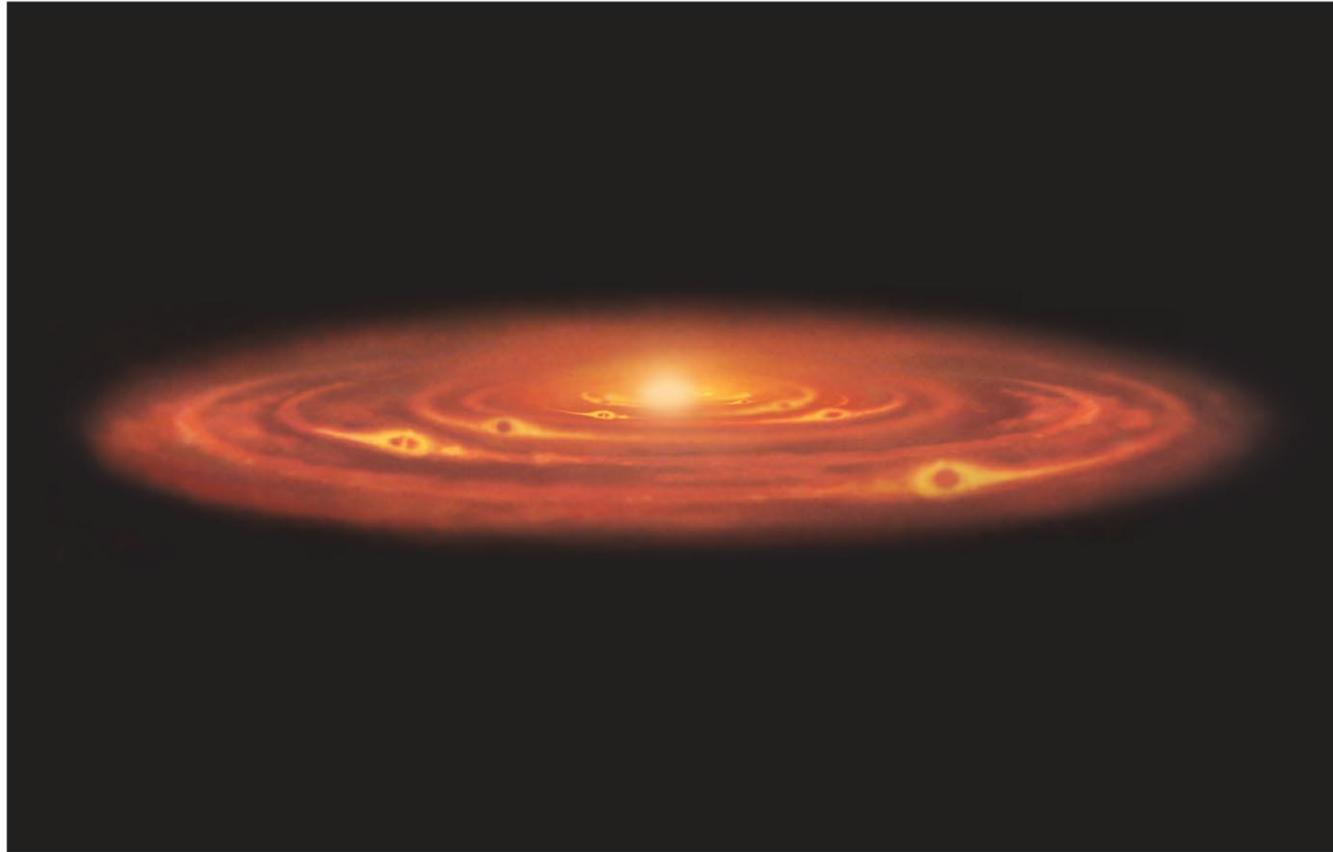
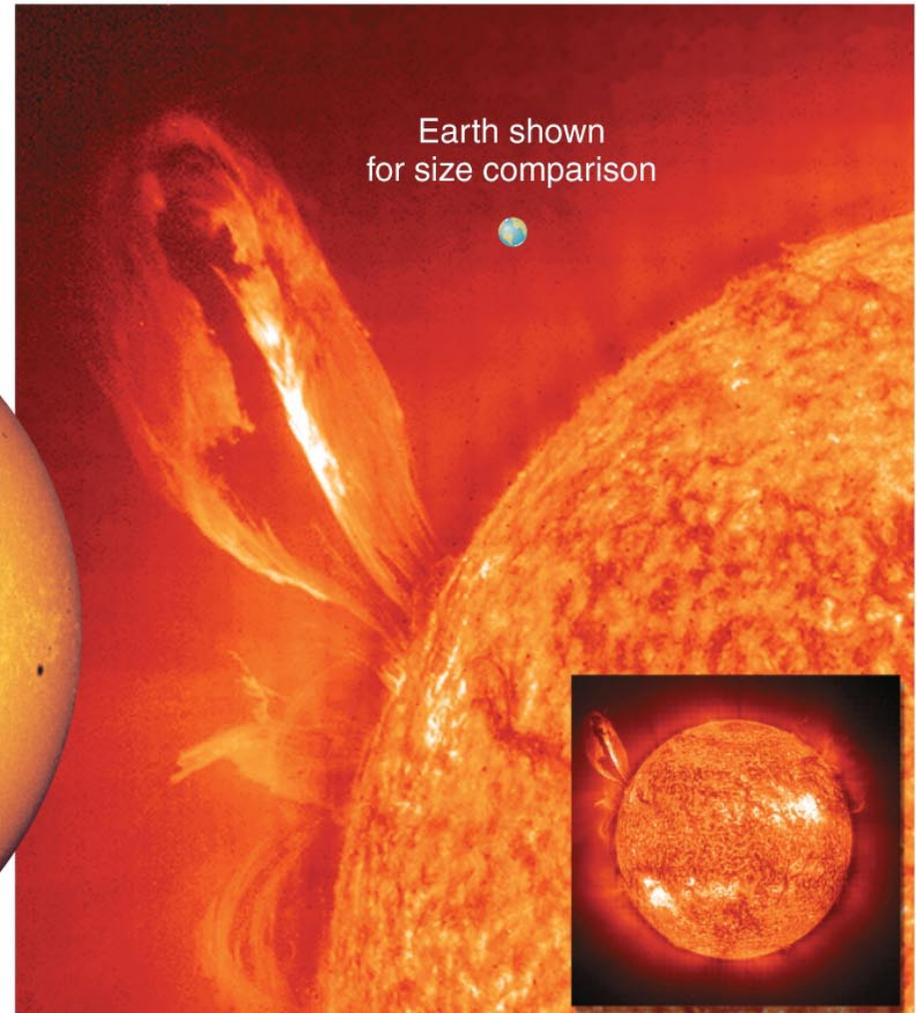
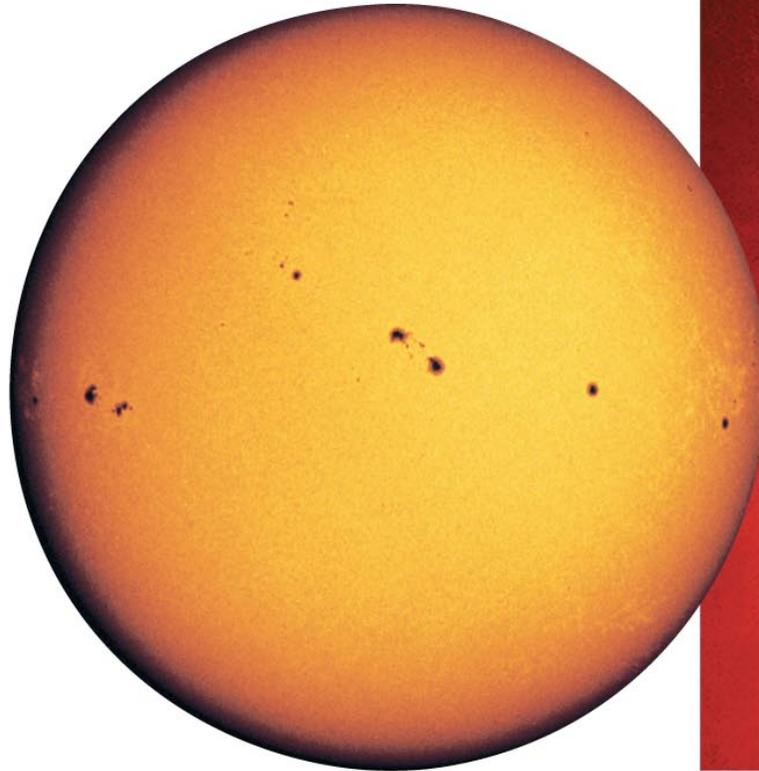


# Sistema Solar y su formación

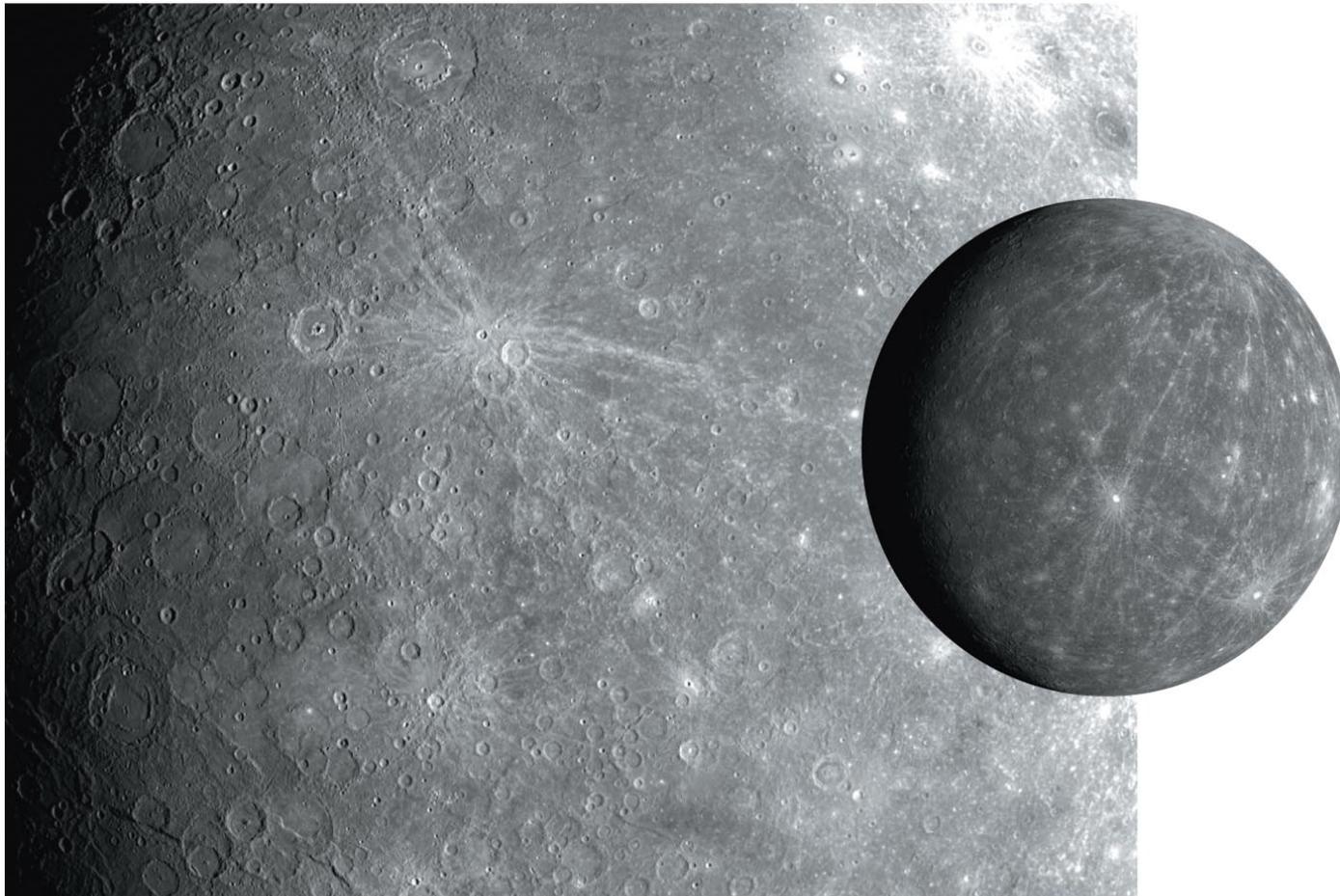


# Sol



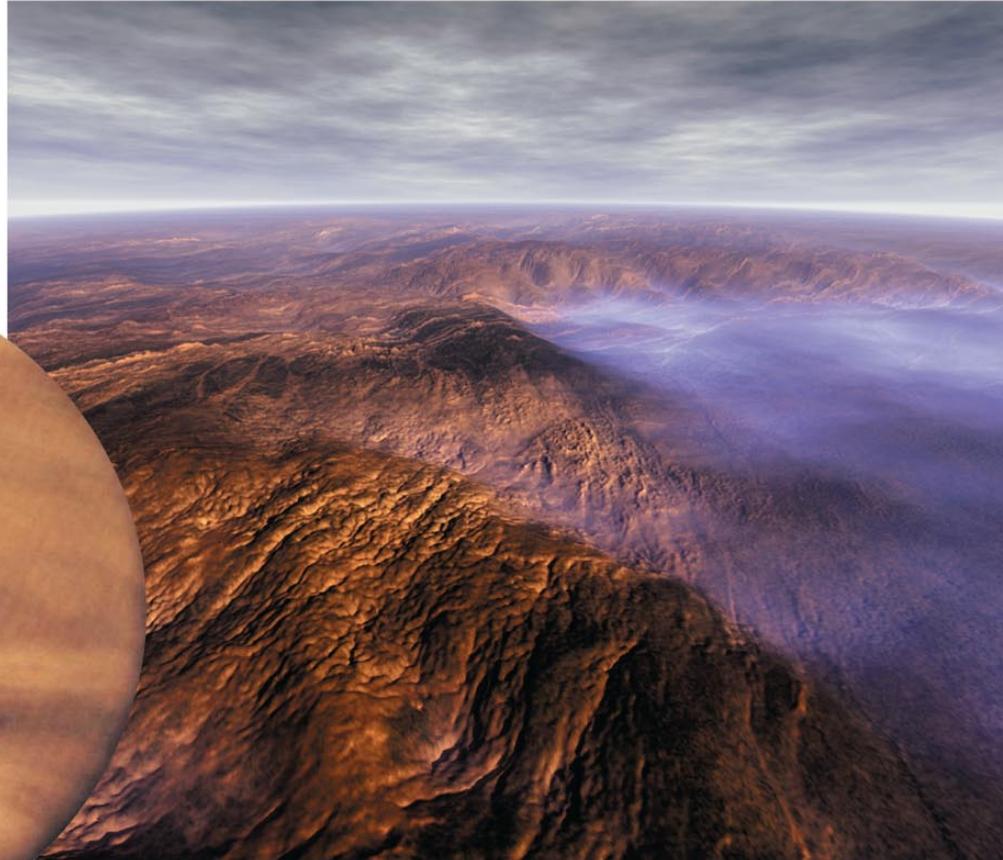
- Más del 99.9% de la masa del sistema solar
- Hecho principalmente de gas H / He (plasma)
- Convierte 4 millones de toneladas de masa en energía por segundo

# Mercurio

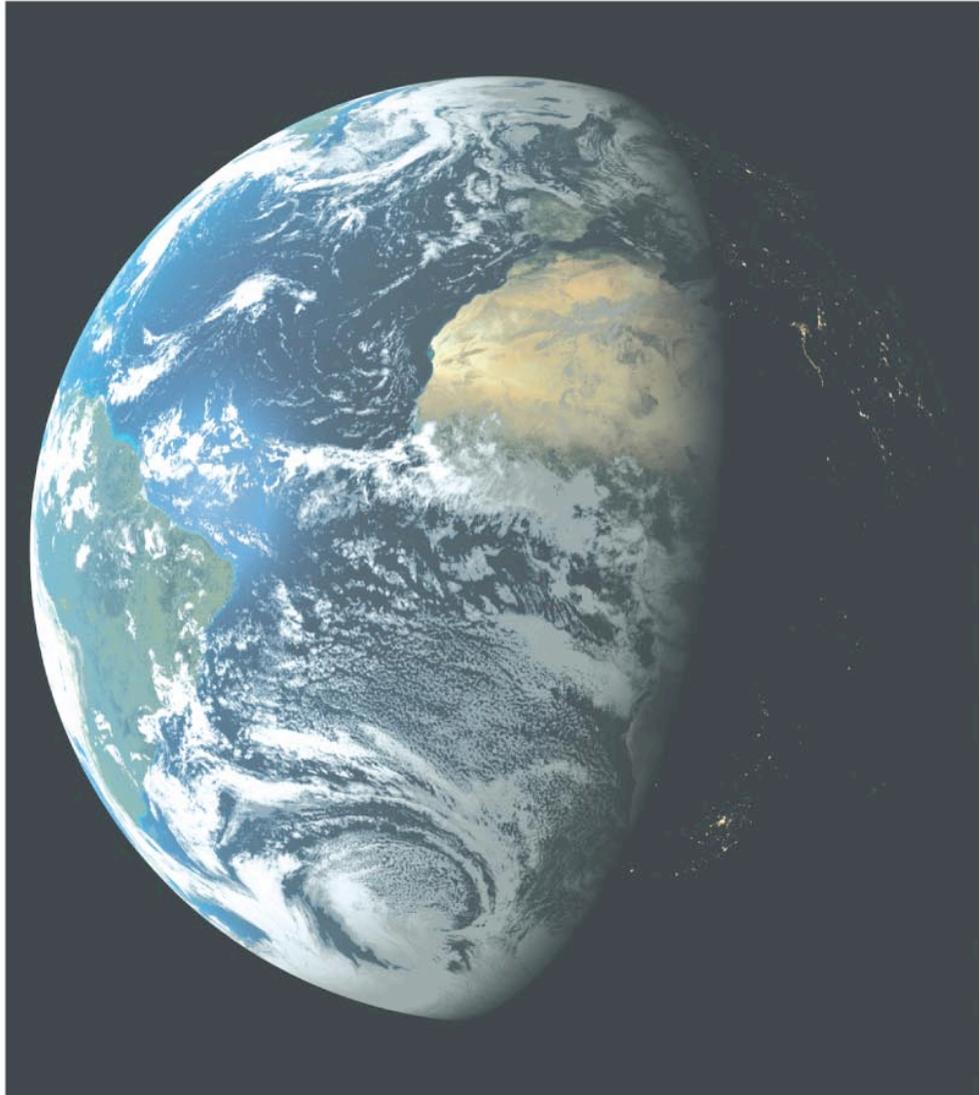


- Hecho de metal y roca; gran núcleo de hierro
- Desolado, con cráteres; acantilados largos, altos y empinados
- Muy caliente y muy frío:  $425^{\circ}\text{C}$  (día)  $-170^{\circ}\text{C}$  (noche)

