10\text{-}20M_{\oplus}$)
Acumulación de gas “primordial” del disco proto-planetario
(misma % que la acumulada por el proto-Sol)

Urano & Neptuno (*gigantes de hielo*): Gran abundancia metálica
(atmósferas mucho mas pequeñas, núcleo de material rocoso & hielo $\leq 10M_{\oplus}$)
¿Semillas a partir de la cual se forman gigantes de gas?

Property	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
Atmospheric H_2 by volume	89%	96%	83%	80%
Atmospheric He by volume	10%	3%	15%	19%
Metal abundance (relative to Sun)	5	15	300	300
Mean density ($g\ cm^{-3}$)	1.3	0.7	1.3	1.6
Number of satellites	63	60	27	13

Escenarios de Formación

(de planetas gigantes)

Composición de las atmósferas de estos planetas $\Rightarrow$ deben formarse **rápídamente**, durante el período en el que aun existe un disco proto-estelar gaseoso $\sim 3 \times 10^6 - 10^7$ años.

Se barajan *dos modelos*

Inestabilidad gravitacional (IG) & Inestabilidad del núcleo (IC, o de acreción nuclear con captura de gas).

IG: ~Inestabilidad de Jeans: Planetas se forman directamente desde disco proto-estelar.

Acumulación de material sólido gracias al pozo de potencial generado por un fragmento

“Top-down”: El núcleo sólido de los planetas se forma tardíamente.

Requiere de foto-evaporación se encarga de producir los gigantes de hielo: ¿Fuente?

Ventaja: Ocurre rápido (recordar t_{ff})

Desventaja: No hay una “masa característica” (función de masa plana), contrario a las observaciones

IC: Coagulación de partículas microscópicas de polvo $\Rightarrow$ *planetesimales* (~ 1 km)

Colisión y aglomeración $\Rightarrow$ núcleos sólidos de $10\text{-}15 M_{\oplus}$ (*embriones*)

Acreción gravitacional de gas sobre estos núcleos masivos

Ventaja: Mismo mecanismo responsable de formación de planetas rocosos.

Desventaja: Núcleo sólido debe formarse rápidamente, antes que se disperse el gas.

Actualmente se favorece la IC...

Observación: Mas planetas alrededor de estrellas de alta metalicidad

¿efectos de selección?, efectos sobre la “arquitectura” orbital...

¿Ambos mecanismos en acción? campo en rápido desarrollo...

Nuestro SS: Planetas rocosos (o Terrestres)

Mercurio, Venus, Tierra, Marte

Atmósferas tenues, abundantes en “elementos pesados”, masas 1/10-1/100 de los planetas gigantes.

En otros sistemas se observa un “continuo” de masas entre estos pequeños planetas y los planetas gigantes...

Algunas “lunas” de planetas gigantes son comparables a estos planetas rocosos: Ganimides (Jupiter): $0.025 M_{\oplus}$, $0.41 R_{\oplus}$ (¡mayor que Mercurio!). Titán (Saturno) es similar a Ganimides... Entonces, su población puede ser tan significativa como la de los planetas rocosos mismos...elemento significativo para la astrobiología.

Escenario de formación: Acumulación de sólidos (ver etapa inicial en modelo IC), hasta formar grandes cuerpos, en escalas de tiempo de 10^6 - 10^8 años.

Property	Mercury	Venus	Earth	Mars
Mass ($M_{\oplus}$)	0.055	0.82	1.0	0.11
Total mass of atmosphere (kg)	$< 10^3$	5×10^{20}	5×10^{18}	3×10^{16}
Mean density (g cm^{-3})	5.4	5.3	5.5	3.9
Number of satellites	0	0	1	2

Etapas inicial: Coagulación (acumulación) de sólidos.

Observaciones de discos proto-planetarios $\Rightarrow$ 99% de gas, 1% sólidos (por masa),
 $\sim \frac{1}{3}$ masa estelar central, ~ 100 UA (en el SS los sólidos contienen $\sim 0.01 M_{\odot}$).

Mayor incertidumbre: ¿Cómo se acumula el polvo microscópico, parte del disco PP,
en pequeños cuerpos sólidos?

