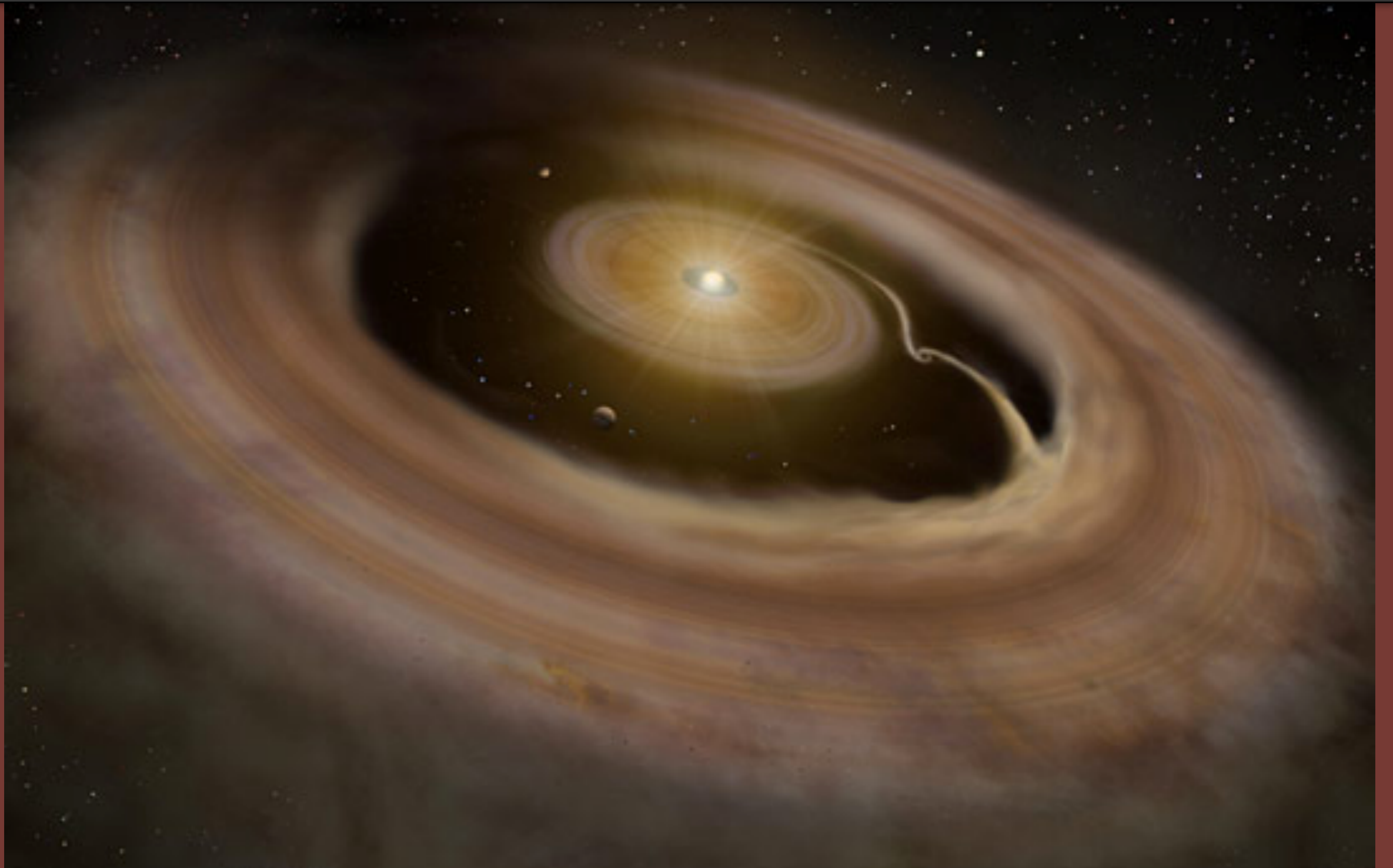


# Formación de Sistemas Planetarios



# Formación Estelar

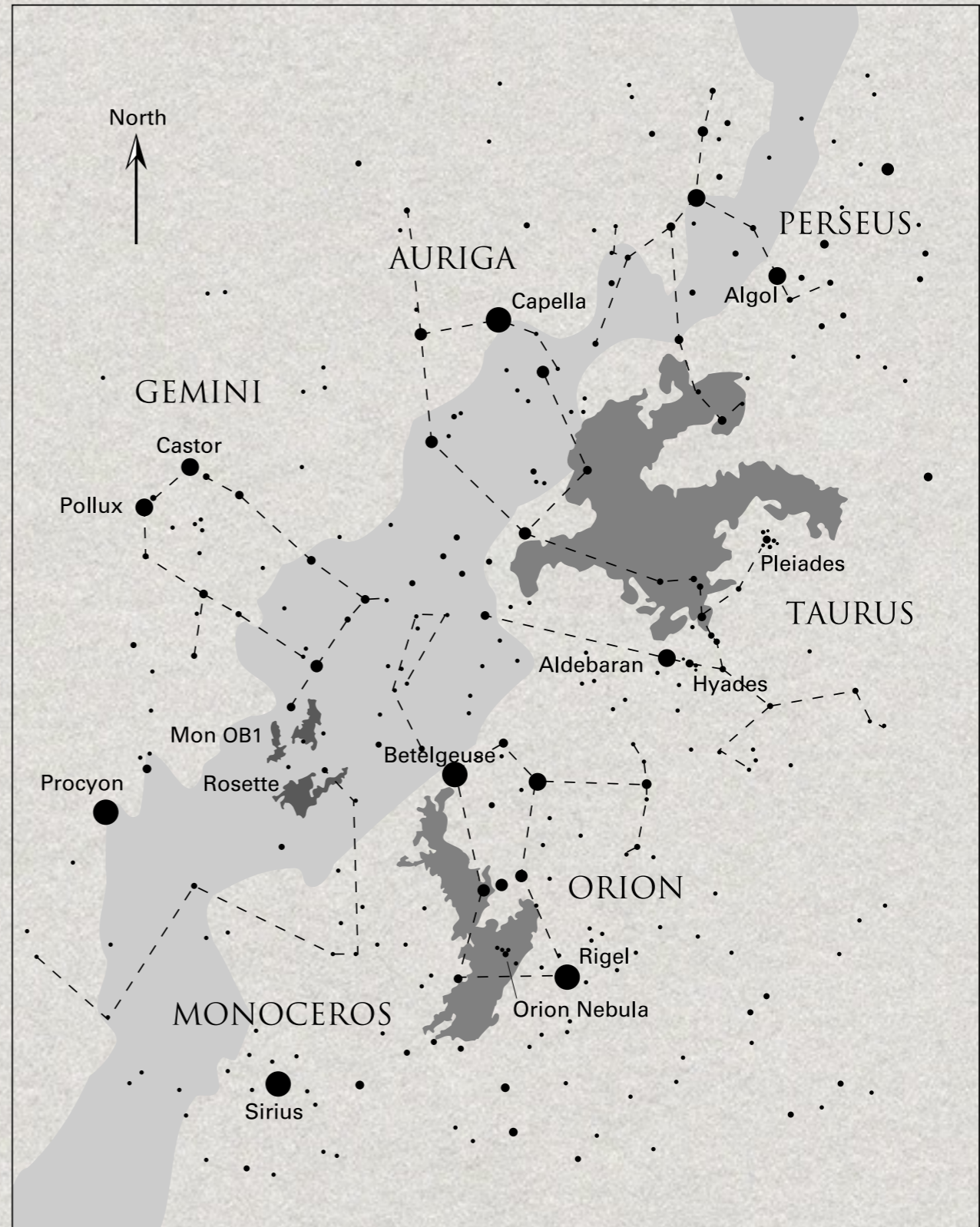
# Nubes Moleculares Gigantes



# Formación Estelar

# Nubes Moleculares Gigantes

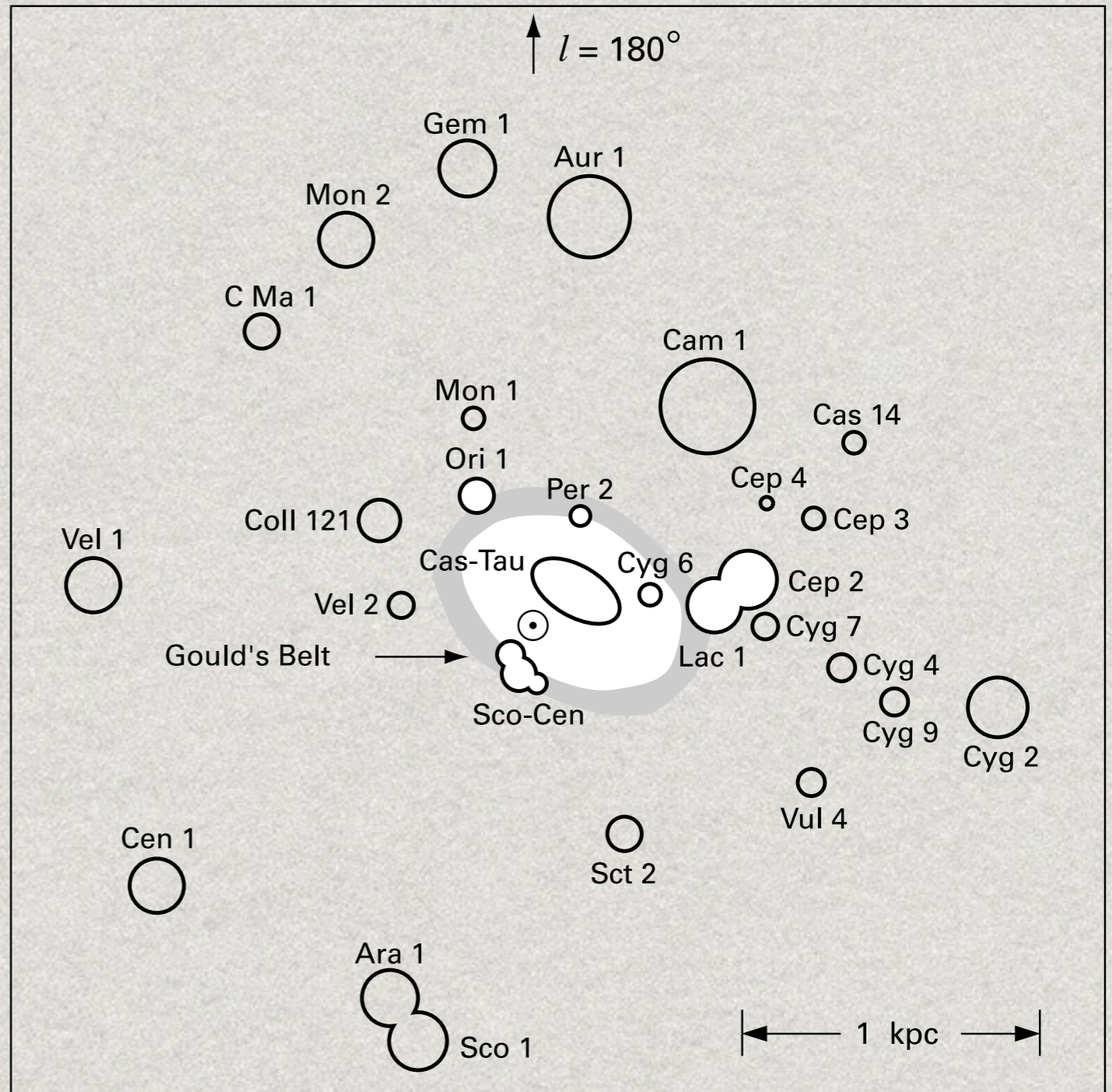
(a) Nubes Moleculares Gigantes. Aquí ocurren la mayoría de los eventos de formación estelar de la Galaxia



# Formación Estelar

# Nubes Moleculares Gigantes

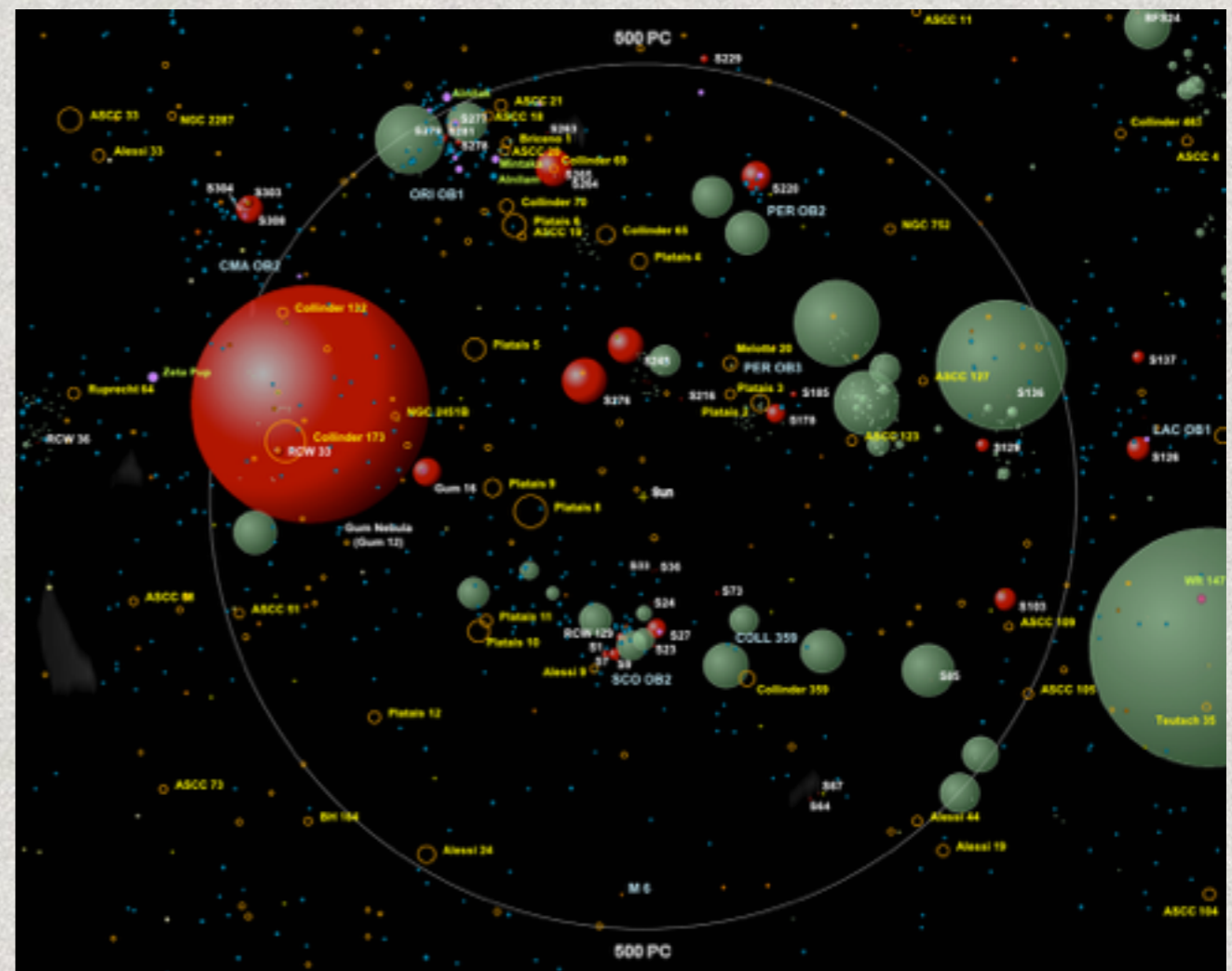
(a) Nubes Moleculares Gigantes. Aquí ocurren la mayoría de los eventos de formación estelar de la Galaxia



# Formación Estelar

# Nubes Moleculares Gigantes

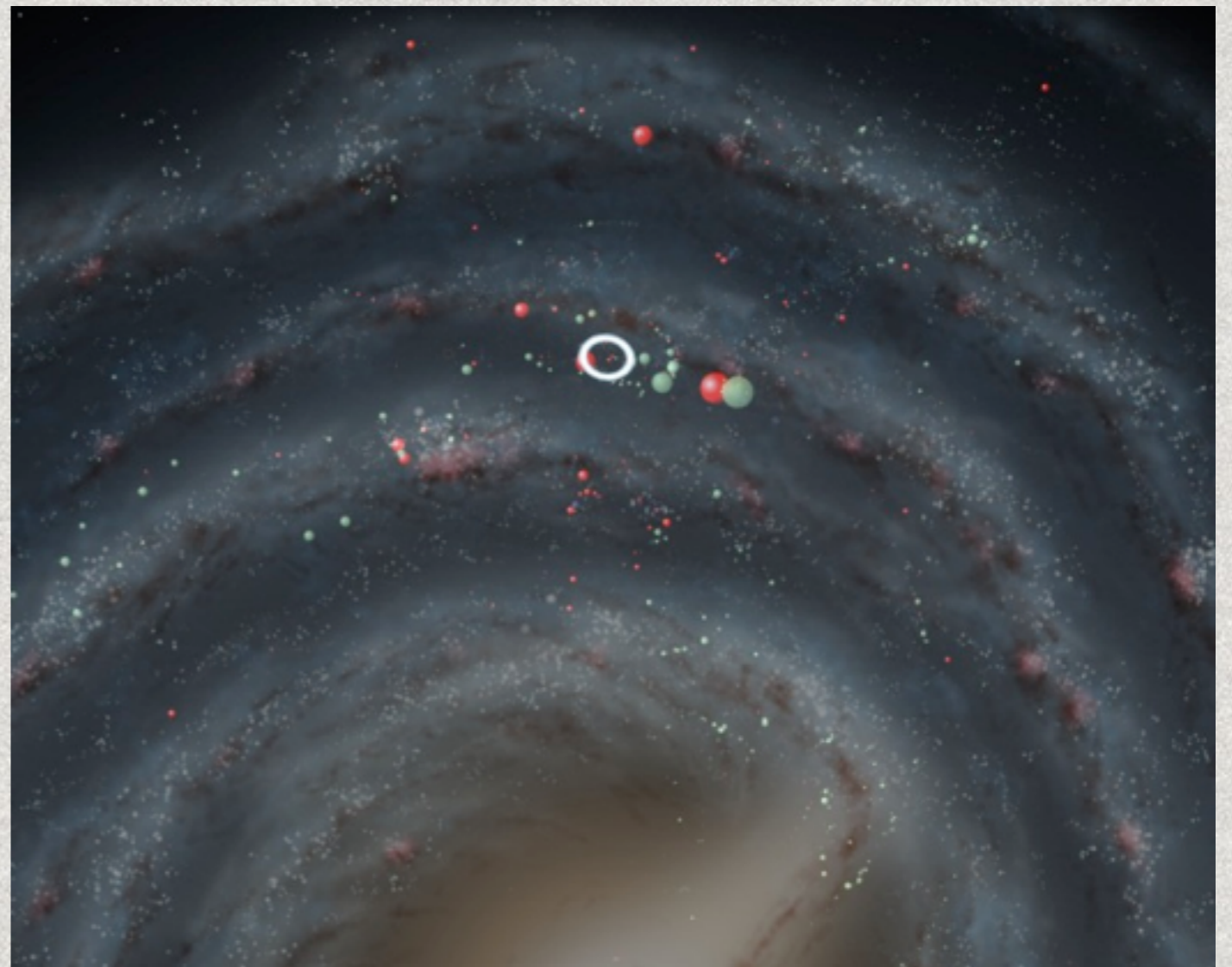
(a) Nubes Moleculares Gigantes. Aquí ocurren la mayoría de los eventos de formación estelar de la Galaxia



