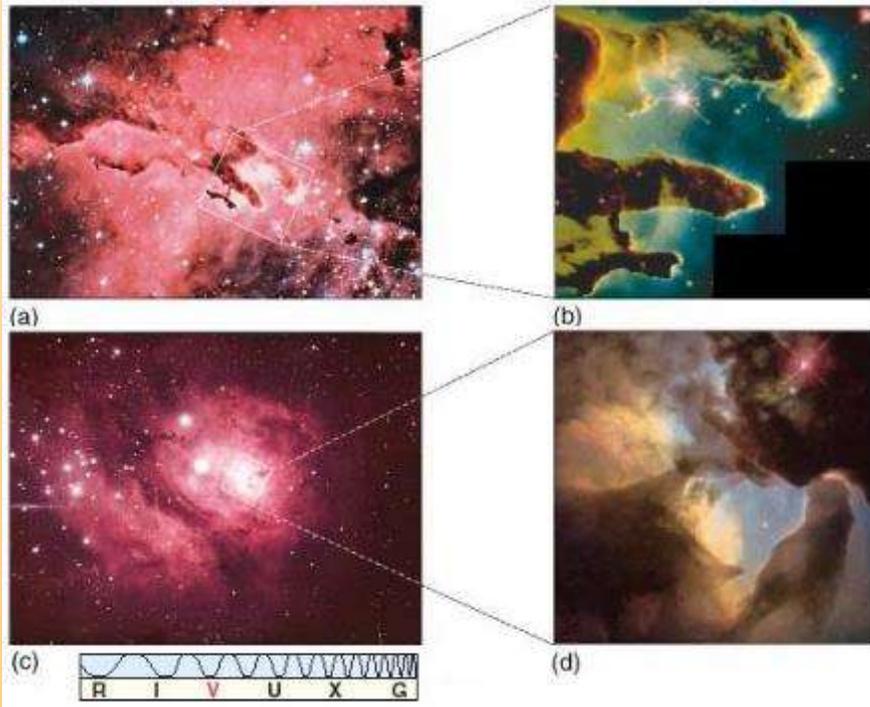


Sistemas Planetarios

Origen de Sistemas Planetarios

Todas las historias tienen un comienzo...



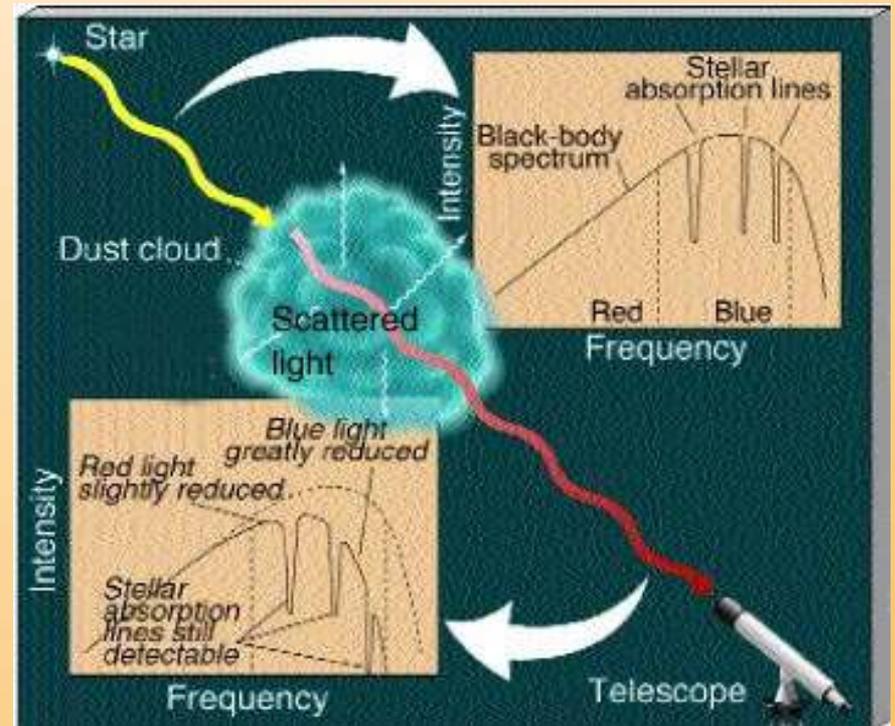
?



Medio Interestelar

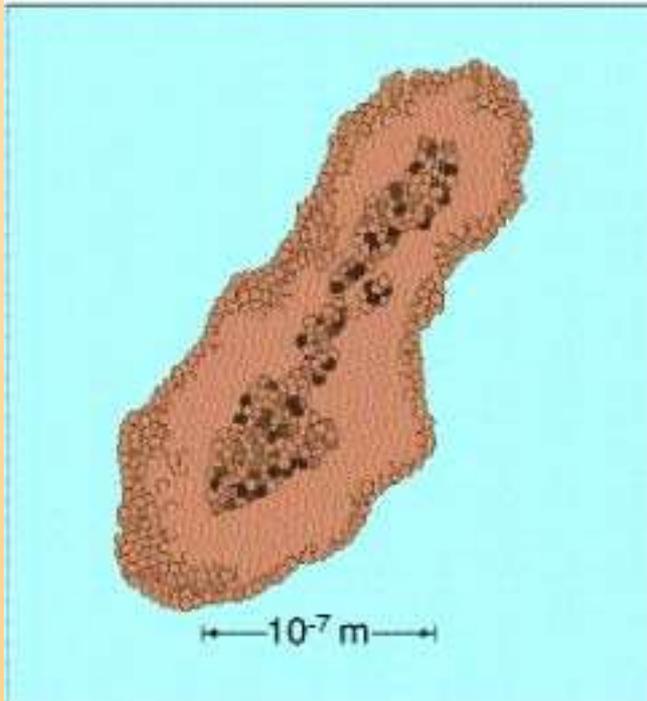
■ Dos componentes:

- **Gas:** principalmente átomos de tamaño promedio de 1nm (10^{-10} m) y algunas moléculas (10^{-9} m).
- **Polvo:** partículas de 10^{-7} m (longitud de onda comparable a la luz visible, opacidad para longitudes de onda cortas en V).
 - Scattering
 - Extinción
 - Enrojecimiento
 - No se alteran las líneas espectrales



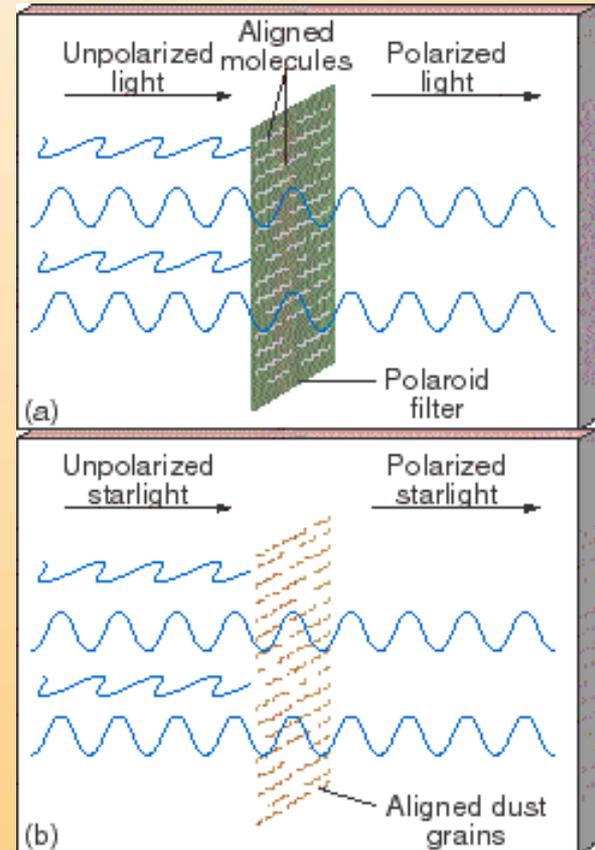
Composición

- **Gas:** a través de espectroscopía
 - 90 % Hidrógeno atómico o molecular
 - 9 % Helio
 - 1 % ‘elementos pesados’ con deficiencia en carbono, oxígeno, silicio, magnesio y hierro (‘atrapados en el polvo’)
- **Polvo:**
 - Indicios de silicio, grafito y hierro
 - ‘Hielo sucio’: hielo de agua contaminado con metano y amoníaco
 - Composición similar a un núcleo cometario
- **Forma del polvo:**
 - Los granos de polvo son elongados (polarizan la luz no polarizada de una fotósfera estelar de acuerdo a su alineación)
 - ¿Evidencia de un débil campo magnético interestelar ?