Condensación de polvo $\Rightarrow$ Fenómenos de *nucleación* – fuerzas intra-moleculares
(para + detalles ver Scharf, Capítulo 7.5 y siguientes)

¿Polvo vs. molécula? Los “cirrus IR” ~ 100 átomos, ≤ 10 Å

Aglomeración de polvo, una vez que comienza, procede rápidamente $\Rightarrow$
población de partículas con tamaños cm-m, que se *sedimentan* del gas
concentrándose en el plano del disco PP.

En el disco, estas partículas colisionan, continúa la aglomeración
y se forman los *planetesimales*.

En lo que sigue *asumiremos* la existencia de planetesimales.

Espectro de tamaños de planetesimales:

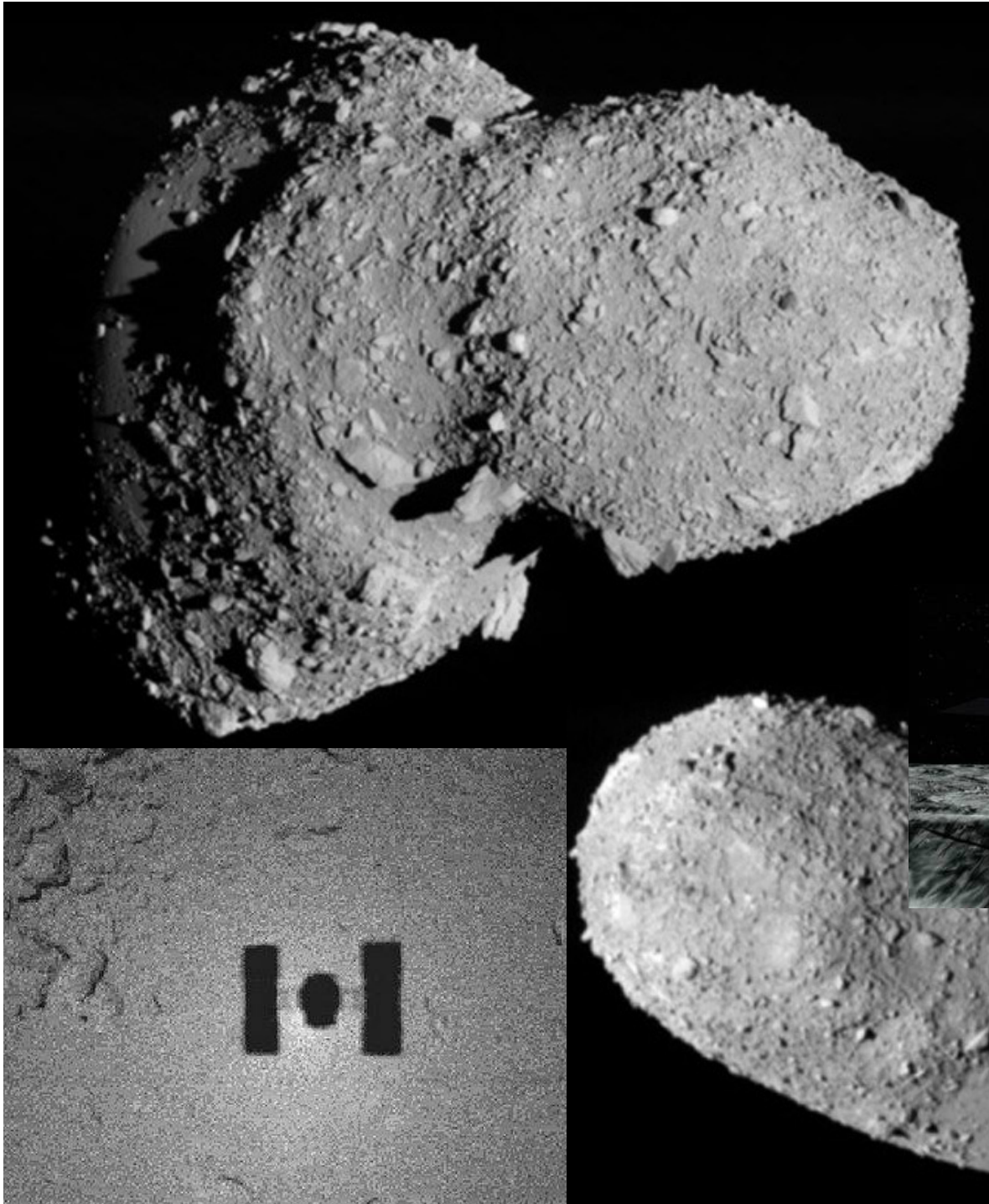
Los mayores serán nuestros *embriones* planetarios,
estudiaremos su evolución temporal.