# Formación Estelar

# Nubes Moleculares Gigantes

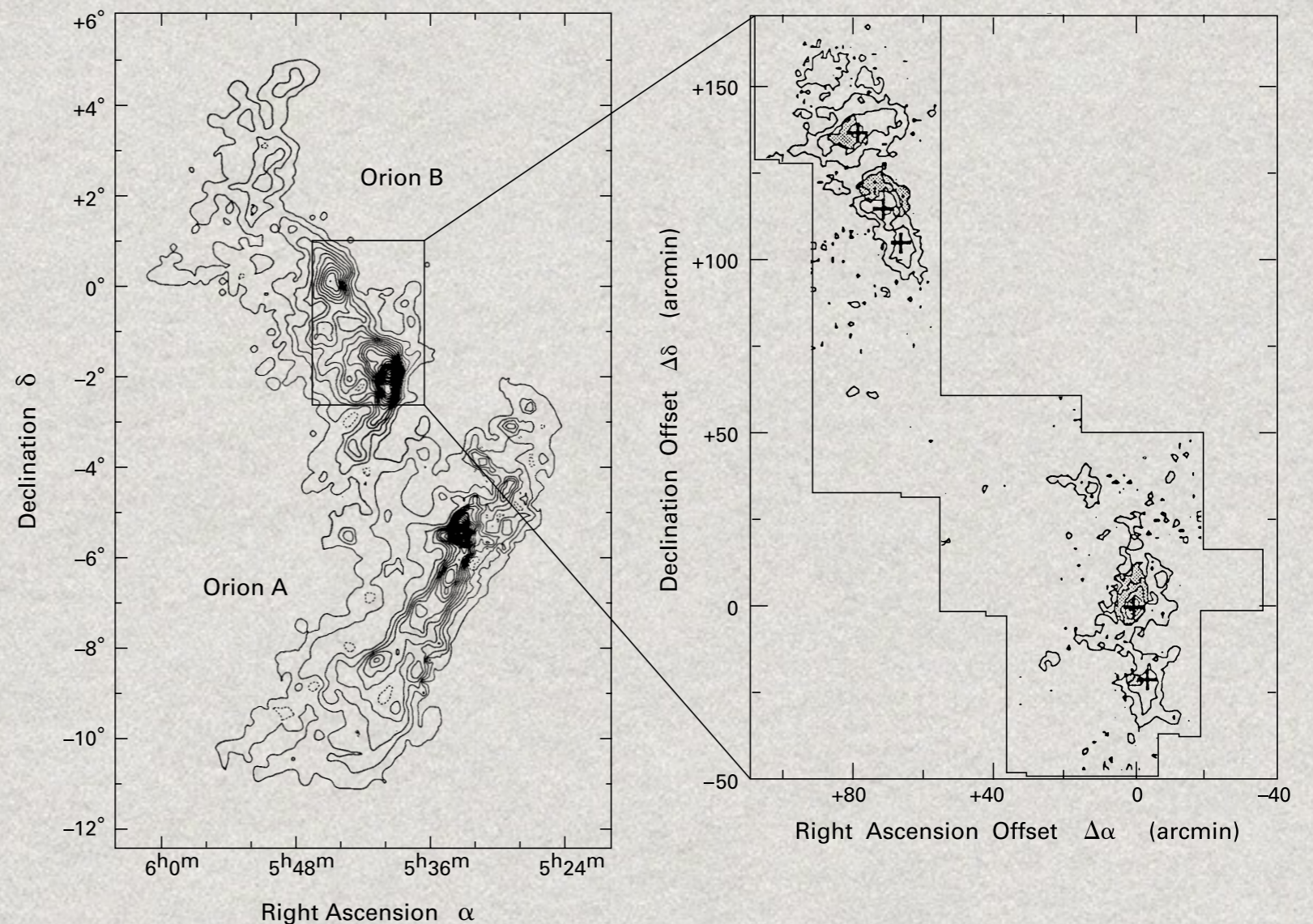
(a) Nubes Moleculares Gigantes.  
Aquí ocurren la mayoría de  
los eventos de formación  
estelar de la Galaxia



# Formación Estelar

# Nubes Moleculares Gigantes

(a) El material más denso forma núcleos masivos donde ocurre el proceso de formación



# Formación Estelar

# Núcleos densos





# Formación Estelar

# Núcleos densos

- En el planteamiento global de la formación estelar aún se carece de una pieza importante.



# Formación Estelar

# Núcleos densos

- En el planteamiento global de la formación estelar aún se carece de una pieza importante.
- Los modelos (estándar o turbulento) aún requieren poder describir con claridad las fases previas al colapso de los núcleos en estrellas.



# Formación Estelar

# Núcleos densos

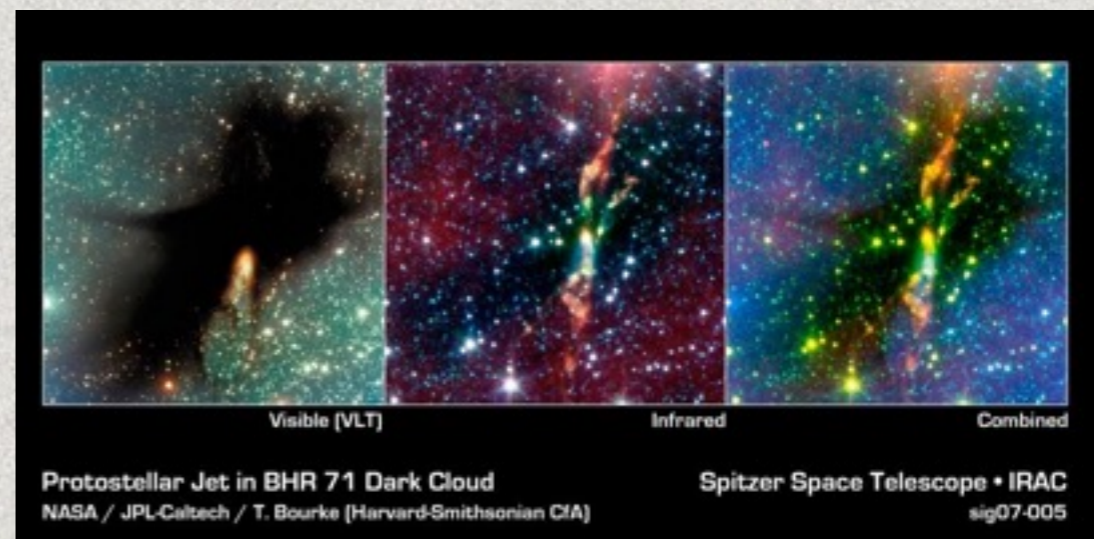
- En el planteamiento global de la formación estelar aún se carece de una pieza importante.
- Los modelos (estándar o turbulento) aún requieren poder describir con claridad las fases previas al colapso de los núcleos en estrellas.
- Los núcleos densos son entidades **relativamente complejas**: *estructura central de densidad, transporte de materia, uniformidad de T, dominio sónico o subsónico, campos magnéticos, agotamiento molecular...*



# Formación Estelar

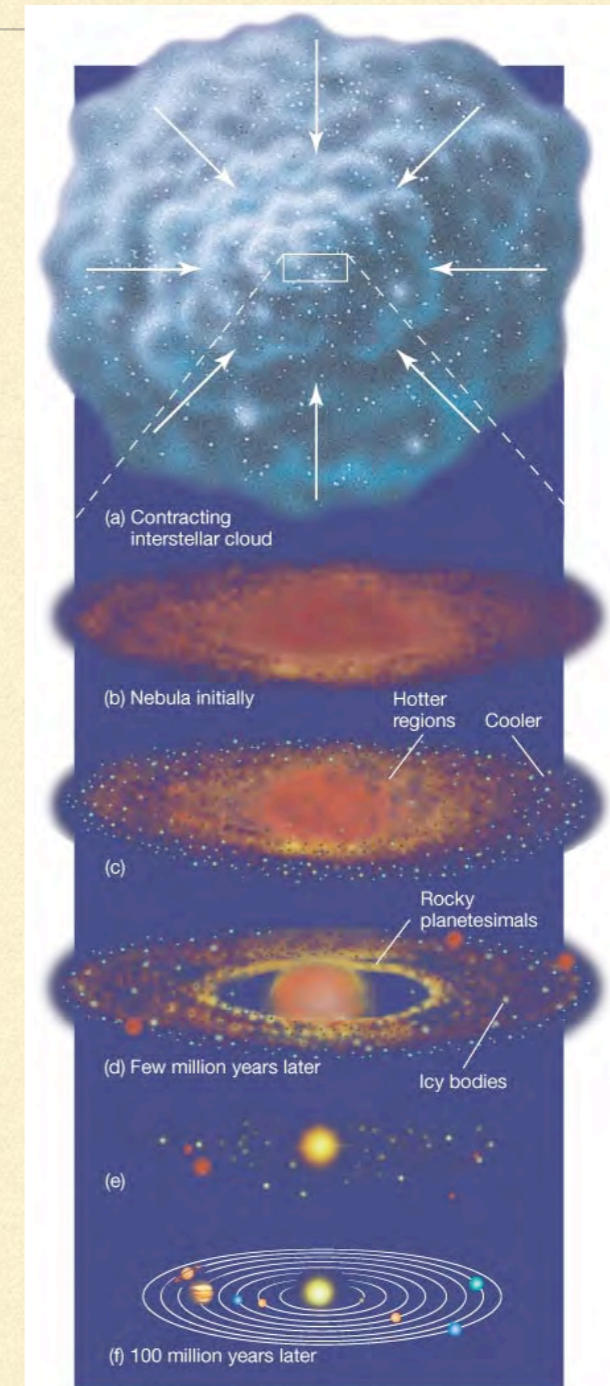
# Núcleos densos

- En el planteamiento global de la formación estelar aún se carece de una pieza importante.
- Los modelos (estándar o turbulento) aún requieren poder describir con claridad las fases previas al colapso de los núcleos en estrellas.
- Los núcleos densos son entidades **relativamente complejas**: *estructura central de densidad, transporte de materia, uniformidad de T, dominio sónico o subsónico, campos magnéticos, agotamiento molecular...*
- Una vez que el núcleo ha formado estrella(s), el papel principal lo toma la eficiencia de formación. Por eso los datos observacionales de las etapas más tempranas son cruciales.



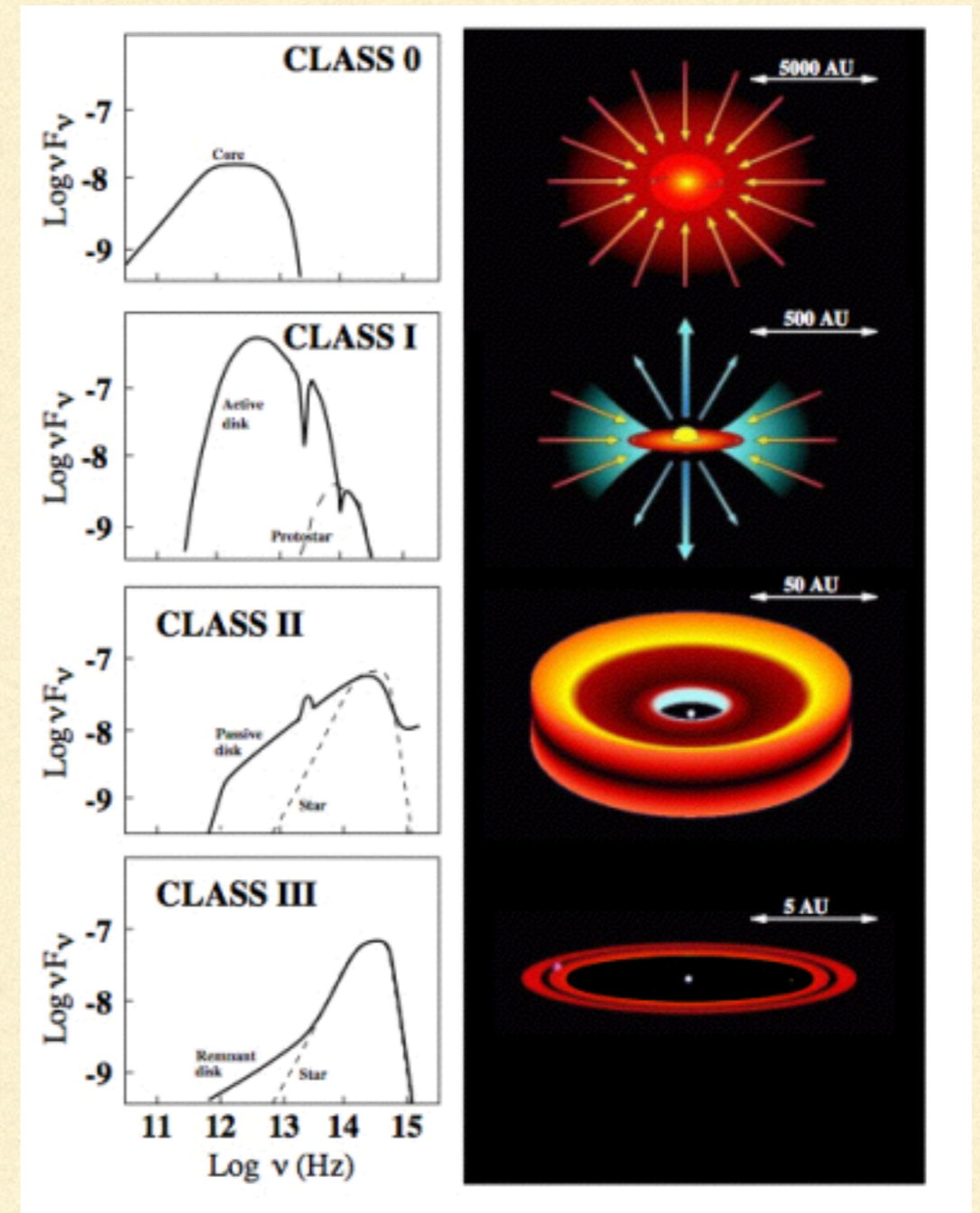
# DISCOS EN OBJETOS ESTELARES JOVENES EN UNA CASCARA DE NUEZ

- Estudiamos objetos estelares jóvenes para entender el proceso de evolución temprana de las estrellas y también para entender el proceso de formación de los sistemas planetarios, en los primeros 10 millones de años de la evolución.
- Las estrellas se forman de núcleos densos de gas que por conservación de momento angular, al colapsarse terminan formando una estrella rodeada de un disco.
- Los discos evolucionan conforme se acreta masa hacia la estrella, conforme el material del disco se asienta hacia el plano (formando granos más gruesos) y conforme el material en el disco es irradiado por la fuente y por campos de alta energía formados en el choque de acreción en la superficie de la fuente.
- Otras fuentes de irradiación en los discos son el campo de radiación de la nube y fotones UV de estrellas masivas cercanas (p.ej. en un cúmulo). Eventualmente, el polvo se disipa o se agrega, dejando un residuo de partículas que eventualmente forma planetesimales y planetas.
- Un 70-80% de las estrellas disiparán sus discos en un periodo de menos de 5 millones de años



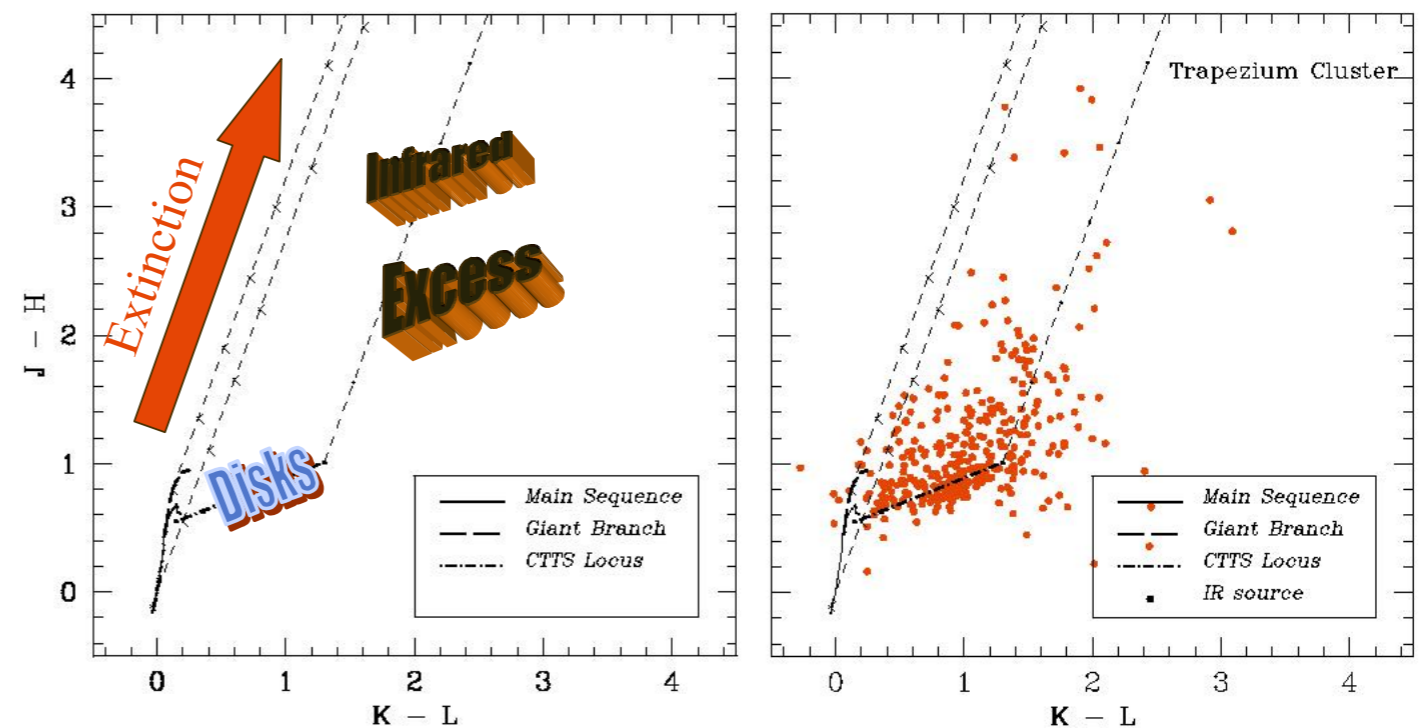
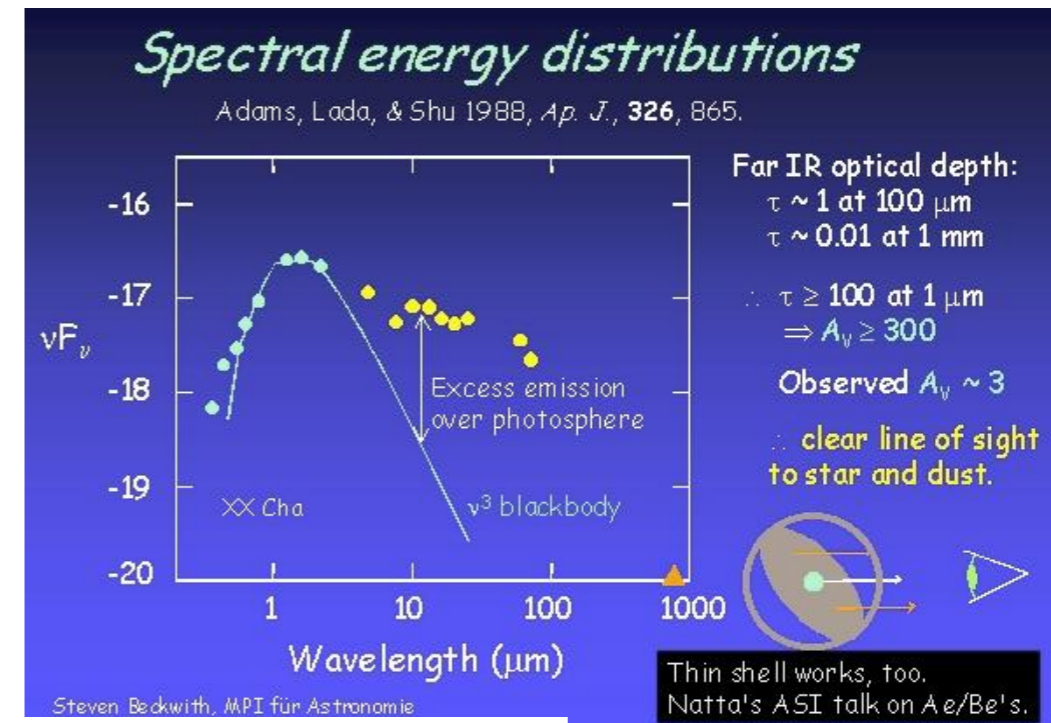
# DISCOS EN OBJETOS ESTELARES JOVENES EN UNA CASCARA DE NUEZ