Forma elongada de un grano de polvo

- a) Filtro Polaroid en un laboratorio
- b) Filtro de granos de polvo interestelar, según como estén alineados los granos



Nebulosas

- **Nebulosas de emisión:**

12° del plano galáctico en
dirección a Sagitario

M17 y M20 (ampliadas)

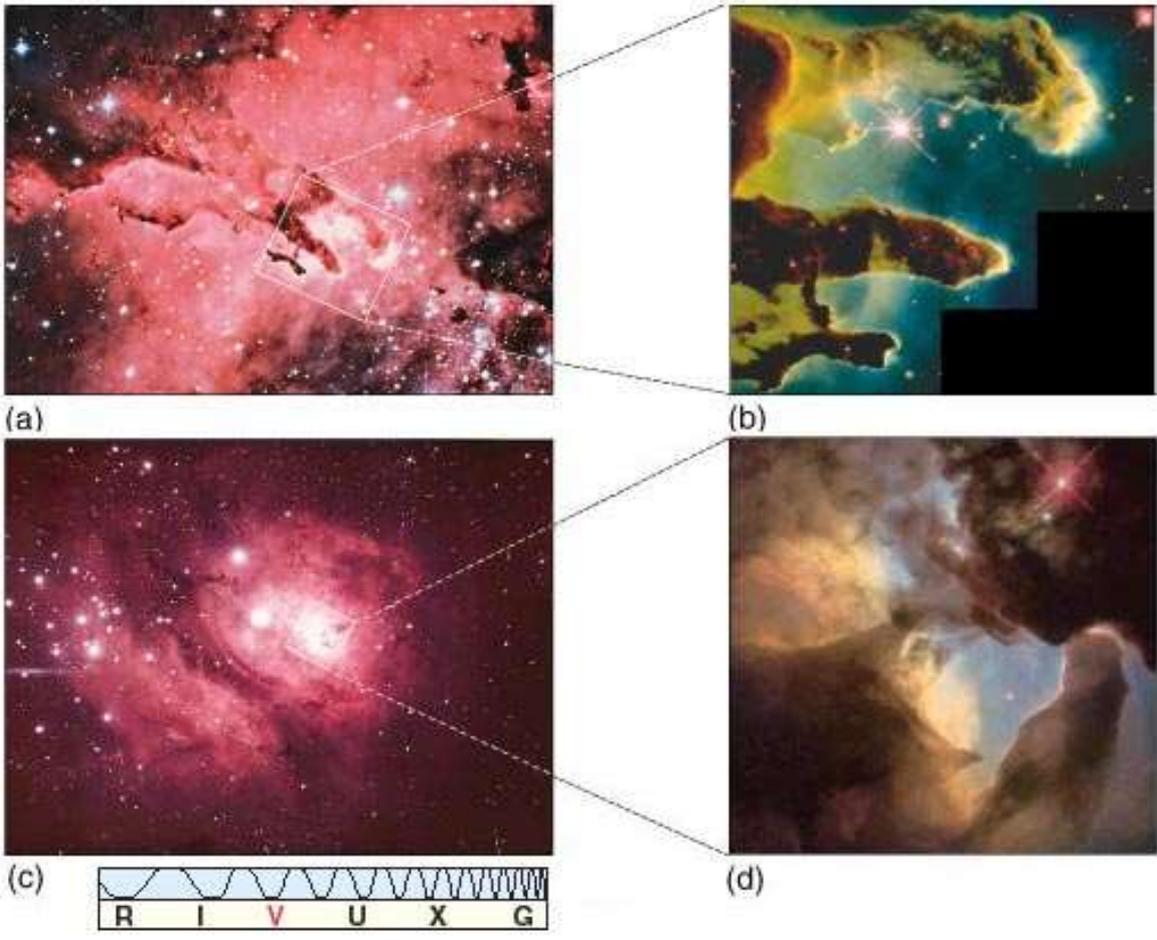
Nebulosas de emisión

Nubes iluminadas formadas
por materia interestelar
caliente

M20 (4pc de diámetro).
Nebulosa Trífida



Nebulosas de emisión



M16 (Aguila), ampliada
Con el HST

M8

Nebulosas de emisión

- Están formadas por gas ionizado y en su proximidad tienen una estrella joven de tipo O o B que emiten gran cantidad de radiación UV.
- La radiación UV ioniza el gas cercano y los e^- a medida que se recombinan con núcleos emiten radiación visible y calientan el gas, haciéndolo brillar.
- **Fotoevaporación:** proceso por el cual la radiación de las estrellas recién formadas dispersa el gas en los alrededores. Este proceso es dinámico. (Ej: los tres pilares de la nebulosa del Águila desaparecerán en algunos cientos de miles de años, este proceso es análogo a la erosión por lluvia o viento en la Tierra).
- **Enrojecimiento:** fenómeno característico en las nebulosas de emisión causado por la emisión de H_{α} (656.3 nm), región del rojo en el visible.

Nebulosas de emisión

- Un problema de notación:
 - Los estados de ionización de un átomo se indican con números romanos.
 - Pero... el **I** el para el estado neutro.
 - Como las nebulosas de emisión están compuestas fundamentalmente de hidrógeno ionizado se las conoce como **regiones HII**.
- También aparecen líneas de emisión correspondientes a otros elementos como el **OIII** (línea ‘prohibida’, azul en la imagen de M8)

Algunas propiedades de estas nebulosas

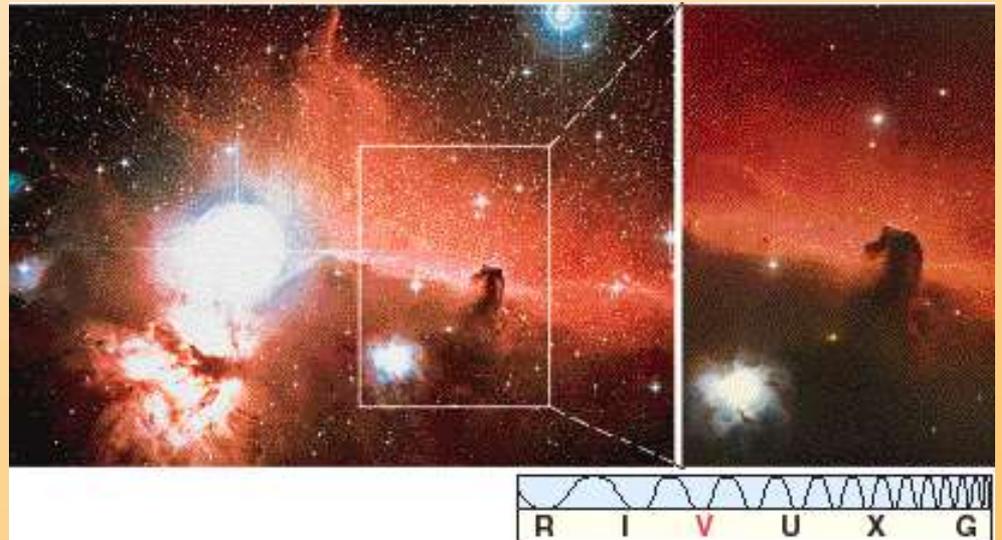
TABLE 18.1 Some Nebular Properties

OBJECT	APPROX. DISTANCE (pc)	AVERAGE DIAMETER (pc)	DENSITY (10^6 particles/m³)	MASS (solar masses)	TEMPERATURE (K)
M8	1200	14	80	2600	7500
M16	1800	8	90	600	8000
M17	1500	7	120	500	8700
M20	900	4	100	150	8200

Nebulosas oscuras de polvo (absorción)

- Están compuestas por gas y polvo (el cual produce la absorción de la luz).
- Su temperatura es mucho menor que la del entorno (pocas decenas de K) y millones de veces mas densas (10^6 átomos/cm³).
- Tamaño: mayores que nuestro Sistema Solar y hasta varios parsecs de distancia.
- Forma: irregulares.

Nebulosa Cabeza de Caballo



¿Cómo nacen las estrellas?