Impresionante ejemplo de planetesimal:

Asteroide Itokawa
“Aglomerado” de piedrecillas...

550m largo, 224-298m de ancho
 $\rho \sim 1.9 \text{ g cm}^{-3}$

Contiene desde peñazcos hasta
granitos de unos pocos mm,
mantenidos por su (minúscula) auto-
gravedad + fzas. intramoleculares...



Enfoque gravitacional & crecimiento del embrión

$$b^2 = r_{\min}^2 \cdot \left(1 + \frac{2GM_e}{r_{\min} v^2} \right) = r_{\min}^2 \cdot F_g$$

Diagram illustrating the equation for the effective impact parameter b^2 in the context of gravitational focusing.

The equation is: $b^2 = r_{\min}^2 \cdot \left(1 + \frac{2GM_e}{r_{\min} v^2} \right) = r_{\min}^2 \cdot F_g$

Annotations:

- b^2 : Parámetro de impacto “efectivo” (planetesimal se “pega” al embrión si $r_{\min} = R_e$)
- $r_{\min}$: Masa y vel. relativa del embrión
- F_g : Factor de “enfoque gravitacional”
 $F_g = 1$ si no hay gravedad

El embrión “barre” y acumula objetos mas pequeños (planetesimales)...

Su atracción gravitacional le permite agarrar objetos mas allá de su sección eficaz geométrica (R_e)....

Con esta sección eficaz (πb^2) se puede calcula la “tasa de acreción” de planetesimales sobre el embrión...

Para “enfoque débil” ($F_g \sim 1$), la tasa relativa de crecimiento del embrión se hace mas pequeña cuando el embrión crece.

Para $F_g \gg 1$, el embrión crece de manera “explosiva”...

Distribución de tamaños

¿Un embrión único? Probablemente no.

Distribución de masas de planetesimales, que crecen por coagulación (o a expensas) de otros planetesimales.

Notar que la tasa de cambio de tamaño de todo los objetos no depende del tamaño, es la misma:

Objetos mas pequeños comienzan a *asemejarse* a los mas grandes....

la distribución de tamaños *tiende* hacia los objetos mas grandes....

$$\frac{dR_e}{dt} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_e} \cdot v$$

← Densidad espacial de planetesimales

← Densidad espacial de embriones

[Caso de enfoque gravitacional débil (¡etapas iniciales!)...]

Ecuación de coagulación

A medida que los planetesimales se “funden”, la estadística de la distribución de tamaños cambia:

Crece el número de objetos *mas grandes*, a expensas de una disminución del número de *objetos pequeños* (“limpieza del disco PP”)

Esto está descrito por la “**ecuacion de coagulación**”

$$\frac{dn_k}{dt} = \underbrace{\frac{1}{2} \sum_{i+j=k} A_{ij} n_i n_j}_{\text{Aumento de } n_k \text{ debido a la colisión y fusión de objetos mas pequeños}} - \underbrace{n_k \sum_{i=1, i \neq k}^{k_{\max}} A_{ki} n_i}_{\text{Disminución de } n_k \text{ debido a la incorporación en objetos de mayor tamaño.}}$$

n_k = Número de objetos con masa $m_k = k \times m_1$
 k entero.
 Masa “primordial” m_1

A_{ij} = Probabilidad (en [s⁻¹]) de colisión (& fusión) entre planetesimales de masa m_i y m_j

Solución numérica, no es tan simple... (+ disrupción & fragmentación)

Un caso “analítico” es cuando $A_{ij} = cte = \alpha$ (OK para etapas iniciales)

Resultado ecuación de coagulación

Evolución con $A_{ij} = \alpha$

Inicialmente no hay objetos con $k > 1$...

Objetos con $k > 1$ crecen en el tiempo, a expensas de $k=1$

¡Eventualmente el número de objetos de **todos** los tamaños se hace muy similar! (ver gráfico de + abajo).