- Estudiamos objetos estelares jóvenes para entender el proceso de evolución temprana de las estrellas y también para entender el proceso de formación de los sistemas planetarios, en los primeros 10 millones de años de la evolución.
- Las estrellas se forman de núcleos densos de gas que por conservación de momento angular, al colapsarse terminan formando una estrella rodeada de un disco.
- Los discos evolucionan conforme se acreta masa hacia la estrella, conforme el material del disco se asienta hacia el plano (formando granos más gruesos) y conforme el material en el disco es irradiado por la fuente y por campos de alta energía formados en el choque de acreción en la superficie de la fuente.
- Otras fuentes de irradiación en los discos son el campo de radiación de la nube y fotones UV de estrellas masivas cercanas (p.ej. en un cúmulo). Eventualmente, el polvo se disipa o se agrega, dejando un residuo de partículas que eventualmente forma planetesimales y planetas.
- Un 70-80% de las estrellas disiparán sus discos en un periodo de menos de 5 millones de años



# DIAGRAMAS COLOR-COLOR

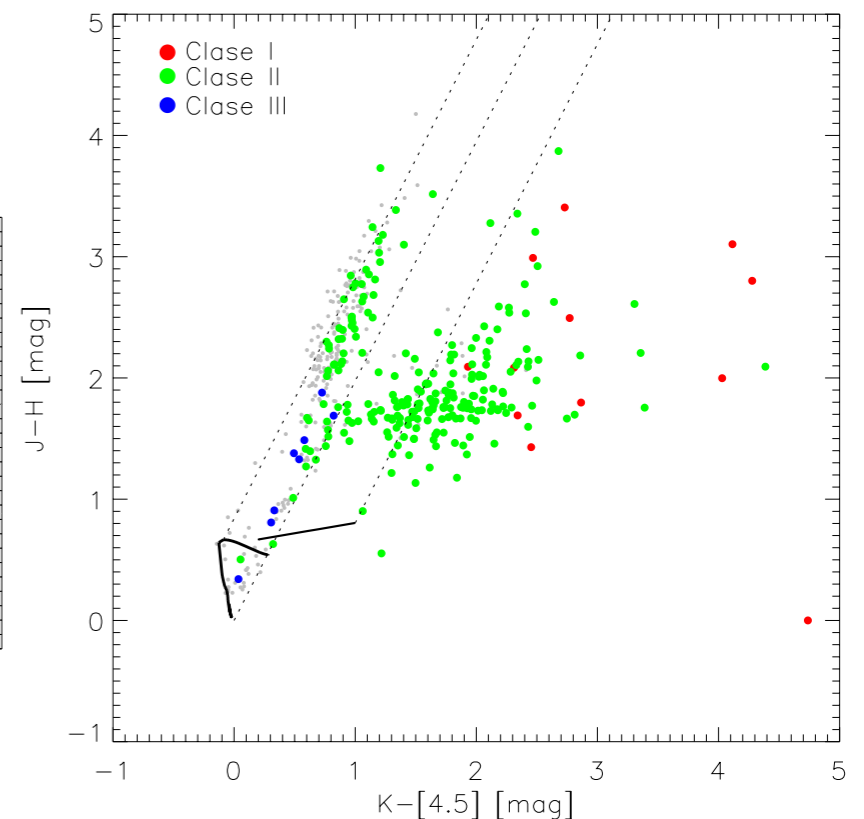
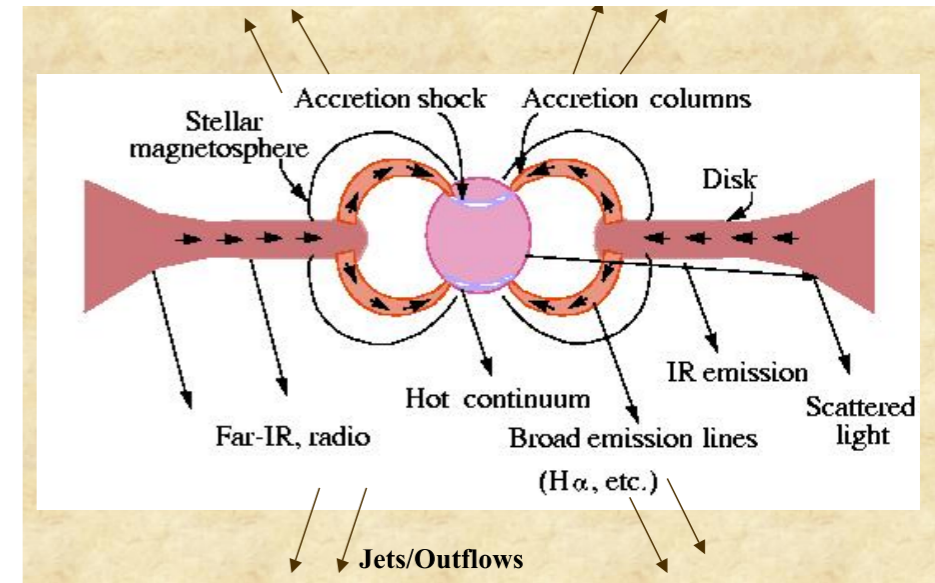
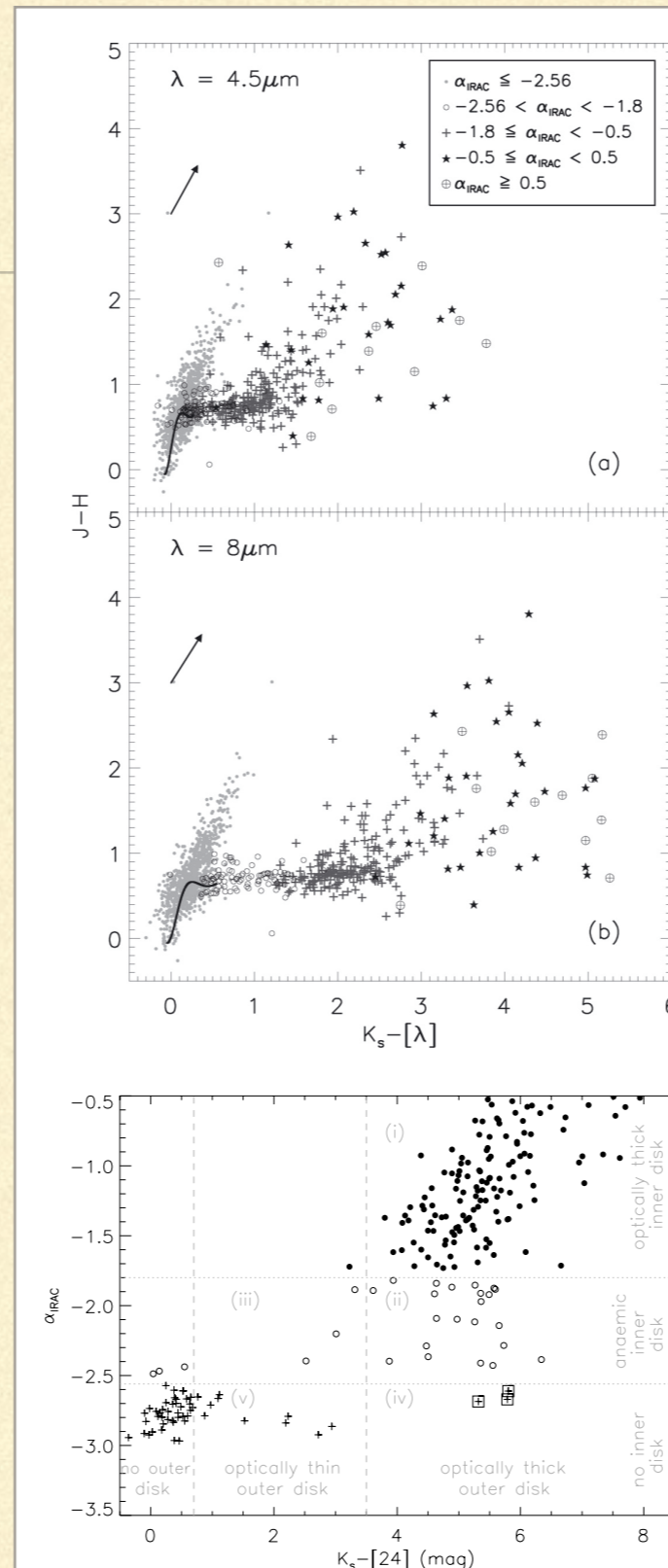
- El exceso en el infrarrojo es fácilmente detectable a través de diagramas fotométricos, que son buenos, bonitos y baratos.
- Los diagramas color-color muestran que los distintos tipos de YSO ocupan regiones bien definidas en este tipo de diagramas.
- Tipicamente, podemos colocar un color sensible al exceso infrarrojo en el eje X y un color sensible a la extinción en el eje Y. Las estrellas con exceso infrarrojo caerán a la derecha de la banda definida por la proyección de las secuencias de las enanas y gigantes en dirección del enrojecimiento interestelar (banda de enrojecimiento). Usualmente, antes de Spitzer se tenía J, H y K como opciones, y a veces, L, que puede observarse dificultosamente desde tierra.



Lada et al. 2000

# DIAGRAMAS COLOR-COLOR

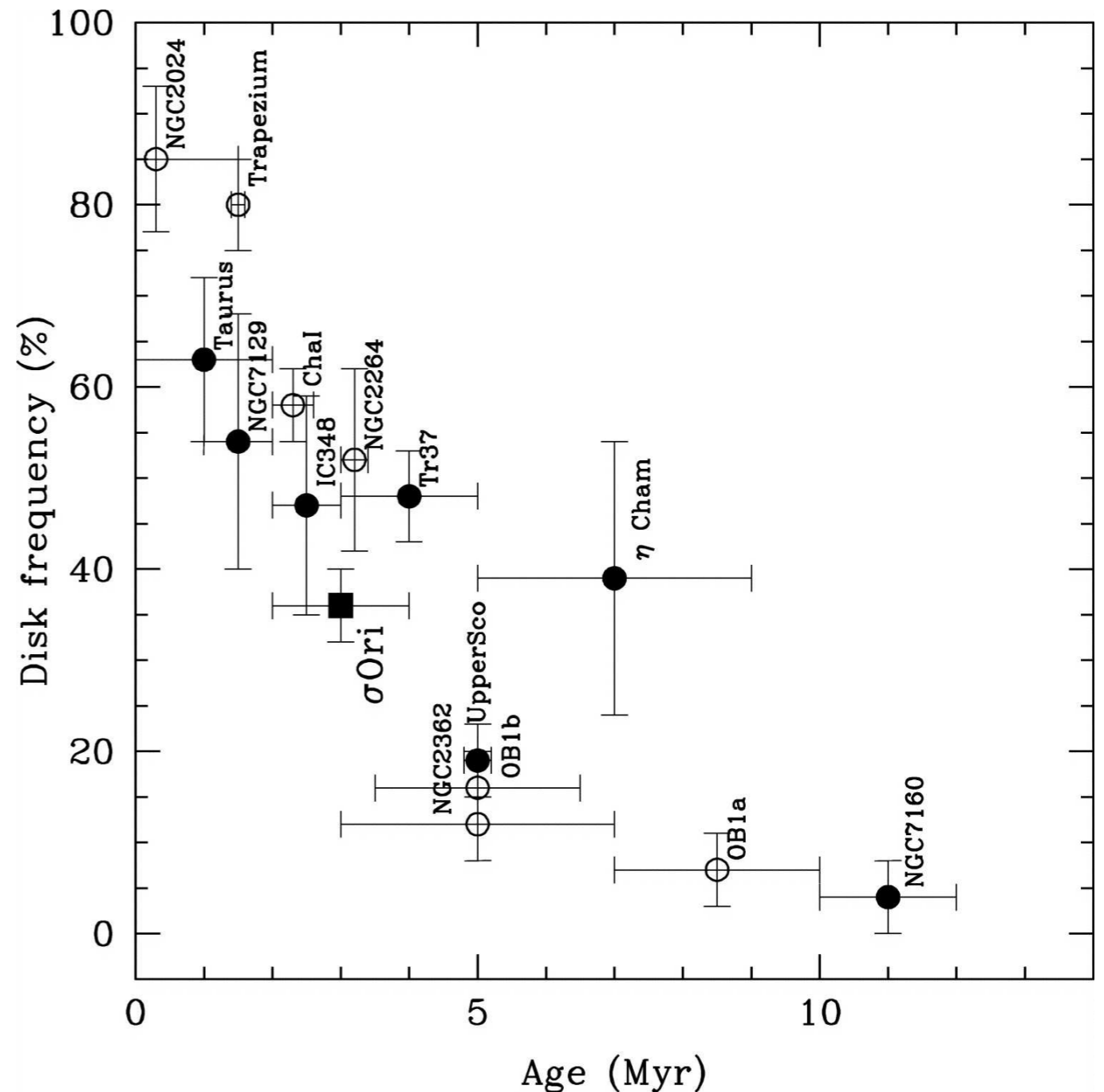
- En diagramas color color contruidos con combinaciones que usan las bandas 1-4 de la cámara IRAC del telescopio espacial Spitzer, las estrellas con discos prominentes se separan de las estrellas con discos poco prominentes.
- El el diagrama hay tres clases evolutivas que llamamos I, II y III. Las I son proto-estrellas , que aun están formando un disco. Las II son estrellas con discos prominentes tambien conocidas como estrellas T-Tauri Clásicas. Las III se llaman T-Tauri desnudas y su emisión es mayoritariamente fotosférica. Las estrellas tipo I y II se ven muy rojas y se acomodan a la derecha en estos diagramas. Las III se acomodan a la izquierda. Hacia arriba, el color indica sobre todo la cantidad de material en la nube. Es decir que a la derecha y hacia arriba, tenemos estrellas muy jóvenes, muy embebidas en la nube progenitora. Hacia abajo y la izquierda están las estrellas mas evolucionadas y que ya casi salen de su nube.
- Estos diagramas son como fotogramas fijos de la película del nacimiento de las estrellas.



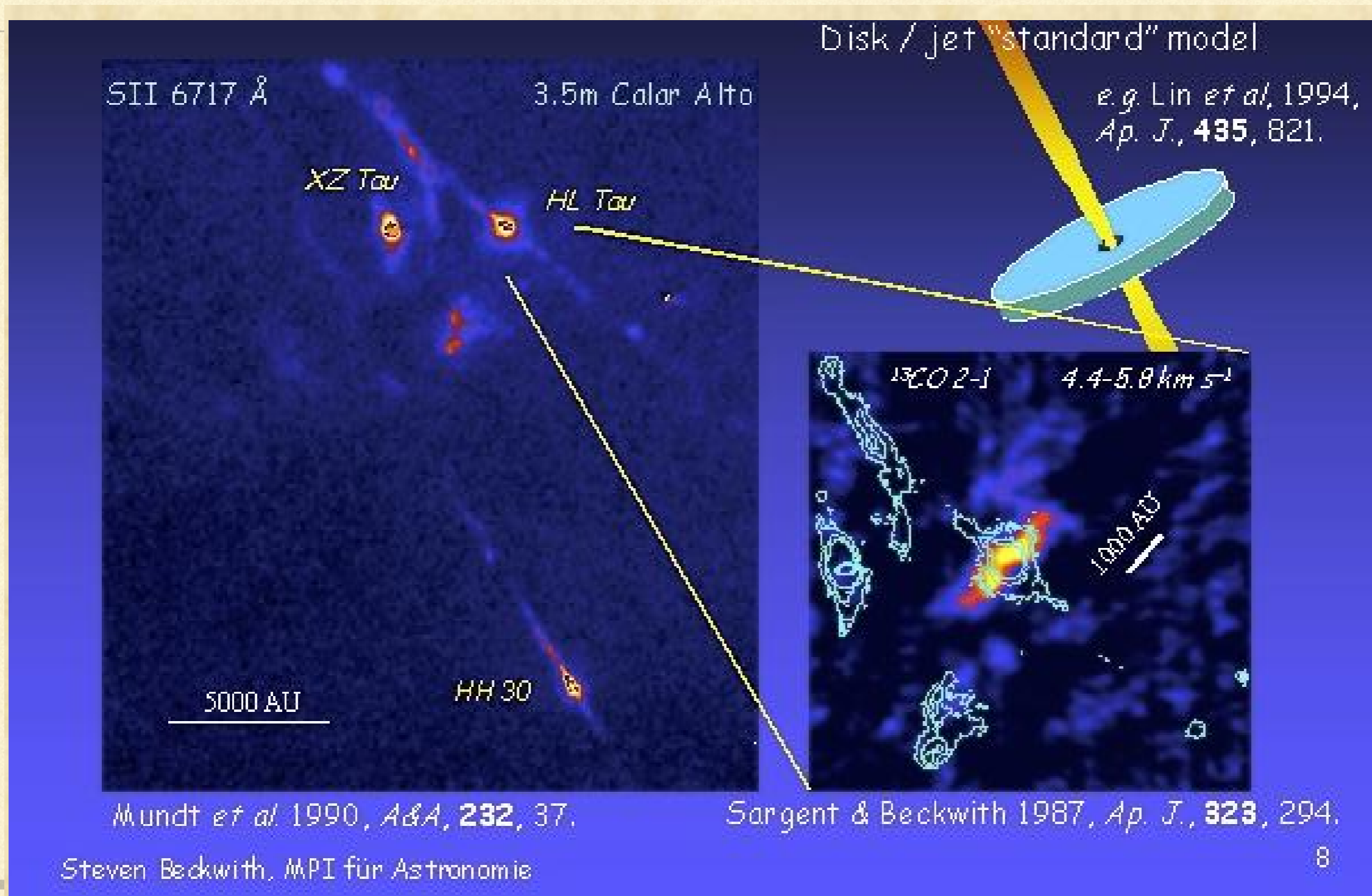


# EVOLUCIÓN DE DISCOS

- Conforme una región de formación estelar es más vieja, el número de estrellas con discos prominentes en una población disminuye sensiblemente.
- El polvo en los discos se asienta hacia el plano, y como consecuencia de esto, son más difíciles de detectar. Poco a poco, las estrellas jóvenes van pasando todas de clase I a clase III y luego a sistemas planetarios como el nuestro.
- Las estrellas masivas hacen este proceso muy rápidamente, y aún no entendemos como o qué tipo de planetas forman. Las estrellas menos masivas, forman planetas de todos tipos y poco a poco vamos entendiendo este proceso.