- Por el colapso de una porción de una nube interestelar.
- ¿Por qué colapsa? Gravedad vs. energía cinética (SN?, ondas de presión de estrellas O – B?)
- $E_g = -f \cdot GM^2/R$, para densidades uniformes $f=3/5$, si hay cierto grado de concentración $f=1$
- Suponiendo N partículas que forman la nube con m la masa molecular media $M = N \cdot m$
- E_k (energía cinética) = $3/2 N \cdot k \cdot T = 3/2 \cdot M/m \cdot k \cdot T$
- Para el colapso gravitacional $E_g > E_k$ (condición de colapso)
- Si introducimos el concepto de densidad media (☞)

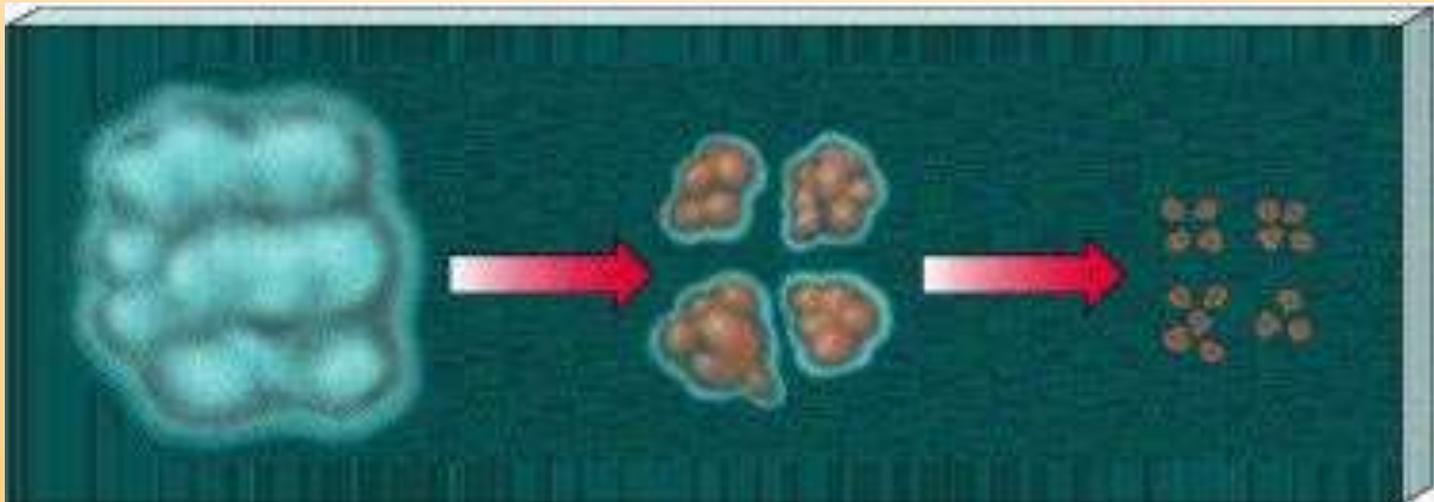
$$M = 4/3 \cdot \rho \cdot R^3 \cdot \phi$$

Imponiendo la condición de colapso

$$\rho = 3/(4 \cdot \phi \cdot M^2) \cdot (3 \cdot k \cdot T / 2 \cdot G \cdot m)^3 \text{ (densidad crítica de Jeans, se puede despejar la masa)}$$

¿Cómo nacen las estrellas?

- Utilizando el criterio de Jeans el colapso gravitatorio se da para 100 masas solares, lo cual es mucho para una sola estrella.
 - Conclusión: las estrellas se forman en grupos.



De la nube primordial se forman decenas o cientos de estrellas
Tiempo del proceso: algunos millones de años

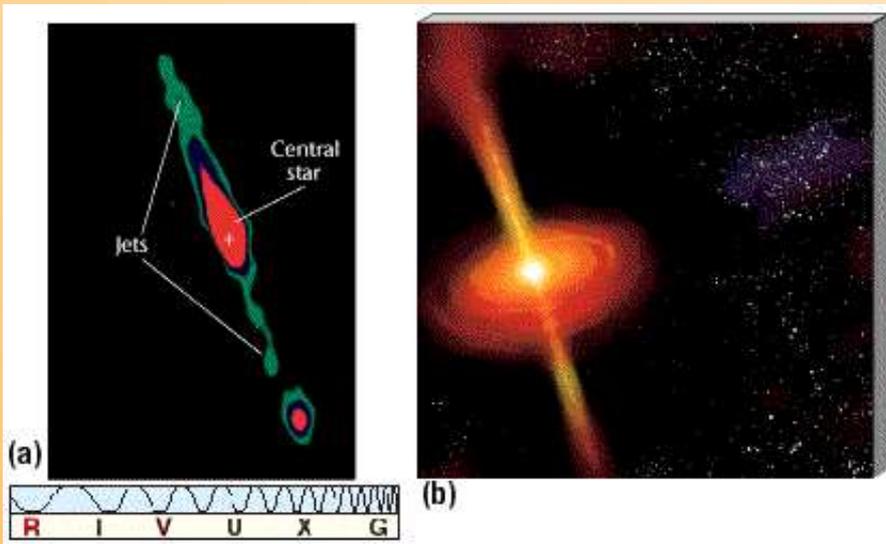
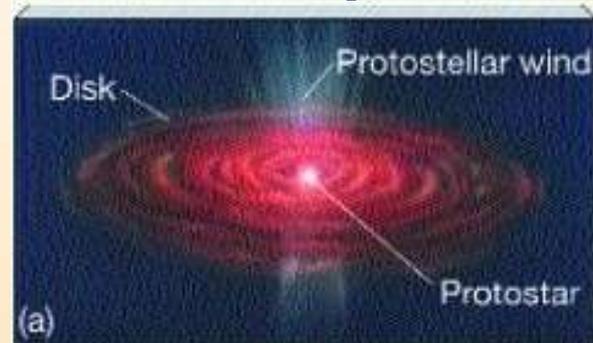
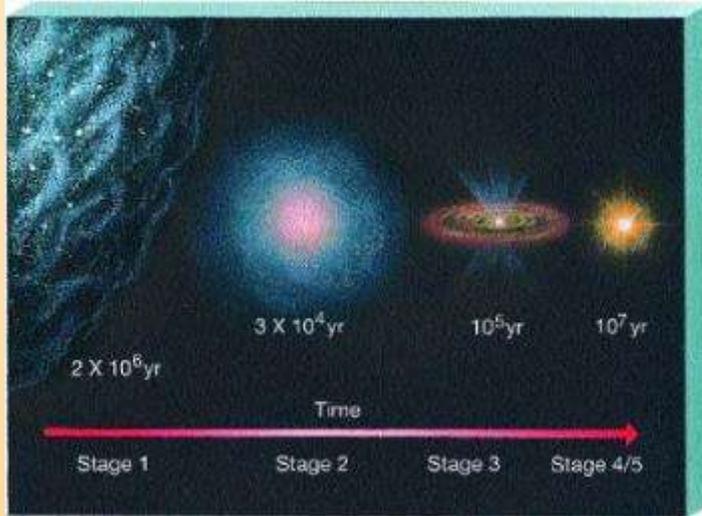
¿Cómo nacen las estrellas?

- Si nos concentramos en un fragmento, donde nacerá una estrella:
 - Tamaño es 100 veces el de nuestro sistema solar
 - La energía liberada por el colapso es emitida (baja densidad), salvo en el centro donde hay mayor concentración de material, lo que hace aumentar la T.
 - La T en esta etapa es de alrededor de 100 K
 - Se detiene la fragmentación, la temperatura y la presión aumentan y al aumentar la concentración de material se inicia una retroalimentación de aumento de T y P.
 - Por primera vez podemos distinguir una ‘fotosfera’ y se nombra al objeto central como **protoestrella**