Notar que todas las masas tienen un máximo de abundancia, que luego decrece.

$$\tau = \frac{1}{\alpha \cdot n_1(t=0)}$$

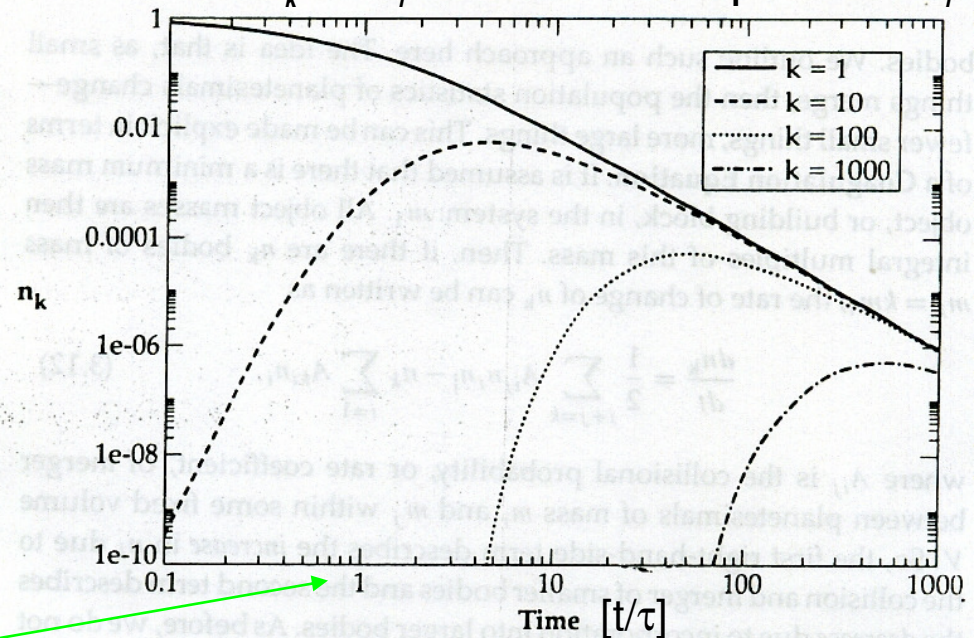
Todas las curvas tienden asintóticamente a la unidad...

El número de objetos con k grande crece con el tiempo, pero...

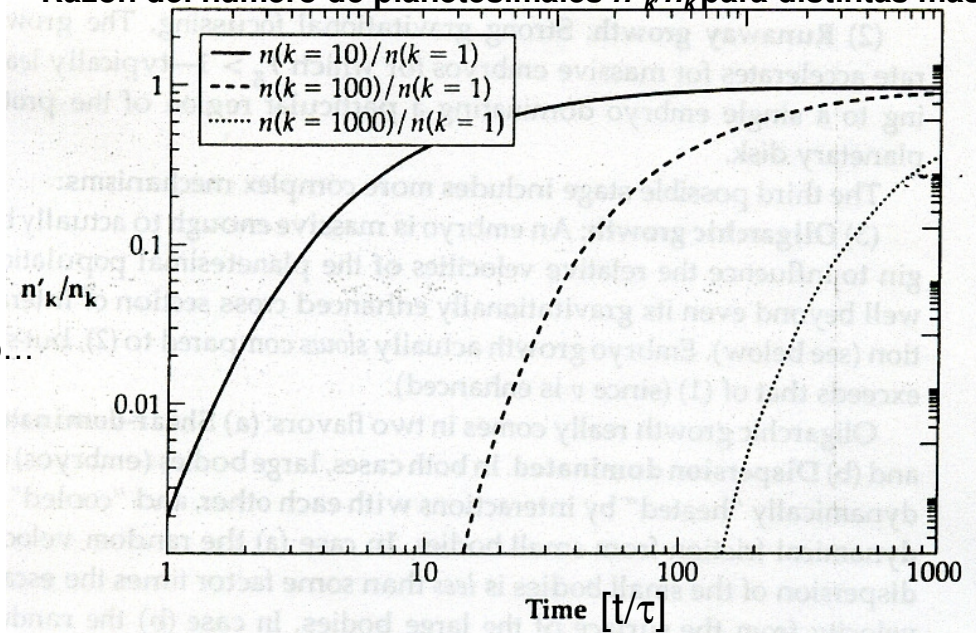
la distribución de masas "se aplana".