# Venus



- Casi idéntico en tamaño a la Tierra; superficie oculta por las nubes
- Condiciones infernales debido a un efecto invernadero extremo
- Más caliente que Mercurio: 470 ° C, día y noche



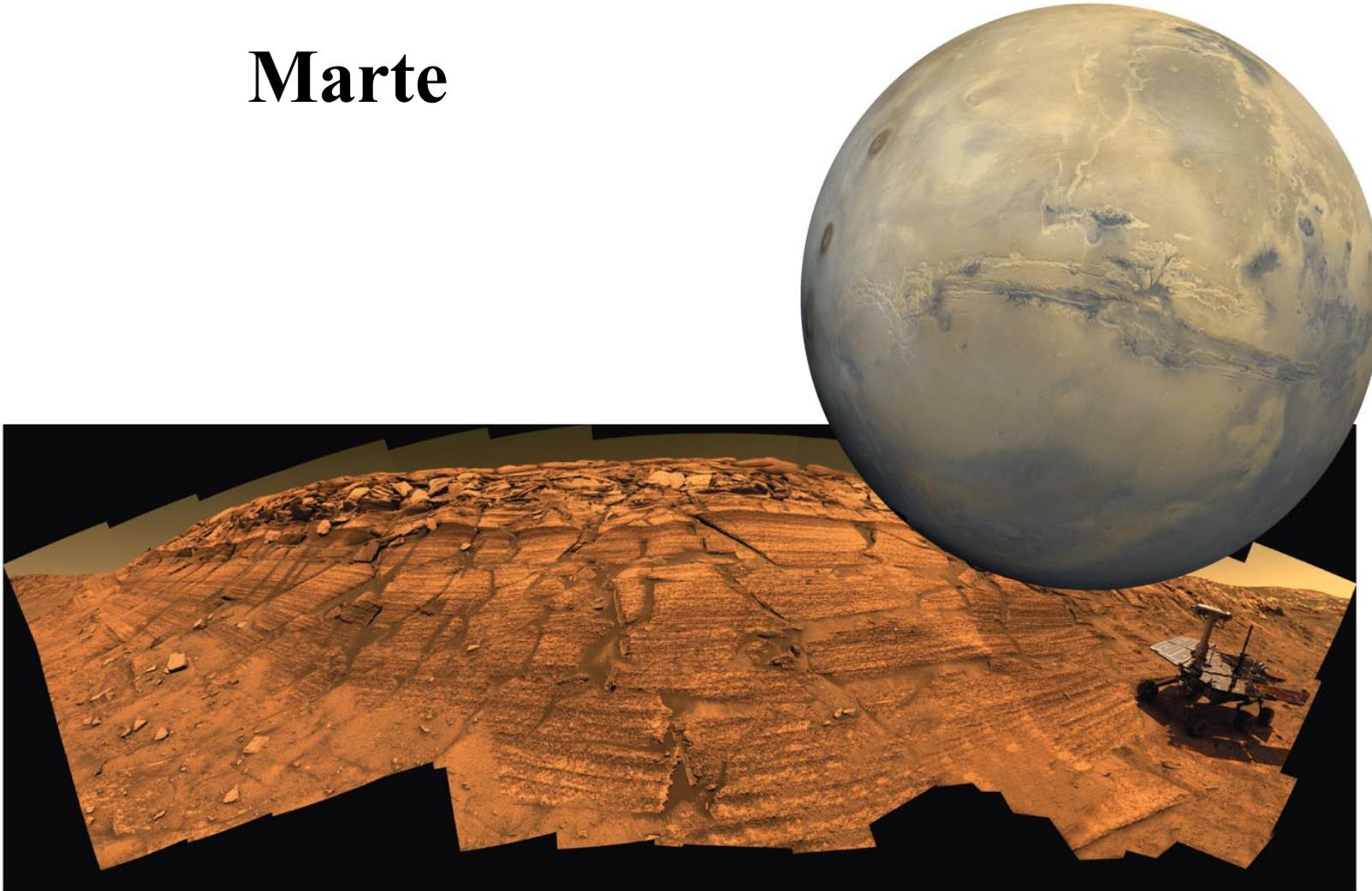
# Tierra



Tierra y Luna

- Un oasis de vida
- La única superficie de agua líquida en el sistema solar
- Una luna sorprendentemente grande

# Marte

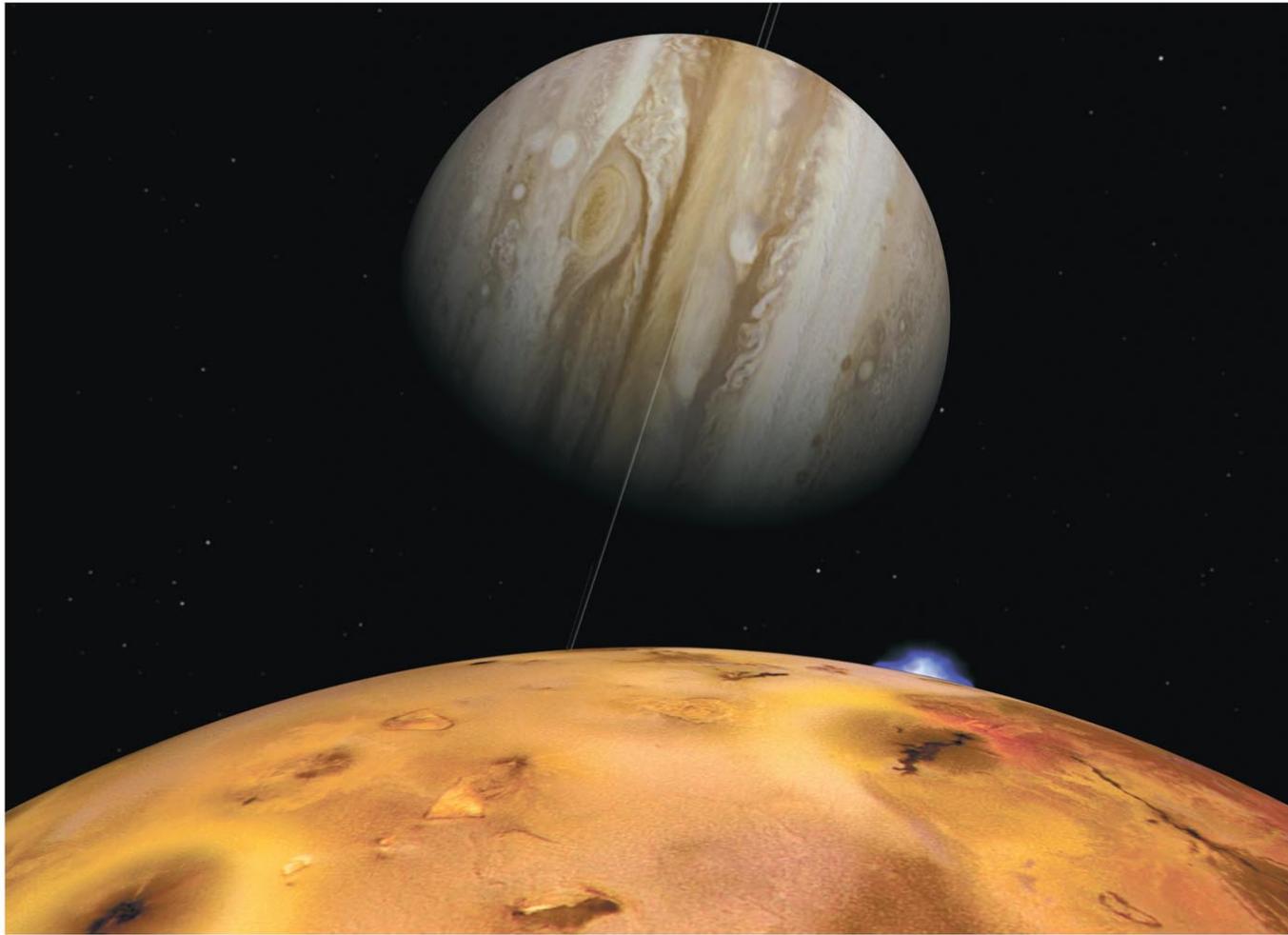


- Parece casi como la Tierra, ¡pero no te vayas sin un traje espacial!
- Volcanes gigantes, un gran cañón, casquetes polares, más
- El agua fluía en un pasado lejano; podría haber habido vida?



# Júpiter

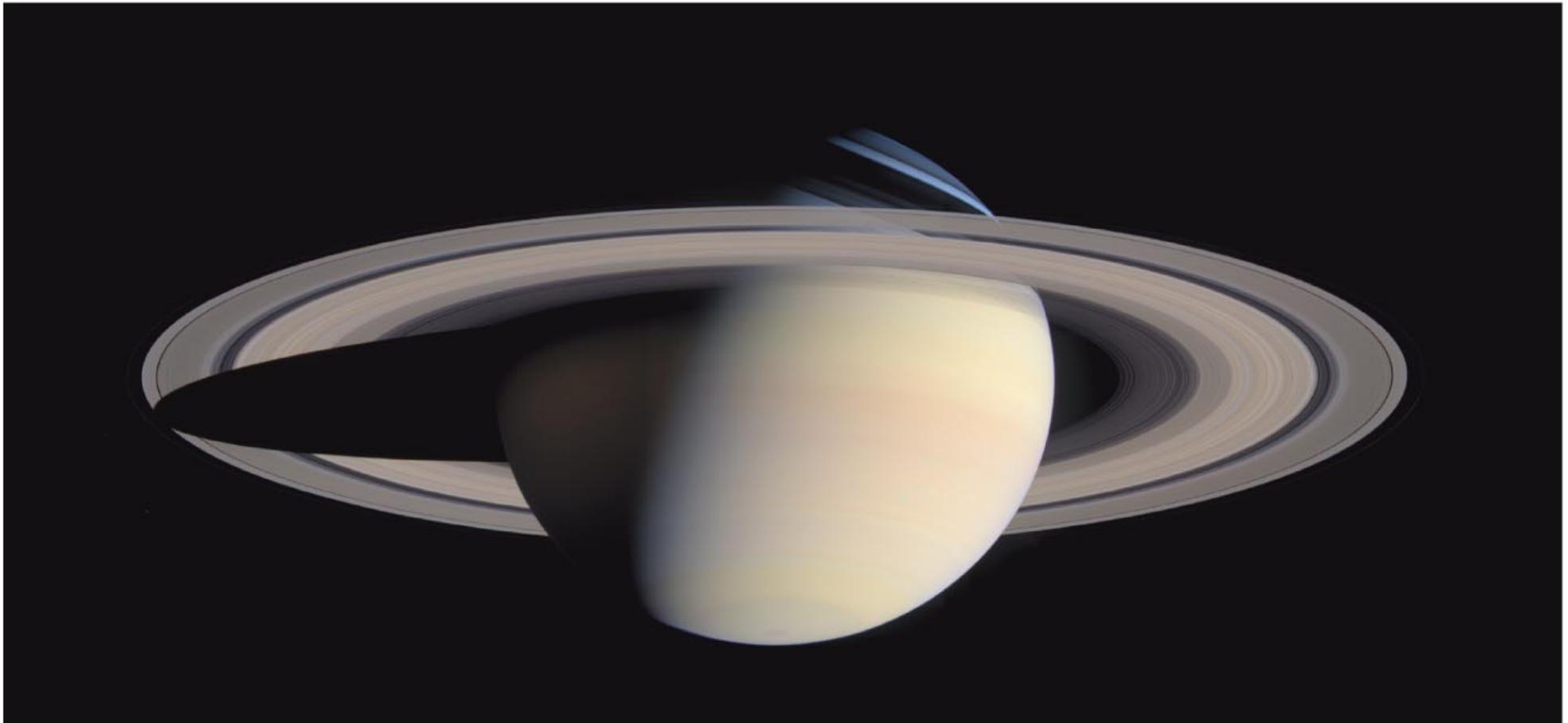
- Mucho más lejos del Sol que los planetas interiores
- Mayormente H / He; sin superficie sólida
- 300 veces más masivo que la Tierra
- Muchas lunas, anillos



Las lunas de Júpiter pueden ser tan interesantes como los planetas mismos, especialmente las cuatro *lunas galileanas de Júpiter*.

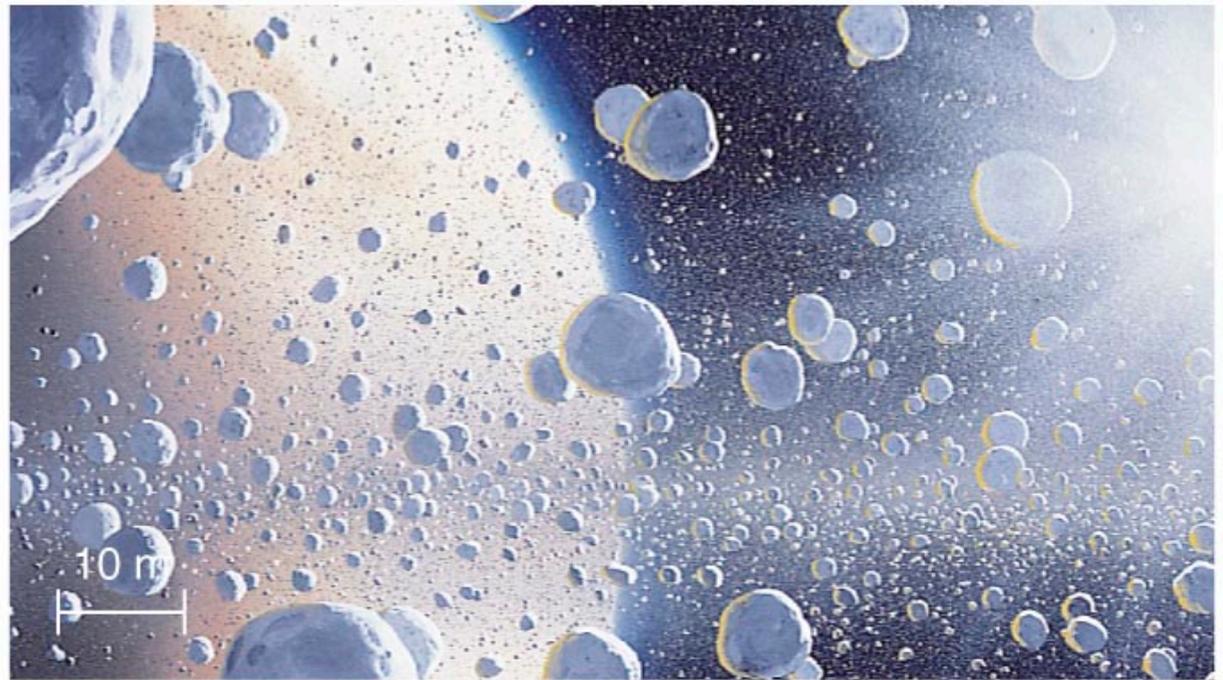
- Io (en la imagen): volcanes activos en todo
- Europa: posible océano subsuperficial
- Ganímedes: la luna más grande en el sistema solar
- Calisto: una gran "pelota de hielo" con cráteres

# Saturno



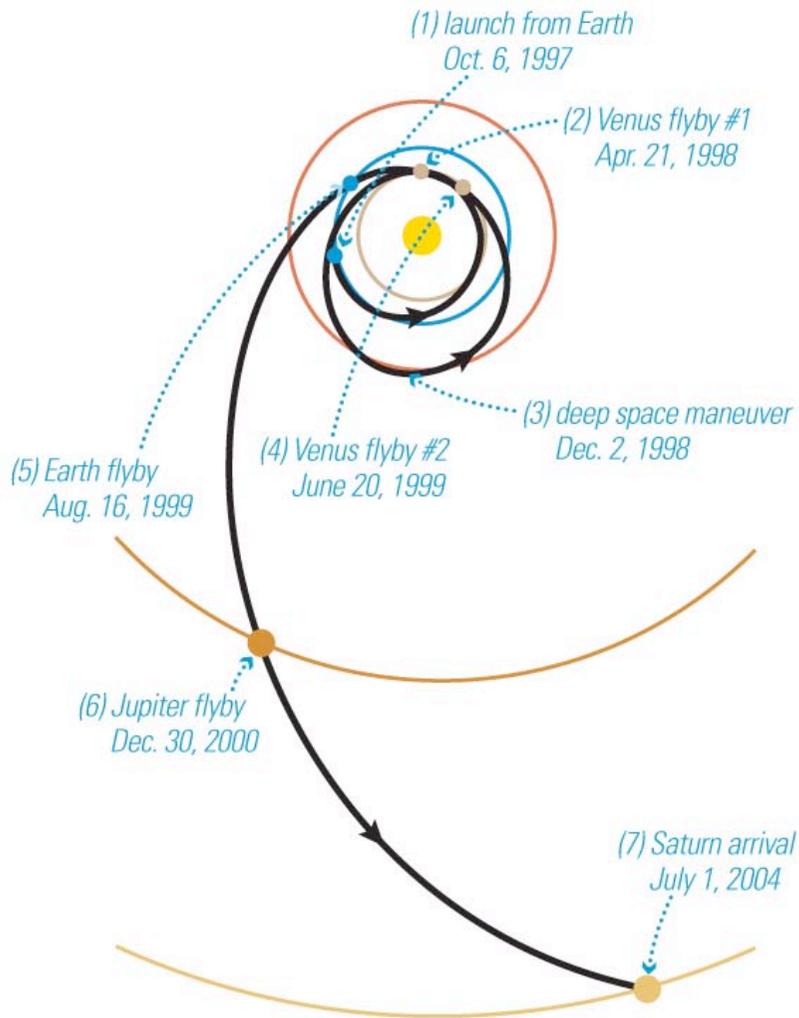
- Gigante y gaseoso como Júpiter
- Anillos espectaculares
- Muchas lunas, incluyendo Titán

Los anillos NO son sólidos; están hechos de innumerables trozos de hielo y roca, cada uno girando como lunas.