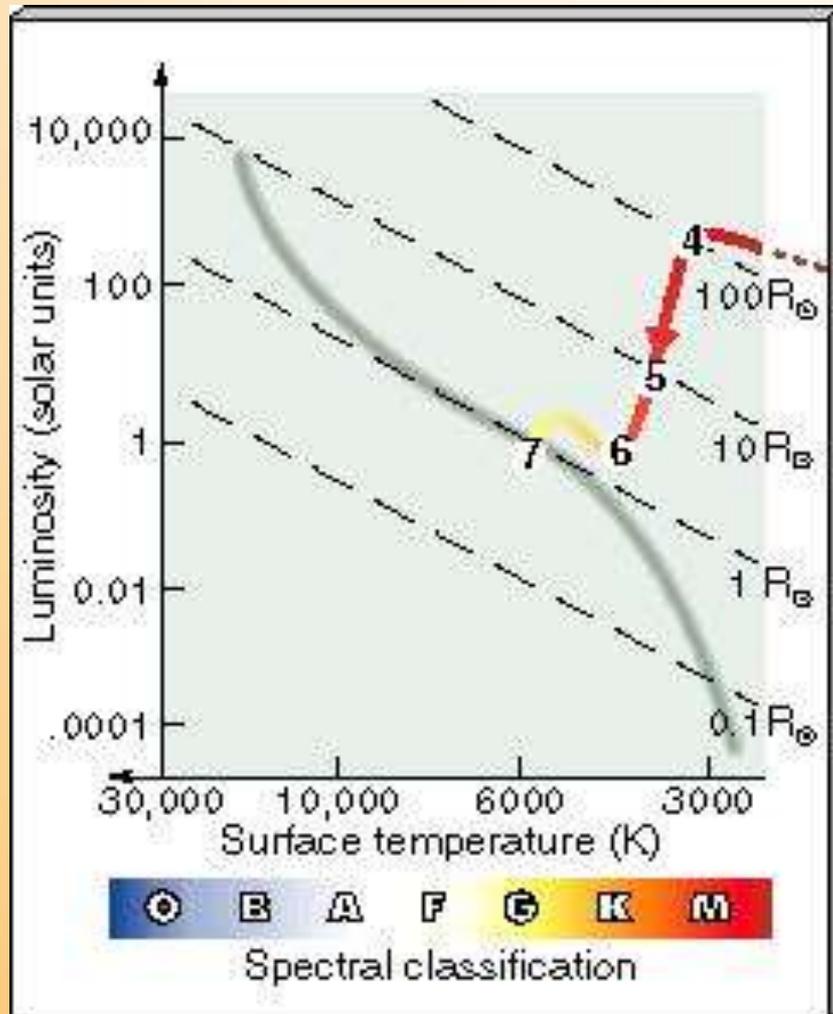
La protoestrella

- Pasaron 100000 años desde que comenzó la fragmentación.
- La T todavía no alcanza $1 \cdot 10^6$ K para comenzar el ciclo $p^+ - p^+$.
- La protoestrella tiene el tamaño de la órbita de Mercurio.
- Si bien tiene menos temperatura que el Sol es tan grande que su luminosidad es mayor
- Está en una etapa pre-secuencia principal ('evolutionary track').
- A esta fase se le denomina de Kelvin- Helmholtz
- NO hay equilibrio en la protoestrella.
- Luego evoluciona a través de la línea de Hayashi, con fenómenos violentos, fundamentalmente fuertes vientos protoestelares.
- Aumenta la contracción.

Las protoestrellas no son tranquilas



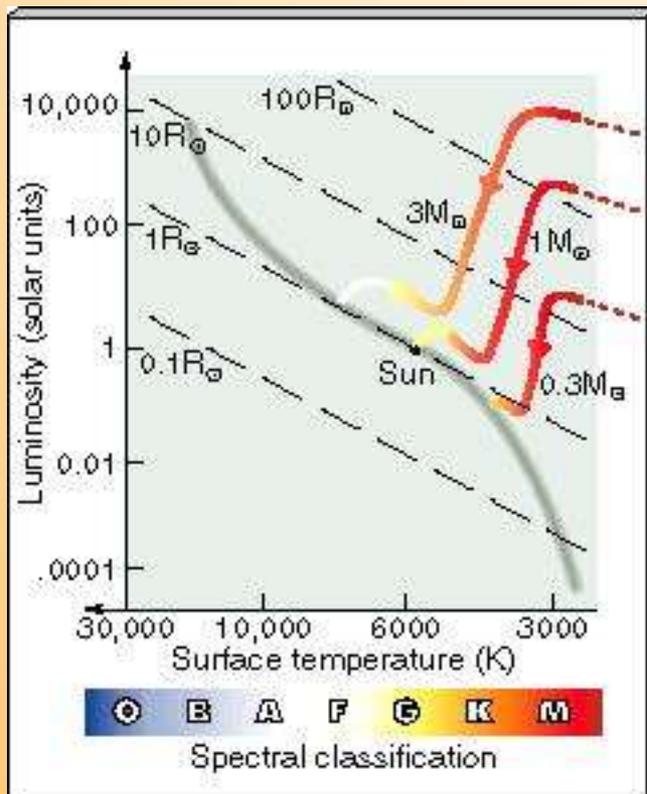
a) Imagen en radio del flujo bipolar mas extenso conocido (10000 UA)



Evolución de la protoestrella
a través de la línea de Hayashi
4-6.

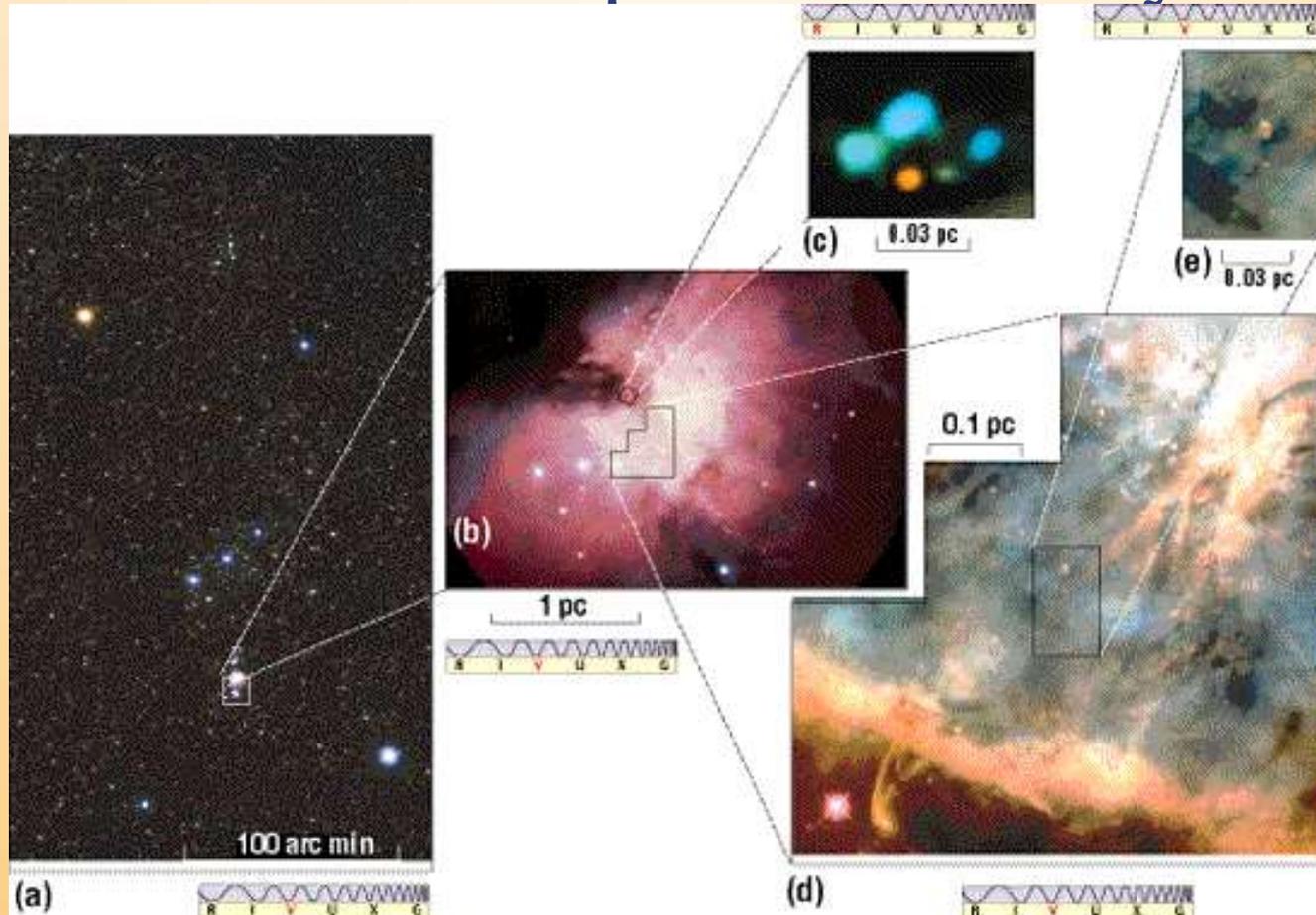
Etapa T-Tauri

ZAMS (Zero Age Main Sequence)



- Luego de una gestación de $10 \cdot 10^6$ años la protoestrella se convierte en estrella.
- Se produce el ZAMS, entra a la secuencia principal.