Notar que la normalización de este gráfico, n_1 ,
cambia en el tiempo.

n_k = Número (unidades arbitrarias) de objetos con
masa $m_k = k \times m_1$ con k entero. Masa "primordial" m_1



Razón del número de planetesimales n'_k/n_k para distintas masas



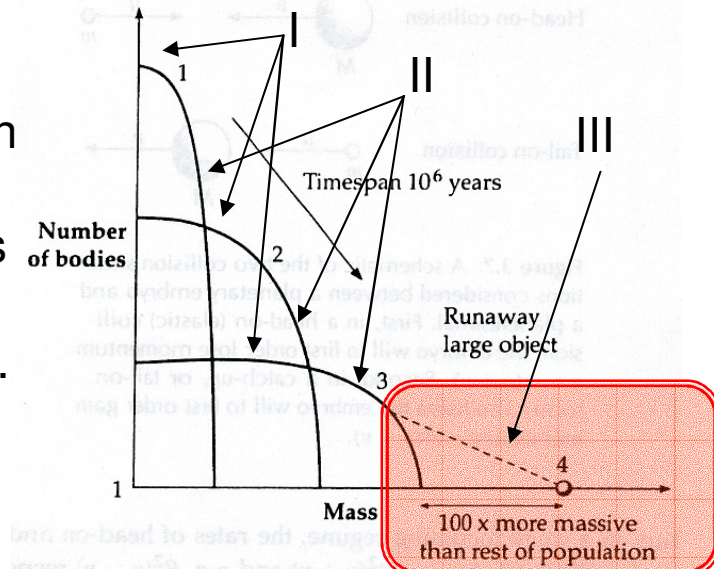
Etapas de crecimiento (del embrión)

Modelo de acreción nuclear, IC

Se distinguen tres etapas embrionarias:

- I. **Crecimiento “ordenando”:** F_g pequeño, el crecimiento relativo de los embriones disminuye en el tiempo. Los objetos tienden a igualarse en tamaño.
- II. **Crecimiento “explosivo”:** F_g grande. La tasa de crecimiento se acelera para embriones masivos, un embrión domina una región particular del disco protoplanetario.
- III. **Crecimiento “oligárquico”:** El embrión es tan masivo, que afecta la velocidad de los planetesimales cercanos (equipartición de energía), mas allá *de* b (radio efectivo de influencia gravitacional). El embrión sigue creciendo, pero mas lentamente que en II. Crecimiento *estocástico*.

Simulaciones numéricas $\Rightarrow$ Típicamente en una región dada (ver “radio de Hill”+adelante), un embrión experimenta crecimiento descontrolado, y coagula los planetesimales dentro de su zona de influencia, inhibiendo además el crecimiento de otros embriones.



Equipartición de la energía

Resultado neto de colisiones entre el embrión (v) y los planetesimales (v).
Colisiones "de frente" (embrión pierde momentum) y
"de cola" (embrión gana momentum)

$$\frac{1}{u} \cdot \frac{du}{dt} = -4\pi n_s R_e^2 v \left(\frac{m}{M_e} \right)$$

¡El embrión tiende a detenerse c/r a los planetesimales! ("enfriamiento" dinámico)

Los planetesimales **ganan** energía cinética a expensas del embrión, que la pierde

↓

Equipartición: "Calentamiento dinámico" de los planetesimales debido a este efecto

NB: Si n_s , v y m son $\sim$ constantes, la escala de tiempo para "equipartición" es aproximadamente igual al tiempo en que el embrión coagula M_e .

Para enfoque fuerte,
$$\frac{dM_e}{dt} = 2\pi G \rho_s \left(\frac{M_e R_e}{v} \right)$$

Como v crece por equipartición, el crecimiento tardío del embrión (post-crecimiento explosivo, i.e., etapa oligárquica), tiende a hacerse mas lento...