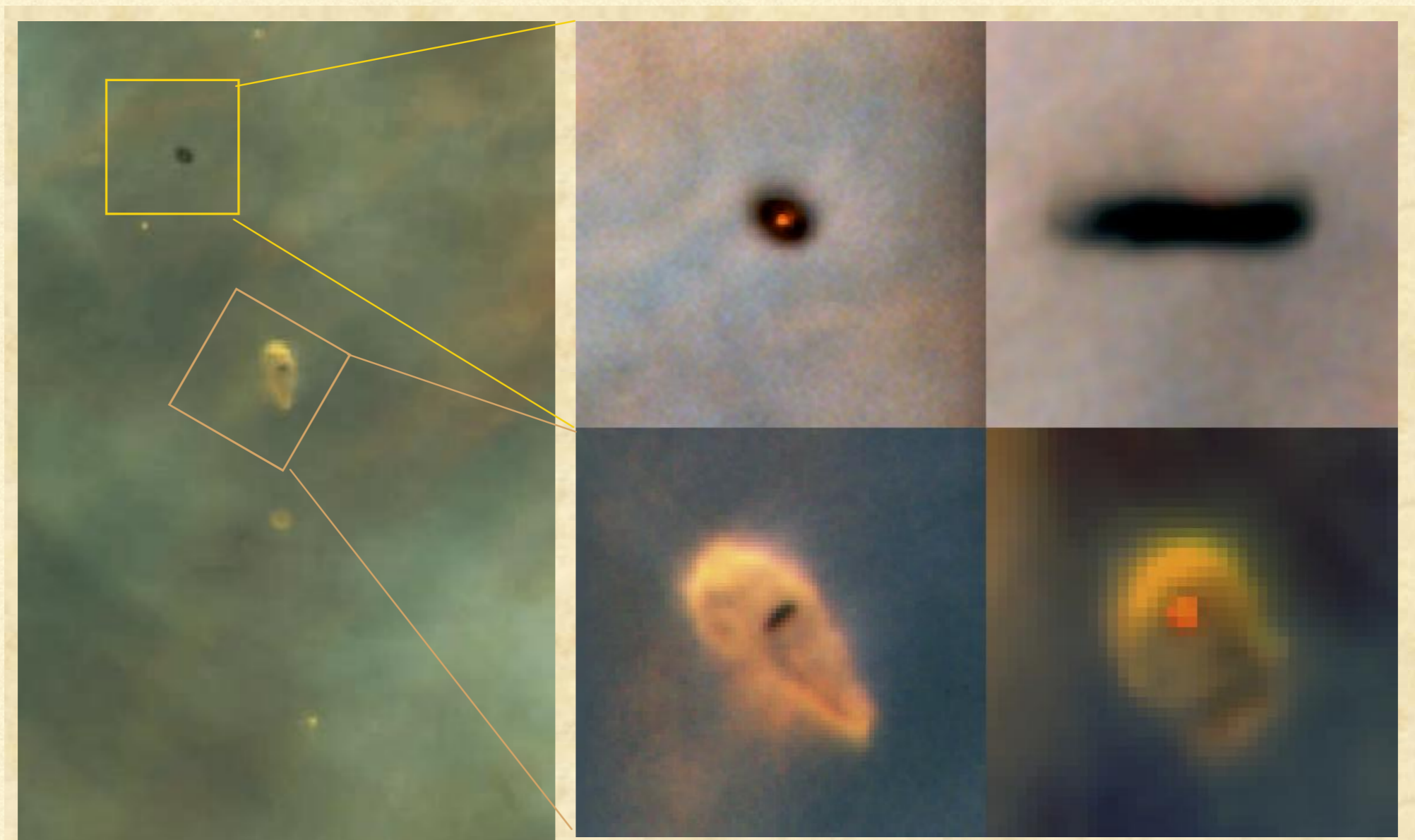


# EVIDENCIA OBSERVACIONAL



# EVIDENCIA OBSERVACIONAL

fotoevaporación de discos protoplanetarios en el  
cúmulo de la Nebulosa de Orión



*(O'Dell & Wen 1992; McCaughrean & O'Dell 1996)*

# EVIDENCIA OBSERVACIONAL

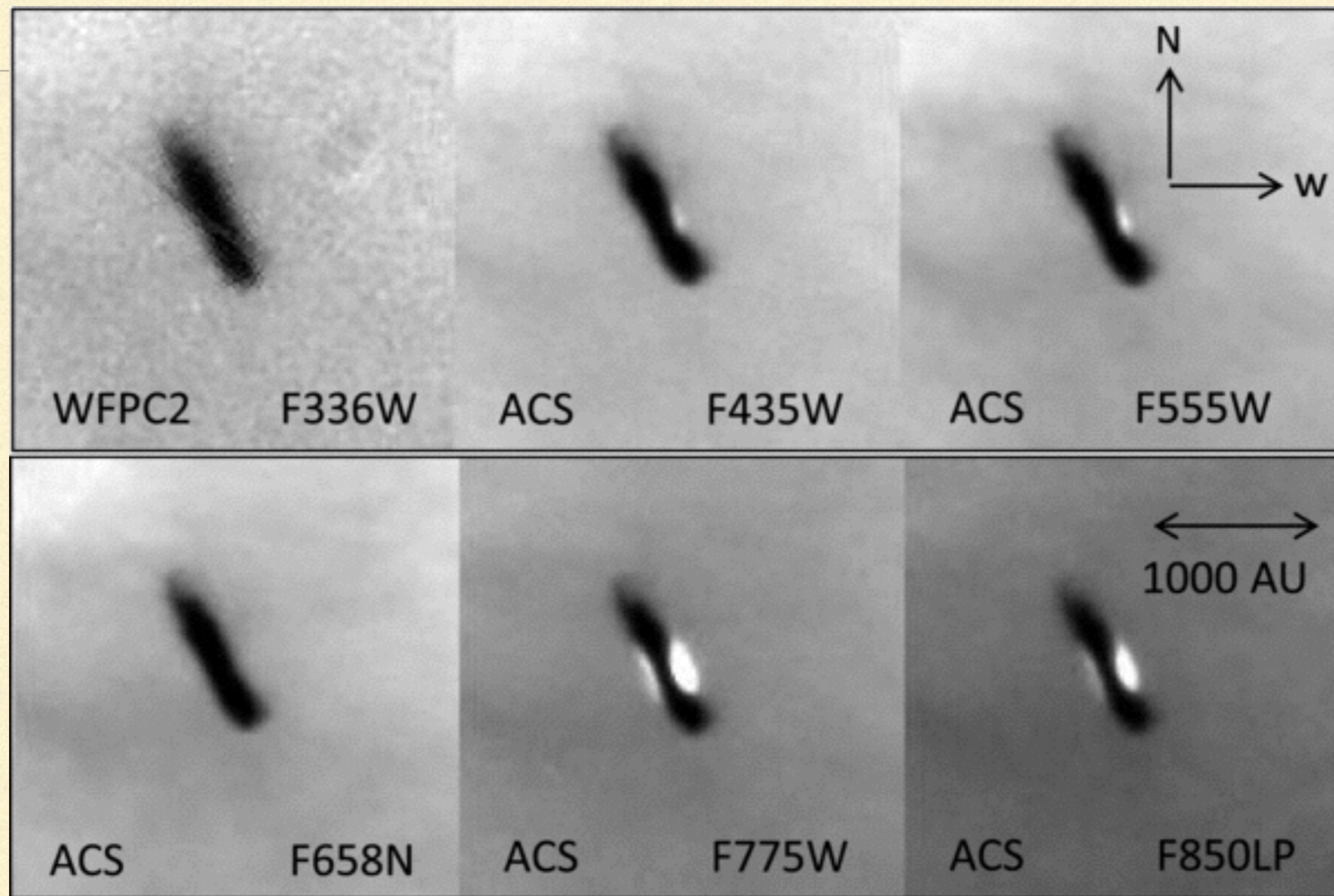
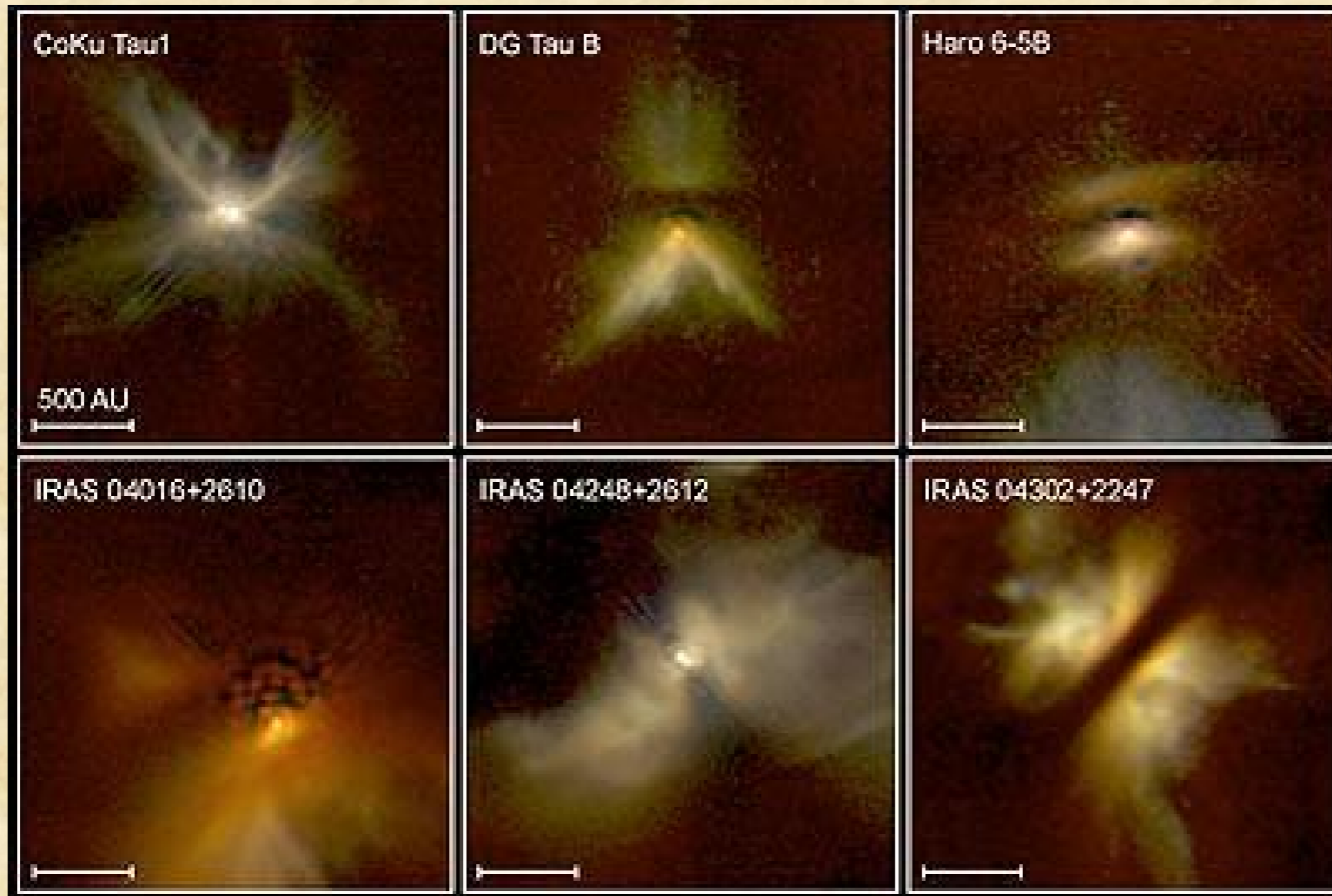


Foto-evaporación: imágenes del telescopio Hubble de un disco protoplanetario en seis distintos filtros fotométricos. Hacia el color rojo, podemos ver a la estrella joven brillando en el centro.

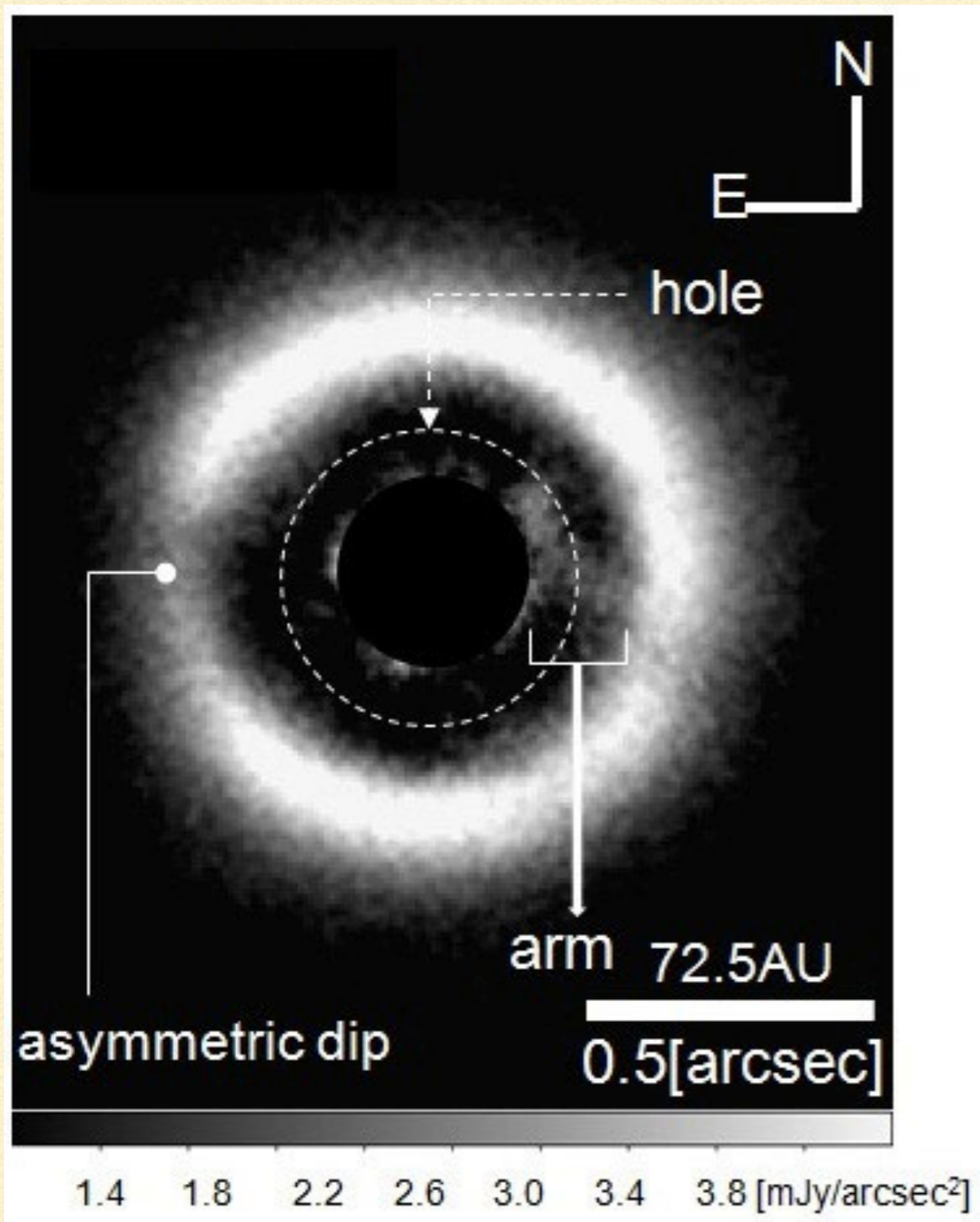
# EVIDENCIA OBSERVACIONAL

## NICMOS Images of Protoplanetary Disks in Taurus



Padgett et al. (1999)

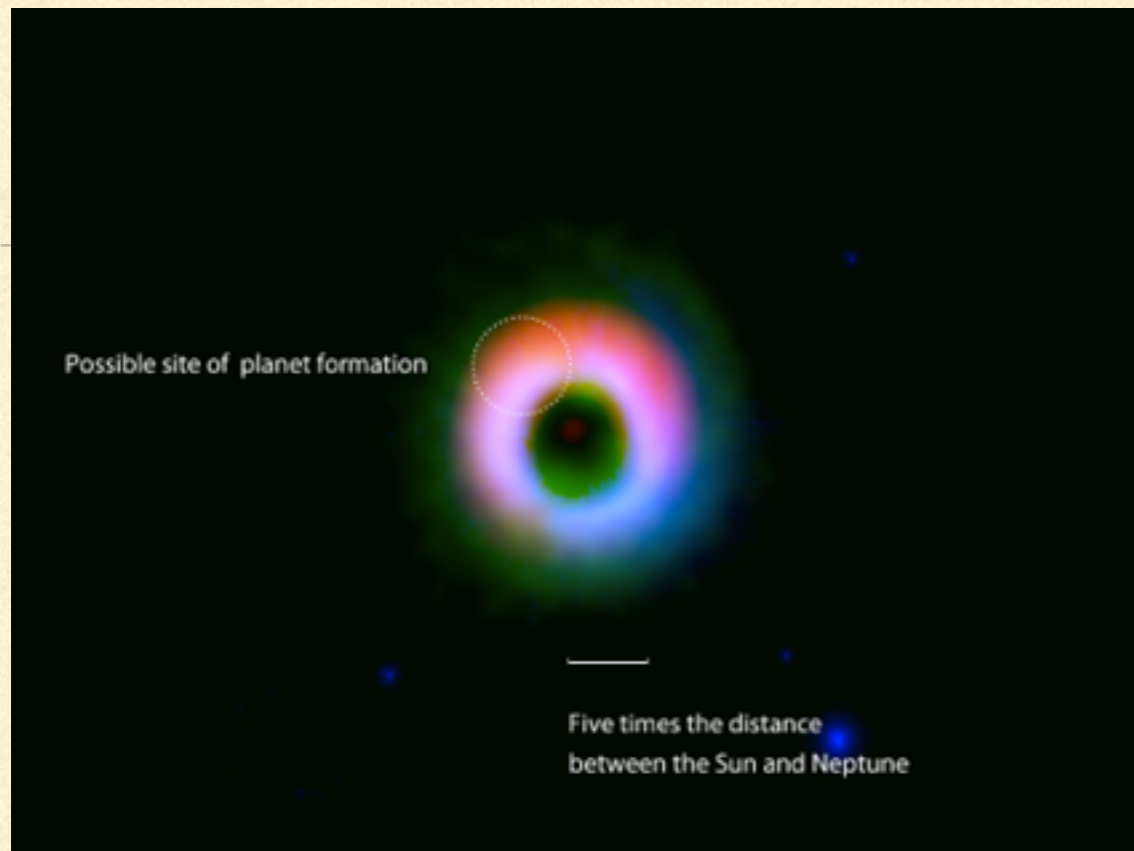
# EVIDENCIA OBSERVACIONAL



## Direct Infrared Image of the Protoplanetary Disk around a Young Star

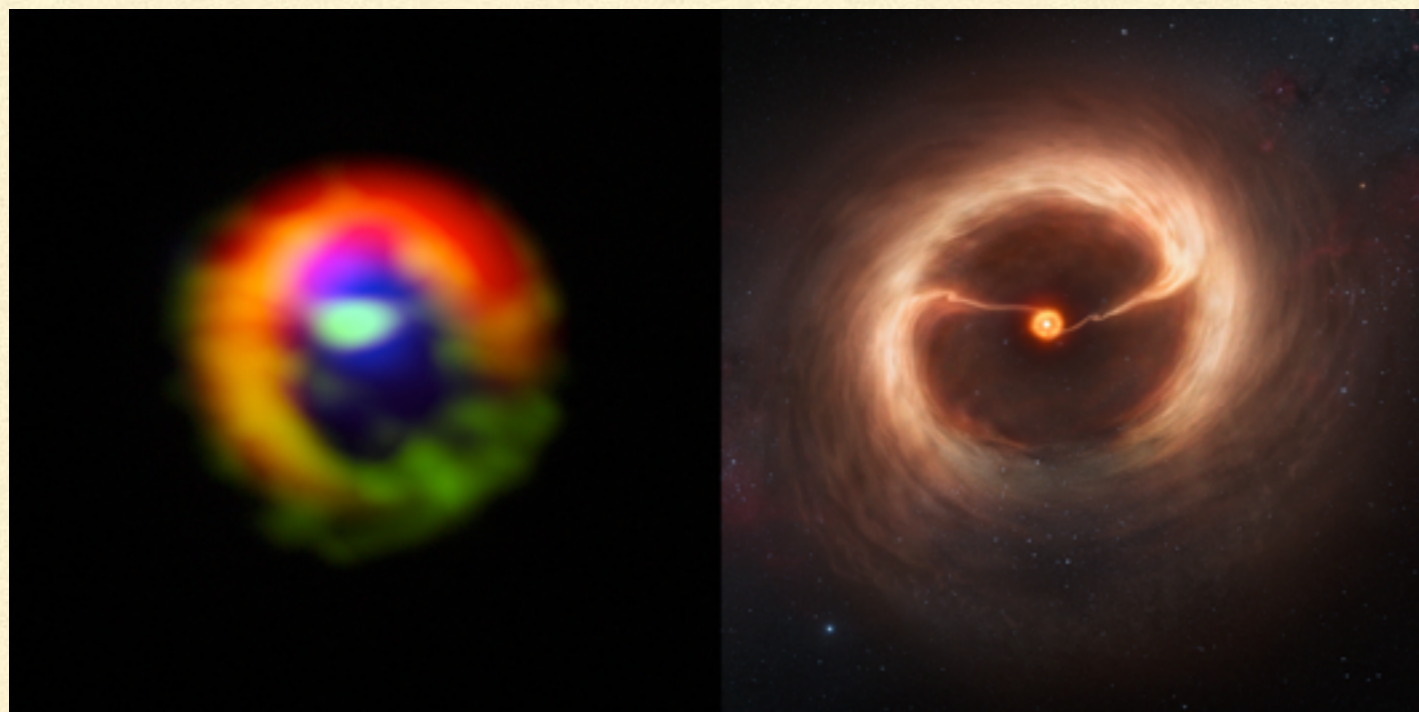
- Mayama+Duong, 12 (Japón, Princeton) primeras observaciones directas de un disco polvoso extendido con pausa notoria y transporte de material mediante un brazo. 2MASS J16042165-2130284 (J1604) en Upper Scorpius
- Estas observaciones requirieron de una cámara infrarroja de alto contraste en el telescopio Subaru de 8.2m, con sistema de óptica activa.