Evidencias de protoestrellas y discos



Nebulosa de Orión: b) y c) regiones en posible contracción donde hay evidencias de protoestrellas. d) y e) estrella jóvenes rodeadas de discos donde pueden formarse planetas

Discos (al fin...)

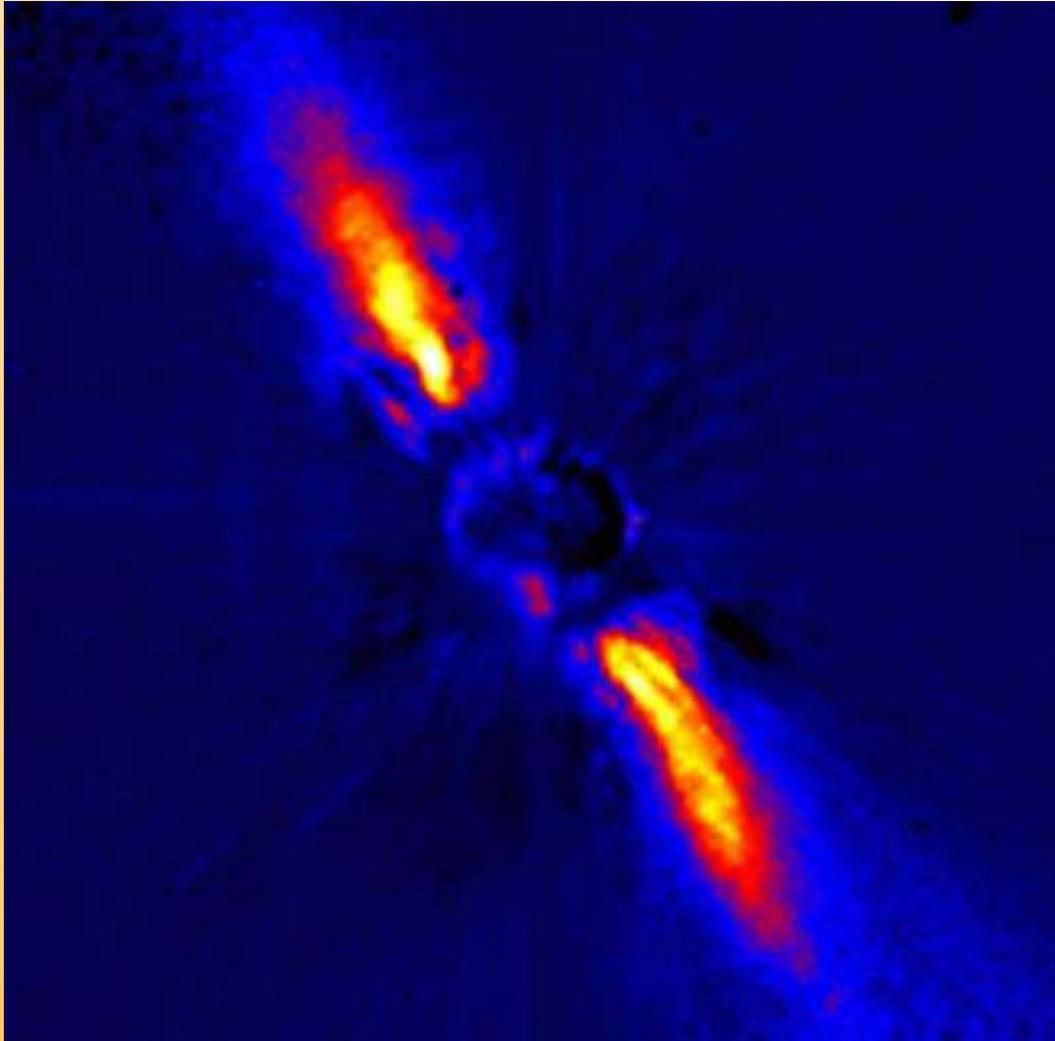


Imagen de Beta Pictoris
tomada con el *ESO ADONIS adaptive optics system* en el telescopio de 3.6-m y el coronógrafo del *Observatoire de Grenoble*

¿Por qué preocuparnos por los discos protoplanetarios (circumstelares)

- Estudiar la formación y evolución de discos es fundamental para entender el proceso de formación planetaria.
- Los discos se pueden detectar más fácilmente que los planetas en torno a estrellas porque el área superficial del polvo del disco es 10^{14} veces mayor que la de un planeta.
- Por otra parte, aunque un planeta posea la misma masa que la contenida en el polvo del disco, éste último emite y refleja mucho mejor la luz y puede ser observado a distancias mayores a la estrella (parte de esta radiación es debida a la **acreción**)
- Si bien la estrella es más caliente y masiva, las partículas pequeñas emiten más energía porque tienen mayor área superficial.

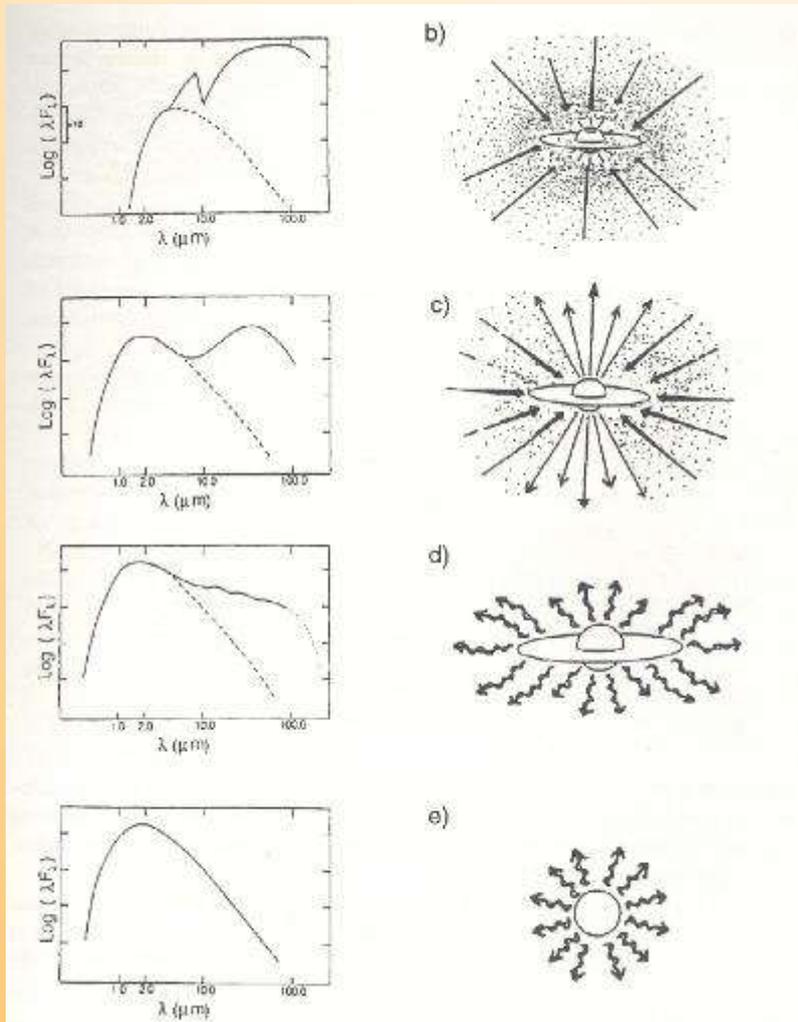
Discos según el estado evolutivo de la estrella

- Respecto a la distribución de la energía espectral (I vs λ):
- En estrellas pre-secuencia principal se observa un gran exceso infrarrojo (asociados al disco). La estrella calienta al polvo y la energía es reemitida.
 - Otro efecto: exceso UV proveniente de las zonas cercanas a la estrella donde el material del disco que rota a alta velocidad se encuentra con la superficie de la estrella que rota más lentamente (boundary layer).
- Discos con envoltura: la envoltura reemite la radiación del disco y la estrella en longitudes de onda más larga.
- Objetos tipo 0 y I: objetos con envoltura extendida, sistemas muy jóvenes donde todavía hay gas de la nebulosa primordial.
- Objetos tipo II: emisión infrarroja (etapa T-Tauri)
- Objetos tipo III: casi en la SP, leve exceso infrarrojo.
- La observación en IR es un método indirecto, detecciones ópticas son posibles gracias al HST.

¿Cómo explicar la ausencia de polvo?