Etapas finales del crecimiento

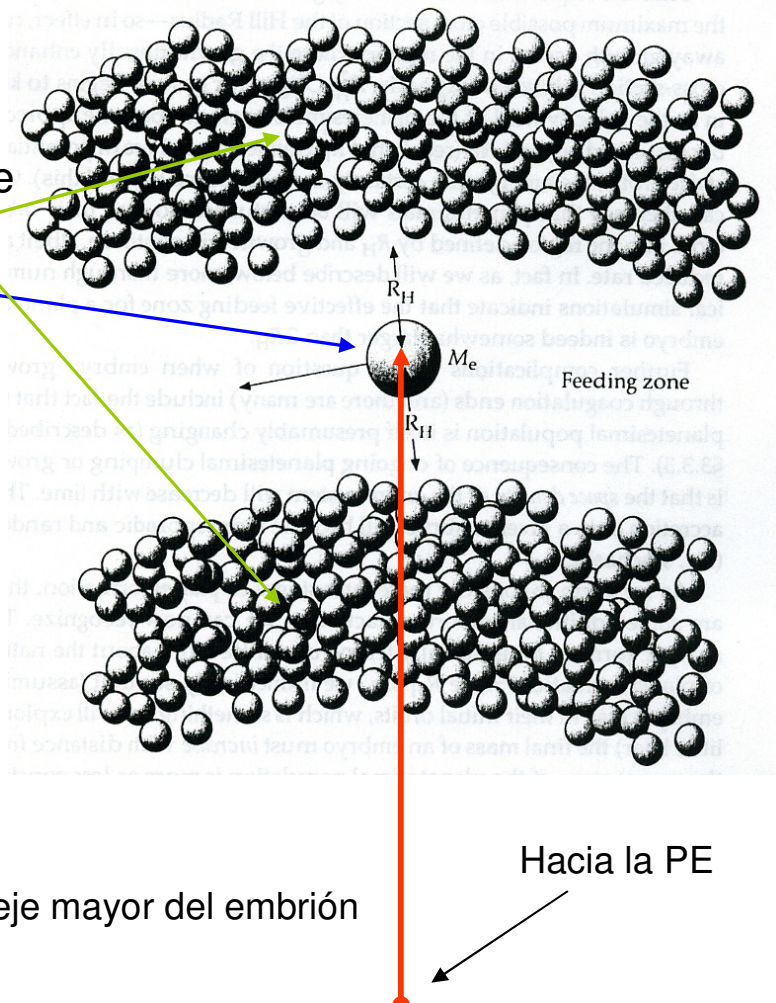
Crecimiento cesa cuando se acaba el “alimento” (planetesimales).

La “zona de alimentación” está dada, *en principio*, por la sección eficaz que barre el embrión (y que ya hemos calculado, el factor “ b ”). Pero...

En la derivación de b sólo se considero un sistema de 2 cuerpos. Pero, el **embrión** (y los **planetesimales**), giran alrededor de su protoestrella → efectos de marea. Este sistema de “3 cuerpos” define una distancia máxima de influencia desde la cual el embrión puede efectivamente “coagular” material, conocida como “**radio de Hill**”.

$$R_H = \frac{a_e}{\sqrt[3]{3}} \cdot \left(\frac{M_e}{M_e + M_*} \right)^{1/3}$$

a_e : semi-eje mayor del embrión



Etapas finales del crecimiento (*cont.*)

El crecimiento explosivo sólo dura en tanto haya suficiente material para coagular

Luego comienza a ser mas importante el crecimiento oligárquico (simul $\Rightarrow R_{alim} \sim 2R_H$)

Baja densidad de planetesimales $\Rightarrow$ crecimiento *esporádico y aleatorio* del embrión

Como $R_H \propto a_e$, la masa final del embrión **crece** con la distancia a la PE

Masa final del embrión: Masa de "confinamiento"

$$M_e^{conf} = 2\pi a_e \cdot 2BR_H \cdot \sigma = \frac{(4\pi B a_e^2 \sigma)^{3/2}}{(3M_*)^{1/2}} \cong 0.013 M_{\oplus} \quad \text{a 4 UA del Sol...}$$



Se requiere de fusiones estocásticas de ~ 100 objetos de tipo lunar

También, dispersión de objetos dentro del sistema: Impactos & pasajes cercanos

Resumen, formación planetaria.

Procesos complejo $\Rightarrow$ diversidad de sistemas planetarios

Colapso de nube molecular $\rightarrow$ formación de objeto PE de $1M_{\odot}$ en $\Delta t \ll 10^6$ años

Foto-evaporación desde la PE central disipa el gas remanente en $\Delta t \sim 10 \times 10^6$ años
 $\Rightarrow$ planetas (gaseosos) deben formarse rápidamente.

Coagulación de partículas de polvo & moléculas en cuerpo pequeños (cm), que caen (sedimentan) hacia el disco proto-planetario

En menos de 10^6 años, formación de planetesimales (~ 1 km) y embriones ($\sim 0.1M_{\oplus}$)

Aglomeración y crecimiento gravitacional $\rightarrow$ población de objetos de igual tamaño.