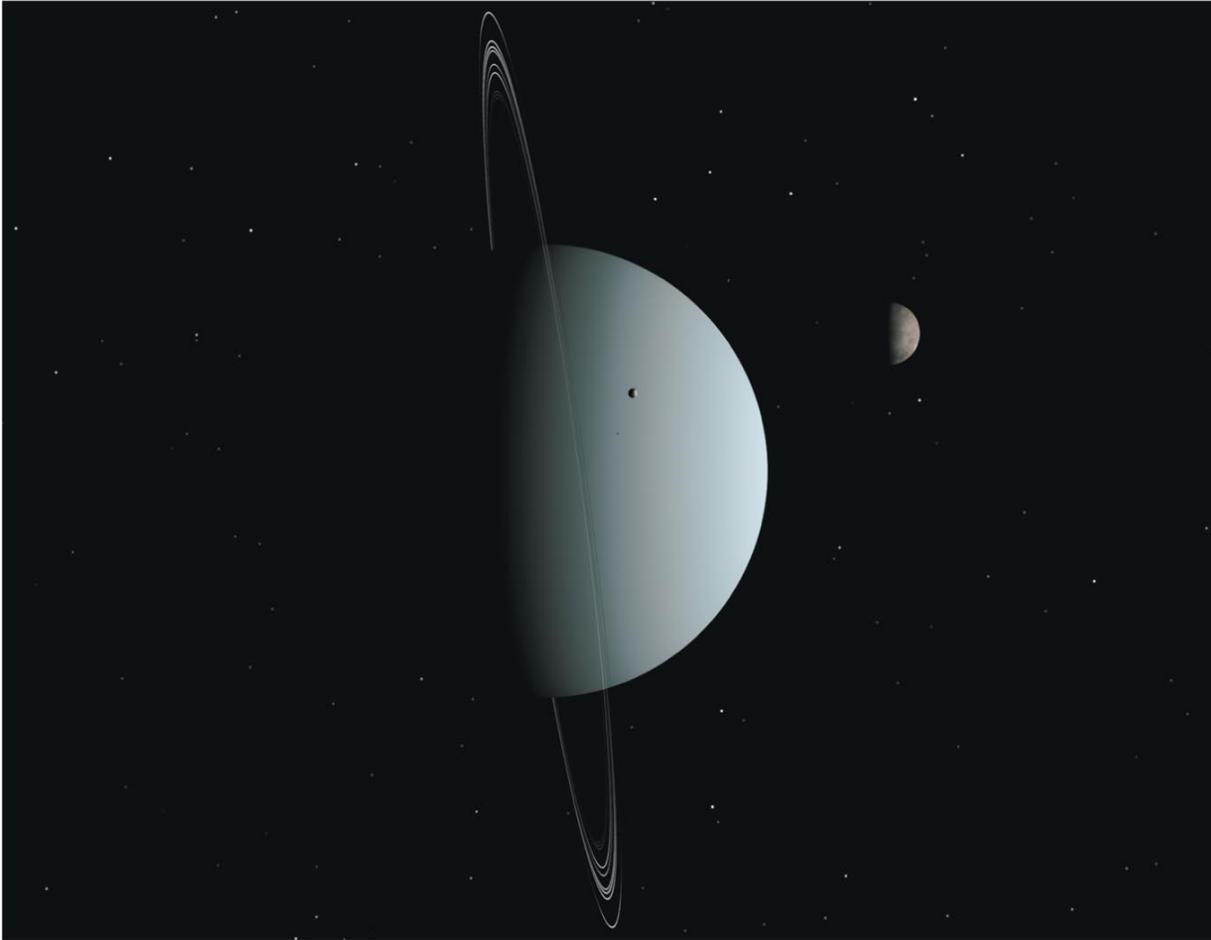
Artist's conception

La sonda Cassini llegó en julio de 2004 (se lanzó en 1997).

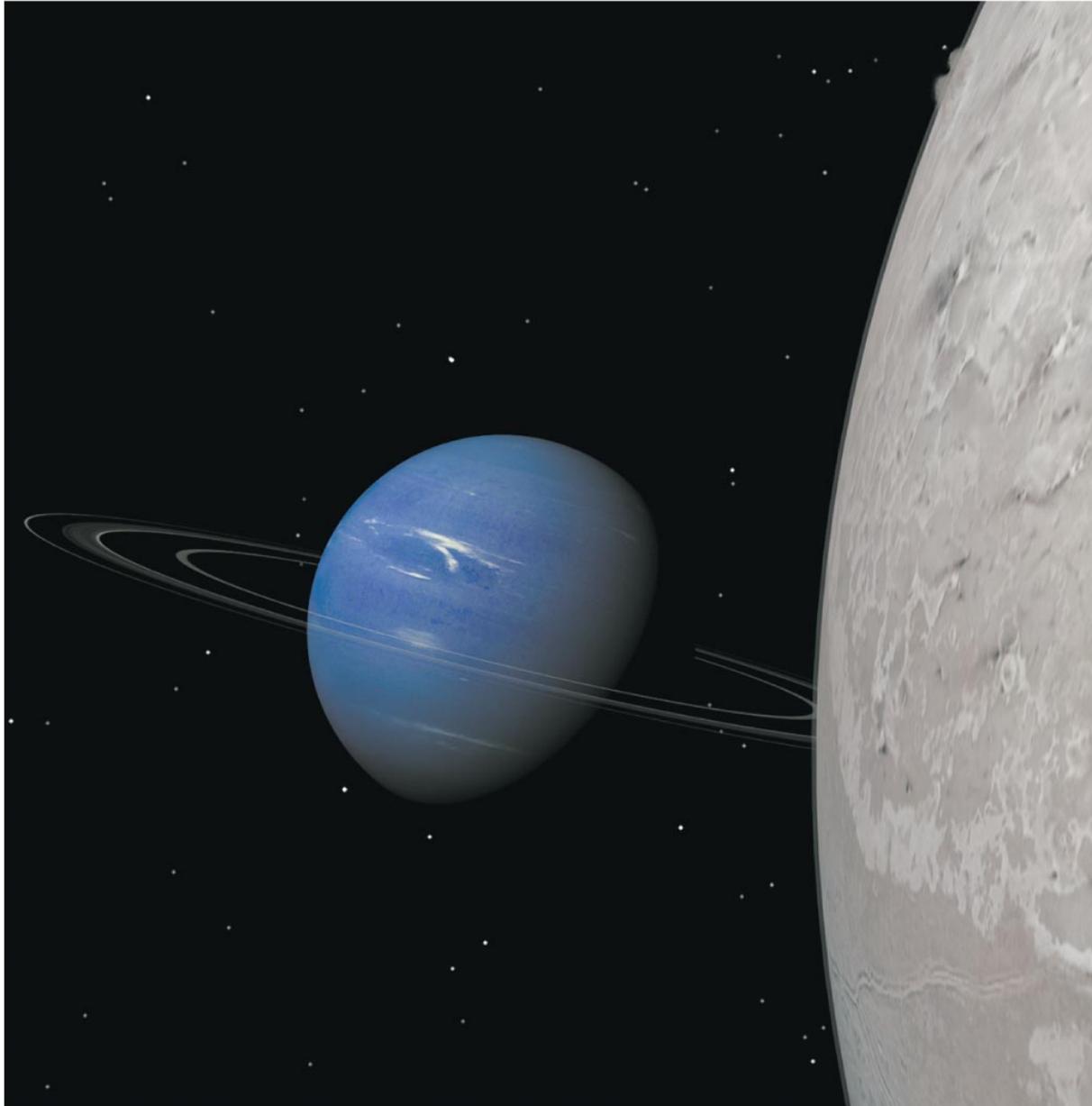


# Urano

(Herschel 1781)



- Más pequeño que Júpiter / Saturno; mucho más grande que la Tierra
- Hecho de H / He gas y compuestos de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ )
- Inclínación extrema del eje
- Lunas y anillos

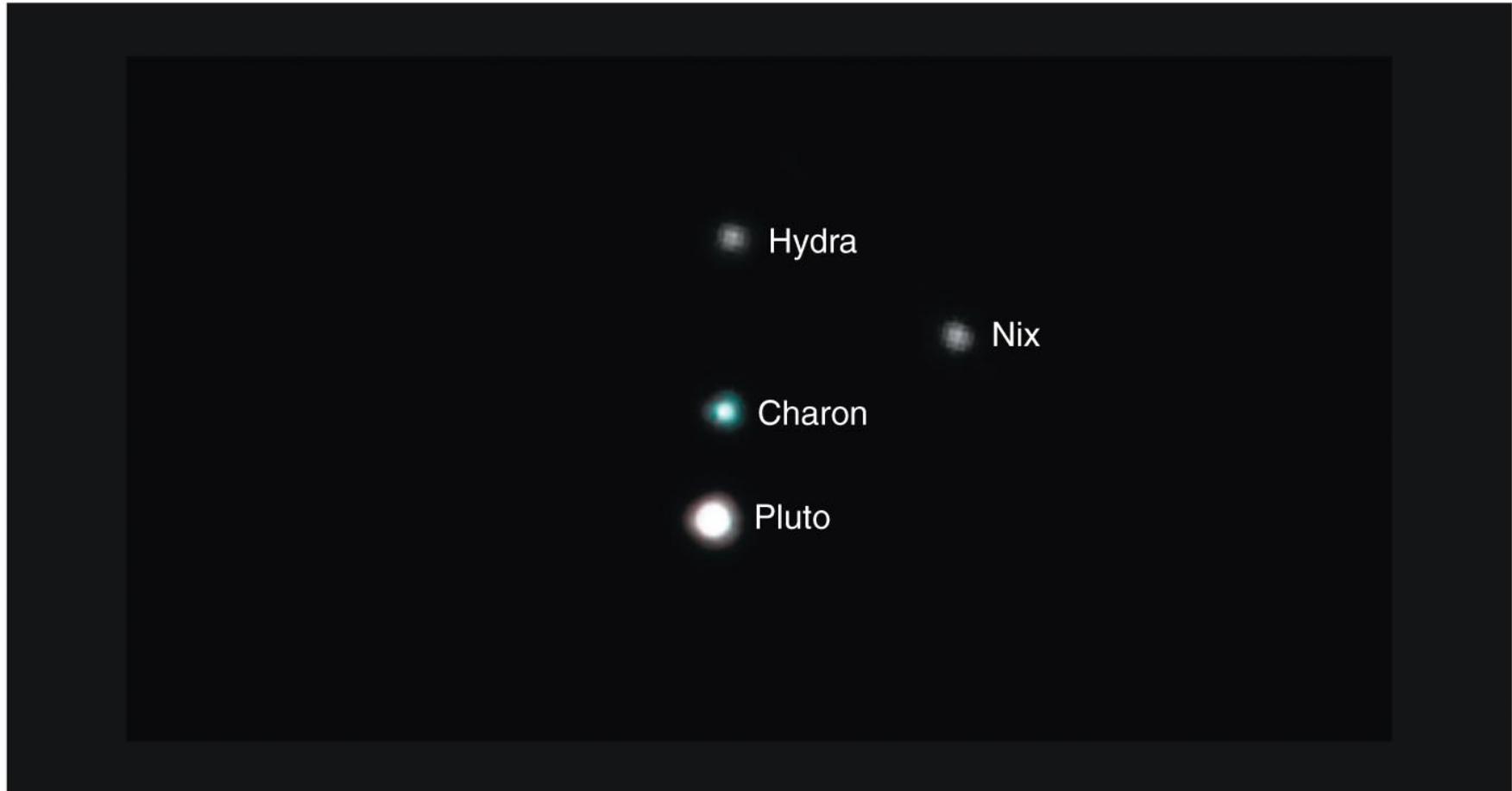


# Neptuno

(1846, Le Verrier, Galle, Adams)

- Predicted before it was observed
- Similar a Urano (excepto por la inclinación del eje)
- Muchas lunas (incluido Triton)

# Plutón (y otros planetas enanos)



- Mucho más pequeño que los planetas principales
- Helado, composición similar a un cometa
- La luna principal de Plutón (Caronte) tiene un tamaño similar

# Plutón (new horizon mission)



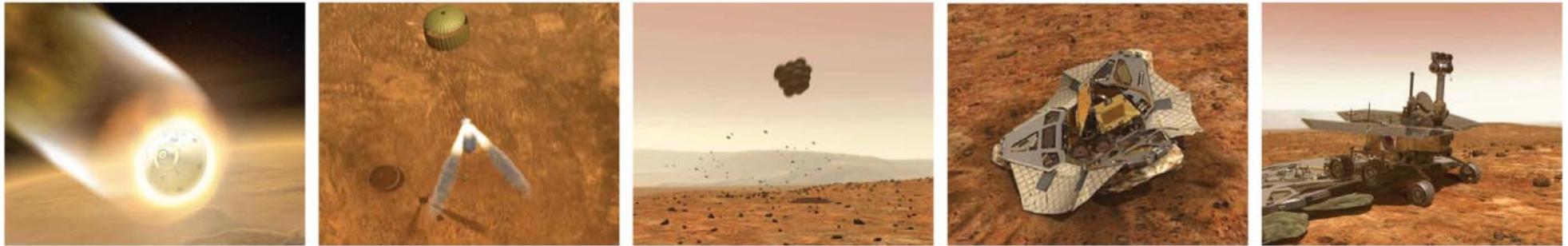
## Caronte



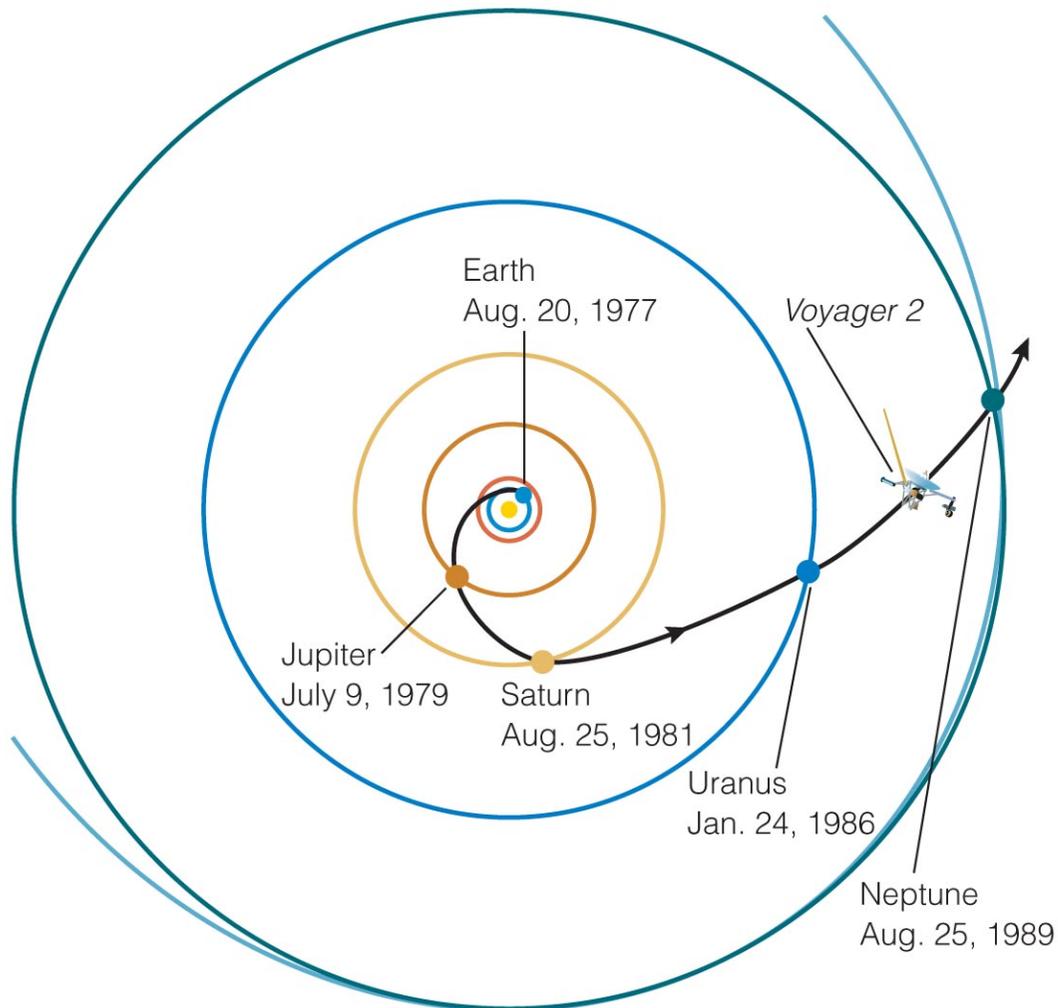
# Exploración del sistema solar

- ¿Cómo funcionan las naves espaciales robóticas?