- La masa total de polvo en los discos fue determinada entre 10^{-4} y 10^{-3} masas solares.
- Considerando la misma proporción polvo-gas que en el medio interestelar hay 100 veces mas cantidad de hidrógeno.
 - Masa total del disco: 0.01 – 0.1 masas solares
- La mayoría de las T-Tauri tienen poco exceso infrarrojo si su edad es superior a los $3 \cdot 10^6$ años, por lo cual no poseen partículas micrométricas a pocas UA de la estrella.
- **El polvo tuvo que agruparse en objetos mayores dentro de esa escala de tiempo.**

Para entender de que estamos hablando



El exceso de emisión comparado con la curva de Planck de un cuerpo negro disminuye a medida que la estrella queda ‘sola’

Discos evolucionados alrededor de estrellas de la SP

- Pregunta diagnóstico (elemento disparador): ¿cuál creen ustedes que es el primer disco evolucionado conocido en torno a una estrella ?
- Importancia de IRAS: detección de 3 discos evolucionados
 - Vega
 - Fomalhaut
 - Beta Pictoris
- Emisión IR en 60 – 100 micrones:
 - Los granos de polvo son mas grandes que los interestelares
 - El material orbita en el plano ecuatorial de la estrella
 - La extensión es entre 100 y 1000 UA
 - Las zonas internas (decenas de UA) están vacías
- Interpretación: **PLANETAS!!!!**

Cualquier coincidencia con la realidad no es casualidad

- Respecto a Beta Pictoris:
 - Posee fuertes líneas espectrales de absorción corridas al rojo: cometas que caen sobre la estrella.
- En el 2001: ISO, la gran mayoría de las estrellas estudiadas llegan a la SP con un disco que decae luego de $400 \cdot 10^6$ años.
- En nuestro Sistema solar el sol tiene el 99% de la masa pero el 2% del momento angular.
- A medida que la nube primordial se contrae aumenta su velocidad de rotación hasta valores de 0.1 s^{-1} (velocidad que haría destruir la estrella).
- La formación de un disco protoplanetario sería una forma de redistribuir el momento angular y permitir la formación estelar.

Objetivos de la primera parte

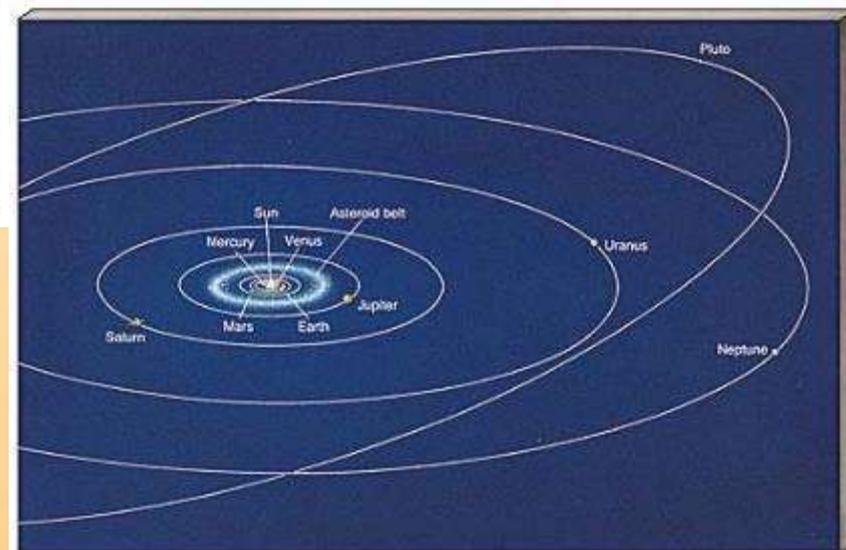
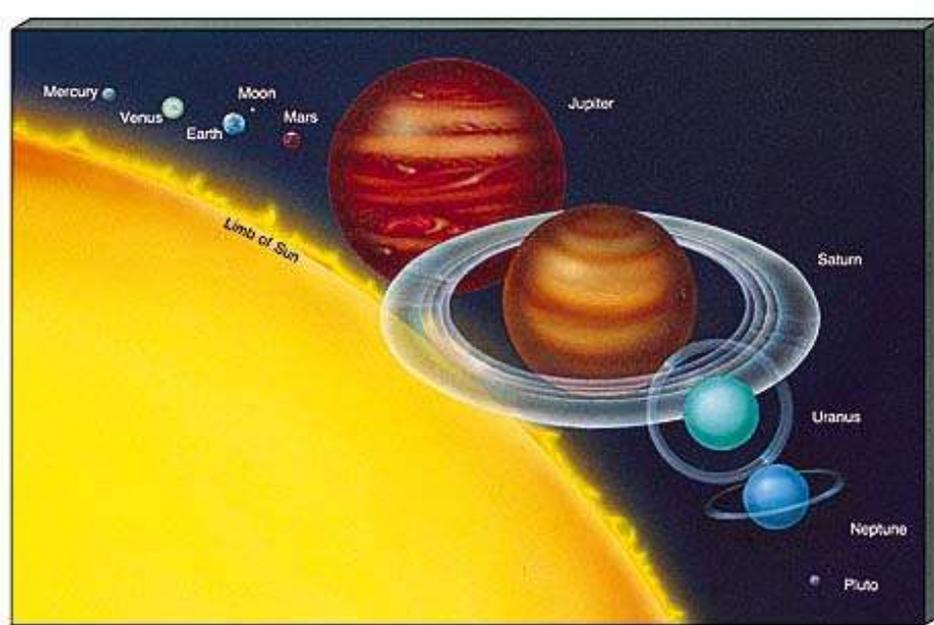
- Conocer los componentes del medio interestelar
- Diferenciar los distintos tipos de nebulosas y su relación con la formación estelar
- Entender la importancia de los discos circumestelares.
- **Preguntas tipo:**
 - ¿Qué entiende por regiones HII? ¿Las mismas tienen alguna relación con la formación estelar?
 - ¿Qué importancia tienen los discos circumestelares en la formación planetaria? ¿Son solamente una especulación teórica o hay observaciones que validen el modelo?

Origen y características generales de nuestro Sistema Solar

Dos enfoques posibles...

	Distancia	Radio	Masa	Rotación	Inclinación	Excentric.	Densidad
	(AU)	(Tierras)	(Tierras)	(Tierras)	Orbital	Orbital	(grs/cm3)
Sol	0	109	332,8	25-36*	---	---	1.410
Mercurio	0.39	0.38	0.05	58.8	7	0.2056	5.43
Venus	0.72	0.95	0.89	244	3.394	0.0068	5.25
Tierra	1.0	1.00	1.00	1.00	0.000	0.0167	5.52
Marte	1.5	0.53	0.11	1.029	1.850	0.0934	3.95
Júpiter	5.2	11	318	0.411	1.308	0.0483	1.33
Saturno	9.5	9	95	0.428	2.488	0.0560	0.69
Urano	19.2	4	15	0.748	0.774	0.0461	1.29
Neptuno	30.1	4	17	0.802	1.774	0.0097	1.64
Plutón	39.5	0.18	0.002	0.267	17.15	0.2482	2.03

