

FORMACION DEL SISTEMA SOLAR

Dispersion del gas: 10 Ma. Formacion planetaria: 100 Ma.

1 Condicionamientos observacionales

- movimientos planetarios coplanares y directos. Cuasi resonantes: migracion orbital
- edad: 4568 Ma segun edad de condros y CAIs en meteoritos
- condros y CAIs: calentamiento y enfriamiento rapido
- granos interestelares: algunas regiones permanecieron frias
- densidades y tamaños: gradiente composicional
- abundante H y He en J y S pero escaso en U y N
- reconstruccion de densidad superficial nebulosa primitiva solar
- poblaciones de asteroides y cometas
- sistemas de satelites: regulares sincronicos e irregulares retrogrados
- composicion isotopica casi uniforme: material primitivo mezclado
- interiores diferenciados: pasado caliente
- superficies: alta tasa de impactos en el pasado
- momento angular: (sol/planetas) $\ll 1$ y (planetas/satelites) $\gg 1$
- observacion de discos y sistemas extrasolares

2 Formacion de elementos

- Big Bang: 25% He, 75% H, poco D, H₃, He₃, Li, Be, B
- nucleo estelar: por fusion todo hasta el Fe y por captura de neutrones + decaimiento beta los elementos mas pesados (procesos r, s, p).

3 Formacion estelar

- nubes moleculares: varios AL de diametro, masa $\sim 10^6 M_{\odot}$, basicamente H₂, (CHONS) y granos generados en SN, nucleos densos de $T \sim 10$ K.
- pasaje por brazo espiral u onda de choque de SN: cuando $E_p > 2E_c$ comienza colapso. Masa de Jeans.
- colapso en varios nucleos
- tiempo de caida libre (0.1 Ma)
- densidad crece, opacidad crece y crece T: vaporizacion del polvo
- la fuerza centrifuga anula la contraccion en el plano ecuatorial: disco

- rotacion mas rapida lleva a fragmentacion
- disco se enfria
- protoestrella: fusion de D en He ($T = 1$ millon K), destruccion de D solar, relacion D/H en jovianos y meteoritos mayor que la solar
- acabado el D se contrae, crece la T
- fusion de H en He al llegar a 10 millones de grados
- la protoestrella es invisible cubierta por la nube de polvo fria
- comienza viento TTauri, rotacion de horas-dias
- flujo bipolar (y objetos Herbig-Haro): pierde momento angular
- outbursts vinculados a acrecion de material del disco
- discos de polvo de 100 a 1000 ua, visibles por HST, IRAS
- discos con masas observadas entre 0.001 y 0.1 M_{\odot}
- gaps y anillos en el disco producidos por planetas
- nebulosa primitiva solar: proto-Sol + disco protoplanetario

4 Disco protoplanetario

- reconstruccion de la densidad superficial original (Weidenschilling, Hayashi): MMSN $0.02M_{\odot}$
- escala de altura H_z
- colapso: partes proximas acretan al sol
- partes alejadas, con gran momento angular, no caen directo al sol pero impactan al disco calentandolo
- disco caliente ($T \sim 1500$ K a 1 ua) por la compresion del gas que precipita al disco desde $z \neq 0$
- la componente V_z del gas se anula
- intercambio de momento sol-disco (determina relacion masa estrella / masa disco) por:
 - torques magneticos: el campo magnetico del sol en rotacion arrastra al disco ionizado. Frena y hace caer hacia el sol al medio proximo al sol y acelera y cede momento angular al medio mas alejado
 - torques gravitacionales por ondas de densidad
 - torques por difusion viscosa: particulas interiores rapidas colisionan con exteriores lentas transmitiendoles momento
- parte del disco cae a la estrella y es eyectado por flujos bipolares: ¿formacion de condrolos y CAI ?
- la temperatura decrece con la distancia al sol: los elementos refractarios condensan (compuestos de metales a 4568 Ma y luego rocas 4500 Ma). Se inicia la quimica del disco.
- mas alla de 3.5 ua la $T < 200$ K y el hielo de agua aparece.
- reacciones quimicas aceleradas cerca del sol y retardadas lejos del sol. Aparecen CO, CO₂, CH₄, N₂, NH₃, H₂O, HCN
- limpieza via TTauri y alta luminosidad solar (20-30 veces la actual): se dispersa el gas libre no acretado a los 10 Ma de iniciado el proceso.