# EVIDENCIA OBSERVACIONAL

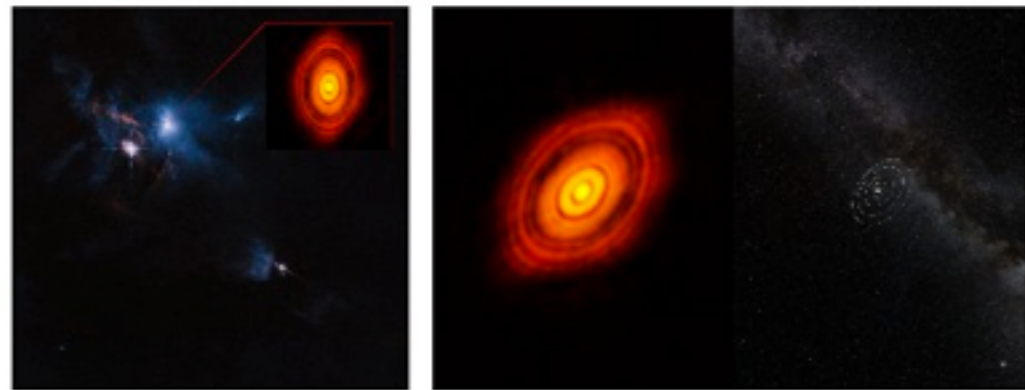
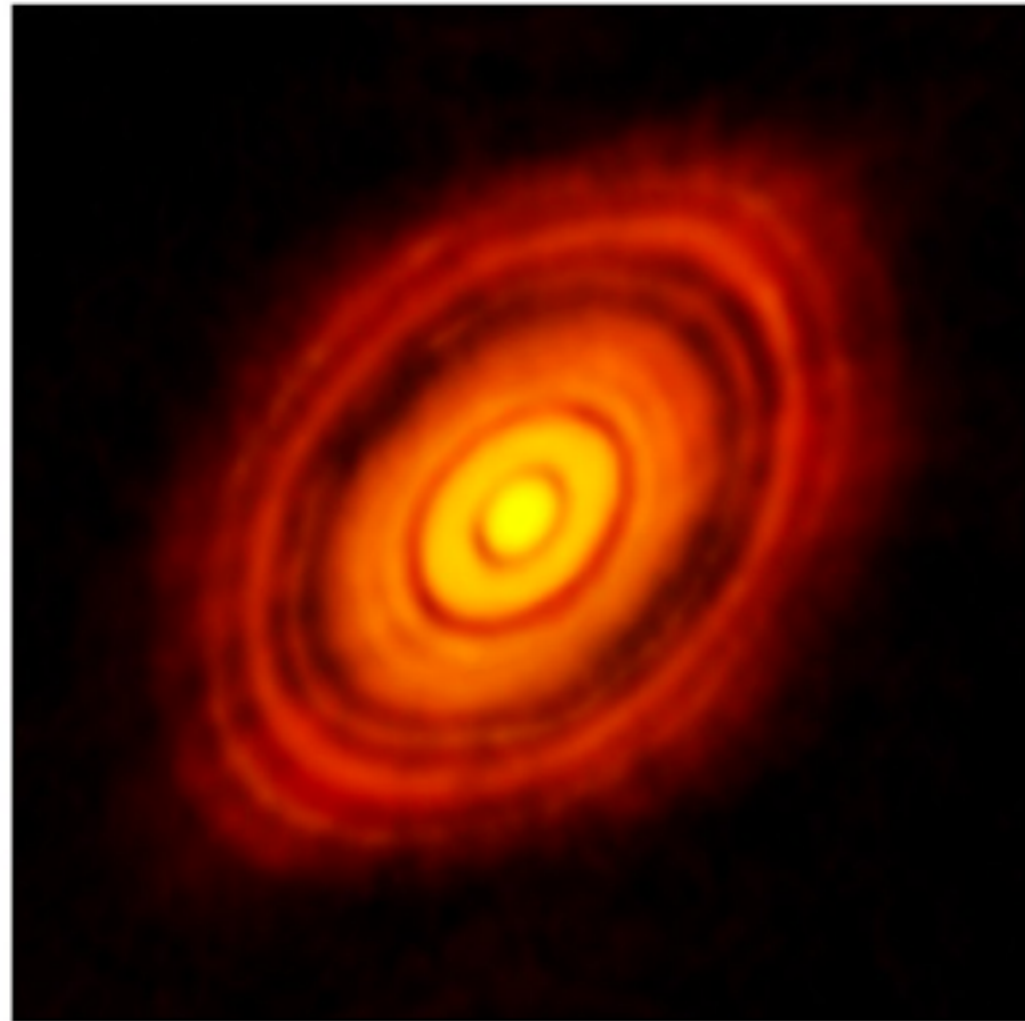


## Direct Infrared Image of the Protoplanetary Disk around a Young Star

- Combinando datos del Subaru, pero ahora añadiendo datos de radio-continuo de ALMA se ha podido observar el disco alrededor de la fuente HD 142527, con la distribución de polvo (infrarrojo, rojo) y una concentración posiblemente debida a un protoplaneta.
- Luego ALMA reveló en el mismo sistema, el movimiento de polvo Y GAS que posiblemente confirma modelos de transferencia de gas desde el disco hacia planetas gaseosos en formación.



# EVIDENCIA OBSERVACIONAL



**Fig. 1 (top):** This is the sharpest image ever taken by ALMA — sharper than is routinely achieved in visible light with the NASA/ESA Hubble Space Telescope. It shows the protoplanetary disc surrounding the young star HL

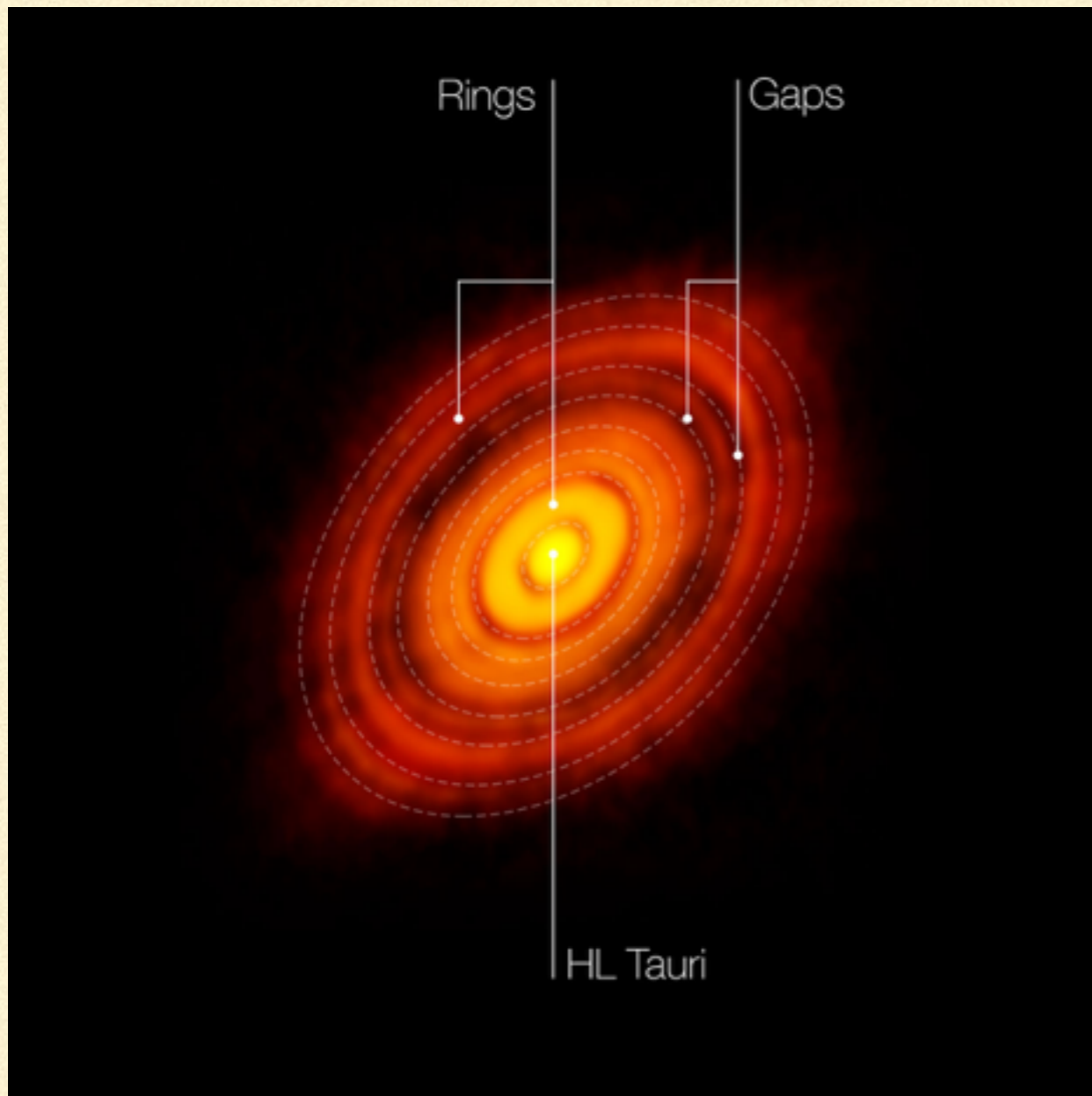
## Direct Infrared Image of the Protoplanetary Disk around a Young Star

- Disco de HL Tauri, como prueba de nuevo arreglo de alta resolución (35 mas, baseline=15 km) para ciclo 3.
- “These features are almost certainly the result of young planet-like bodies that are being formed in the disc. This is surprising since such young stars are not expected to have large planetary bodies capable of producing the structures we see in this image”.
- HL Tauri se encuentra a 450 años luz de distancia y tiene menos de 1 millón de años de edad.
- El primer modelo de emisión radiactiva del disco de HL Tau fue realizado en México por D’Alessio, Calvet y Hartmann (1997)



# EVIDENCIA OBSERVACIONAL

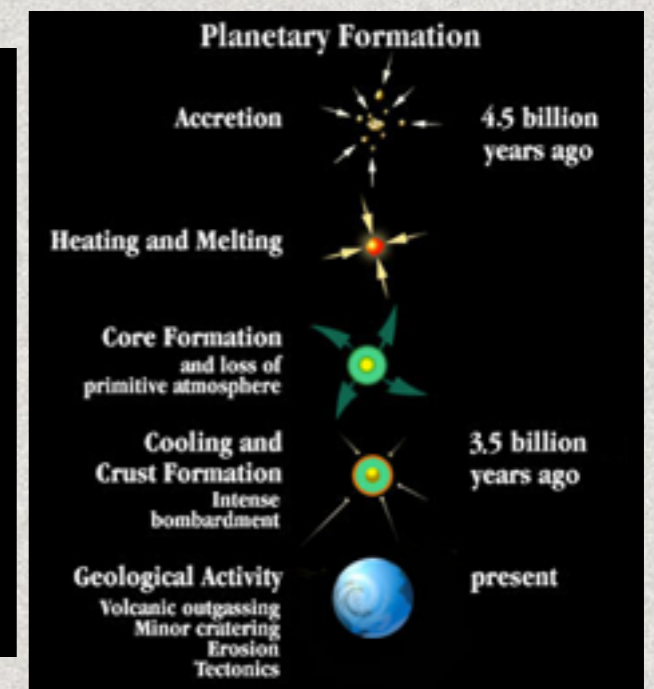
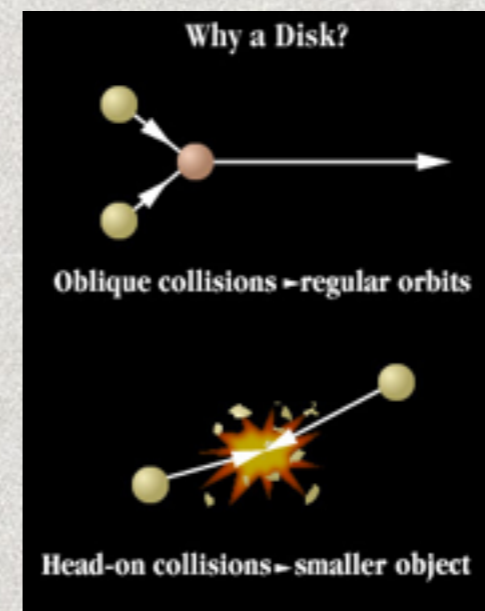
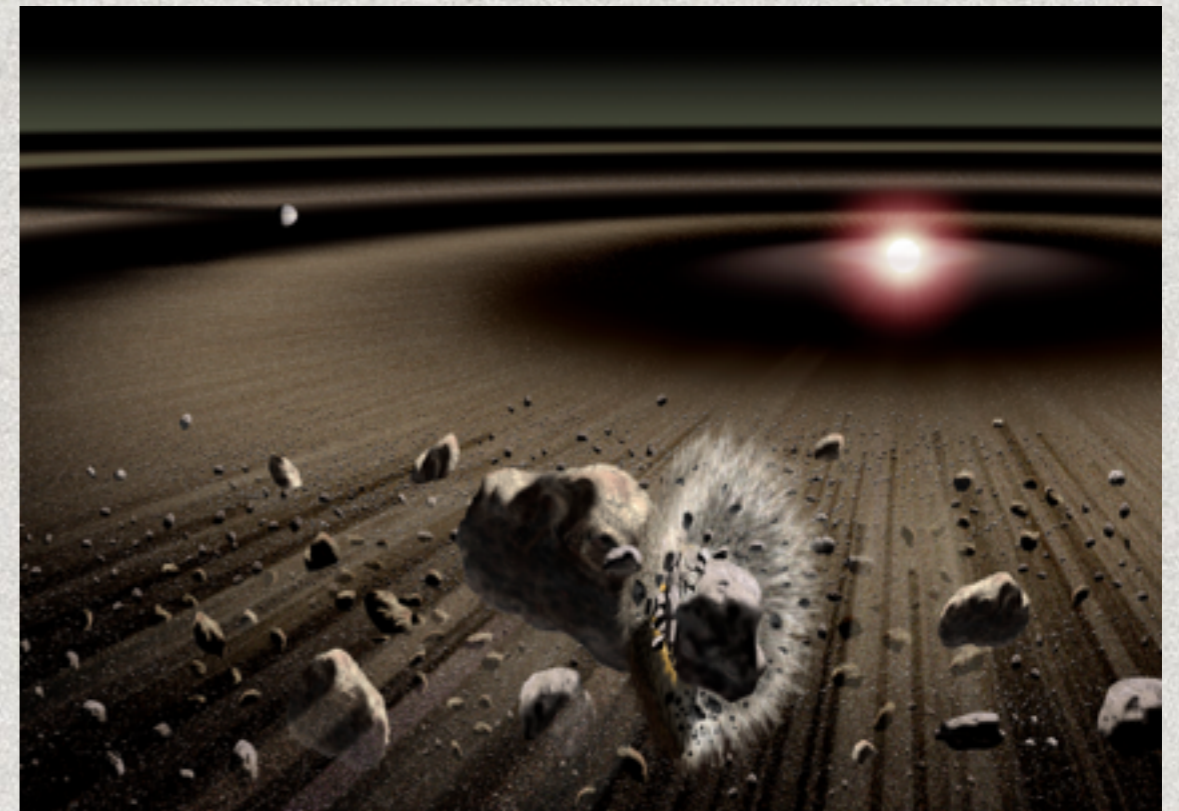
## Direct Infrared Image of the Protoplanetary Disk around a Young Star



- Disco de HL Tauri, como prueba de nuevo arreglo de alta resolución (35 mas, baseline=15 km) para ciclo 3.
- “These features are almost certainly the result of young planet-like bodies that are being formed in the disc. This is surprising since such young stars are not expected to have large planetary bodies capable of producing the structures we see in this image”.
- HL Tauri se encuentra a 450 años luz de distancia y tiene menos de 1 millón de años de edad.
- El primer modelo de emisión radiactiva del disco de HL Tau fue realizado en México por D’Alessio, Calvet y Hartmann (1997)

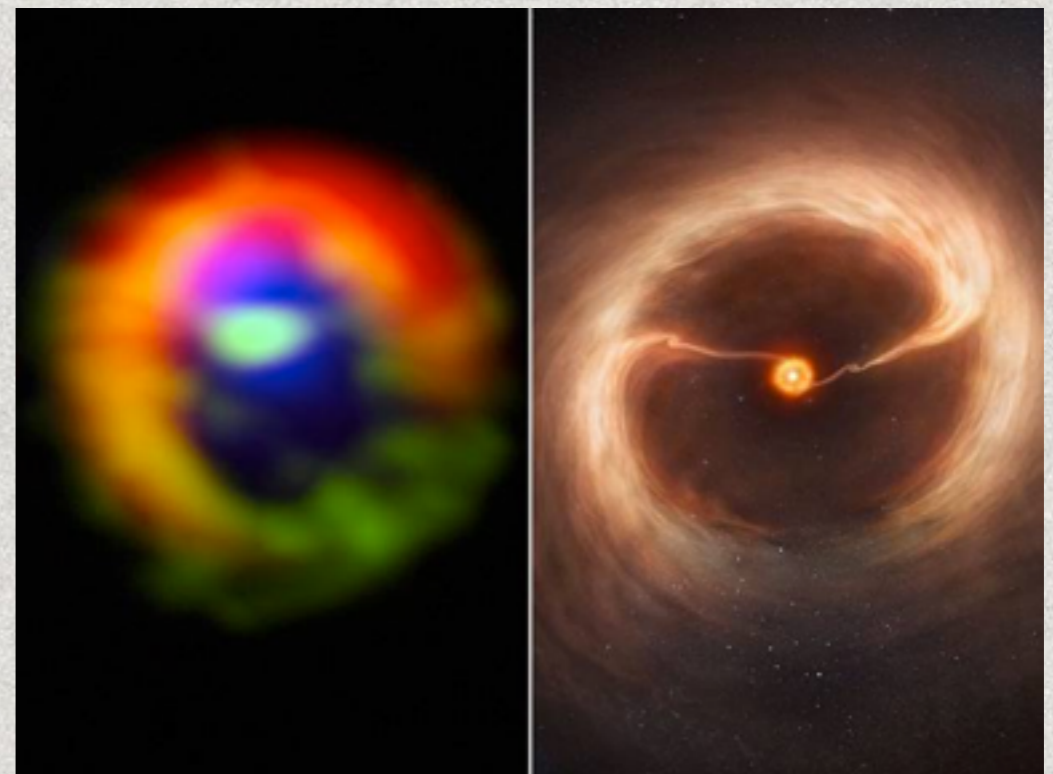
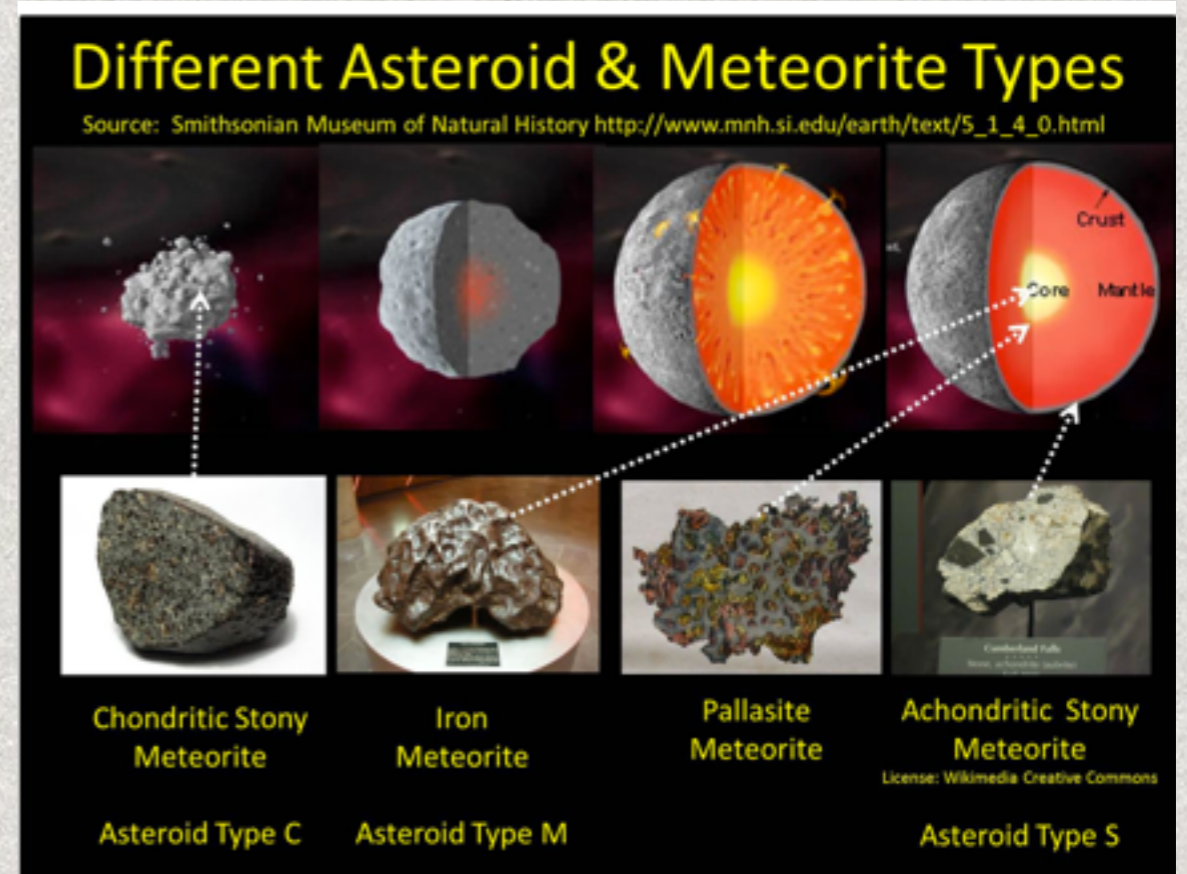
# Teoría de formación de sistemas planetarios.