Características orbitales y físicas



Origen del Sistema Solar

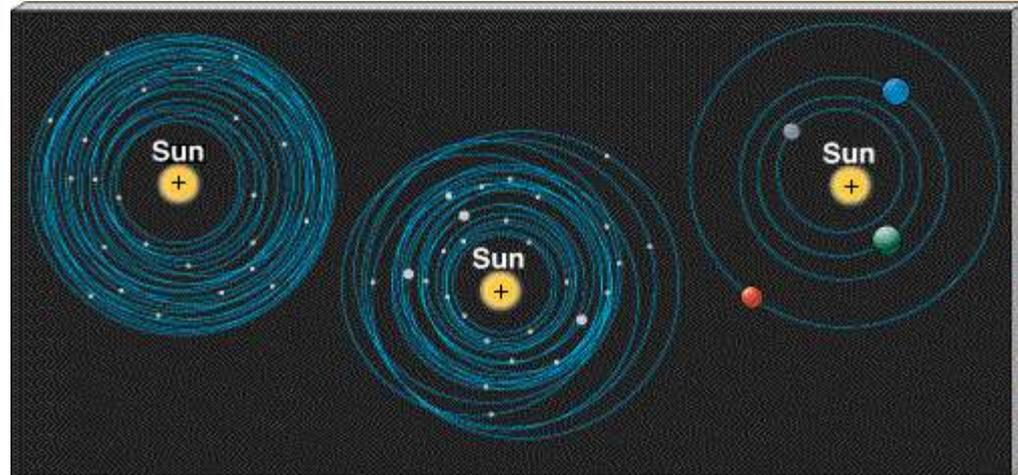
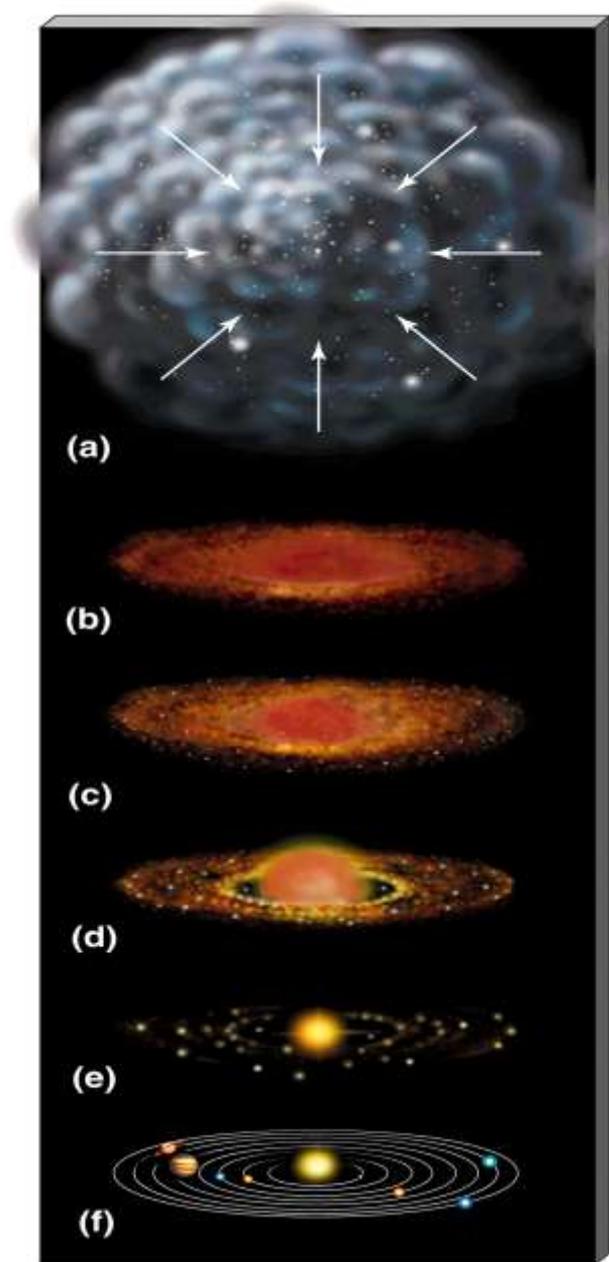
- ¿Qué debemos explicar para tener un ‘modelo estándar’ consistente?
 - Cada planeta está aislado en el espacio, con distancias cada vez mayores entre sí a medida que nos alejamos del Sol.
 - Órbitas casi circulares (interacción con el disco?)
 - Órbitas casi coplanares (disco?) salvo Plutón (KBO)
 - Rotación en el mismo sentido que el Sol
 - Satélites que en su mayoría rotan en la misma dirección que sus planetas
 - Diferenciación (terrestres y jovianos lejos del Sol)
 - Características particulares de asteroides y cometas.
- ¿Qué herramientas tenemos? : remanentes de la formación que recuerdan su pasado: asteroides y cometas, que han permanecido incambiados.

Formación planetaria (teorías actuales)

- Mecanismo: **acreción**

- Tres etapas:

- 1. Los granos de polvo en la nebulosa primitiva forman núcleos de condensación, donde se comienza a acumular material ('small clumps')
- 2. A medida que esos cúmulos van creciendo, su masa aumenta y su área superficial también, entonces el proceso se acelera. Se forman millones de objetos del tamaño de pequeñas lunas: **planetesimales**.
- 3. Los planetesimales chocan y se mantienen unidos (merging) barriendo el material a su alrededor por atracción y quedan unos pocos **protoplanetas**.



El primer esquema muestra el proceso completo desde la nube primordial a los planetas.

El segundo es una simulación computacional para el SS interior

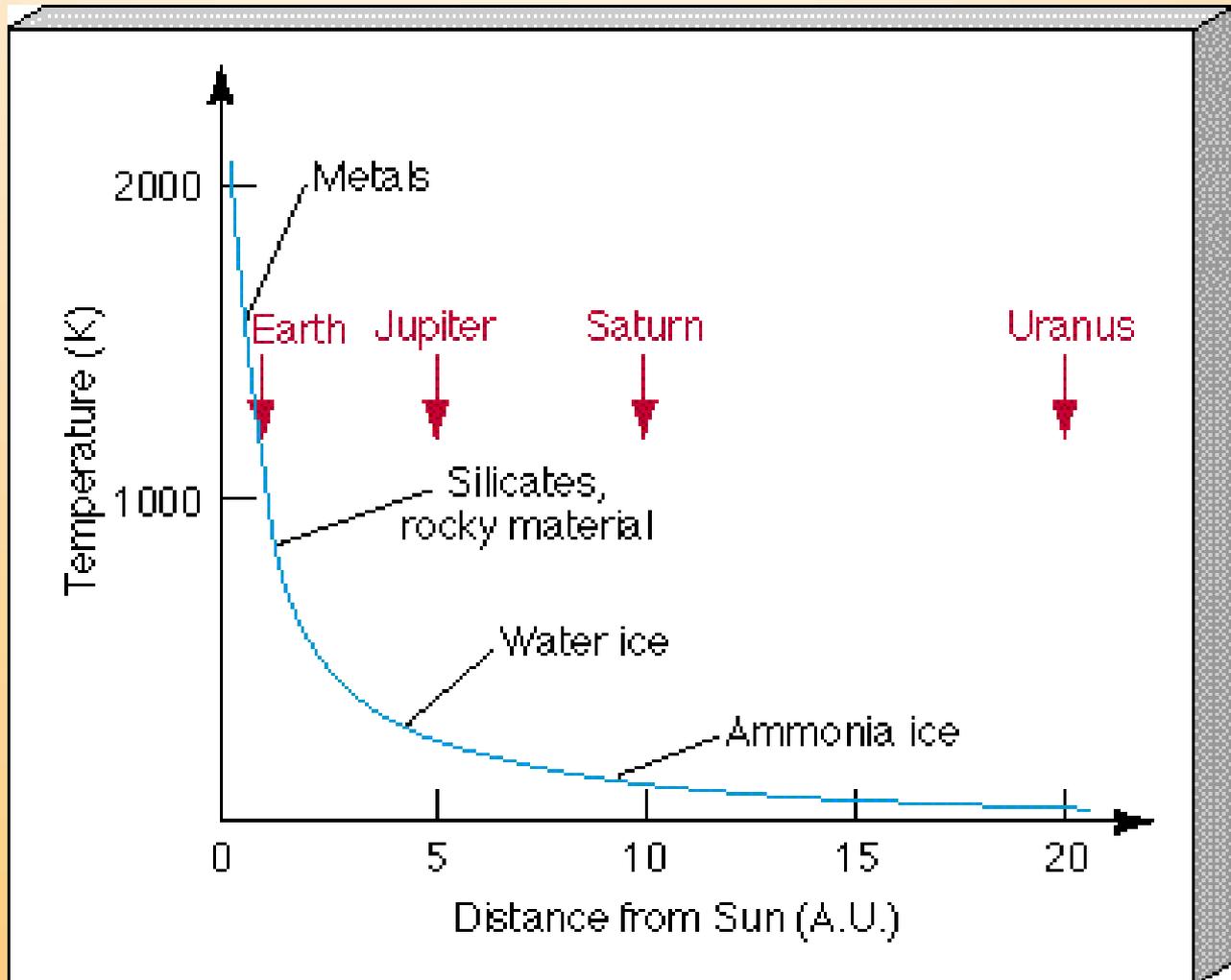
Formación planetaria

- En 10 billones de años el Sistema Solar queda limpio de remanentes luego del bombardeo primitivo o bombardeo pesado (¿origen de la Luna?).
- ¿Los planetas gigantes se formaron por el mismo proceso?
- Muchos de los satélites regulares constituyen en su formación sistemas solares en miniatura a partir del gas que rodeaba os planetas exteriores

Los planetas gigantes (el rol de la temperatura)