# ¿Cómo funcionan las naves espaciales robóticas?



# Flybys

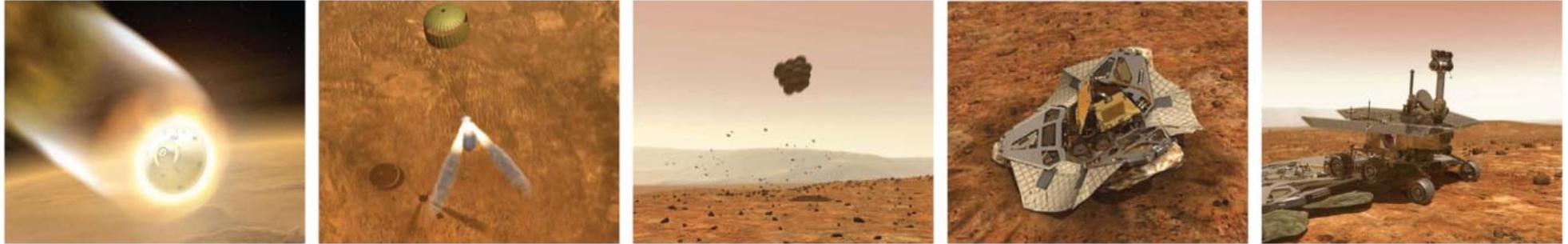


- Uno mission flyby vuela por un planeta solo una vez.
- Más barato que otra misión, pero menos tiempo para recibir datos

# Orbitadores

- Entrar en órbita alrededor de otro mundo
- Más tiempo para recopilar datos pero no puede obtener información detallada sobre la superficie del mundo

# Sondas o Landers

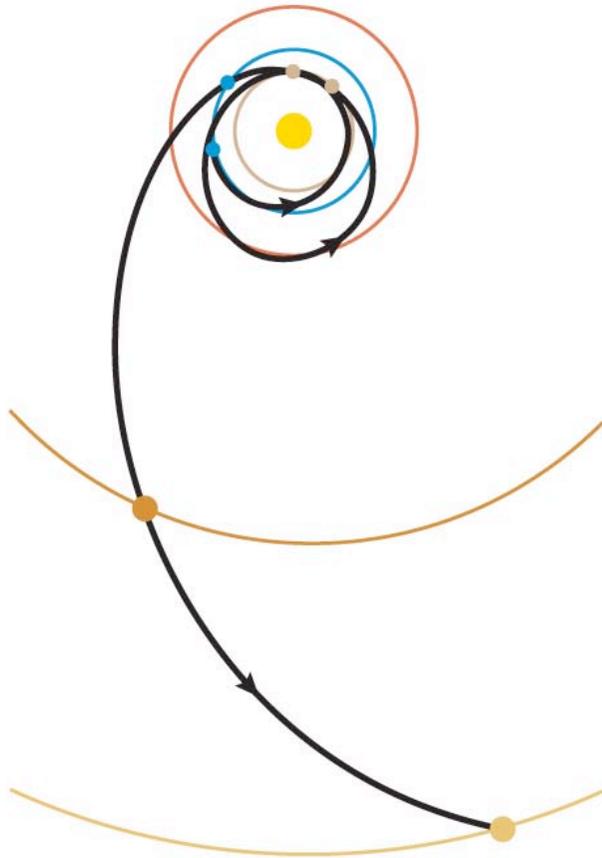


- Aterriza en la superficie de otro mundo
- Explora la superficie en detalle

# Sample Return Missions

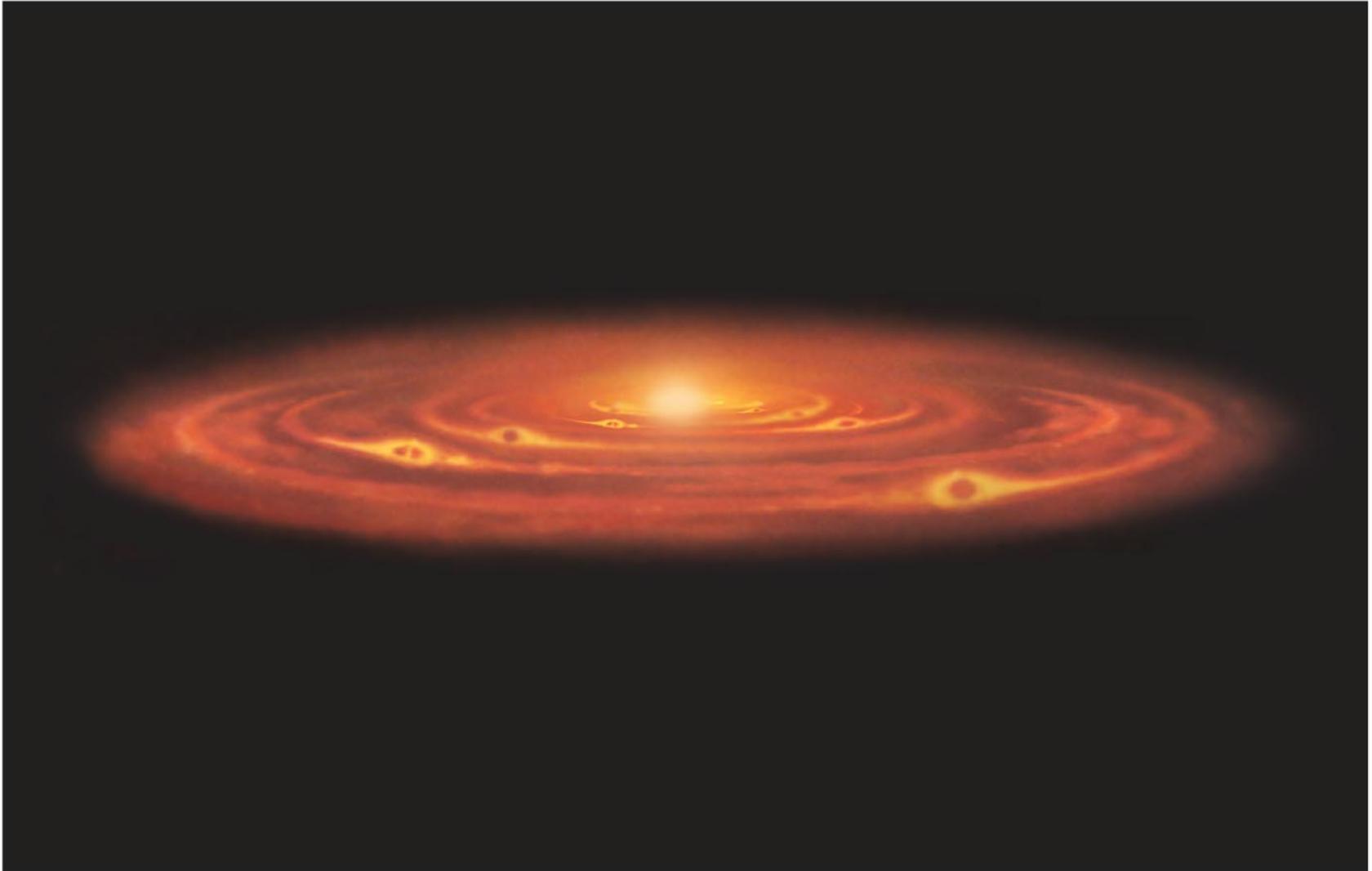
- Aterriza en la superficie de otro mundo
- Toma muestras
- Nave espacial diseñada para despegar de otro mundo y regresar a la Tierra
- Ejemplo: mission Apollo en la Luna

# Combination Spacecraft



- La mission *Cassini/Huygens* contiene un orbitante (*Cassini*) y un lander (*Huygens*).

# Formación del Sistema Solar



# La búsqueda de las orígenes

- ¿Qué propiedades de nuestro sistema solar debe explicar una teoría de la formación?
- ¿Qué teoría explica mejor las características de nuestro sistema solar?

# ¿Qué propiedades de nuestro sistema solar debe explicar una teoría de la formación?

1. Patrones de movimiento de los cuerpos grandes
  - Órbita en la misma dirección y plano
2. Existencia de dos tipos de planetas
  - Terrestre y joviano
3. Existencia de cuerpos más pequeños
  - Asteroides y cometas
4. Excepciones notables a los patrones habituales
  - Rotación de Urano, Luna de la Tierra, etc.

# ¿Qué teoría explica mejor las características de nuestro sistema solar?

- La *teoría nebular* establece que nuestro sistema solar se formó a partir del colapso gravitacional de una gigantesca nube de gas interestelar: la nebulosa solar. (*Nebulosa es la palabra latina para nube*).
- Kant y Laplace propusieron la hipótesis nebular hace más de dos siglos.
- Una gran cantidad de evidencia ahora es compatible con esta idea.

# Hipótesis de Encuentro

- Una idea rival propuso que los planetas se formaron a partir de restos arrancados del Sol por un encuentro cercano con otra estrella.
- Esa hipótesis no podría explicar los movimientos y tipos de planetas observados.

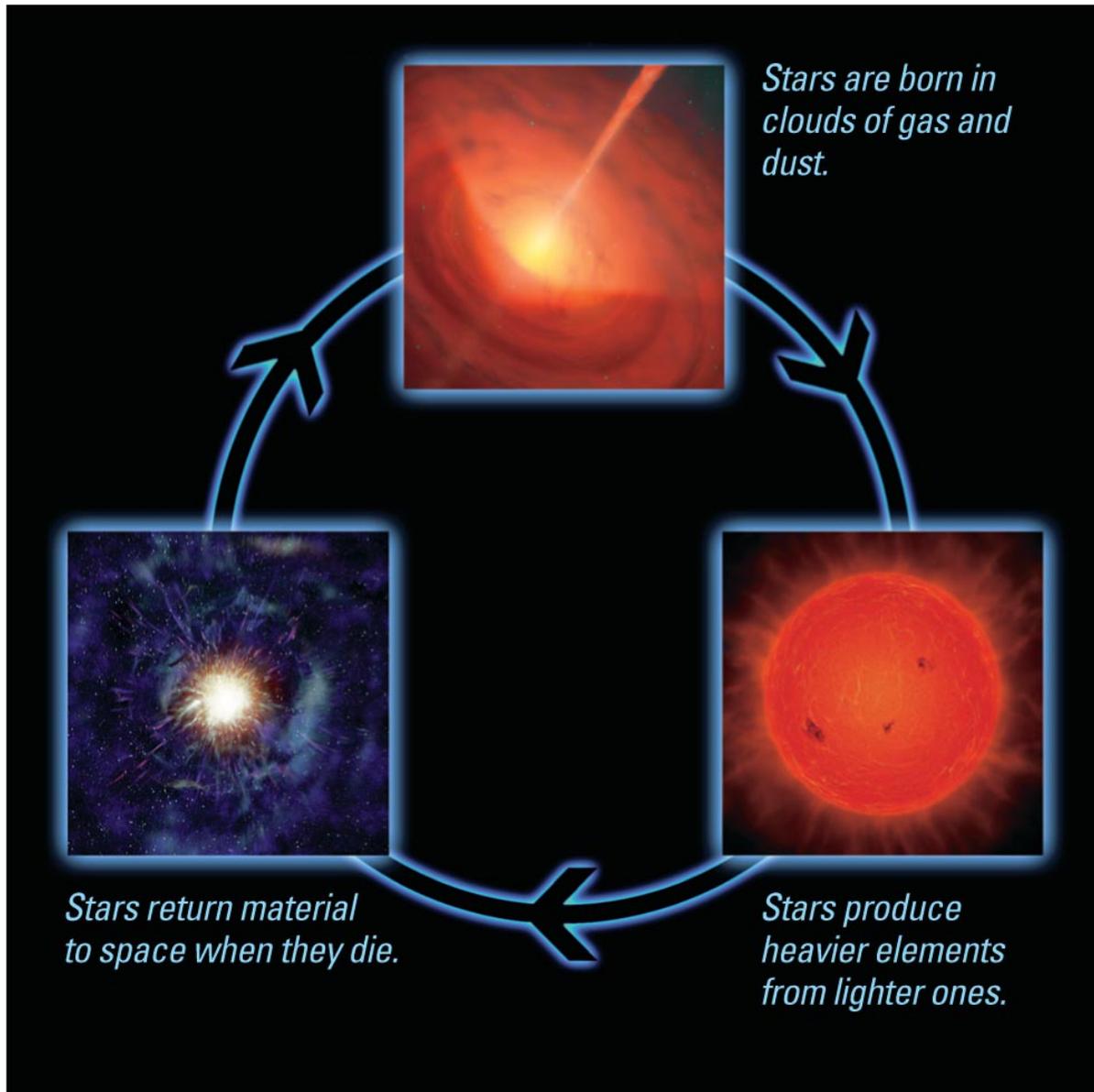
# El nacimiento del sistema solar

- ¿De dónde vino el sistema solar?
- ¿Qué causó los patrones de movimiento ordenado en nuestro sistema solar?

# ¿De dónde vino el sistema solar?



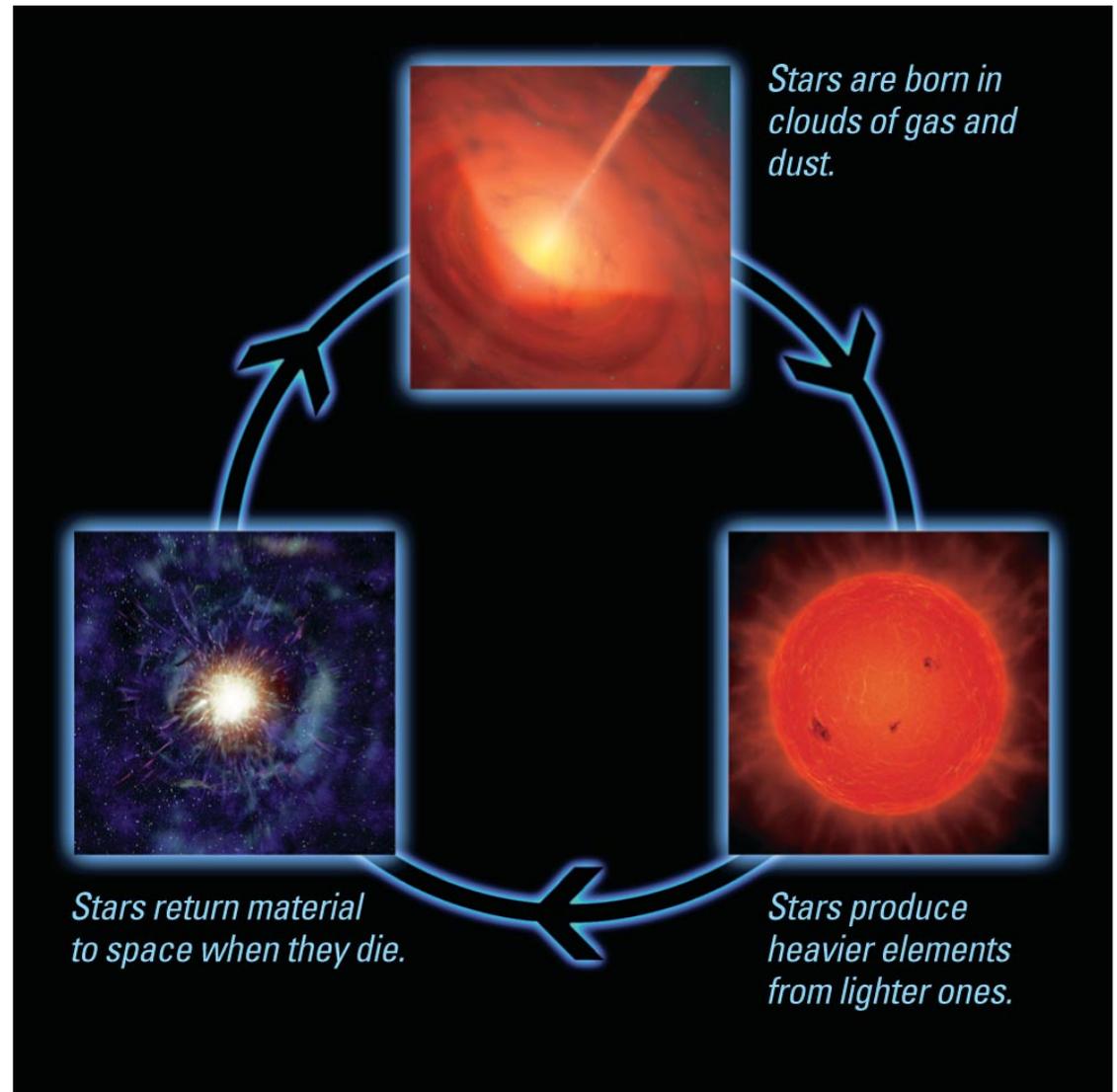
# Reciclaje galáctico



- Los elementos que formaron planetas se hicieron en estrellas y luego se reciclaron a través del espacio interestelar.

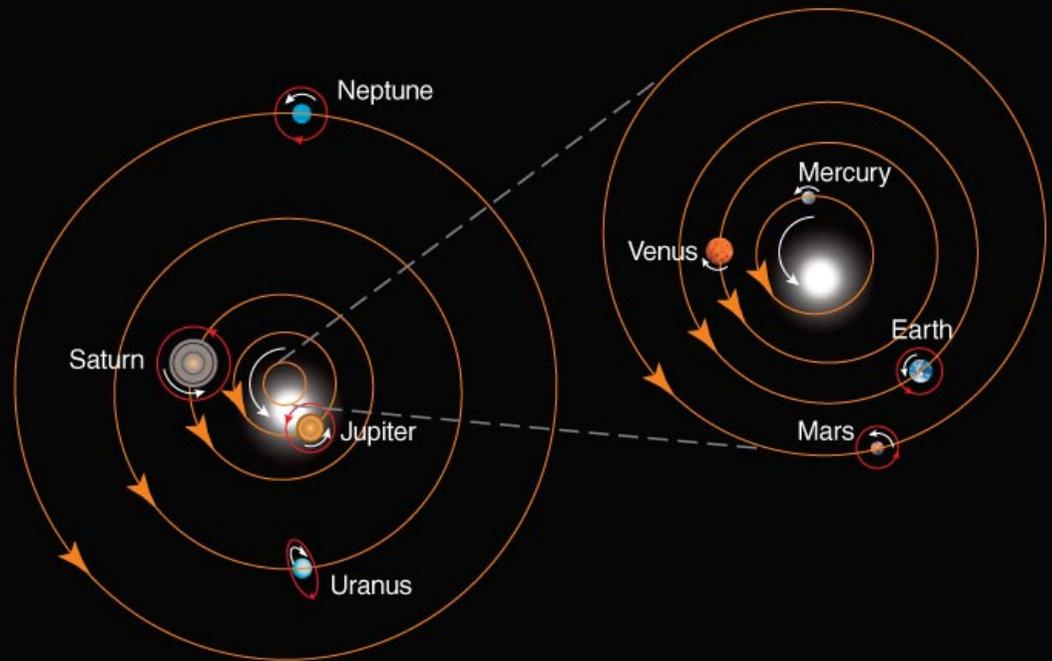
# Evidencia de otras nubes de gas

- Podemos ver estrellas que se forman en otras nubes de gas interestelar, que apoyan la teoría nebular.



# ¿Qué causó los patrones de movimiento ordenado en nuestro sistema solar?

- 1 **Large bodies in the solar system have orderly motions.** All planets have nearly circular orbits going in the same direction in nearly the same plane. Most large moons orbit their planets in this same direction, which is also the direction of the Sun's rotation.



# Conservación del momento angular



- La velocidad de rotación de la nube desde la cual se formó nuestro sistema solar debe haber aumentado a medida que la nube se contrajo.