- \* En el disco pp, el polvo está inicialmente mezclado con el gas del disco de modo uniforme. Luego por gravedad las partículas pesadas se asientan hacia el plano medio del disco - diferenciación.
- \* Tras de la fase de formación y diferenciación, los discos protoplanetarios contiene partículas sólidas con tamaños del orden de micrómetros. CONDENSACION.
- \* Las colisiones entre las partículas llevan eventualmente a la formación de fragmentos más grandes. Al principio las partículas tienen colisiones “pegajosas” porque la energía disipada es del orden de la velocidad relativa del impacto. Posiblemente haya ayuda de cascarones pegajosos (hielos) y carga electrostática. ACRECION
- \* Eventualmente, al formarse partículas suficientemente grandes ( $\mu\text{m}$ -> $\text{cm}$ -> $\text{km}$ ) actúa la gravedad y puede haber atracción de más planetesimales. Los dos procesos son distintos, pero actúan hacia un resultado común.
- \* En el final del proceso, los planetesimales se hayan en un disco que por procesos dinámicos agrupa y **fragmenta** para formar cuerpos de 100 km o más. Esta es la fase de *protoplaneta*.



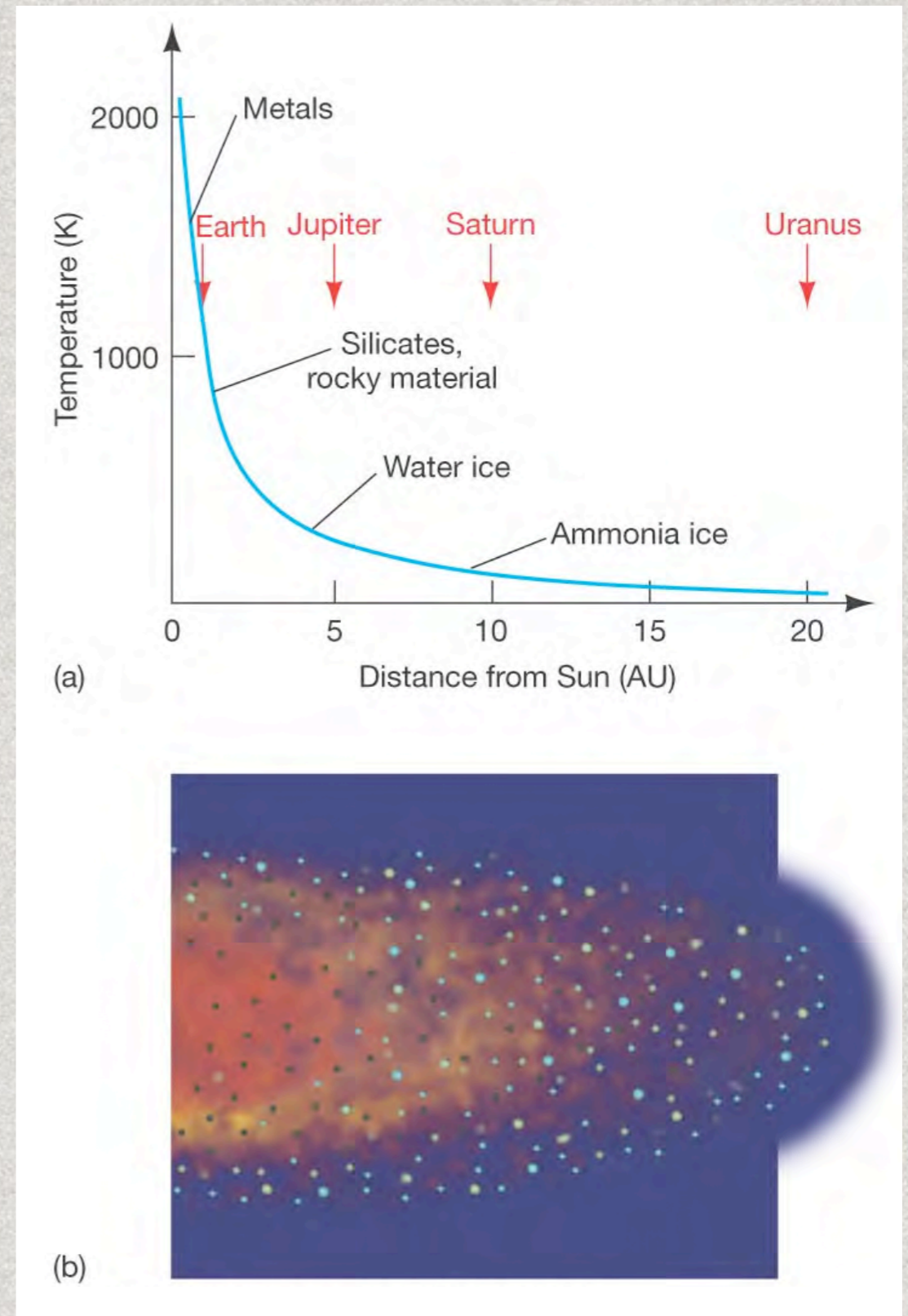
# Teoría de formación de sistemas planetarios.

- \* Diferenciación de planetas rocosos: elementos más pesados como Fe, Ni, se hunden hacia los núcleos mientras silicatos y compuestos más ligeros se quedan más cerca de la superficie.
- \* Planetas jovianos comienzan con núcleos diferenciados de roca y hielos hasta masas críticas de aproximadamente 15 Me y comienzan a capturar grandes cantidades de H y He desde disco.
- \* Las atmósferas de los planetas rocosos comienzan a formarse por evaporación de esos elementos desde el interior - desgasificación (outgassing).
- \* Aun no queda claro cual proceso domina en un planeta como la tierra, si captura o desgasificación, para formar una atmósfera muy densa y retención de océanos de agua líquida.



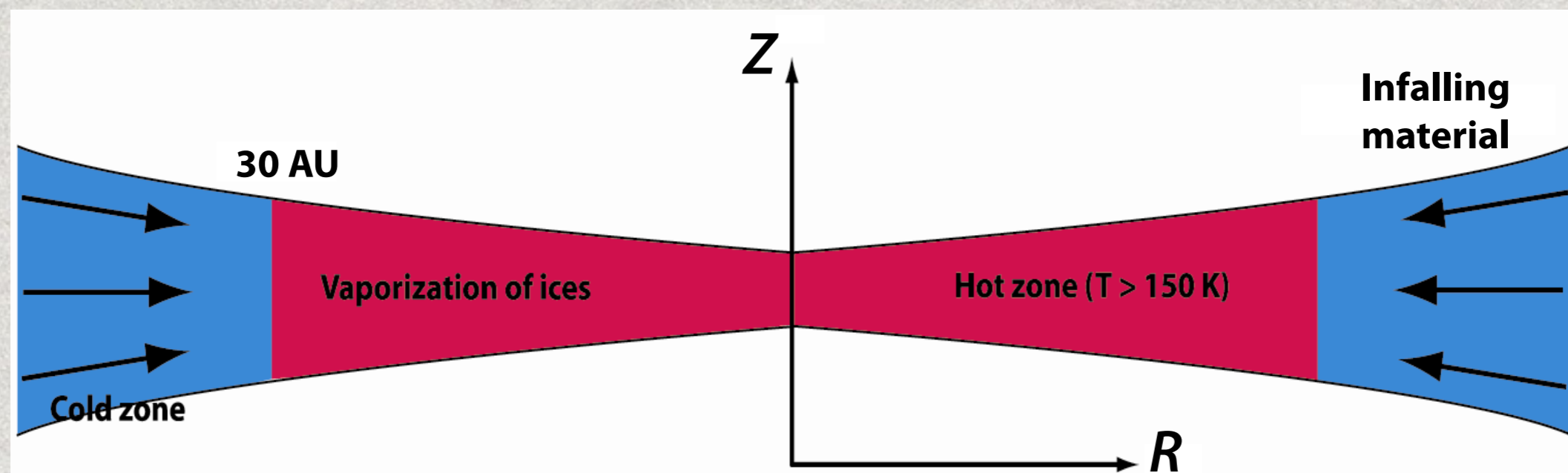
# Teoría de formación de sistemas planetarios.

- \* La distancia es importante!!. A distancias cercanas al Sol (1-10 AU) se evaporan casi todos los hielos planetesimales ( $T > 100\text{K}$ ). De esta manera se entiende que los planetas jovianos se hayan formado en el exterior. Sin embargo, Júpiter pareciera estar mucho más cerca de lo debido, y entonces se habla de procesos de migración planetaria.
- \* Otro problema a resolver: los discos se disipan en  $t < 5\text{ Myr}$  debido a los vientos de la estrella central, que es además MUY activa en la fase T Tauri. La captura de atmósferas en planetas gigantes debe ser rápida y eficiente.



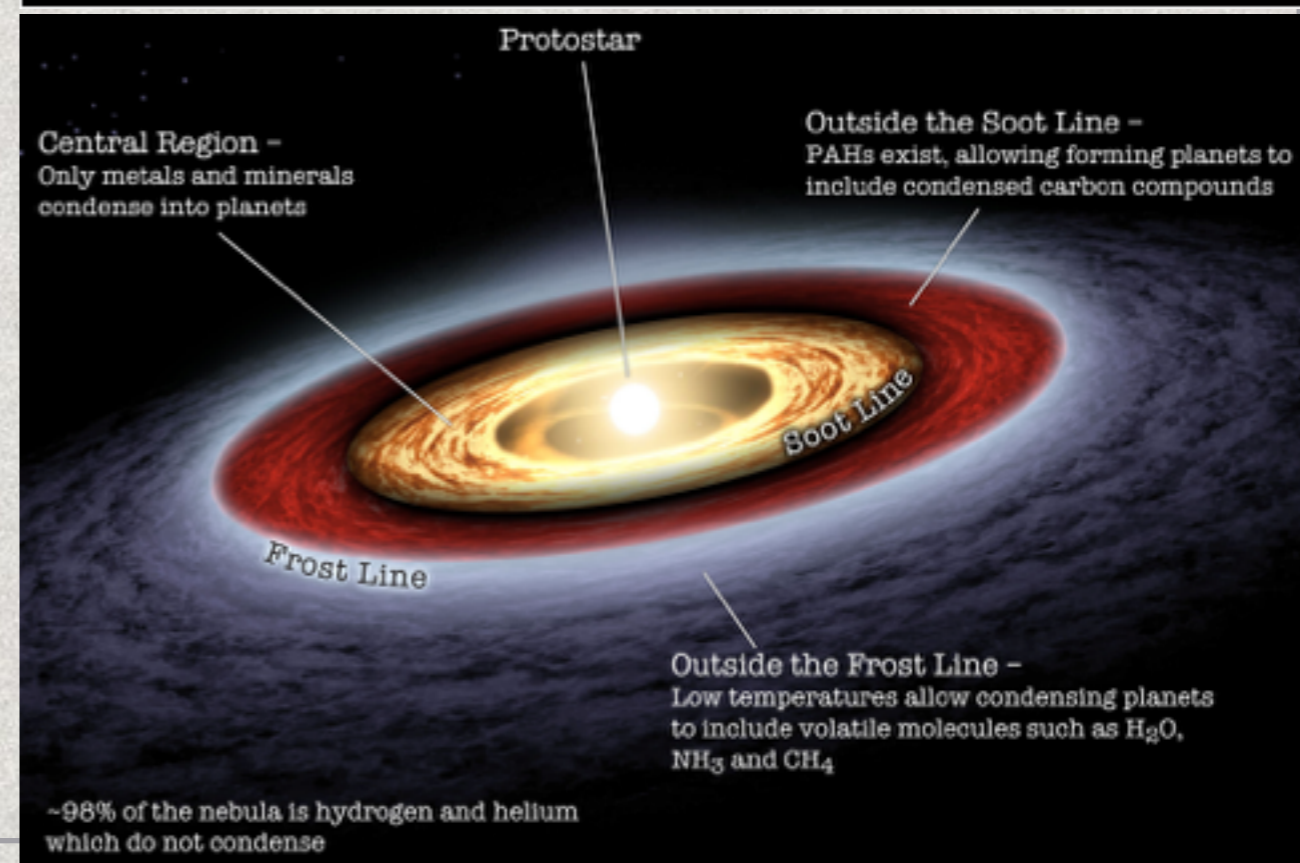
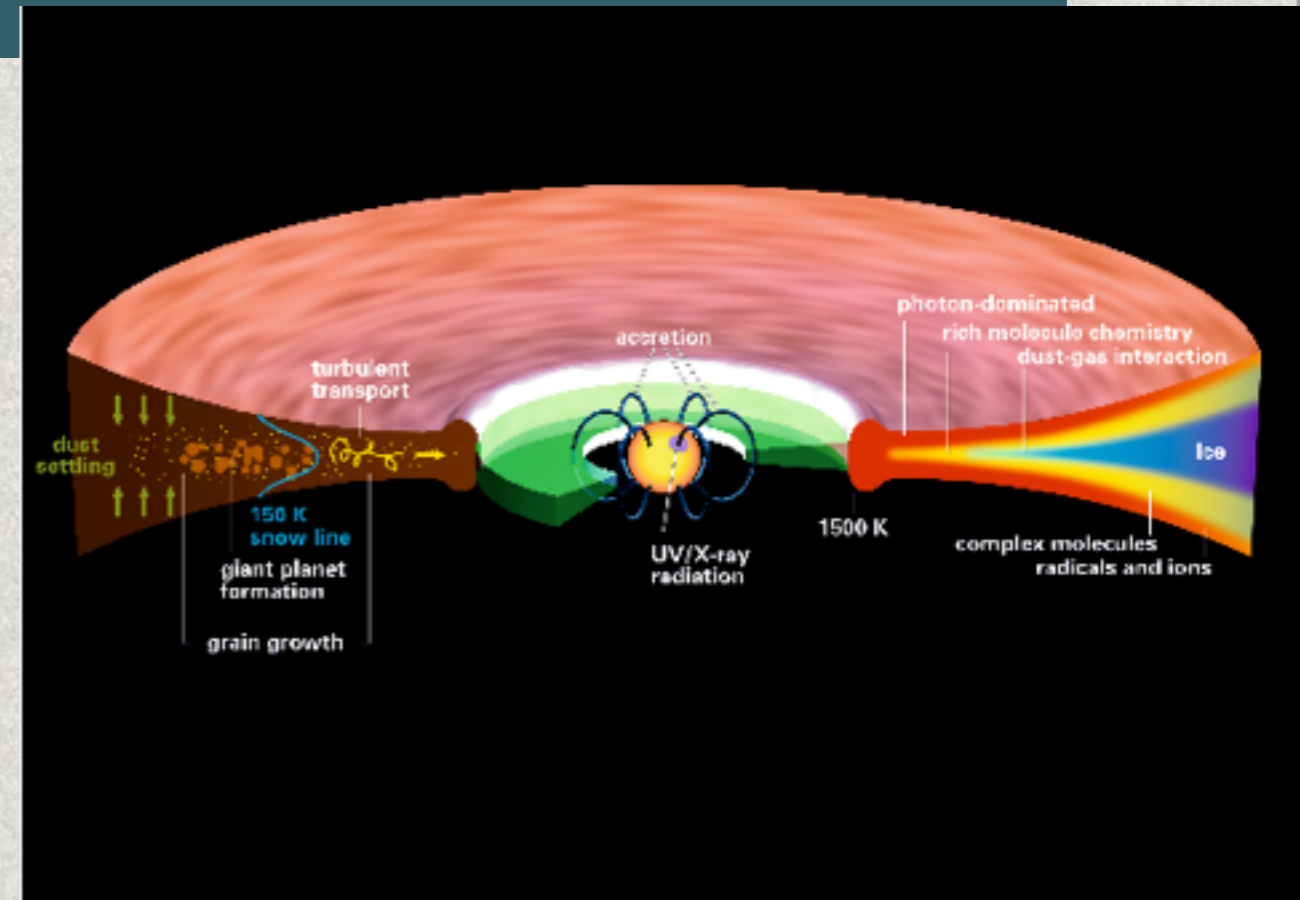
# Teoría de formación de sistemas planetarios.

- \* Nebula protosolar: el disco pp forma dos reservorios de hielos. Un primer reservorio (frío) se forma para  $R > 30$  AU, conformado por hielos amorfos del medio interestelar. El segundo reservorio (caliente) se forma de materiales volátiles transportados desde el medio interestelar hacia el interior del disco. Los materiales que lleguen a zonas con  $T > 150$  K se evaporan, pero luego hay un enfriamiento del disco posterior a la formación de planetas y en la parte interior a 30 AU cualquier condensación se da en forma cristalina.
- \* Remoción de la nebulosa protosolar:
- \* Presión de Radiación, para empujar las partículas fuera de la nube. Viento solar (principalmente H ionizado) puede empujar gas y polvo.
- \* Barrido de material de escombros por los planetas - período de bombardeo pesado (hace  $\sim 4$  Gyr)
- \* Eyecciones de material por encuentros cercanos entre planetas.



# Teoría de formación de sistemas planetarios.

- \* Diferenciación por temperatura: En el modelo tradicional la formación de planetas rocosos o gaseosos queda determinado por un gradiente térmico. La división se llama línea de nieve.
- \* La densidad superficial de planetesimales es mayor hacia afuera de la línea de nieve, en las partes suficientemente frías como para conservar hielos.
- \* A mayor densidad superficial, es más rápida la formación de planetas.
- \* En la zona exterior del SS, los planetas lograron crecer hasta unas 20 Me mientras hubo gas para capturar.
- \* En el interior, no hubo captura de gas.
- \* Importante: las órbitas fueron casi circulares y esto requirió de un disco circular. He ahí que la diferenciación sea mas o menos clara en nuestro sistema.