5 Formacion de granos, planetesimales (1 km) y embriones (proto-planetas)

- al bajar la temperatura se forman los primeros granos, condensados de silicatos y compuestos de Fe. Sostenidos por fuerzas de van der Waals, estructura fractal.
- decantacion al disco por friccion con gas: crecen 1 cm/año
- dentro del disco los granos se mueven mas rapido que el gas pues este tiene gravedad efectiva menor por presion gaseosa. El gas frena a los granos. Frenado es mas efectivo para granos del orden de metros: en 100 años chocarian con el sol.
- crecimiento de granos: al caer al protosol colisionan entre si y crecen hasta llegar al kilometro, para los cuales el frenado es despreciable. Queda una poblacion de planetesimales de tamaño del orden de kms de diametro.
- hacia el exterior del SS estos procesos son mas lentos
- las perturbaciones gravitacionales se empiezan a sentir, las orbitas se excitan
- los pequeños se excitan mas que los mayores: estos sufren friccion dinamica
- acrecion runaway de embriones (oligarquico): aparecen algunos grandes embriones que acretan todo lo que tienen cerca por enfoque gravitacional: se "despegan" de la poblacion en cuanto a crecimiento. Crecen hasta que acretan todo lo que habia en su zona de influencia (algunas R_H)
- mas alla de 3.5 ua la masa acretable es mayor por existir hielo
- migracion de embriones

6 Formacion de planetas terrestres

- simulaciones sugieren un minimo de $2 M_{\oplus}$ en disco para formar los planetas terrestres
- colisiones entre embriones: acrecion versus destruccion, origen de la Luna hace 4500 Ma, Mercurio debe haber perdido su corteza original
- corteza fundida: la acrecion no libera suficiente calor como para producir la fusion completa del embrion pero si en la corteza
- calentamiento (incluyendo decaimiento radiactivo de ^{26}Al y otros) produce diferenciacion y desgaseamiento
- atmosferas primitivas por desgaseamiento e impactos (generacion de blanketing)
- formacion de litosfera y aparicion de actividad geologica
- la Tierra se forma en 100 Ma.

7 Formacion de planetas gigantes

- la presencia de H y He en J y S implica que se formaron en los 10 primeros Ma, antes de la dispersion del disco gaseoso
- la relacion D/H en J y S igual a la del medio interestelar
- observacion en cumulos: objetos formandose con masa inferior a $13 M_J$ generarian "Free Floating Planets"
- desierto de enanas marrones: formacion planetaria es diferente de la formacion de enanas marrones

- mecanismo mas probable: (core nucleated accretion model) formacion de embrion que acreta gas en forma acelerada ("runaway")
- alternativa: nucleo gaseoso que colapsa (implicaria disco muy masivo de $1 M_{\odot}$)
- U y N no alcanzan runaway

8 Migracion planetaria por interaccion con disco de gas

- desigual intercambio de momento con el disco interno y externo
- predomina la caida hacia la estrella
- tasa de migracion proporcional a la masa: migracion Tipo I
- "mortalidad infantil": pueden caer a la estrella
- para planetas con masa $\sim 1M_J$ cuando $R_H > H_z$ se abre un gap y se enlentece la migracion: Tipo II
- captura en resonancias orbitales y spin-orbita por mareas (hot Jupiters)

9 Migracion planetaria por interaccion con planetesimales

- intercambio de momento por encuentros con planetesimales: J pierde momento y SUN ganan (Fernandez & Ip)
- pasaje del sistema Jup-Sat por la resonancia 1:2 que excita a Neptuno y genera LHB (Modelo de Nice)
- captura en resonancias: Neptuno-Pluton, troyanos

10 Satelites planetarios

- en los planetas gigantes los satelites regulares formados por materia no acretada en el planeta por poseer gran momento angular.
- por mareas e intercambio de momento quedan sincronicos y en resonancia
- satelites galileanos: gradiente composicional debido a luminosidad de jupiter, migracion y captura en resonancia
- irregulares: capturados
- anillos de vida corta
- los planetas terrestres no pueden generar satelites por tener disco poco masivo: son capturados o recreados luego de colision catastrofica (Luna a partir de planeta como Marte o gemelo de la Tierra)