## Collapse of the Solar Nebula



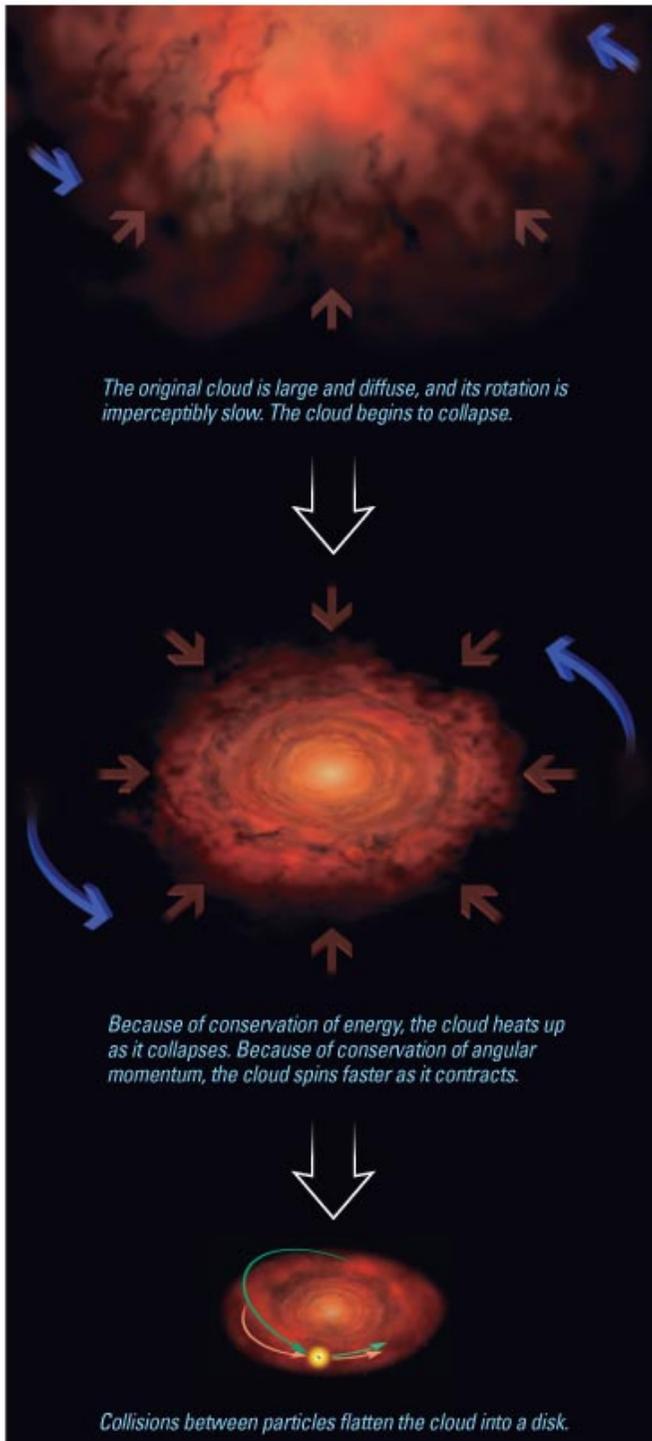
Running

Show Skater

La rotación de una nube que se contrae se acelera por la misma razón que un patinador se acelera al tirar de ella en sus brazos.

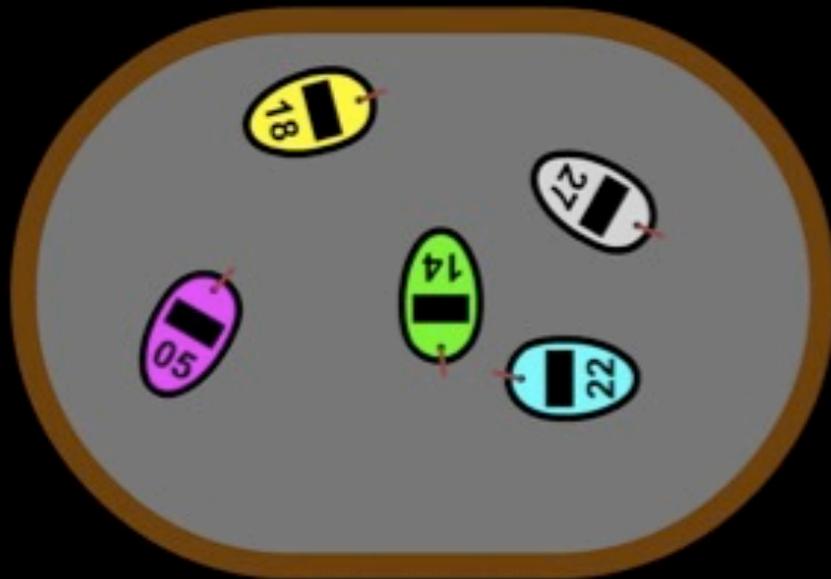
# Aplastamiento

- Las colisiones entre las partículas en la nube causaron que se aplanara en un disco.



## Formation of Circular Orbits

Top View

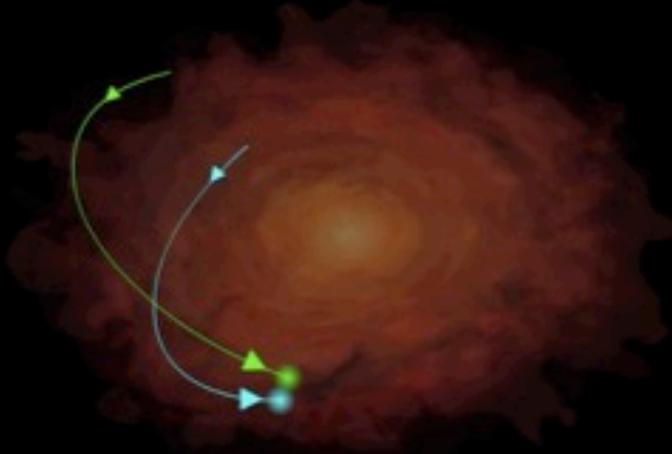


Play

Las colisiones entre partículas de gas en la nube reducen gradualmente los movimientos aleatorios.

## Why does the Disk Flatten?

Oblique View



Running

Las colisiones entre partículas de gas también reducen los movimientos hacia arriba y hacia abajo.

## Formation of the Protoplanetary Disk

Oblique View



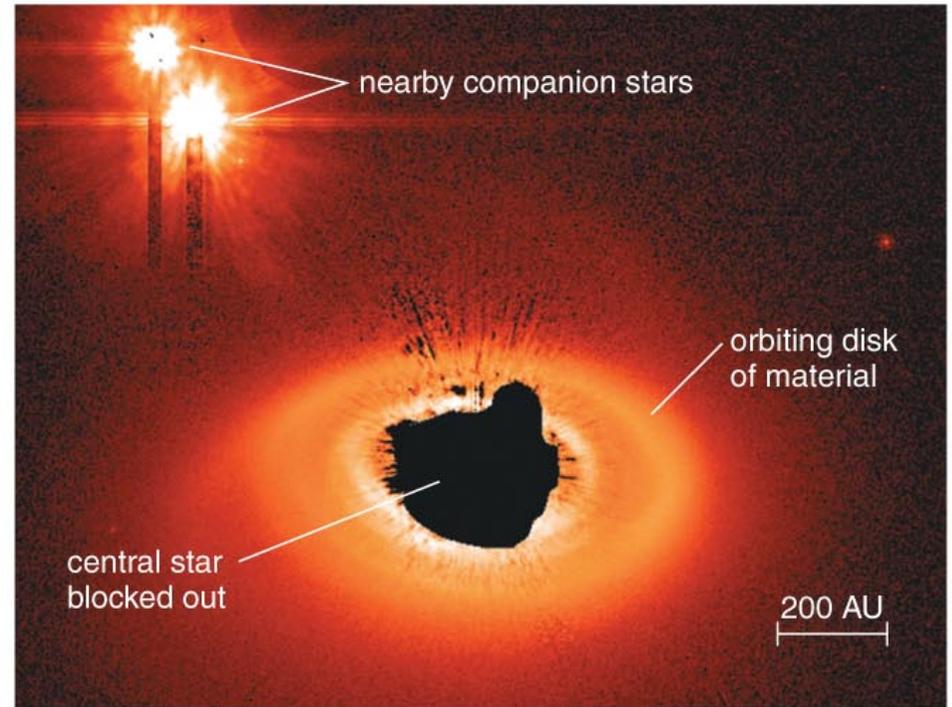
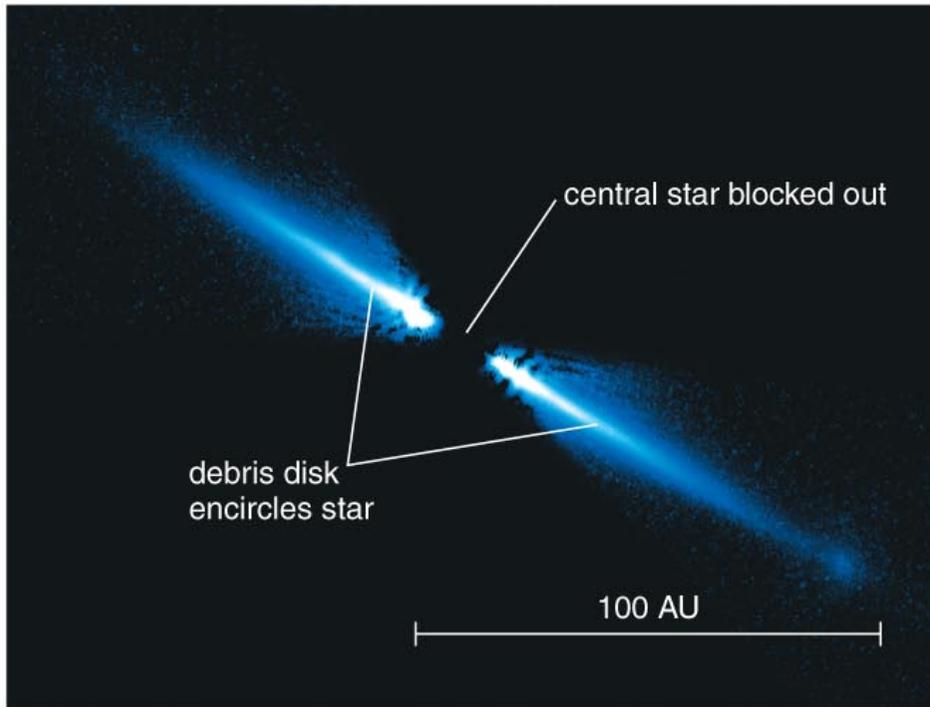
Edge-on View



Running

La nube  
giratoria se  
aplana a  
medida que  
se encoge.

# Discos alrededor de otras estrellas

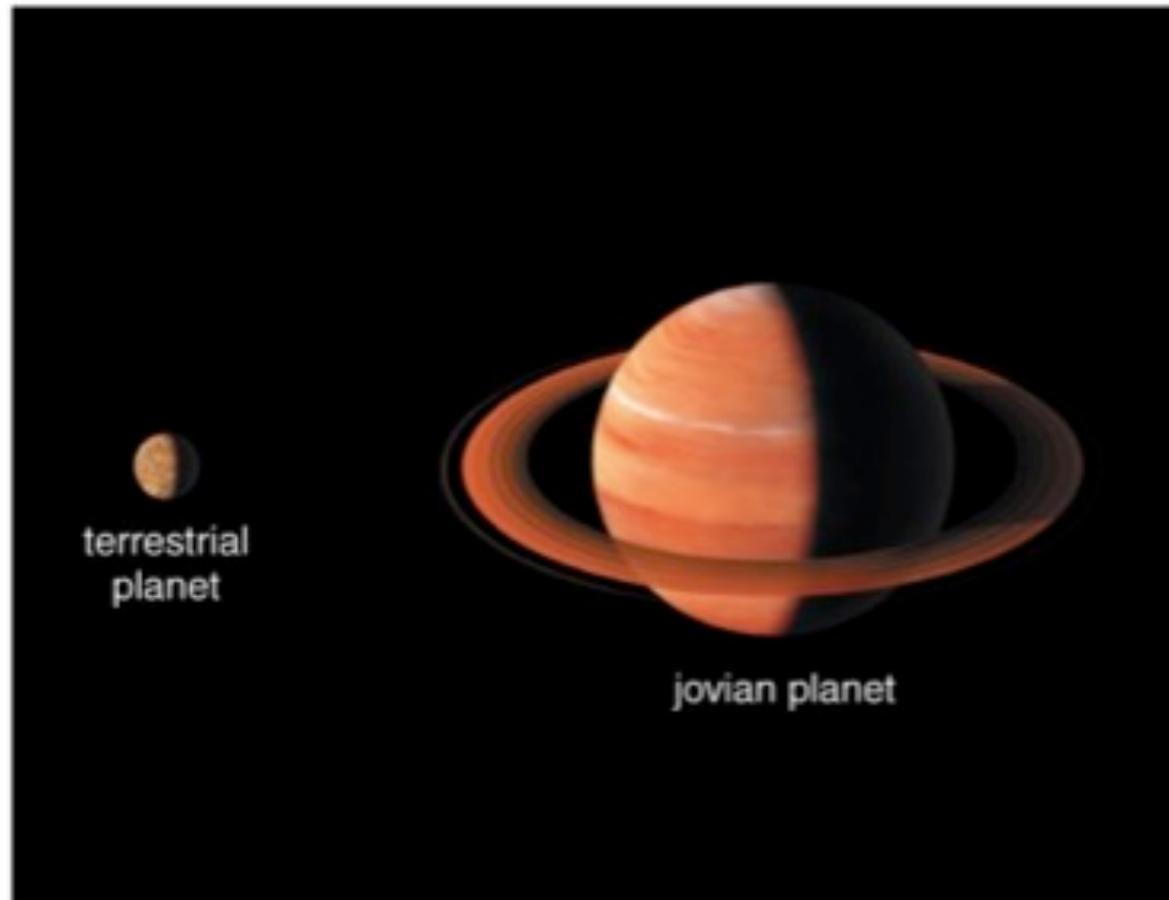


- Las observaciones de discos alrededor de otras estrellas apoyan la hipótesis nebular.

# La formación de planetas

- ¿Por qué hay dos tipos principales de planetas?
- ¿Cómo se formaron los planetas terrestres?
- ¿Cómo se formaron los planetas jovianos?
- ¿Qué terminó la era de la formación de planetas?