# Teoría de formación de sistemas planetarios.

**Table 1: Condensed Volatiles on Surfaces in the Solar System**

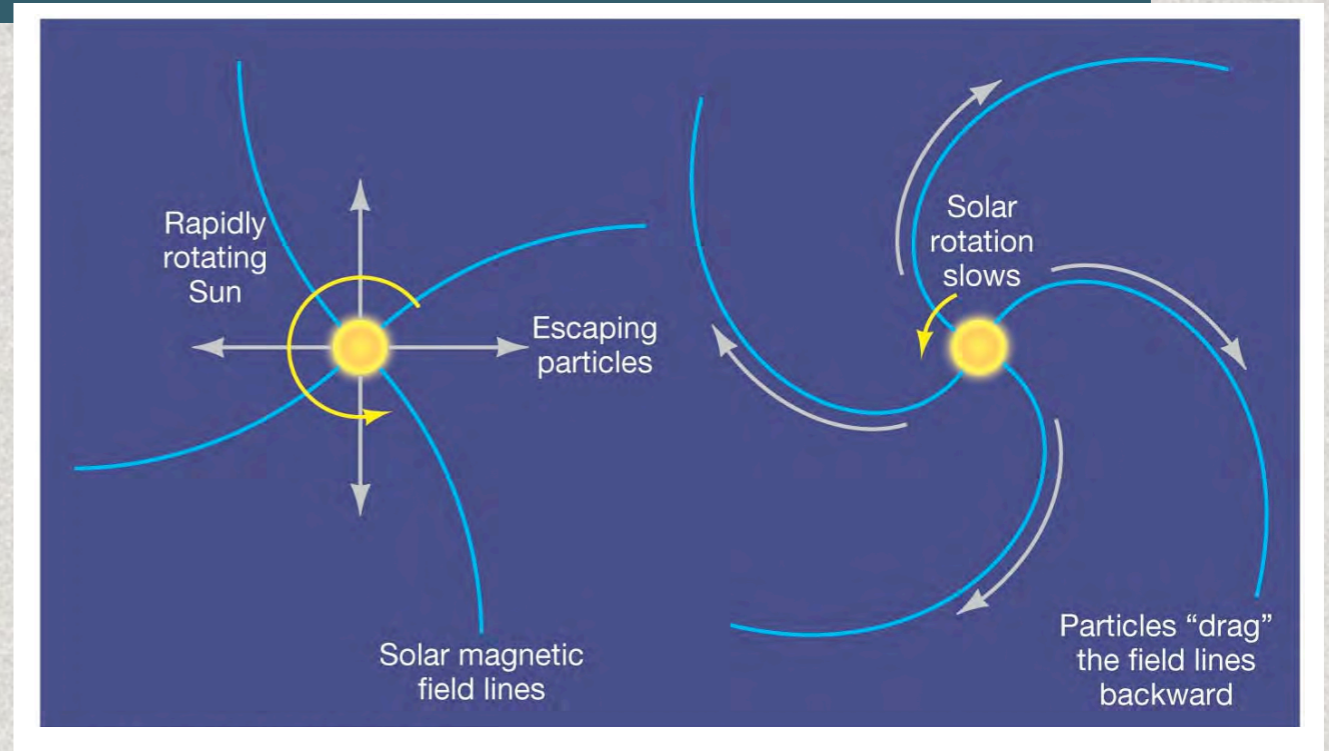
<i>Element or Compound</i>	<i>Normal Freezing Temperature (at 1 atmosphere of pressure)</i>	<i>Where Is It Found?</i>
H <sub>2</sub> O water	273 K (0° C or 32° F)	Earth, Mars, satellites of outer planets (see table 2), comets, and maybe Mercury and our Moon
CO <sub>2</sub> carbon dioxide	215 K (-58° C or -72° F)	Mars, Triton, comets, perhaps Callisto
SO <sub>2</sub> sulfur dioxide	200 K (-73° C or -99° F)	Io, Europa, Callisto
NH <sub>3</sub> ammonia	195 K (-78° C or -108° F)	Comets; also predicted on icy satellites but not yet observed there
CH <sub>4</sub> methane	91 K (-182° C or -296° F)	Triton, Pluto, comets, Kuiper belt objects
O <sub>3</sub> ozone	80 K (-193° C or -315° F)	Ganymede, Rhea, Dione
CO carbon monoxide	68 K (-205° C or -337° F)	Triton, Pluto, comets
N <sub>2</sub> nitrogen	63 K (-210° C or -346° F)	Triton, Pluto, comets
O <sub>2</sub> oxygen	55 K (-218° C or -361° F)	Ganymede

Note: K = kelvins

For comparison, the coldest recorded temperature on Earth was -89 degrees Celsius (-129 degrees Fahrenheit), measured on July 21, 1983 at Vostok, Antarctica.

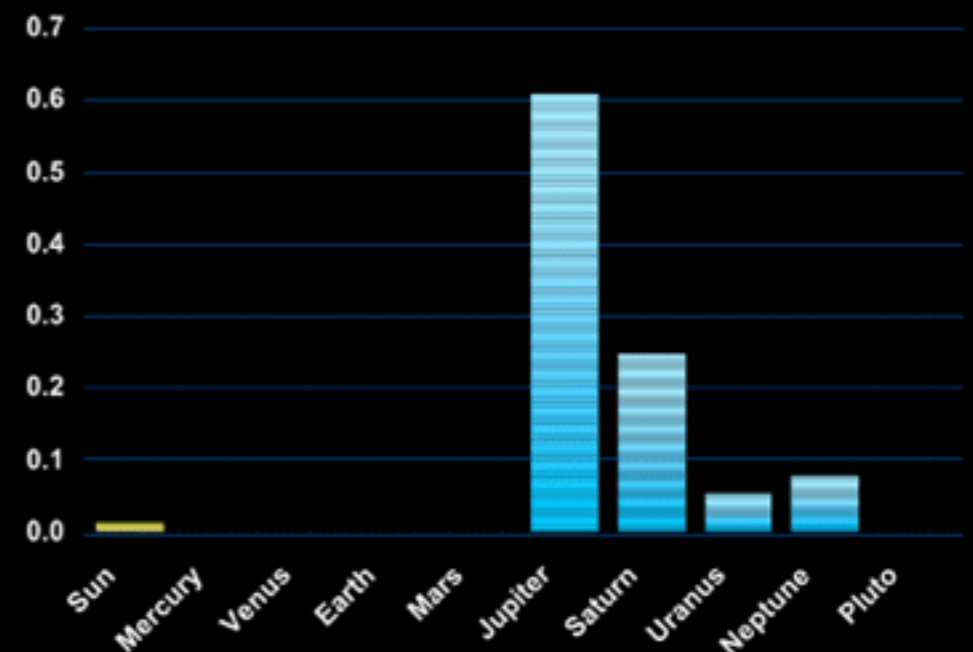
# Teoría de formación de sistemas planetarios.

- \* Momento angular. Conforme la nebulosa que formó al Sol se colapsó en la fase de Clase 0, se necesitó conservar el momento angular del sistema.
- \* Hoy en día el Sol NO conserva la mayoría del momento angular del sistema: Júpiter tiene 60% y los cuatro planetas jovianos suman casi el 99%.
- \* El Sol debió de transferir la mayoría de su momento angular a los planetas exteriores a través de procesos de fricción. Muy posiblemente el arrastre de partículas se dio a lo largo de líneas de campo magnético (efecto de frenado magnético)



## Distribution Standard Model

(Relative Percentages of Total Angular Momentum)

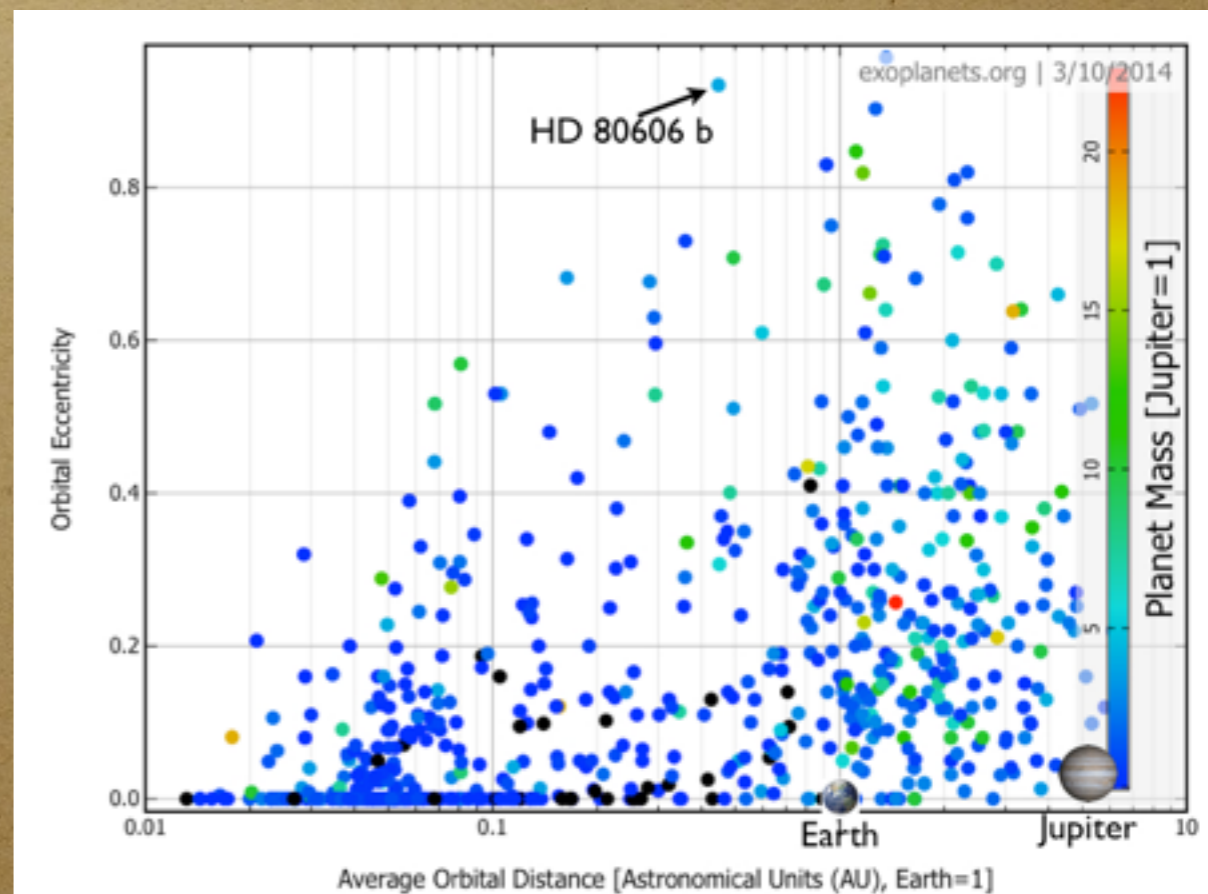
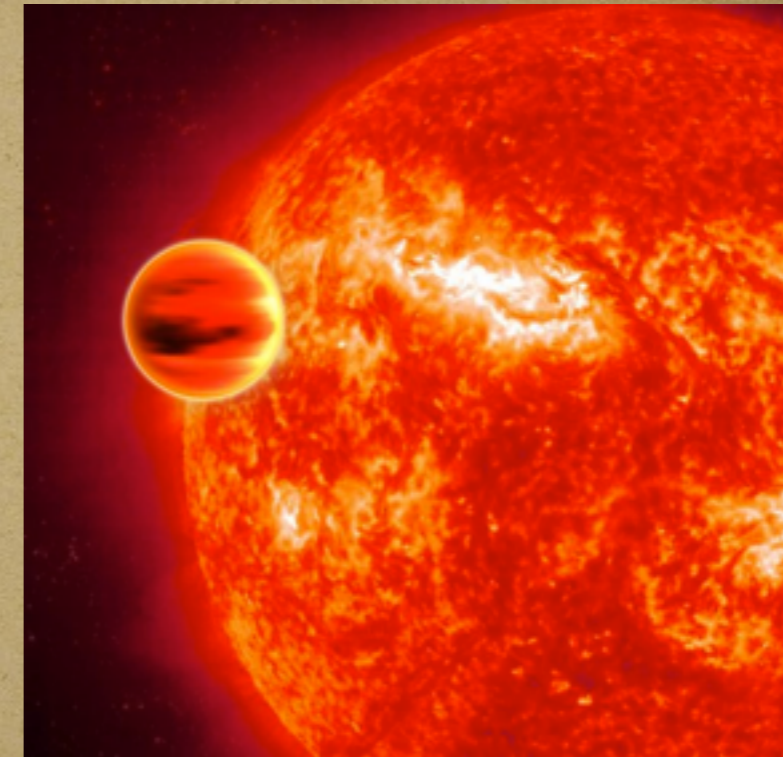




# No todo es coser y cantar

## migración planetaria

- Dos aspectos de las propiedades orbitales de numerosos exoplanetas descubiertos difieren del modelo simple que usamos para explicar nuestro SS.
- 1. Júpiteres calientes: se esperaría que planetas tipo joviano se formaran muy preferentemente fuera de la línea de nieve para favorecer una formación rápida.
- 2. Muchos planetas parecen tener órbitas que difieren mucho de la circularidad. Casi parecería que no se formaron de discos.

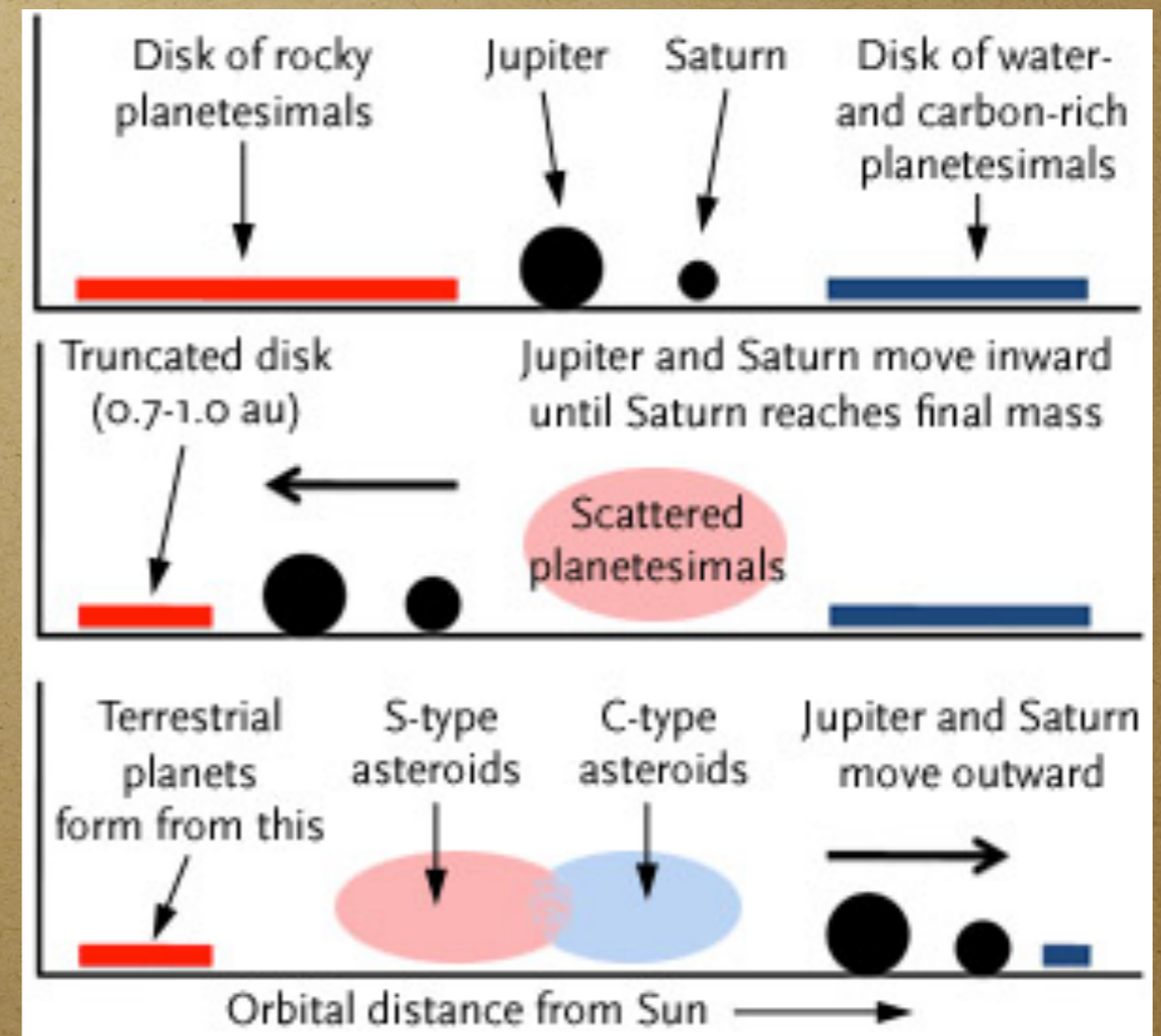


# No todo es coser y cantar

## migración planetaria

### El GRAN ARREO (Grand Tack) del Sistema Solar.

- Se cree que Júpiter pudo formarse a un radio de 3.5 UA Y migrar hasta un radio de 1.5 UA (donde está ahora Marte) antes de moverse en reversa hasta su órbita actual
- Esto puede explicar dos cosas: a) la masa baja de Marte y la composición mezclada de asteroides en el cinturón entre Marte y Júpiter.
- Júpiter pudo haberse detenido o frenado en su arrastre debido a la formación de Saturno y eventualmente pudo migrar de regreso al perder momento angular.
- Al regresar a su órbita extena, Júpiter y Saturno pudieron dejar un sistema solar interno sin materiales volátiles, de modo que formaron 4 planetas rocosos. Marte en realidad se encuentra a una distancia donde debió de tener mayor masa y una atmósfera mucho más densa (como un Neptuno)
- Sin embargo, la pistola humeante podría estar en el cinturón de asteroides, donde Júpiter pudo haber traído material volátil hacia una región donde dominaban los asteroides rocosos. Hoy en día el cinturón tiene una fracción de masa en volátiles que no es fácil de explicar sin un modelo como el del gran Arreo.