11 Cuerpos menores

- asteroides: zona muy perturbada por Jupiter, evolucion colisional de planetesimales de 100 km
- perdida de masa a lo largo de la vida del SS, masa inicial ~ 200 masa actual
- cometas: JSUN dispersan hacia Oort ($\sim 1M_{\oplus}$) e hiperbolicos en relacion hip/Oort = 10 o mas
- masa removida de la region planetaria del orden de 10 a $1000 M_{\oplus}$
- inyeccion en nube de Oort: primero crece semieje y luego por mareas galacticas crece el perihelio

- KB formado in situ con masa inicial de algunas decenas de M_{\oplus} (masa inicial ~ 100 masa actual)
- Neptuno inyectado en la region exterior (modelo Nice) genera el Late Heavy Bombardment hace 3900 Ma, luego cae la frecuencia de impactos
- captura de Troyanos por migracion de Jupiter

12 Rotacion planetaria

- resultado de acrecion continua e impactos
- p. gigantes: rotacion progradada consecuencia de acrecion de nebulosa
- p. terrestres: explicable si los planetesimales migraran al sol
- impactos violentos son responsables por oblicuidades altas (Urano, Pluton, Luna sin volatiles).
- las inclinaciones actuales son compatibles con $M_{\text{proyectiles}}/M_{\text{planetas}} < 0.1$
- estabilizacion de spin Tierra debido a la Luna, spin caotico en Marte (Laskar)

13 Sistemas extrasolares

- escenarios bien diferentes al del SS
- sesgo observacional favorece la deteccion de planetas masivos, excentricos y proximos a la estrella
- proximos a la estrella: migracion, mareas con la estrella producen circularizacion y rotacion sincronica, muy alto calentamiento atmosferico (hot Jupiters)
- en su migracion los hot Jupiters eyectan los terrestres en su camino
- hot Jupiters con alta inclinacion: ¿Kozai, eyecciones?
- altas excentricidades: eyeccion de planetas (contribuyen a FFP)
- sistemas planetarios en resonancias: captura en resonancia
- si la nube primitiva tiene masa $< 13 M_J$ no se forma una estrella sino un "free-floating planet" o planeta sin estrella
- estrellas con alta metalicidad albergan mas planetas: formacion planetaria favorecida por metalicidad del medio

14 Evolucion de la Tierra

- hace 3800 Ma: origen de la vida en el oceano, primeras celulas
- hace 3600 Ma: estromatolitos, primeras comunidades de bacterias, liberan oxigeno en el oceano
- hace 3000 Ma: la corteza continental crece a partir del reciclaje de la oceanica
- hace 2500 Ma: saturado el oceano, crece el oxigeno en la atmosfera. Depositos de Fe bandeado. El dia duraba 19 horas.
- hace 1900 Ma: celulas con nucleo y reproduccion sexual
- hace 1300 Ma: organismos pluricelulares
- hace 850 Ma: episodio Tierra bola de hielo, temperatura 220 K, la vida a punto de extinguirse

- hace 600 Ma: capa de ozono, supercontinente Pannotia en forma de V
- hace 540 Ma: explosion del Cambrico, concentracion de CO₂ 15 veces superior a la actual
- hace 520 Ma: origen de la columna vertebral en el agua
- hace 450 Ma: primeras plantas en los continentes
- hace 420 Ma: mandibula
- hace 360 Ma: semilla
- hace 250 Ma: extincion del Permico, la mayor en la historia de la Tierra, tal vez por masiva actividad volcanica. Formacion de Pangea.
- hace 230 Ma: origen de dinosaurios y mamiferos
- hace 220 Ma: reptiles voladores
- hace 150 Ma: aves. America y Africa se separan, se forman los Andes.
- hace 130 Ma: flores
- hace 100 Ma: peces dominan los mares
- hace 65 Ma: extincion KT liquida los dinosaurios, impacto de asteroide de 10 km en Yucatan, crater Chicxulub
- hace 30 Ma: la India colisiona con Asia y se forman los Himalayas

Fuentes: Fundamental Planetary Science (Lissauer and De Patter), The Exoplanet Handbook (Perryman), Tira del Tiempo y la Vida (MEC).