# ¿Por qué hay dos tipos principales de planetas?



## Collapse of the Solar Nebula

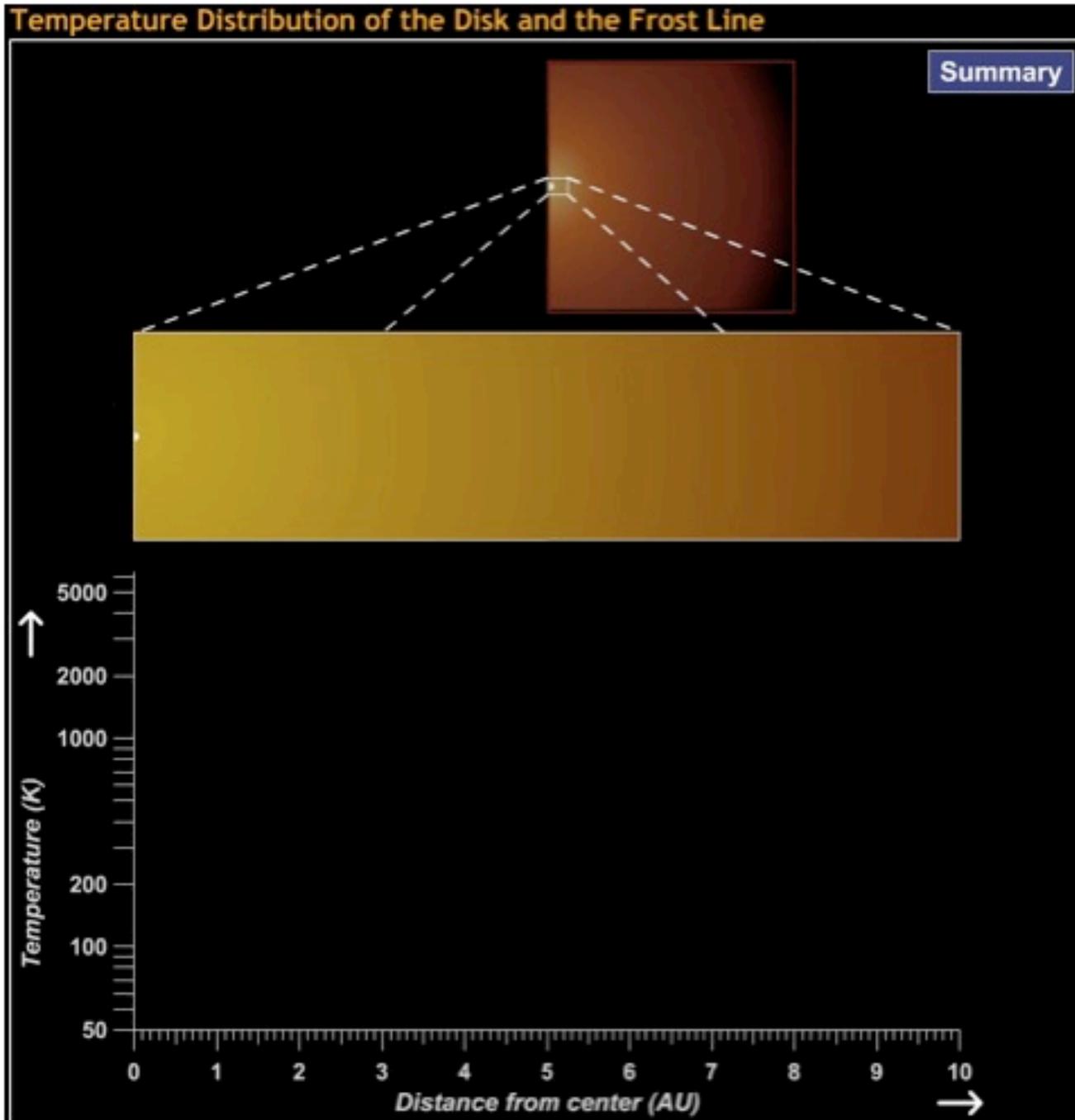


Running

Show Skater

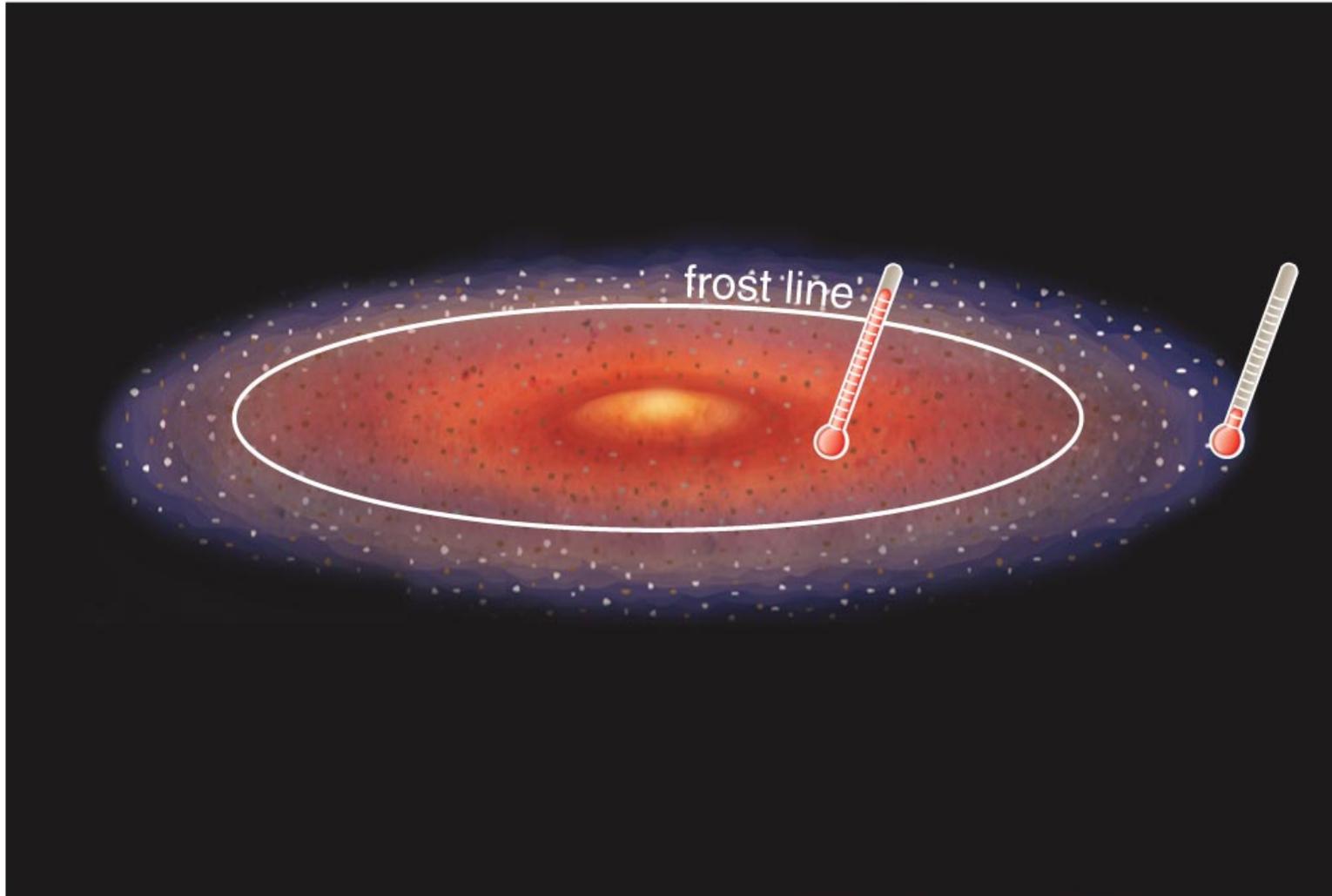
# Conservacion de la energia

A medida que la gravedad hace que la nube se contraiga, se calienta.



Las partes internas del disco son más calientes que las partes externas.

La roca puede ser sólida a temperaturas mucho mayores que el hielo.



Dentro de la **línea de congelación**: demasiado caliente para que los compuestos de hidrógeno formen hielos

Fuera de la **línea de congelación**: suficientemente frío para que se formen hielos

## (2) ¿Por qué hay dos tipos principales de planetas?

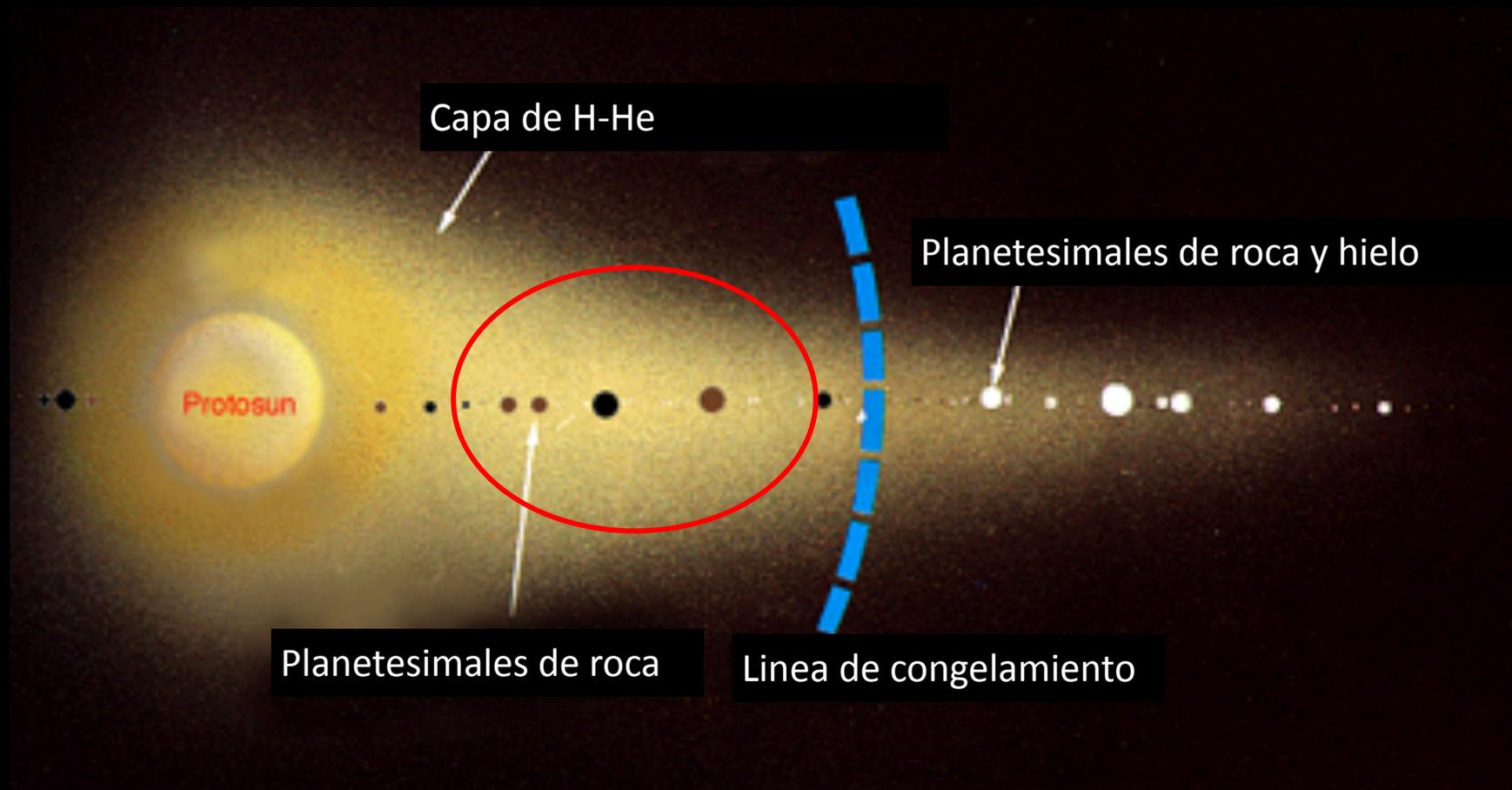
### Composición del Sistema Solar

<u>Tipo</u>	<u>Ejemplos</u>	<u>Temperatura condensación</u>	<u>Abundancia</u>
Gas de H y He	H y He	no se condensa	98%
Compuestos H (Hielos)	Agua (H <sub>2</sub> O) Metano (CH <sub>4</sub> ) Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	<150 K	1.4%
Rocas	Varios minerales	500-1300 K	0.4%
Metal	Fe, Ni, Al	1000-1600 K	0.2%

La mayor parte de la nebulosa Solar se mantuvo gaseosa (H y He)

El resto se condensó en distintos materiales cuando la temperatura lo permitió.

## (2) ¿Por qué hay dos tipos principales de planetas?



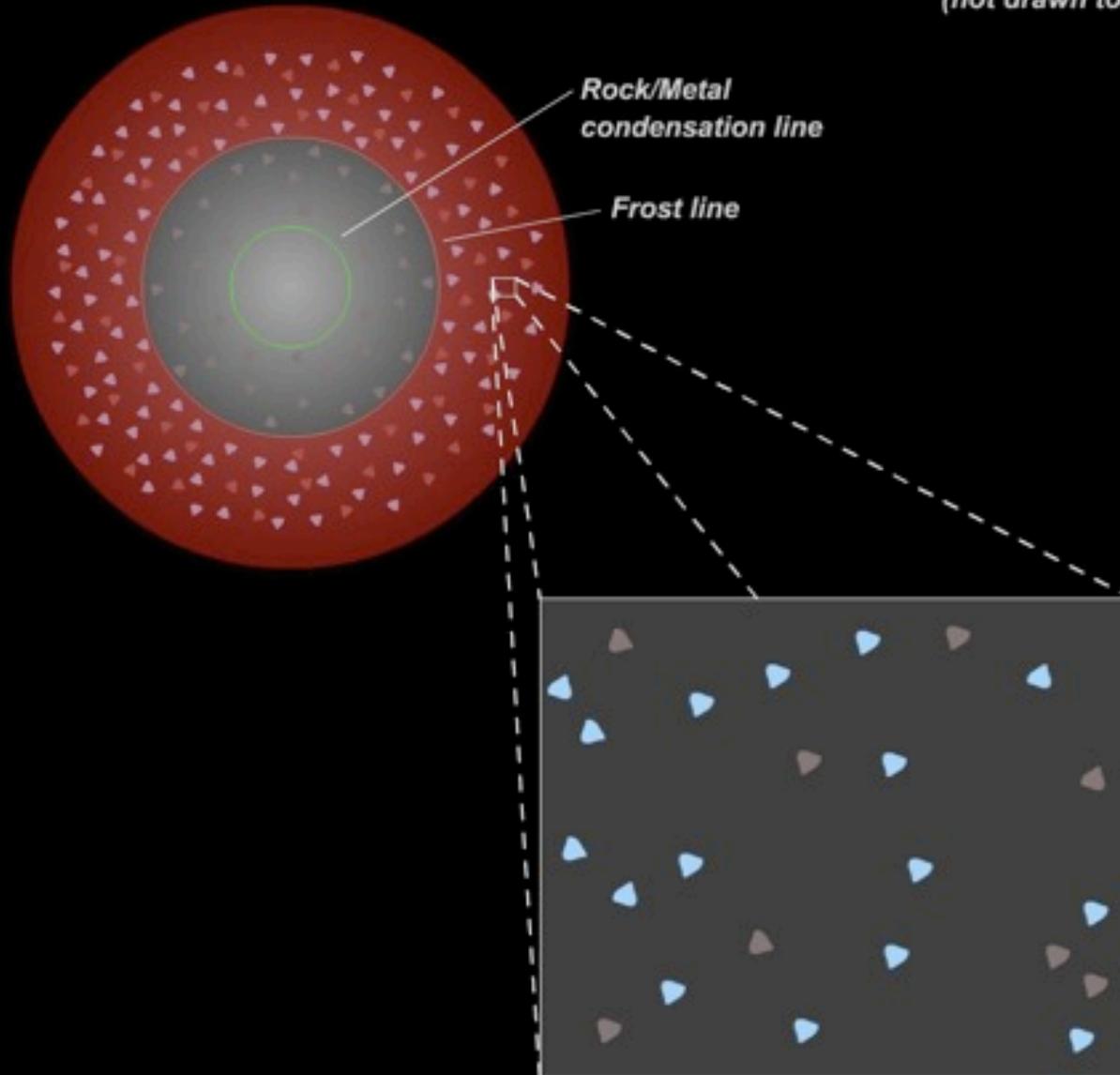
Temperatura decrece radialmente: condensacion de distintos materiales

# ¿Cómo se formaron los planetas terrestres?

- Pequeñas partículas de roca y metal estaban presentes dentro de la línea de escarcha.
- Planetesimales de roca y metal se acumularon cuando estas partículas colisionaron.
- La gravedad eventualmente ensambló estos planetesimales en planetas terrestres.

## Summary of the Condensates in the Protoplanetary Disk

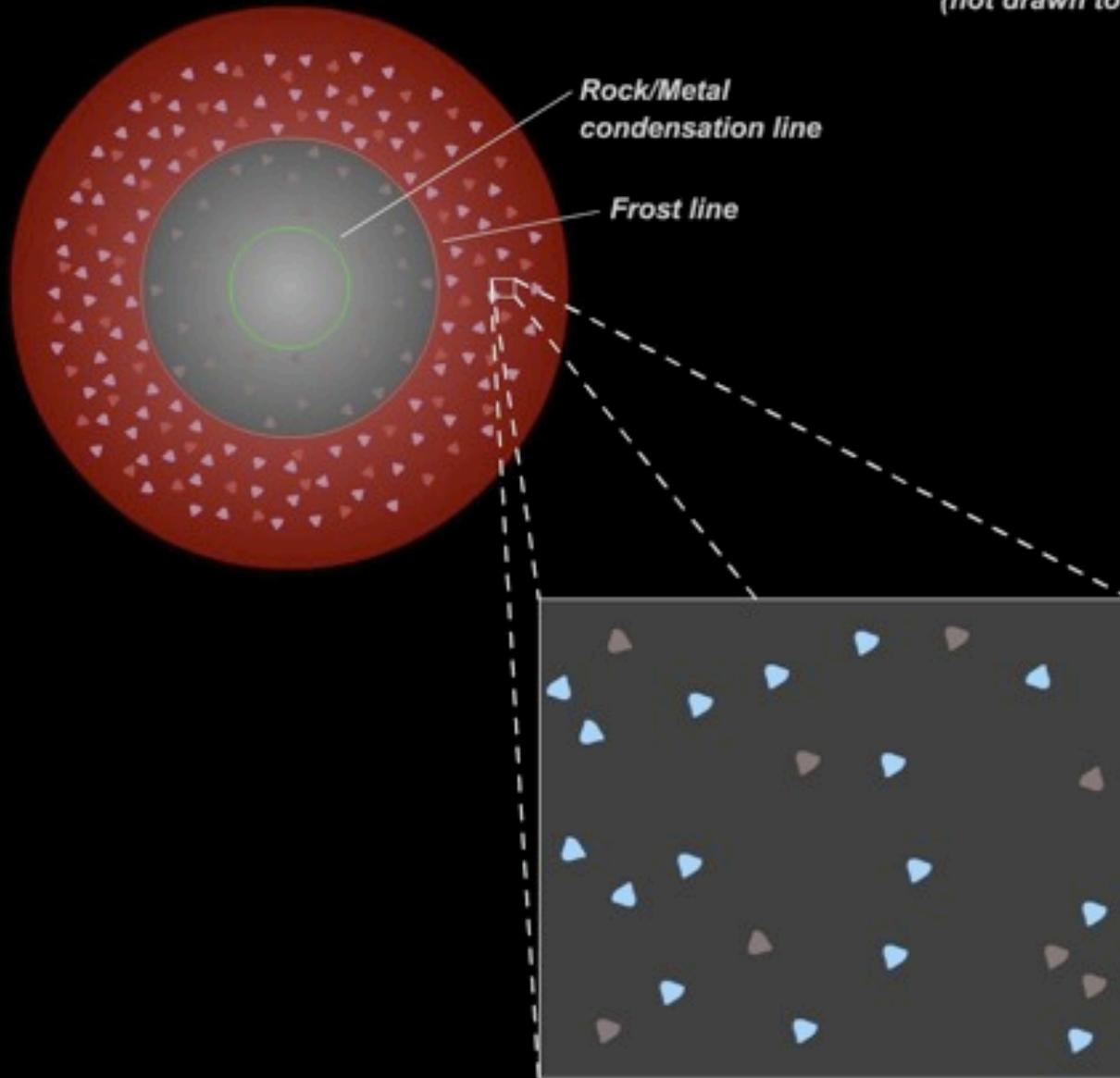
(not drawn to scale)



Pequeñas partículas sólidas se adhieren para formar planetesimales.

## Summary of the Condensates in the Protoplanetary Disk

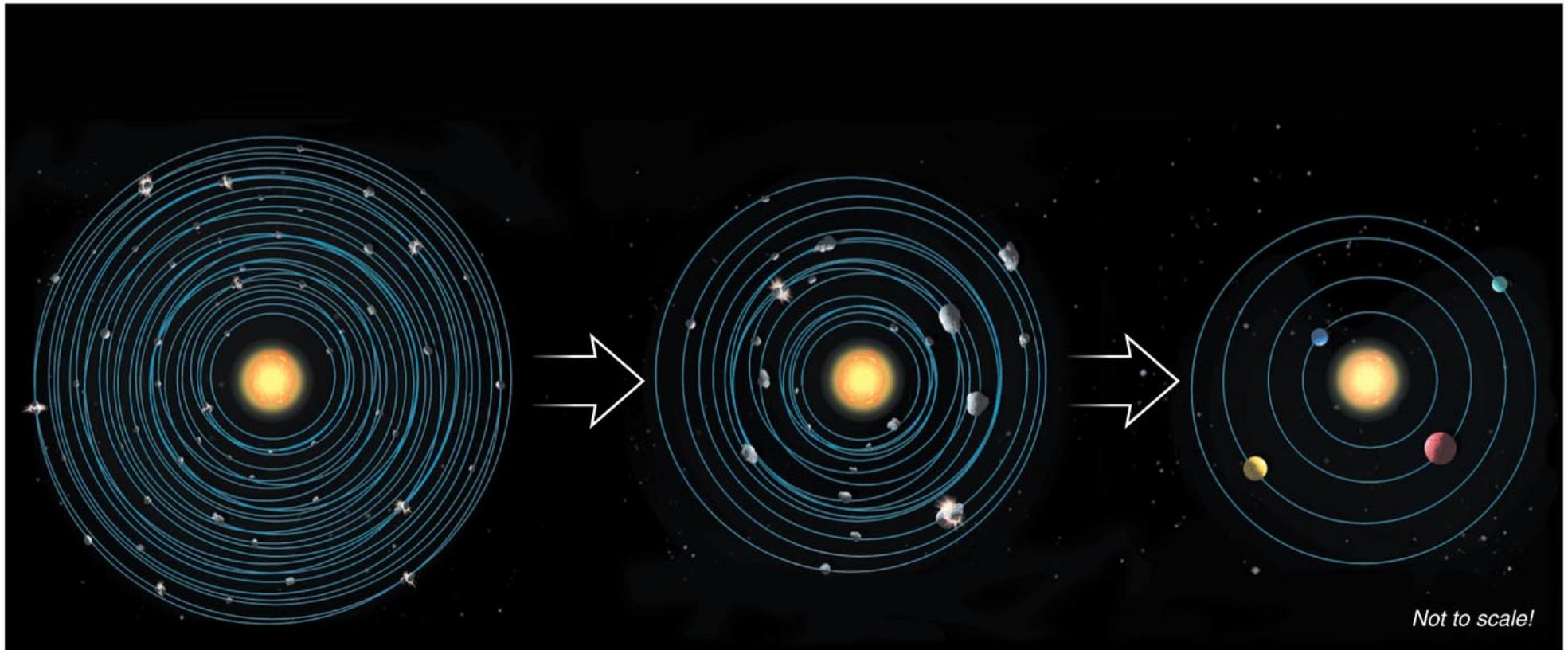
(not drawn to scale)



La gravedad atrae planetesimales para formar planetas.