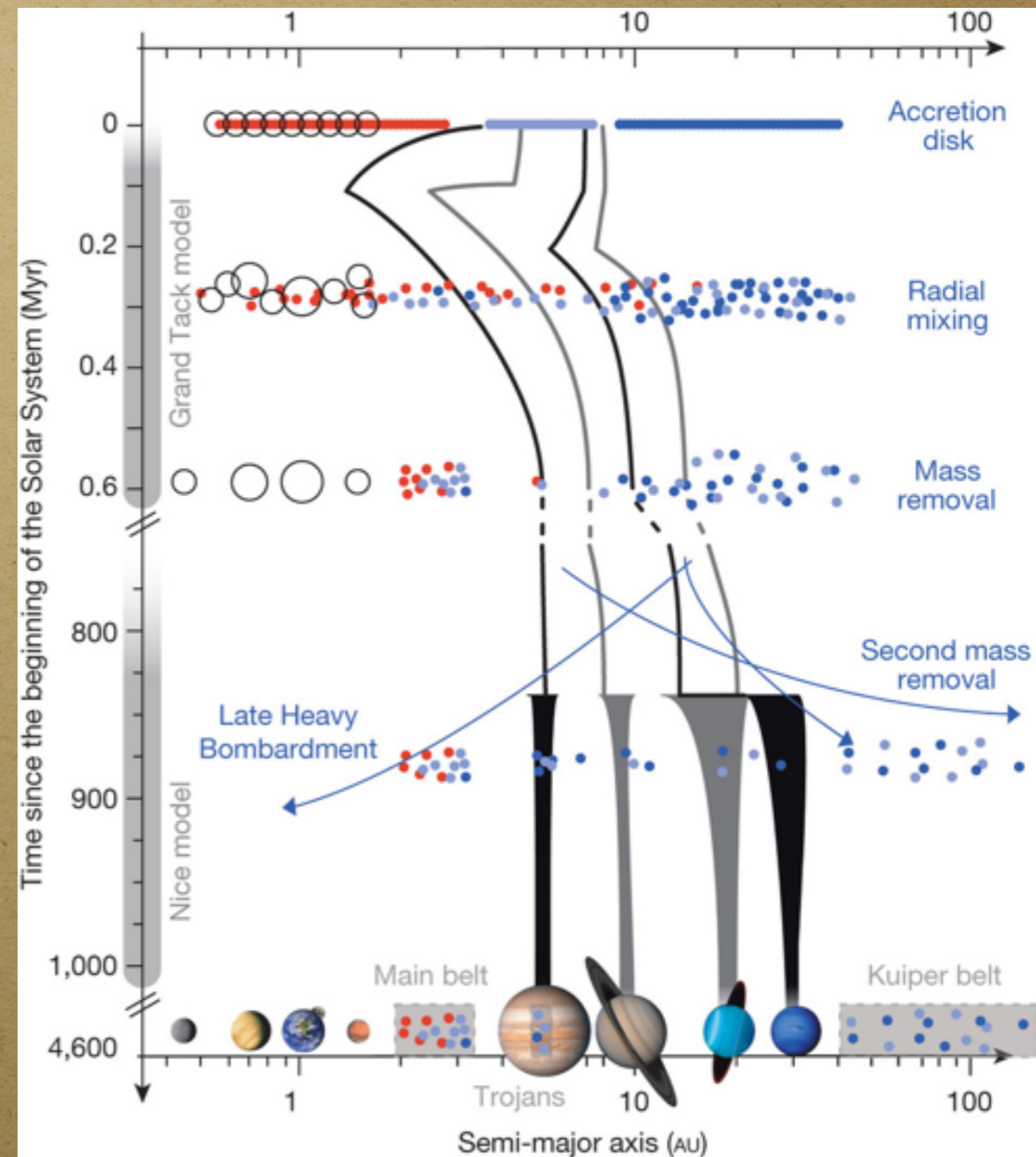


# No todo es coser y cantar

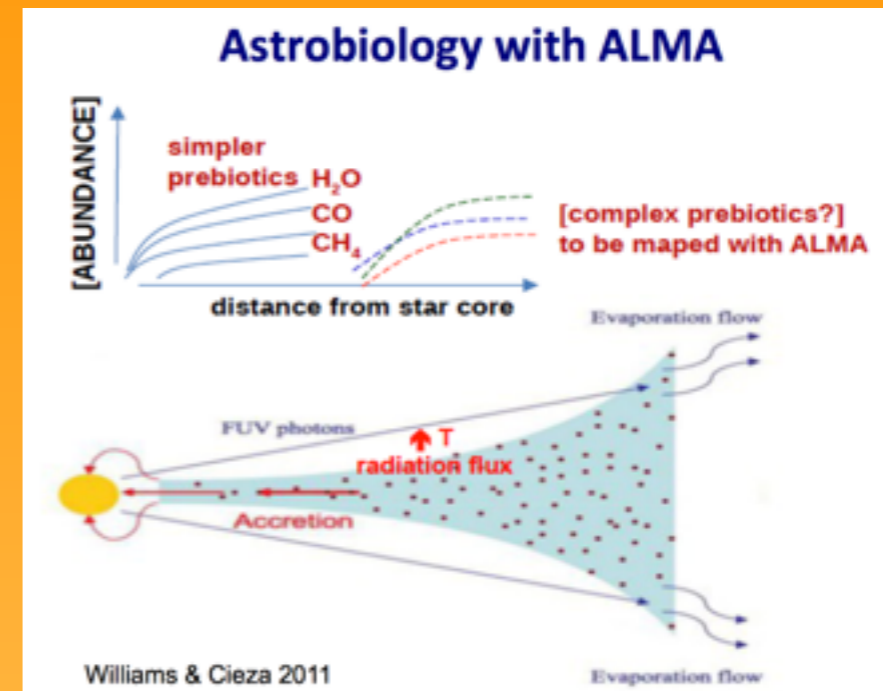
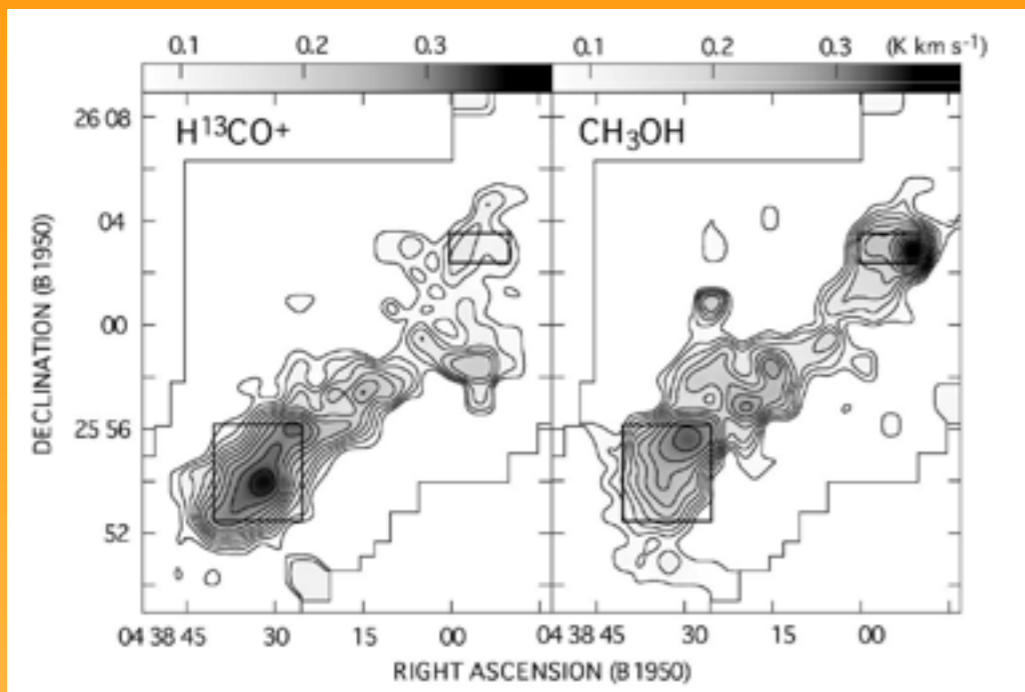
## migración planetaria

### El GRAN ARREO (Grand Tack) del Sistema Solar.

- Se cree que Júpiter pudo formarse a un radio de 3.5 UA Y migrar hasta un radio de 1.5 UA (donde está ahora Marte) antes de moverse en reversa hasta su órbita actual
- Esto puede explicar dos cosas: a) la masa baja de Marte y la composición mezclada de asteroides en el cinturón entre Marte y Júpiter.
- Júpiter pudo haberse detenido o frenado en su arrastre debido a la formación de Saturno y eventualmente pudo migrar de regreso al perder momento angular.
- Al regresar a su órbita externa, Júpiter y Saturno pudieron dejar un sistema solar interno sin materiales volátiles, de modo que formaron 4 planetas rocosos. Marte en realidad se encuentra a una distancia donde debió de tener mayor masa y una atmósfera mucho más densa (como un Neptuno)
- Sin embargo, la pistola humeante podría estar en el cinturón de asteroides, donde Júpiter pudo haber traído material volátil hacia una región donde dominaban los asteroides rocosos. Hoy en día el cinturón tiene una fracción de masa en volátiles que no es fácil de explicar sin un modelo como el del gran Arreo.



# química pre-biótica en nucleos pre-estelares y discos protoplanetarios



### Quick Picker

- CO v=0
- C<sup>17</sup>O
- CH<sub>3</sub>OH v<sub>2</sub>=0
- HCN v=0
- H<sup>13</sup>CN v=0
- DCN v=0
- CS
- NH<sub>3</sub>
- C II
- O III
- H<sub>2</sub>O v=0
- SiO v=0
- <sup>13</sup>CO v=0
- C<sup>18</sup>O
- H<sub>2</sub>CO
- HNC v=0
- HC<sup>15</sup>N v=0
- HCO<sup>+</sup> v=0
- H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>
- C I
- O I
- N II
- HDO

### splatalogue

database for astronomical spectroscopy

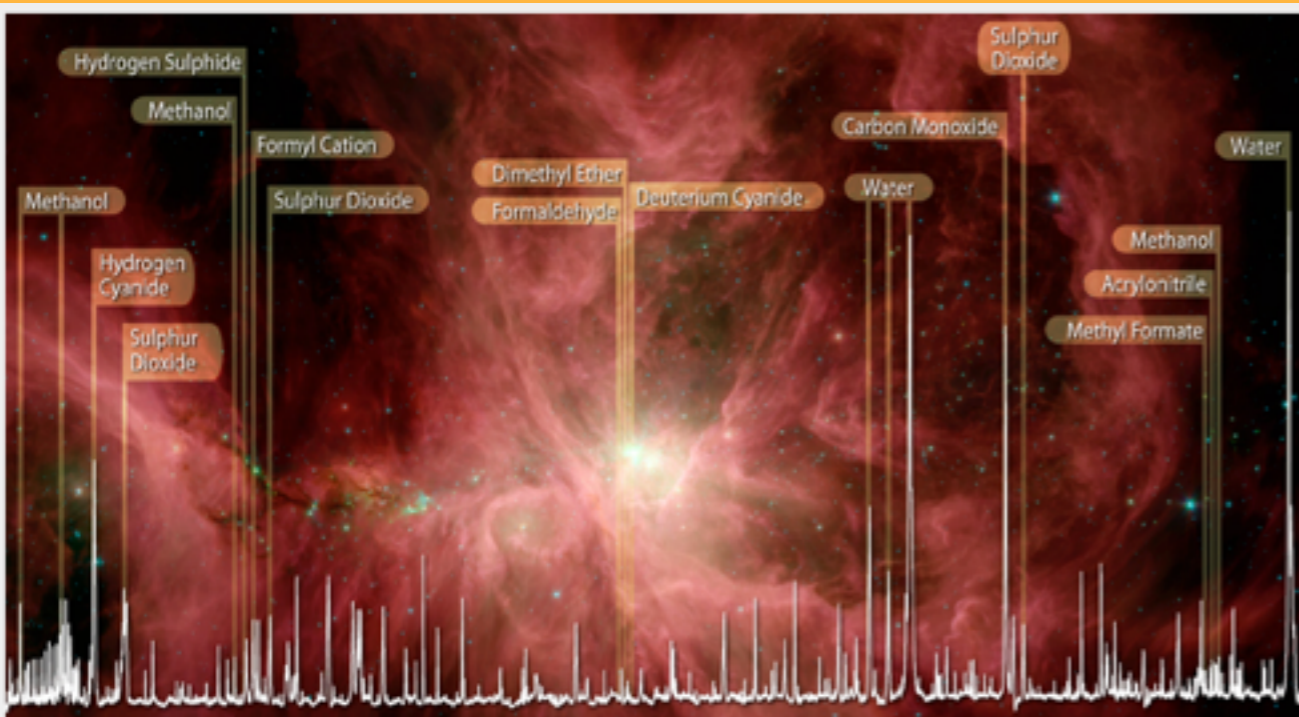
Search:

Telescope Bands:   
 ALMA Band 3 (84-116 GHz)  
 ALMA Band 4 (125-163 GHz)  
 ALMA Band 5 (163-211 GHz)

Redshift:

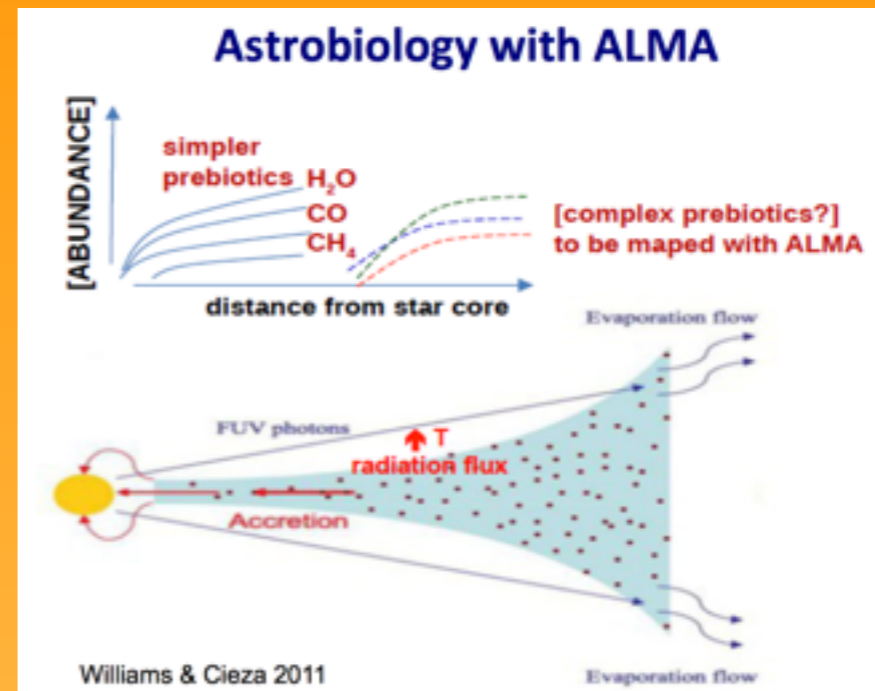
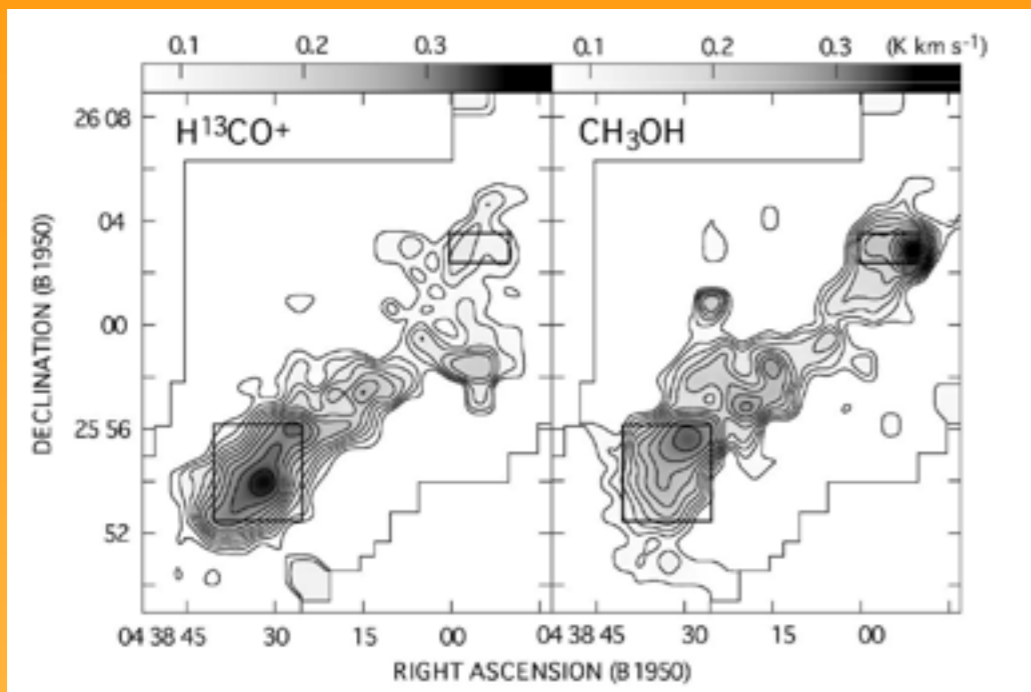
Energy Range: Min  Max   E<sub>L</sub> (cm<sup>-1</sup>)  E<sub>L</sub> (K)

Frequency Range: Min  Max  Frequency Unit:



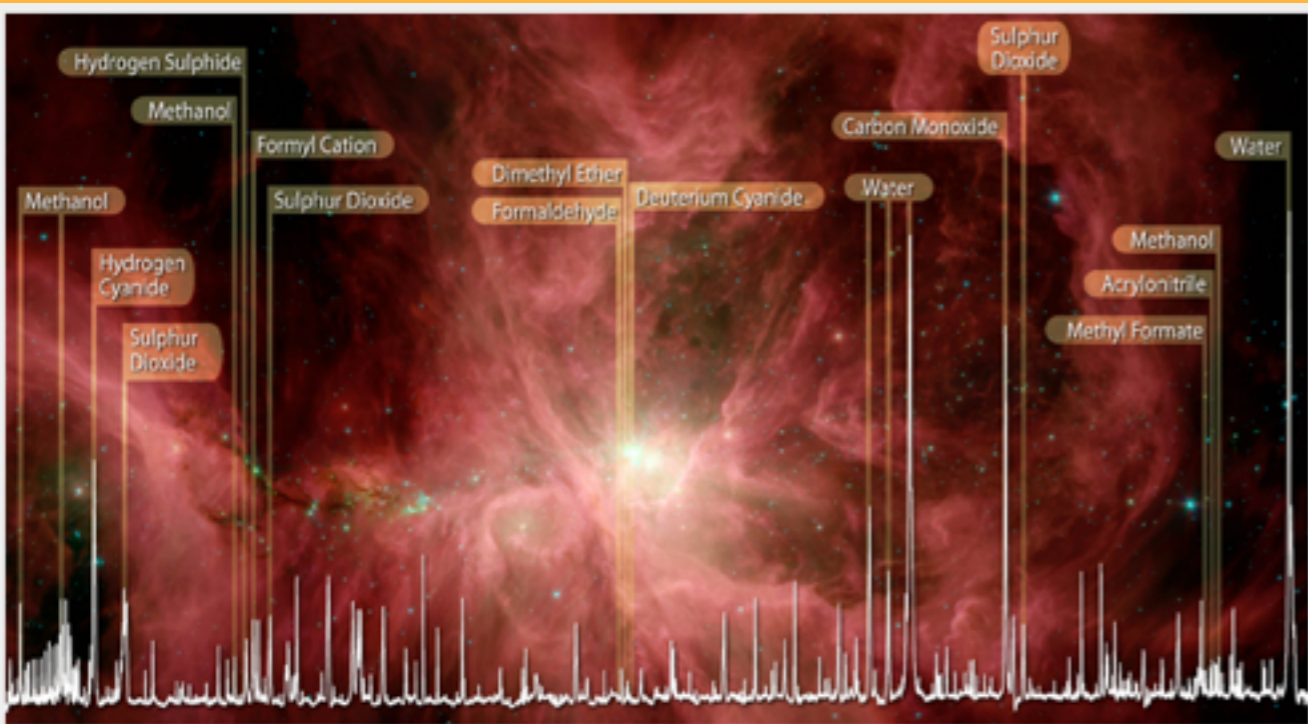
Data, called a spectrum, showing water and organics in the Orion nebula. The data were taken by the heterodyne instrument for the far infrared, or HIFI, onboard the Herschel Space Observatory, a European Space Agency-led mission with important participation from NASA. Image credit: ESA/NASA/JPL-Caltech

# química pre-biótica en núcleos pre-estelares y discos protoplanetarios



Williams & Cieza 2011

Evaporation flow



Data, called a spectrum, showing water and organics in the Orion nebula. The data were taken by the heterodyne instrument for the far infrared, or HIFI, onboard the Herschel Space Observatory, a European Space Agency-led mission with important participation from NASA. Image credit: ESA/NASA/JPL-Caltech

## Quick Picker

- CO v=0
- C<sup>18</sup>O
- CH<sub>3</sub>OH v<sub>2</sub>=0
- HCN v=0
- H<sup>13</sup>CN v=0
- DCN v=0
- CS
- NH<sub>3</sub>
- C II
- O III
- H<sub>2</sub>O v=0
- SiO v=0
- <sup>13</sup>CO v=0
- C<sup>16</sup>O
- H<sub>2</sub>CO
- HNC v=0
- HC<sup>15</sup>N v=0
- HCO<sup>+</sup> v=0
- H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup>
- C I
- O I
- N II
- HDO

Los núcleos pre-estelares son fuentes intensas de moléculas orgánicas complejas. La emisión de estas moléculas traza zonas de gas de alta densidad.

GTM-suficiente para trazar evolución de moléculas prebióticas simples.

Herschel y ALMA: espectroscopía detallada de prebióticos complejos.