- Dependiendo de la temperatura se formaron diferentes materiales que luego serían los que constituirían los planetas:
 - A la distancia de Mercurio solamente se formaron granos metálicos
 - A 1 UA ya se puede considerar granos rocosos, silicatos
 - Entre 4 y 5 UA se congela el agua:
- **‘Línea de nieve’ que es la explicación para la diferenciación del Sistema Solar.**
- De acuerdo al modelo estándar los planetas gigantes se forman lejos de la estrella (esto, más adelante, nos va a dar un susto)

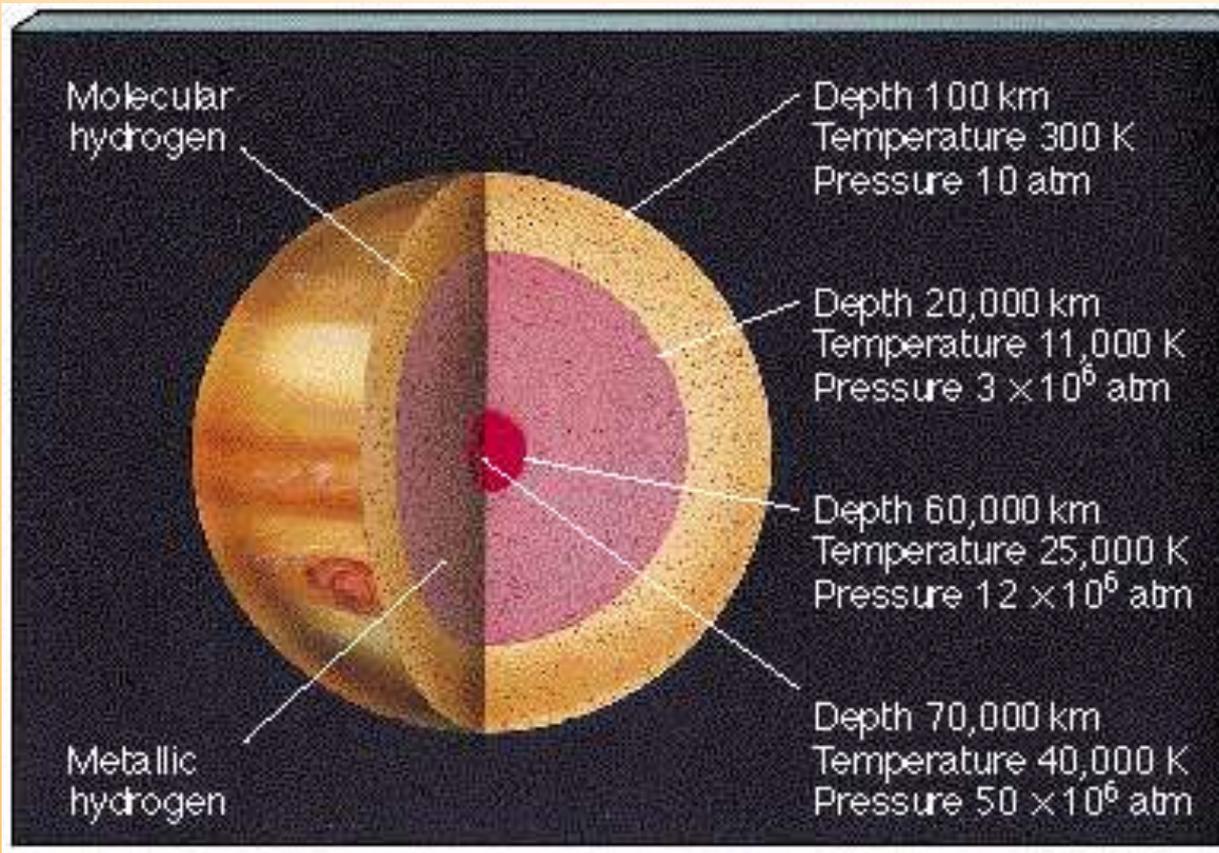
¿Cómo influyó la temperatura?



La eficiencia para capturar gas

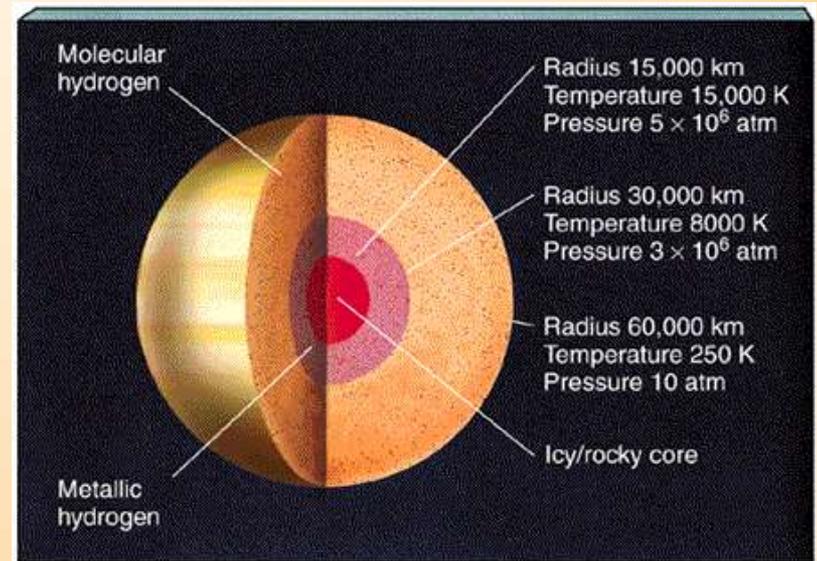
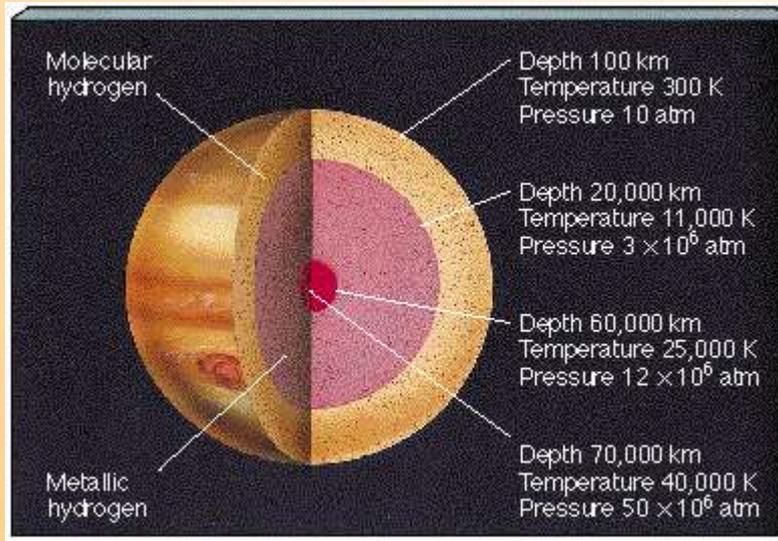
- Al poder acretar hielo, los planetas gigantes aumentaron rápidamente su masa y por lo tanto su atracción gravitatoria, lo que hace que algunos autores hablen de una **formación directa**, sin pasar por todas las etapas de acreción.
- Fueron sumamente eficientes en la captura del gas lo que explica su gran masa, tamaño, baja densidad y composición.

Un ejemplo: Júpiter



El interior de Júpiter a partir de mediciones de las Voyager. Sólo la región central en rojo es sólida.

Júpiter y Saturno: ¿calor desde el interior ?



Júpiter:

Emite el doble de energía que recibe del Sol.

Causa: lenta difusión de la energía gravitatoria, residuo de la formación planetaria.

Saturno: estructura interna.

Reemite 3 veces mas que absorbe.

Causa: Contracción gravitacional por la decantación de He que no se disuelve en H líquido.

La última frontera de nuestro S. S.

- **Heliopausa** :Punto en el que el **viento solar** se une al medio interestelar o al viento solar procedente de otras estrellas.
 - **Viento solar**: débil corriente de gas y partículas cargadas energéticamente, en su mayor parte protones y electrones (**plasma**) que fluye desde el Sol; la velocidad del viento solar alcanza velocidades de 350 kilómetros por segundo.

Objetivos de la segunda parte

- Conocer las teorías modernas de formación de nuestro Sistema Solar
- Conocer las propiedades generales del Sistema Solar
- Poder entender como estas teorías explican las observaciones y características de nuestro Sistema Solar

Preguntas tipo:

1. Explique el concepto de acreción.
2. ¿Qué relevancia tiene para la diferenciación del Sistema Solar (planetas terrestres y jovianos) la línea de nieve?
3. A su entender ¿dónde esperarías encontrar planetas gigantes en otros sistemas planetarios?