Este proceso de ensamblaje se llama **acreción**.

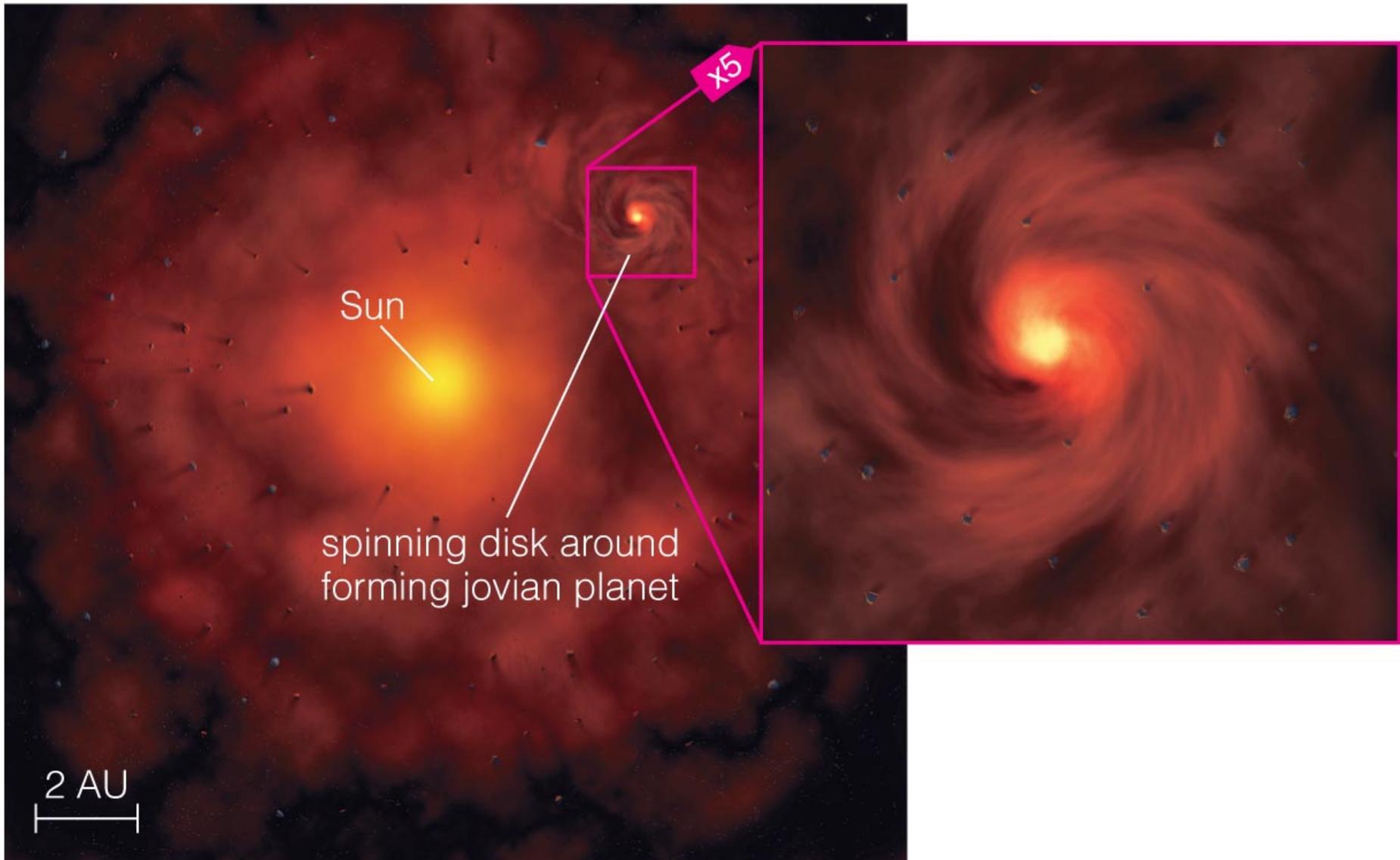
# Acreción de planetesimales



- Muchos objetos más pequeños se recogen en unos pocos grandes.

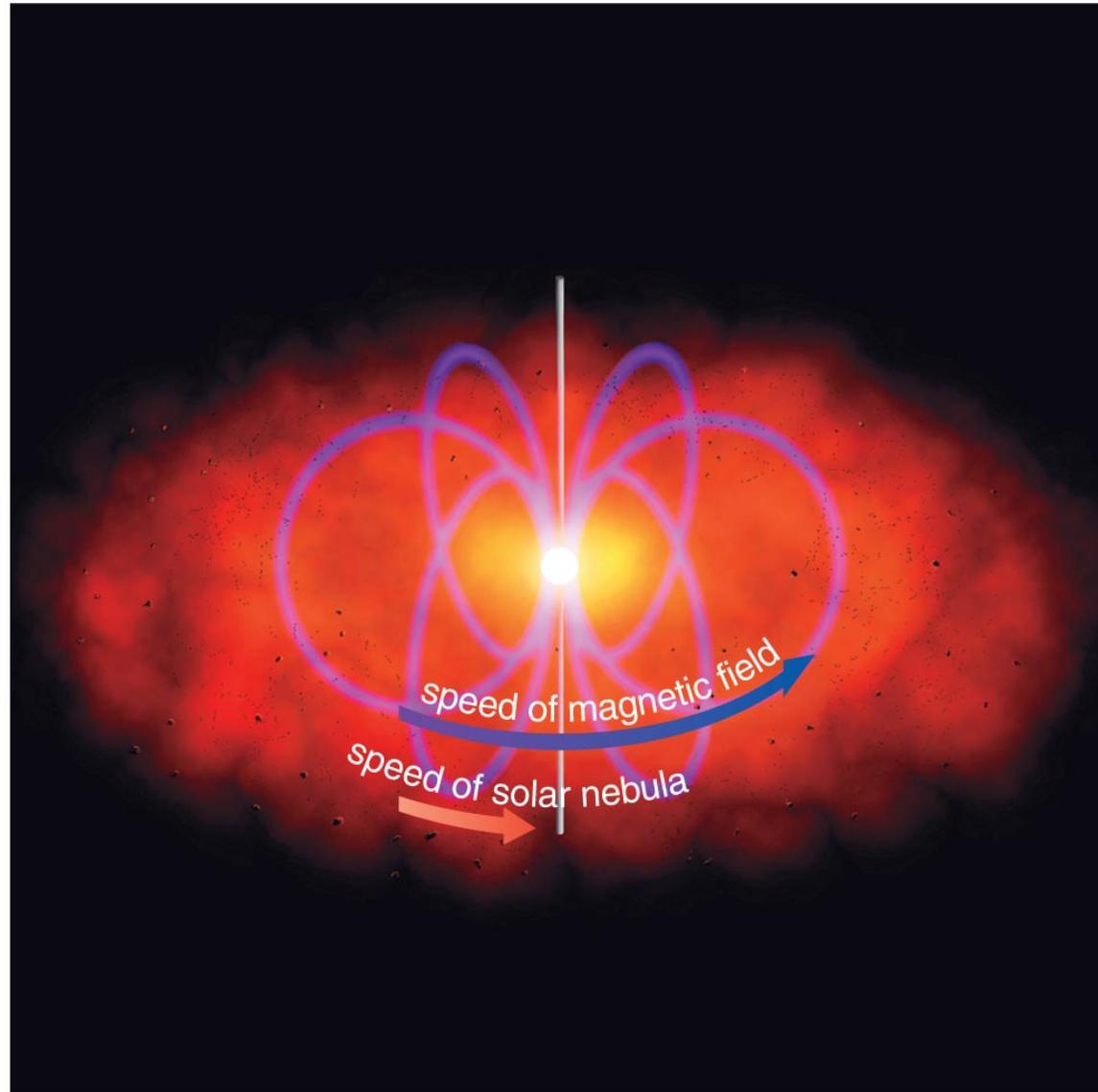
# ¿Cómo se formaron los planetas jovianos?

- El hielo también podría formar pequeñas partículas fuera de la línea de congelación.
- Planetesimales y planetas más grandes pudieron formarse.
- La gravedad de estos planetas más grandes fue capaz de atraer a los gases H y He circundantes.



Las lunas de los planetas jovianos se forman en discos en miniatura.

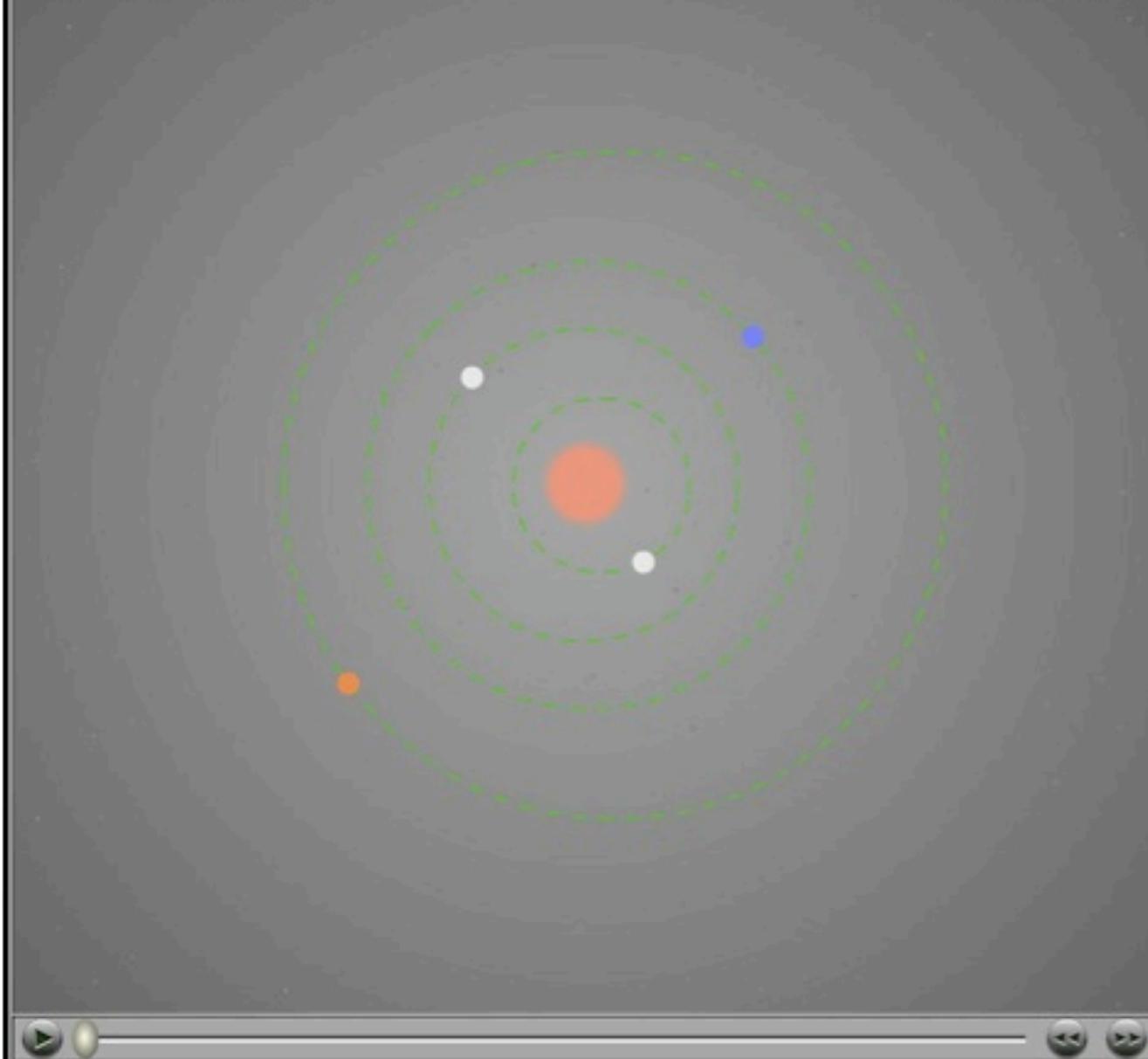
# ¿Qué terminó la era de la formación de planetas?



## The Solar Wind

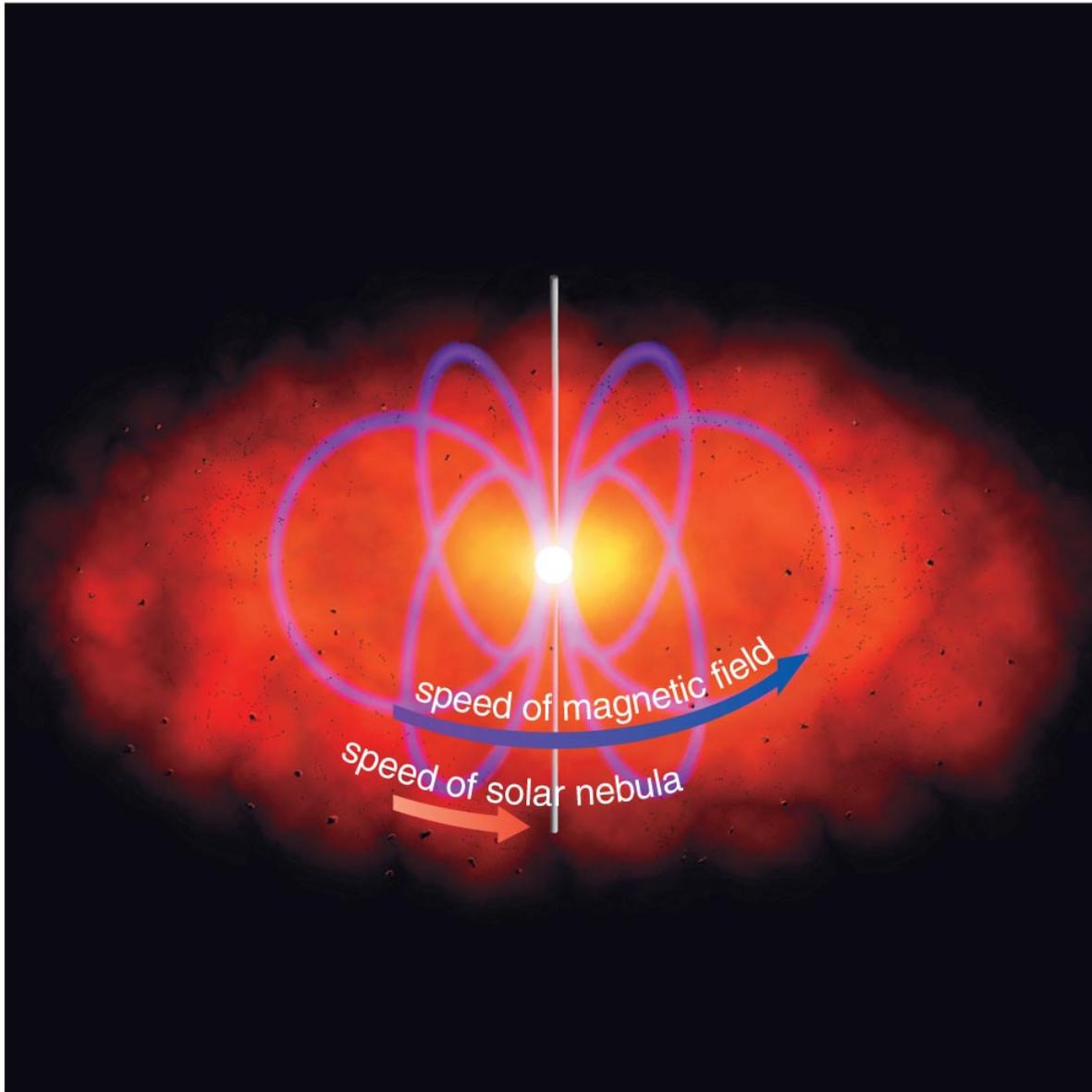
Inner solar system  
orbits drawn to scale

Sun and planet sizes  
not drawn to scale



Una  
combinación de  
fotones y el  
**viento solar**,  
que fluye del  
Sol, expulsó los  
gases sobrantes.

# Rotación solar

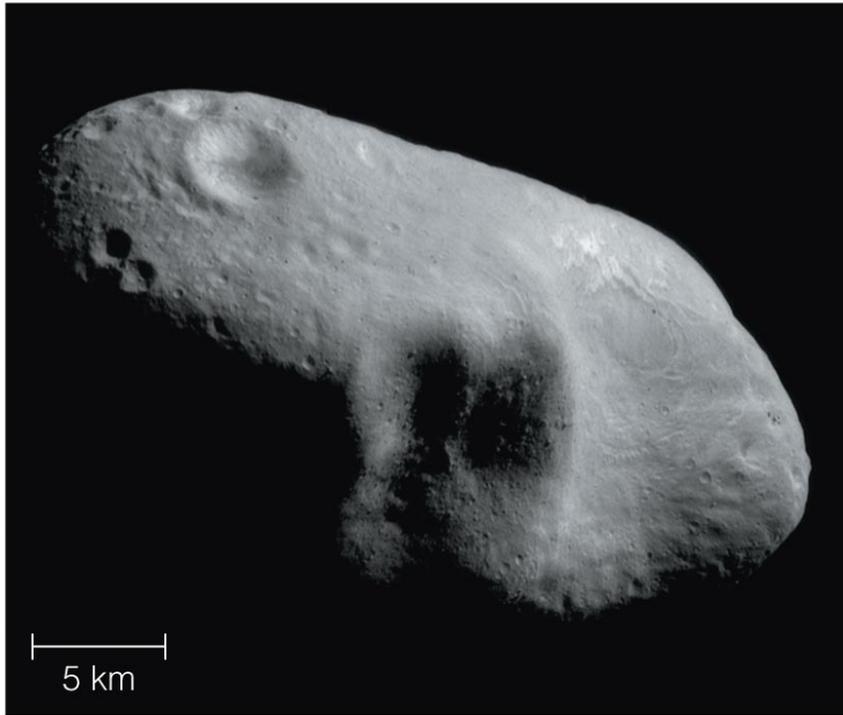


- En la teoría nebular, el joven Sun giró mucho más rápido que ahora.
- La fricción entre el campo magnético solar y el nebuloso solar probablemente ralentizó la rotación con el tiempo.