En el esquema IC, enfoque gravitacional $\rightarrow$

Crecimiento descontrolado & crecimiento oligárquico $\Rightarrow$ Núcleo de planetas gigante de $\sim 10M_{\oplus}$ en $\Delta t \sim 1-3 \times 10^6$ años. Acreción subsecuente de gas, por gravedad (Jupiter, Saturno).

La densidad de masa del disco en las afueras es menor, el crecimiento del embrión es mas lenta, y se recolecta menos gas (Urano, Neptuno).

Luego de $\sim 10 \times 10^6$ años, evolución continúa debido a colisiones violentas de grandes oligarcas.

Resumen etapas de formación planetaria.

Resultado de simulaciones en el modelo IC
¡Notar la gran diversidad de planetas resultantes!

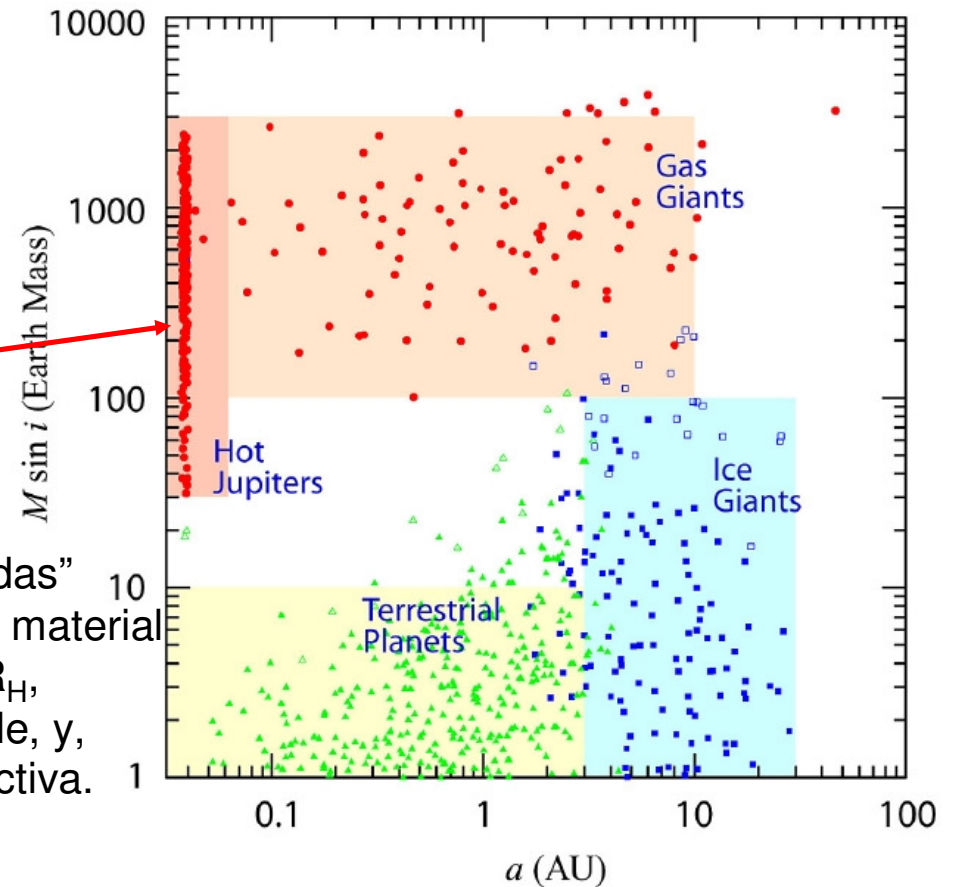
$$1 \leq M/M_{\oplus} \leq 10^3$$

Rocosos & Gigantes de Hielo:
 $0.1 \text{ UA} \leq a \leq 30 \text{ UA}$

Gigantes de Gas:
 $0.04 \text{ UA} ("migración") \leq a \leq 10 \text{ UA}$

Escalas de tiempo **VIP** en este mecanismo: “Ayudas”

- a) Mas allá de la “línea de hielo”, hay ~4-5x más material sólido disponible para el embrión dentro del R_H ,
- b) Migración planetaria $\Rightarrow$ mas “alimento” disponible, y,
- c) Acreción de gas aumenta la sección eficaz efectiva.



¿Formación planetaria en sistemas binarios?

Varios exo-planetas descubiertos en sistemas binarios de gran separación
($50 \text{ UA} \leq a \leq 7000 \text{ UA}$)