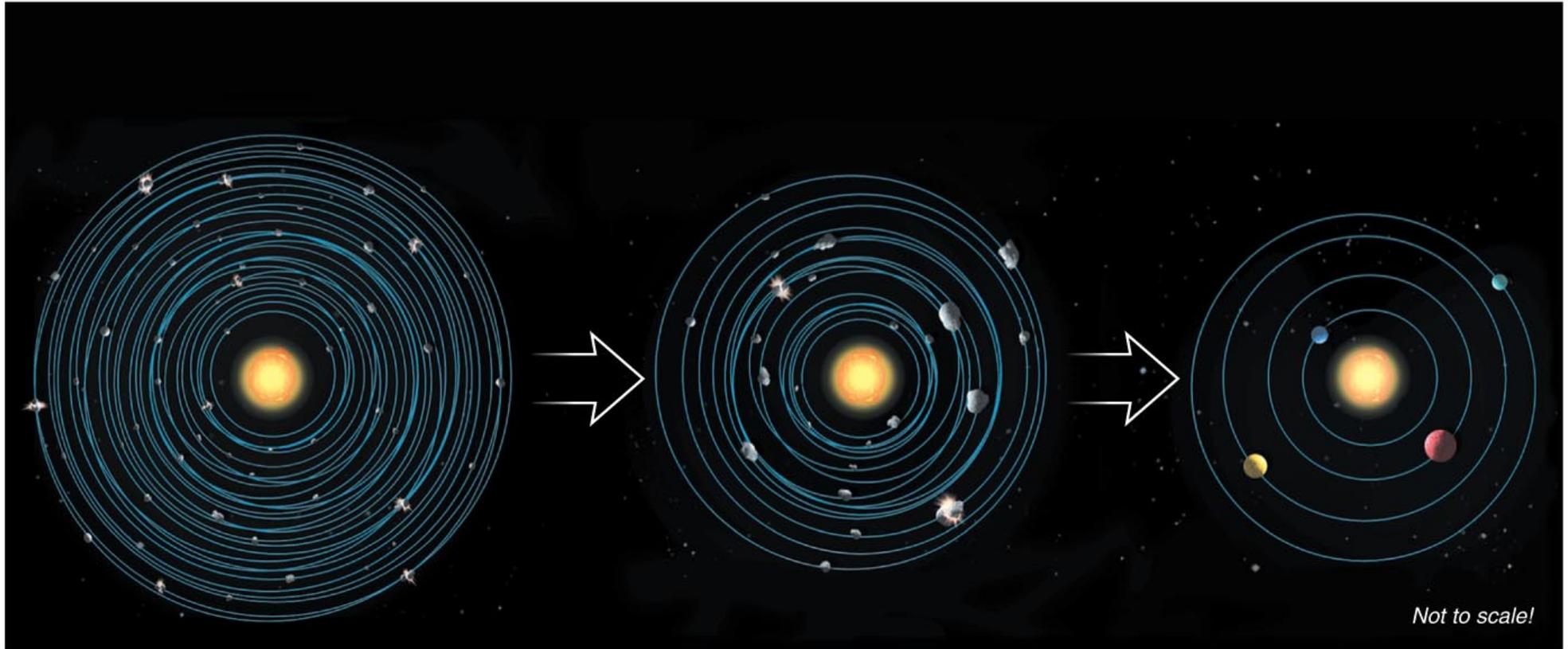
# Despues de la formación planetaria

- ¿De dónde vienen los asteroides y los cometas?
- ¿Cómo explicamos "excepciones a las reglas"?
- ¿Cómo explicamos la existencia de nuestra Luna?
- Fue nuestro sistema solar destinado a ser?

# ¿De dónde vienen los asteroides y los cometas?

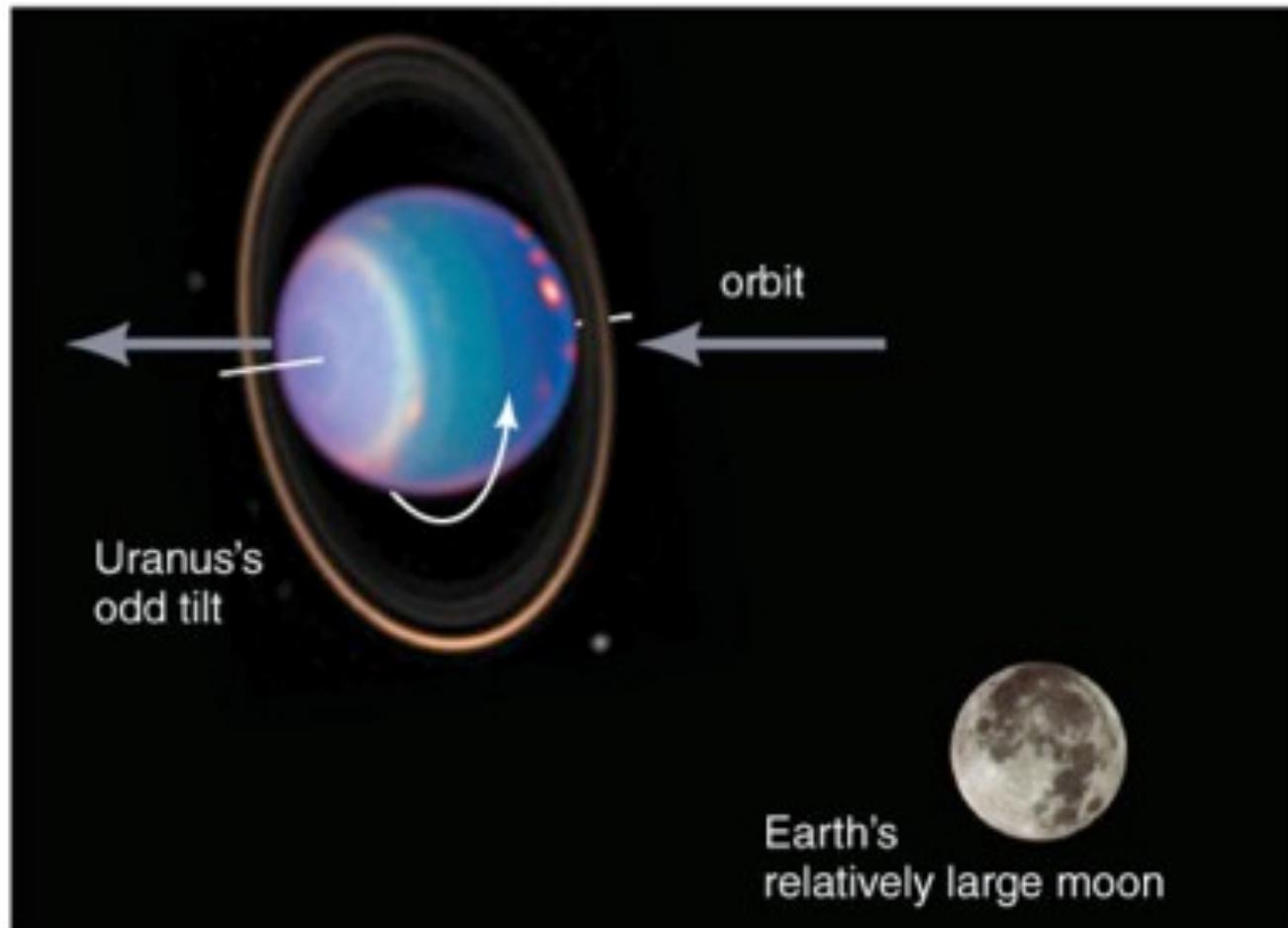


# Asteroides y cometas

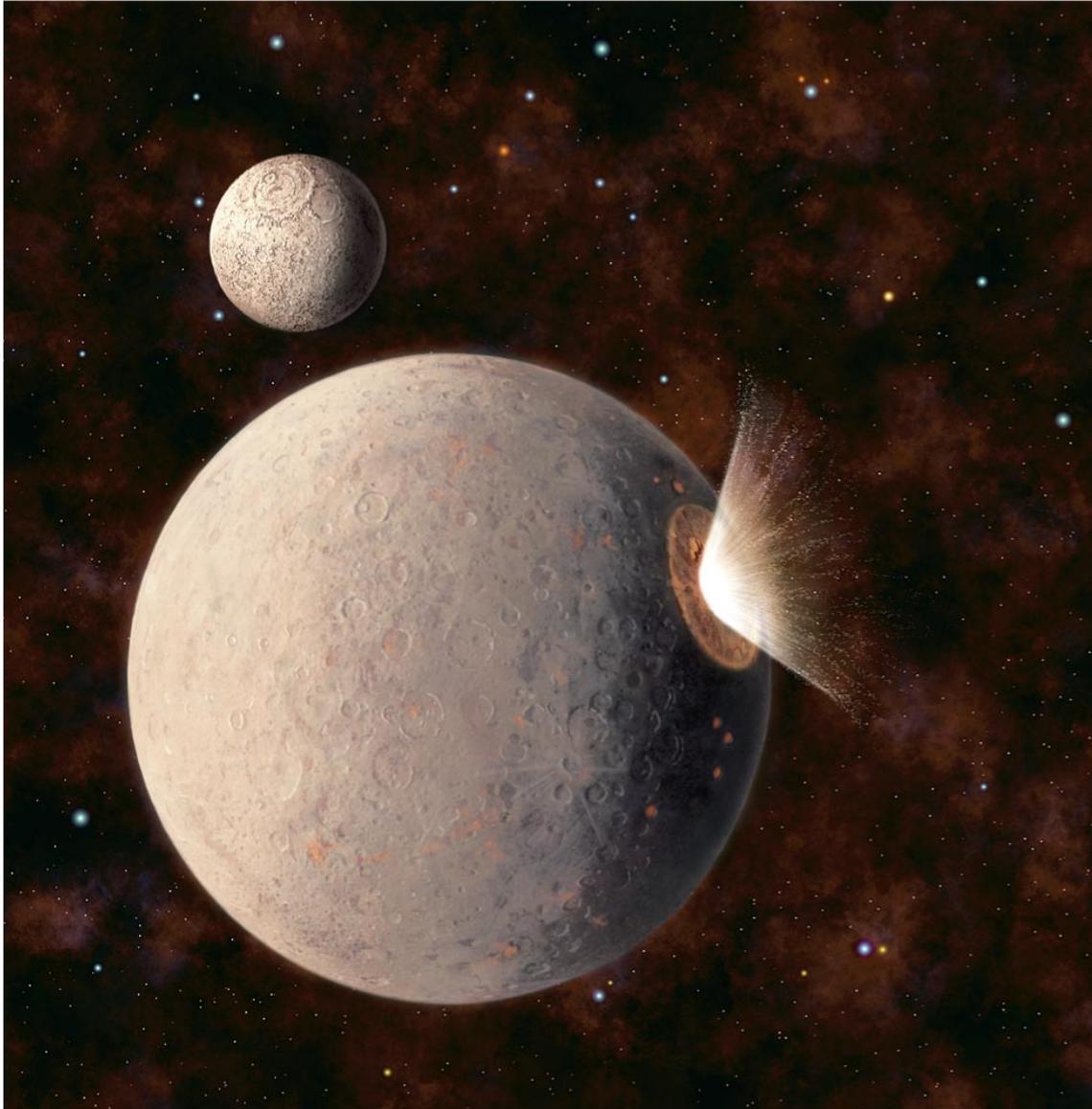


- Las sobras del proceso de acreción
- Asteroides rocosos dentro de la línea de escarcha
- Cometas heladas fuera de la línea de escarcha

# ¿Cómo explicamos "excepciones a las reglas"?

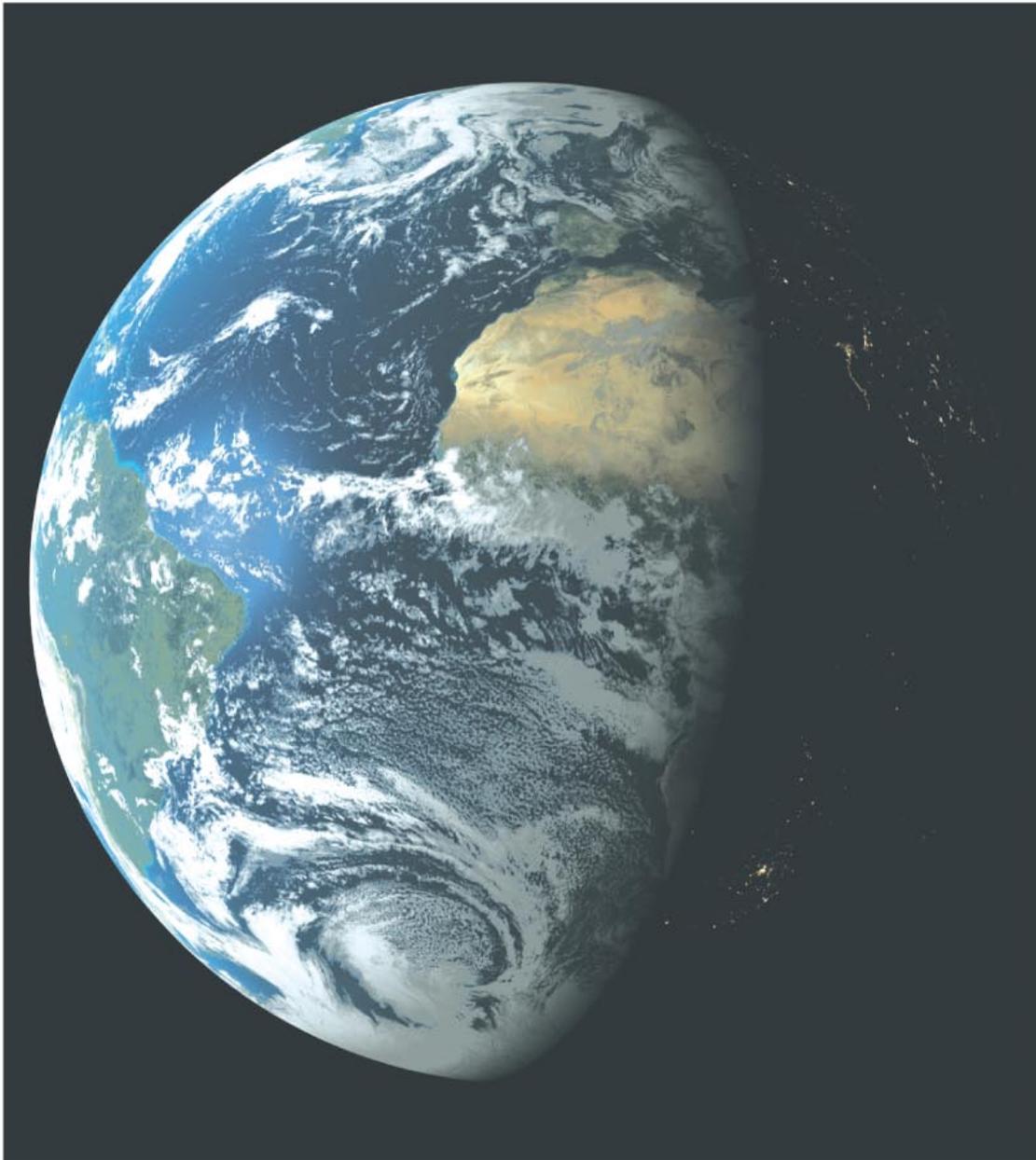


# Bombardeo



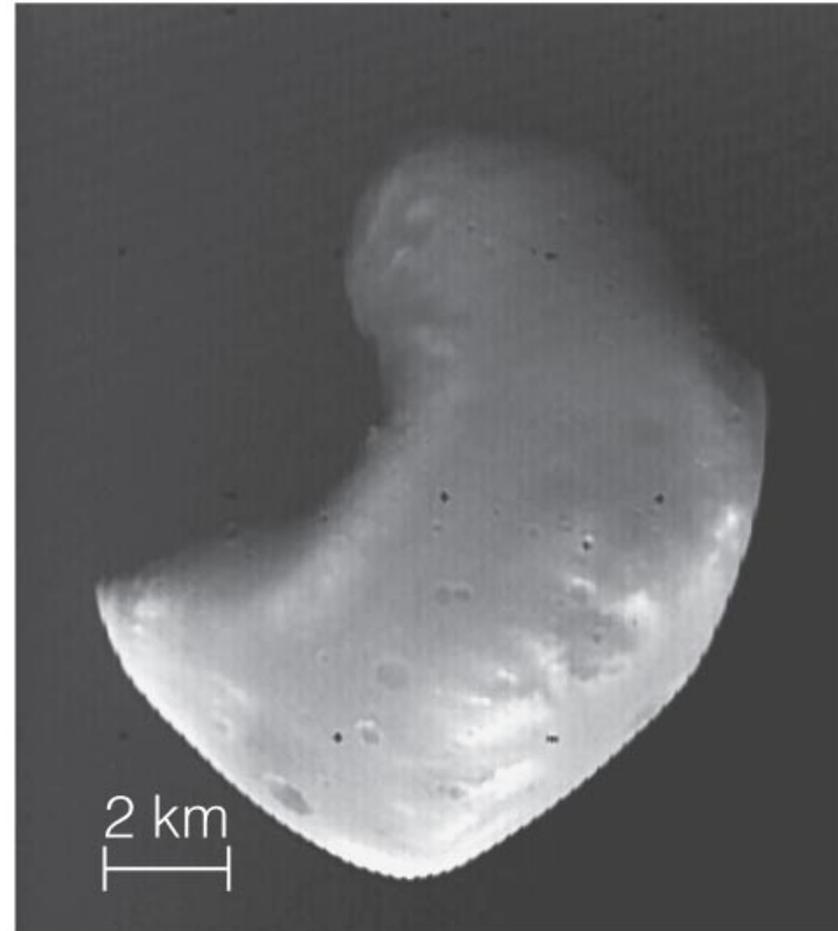
- Los planetesimales sobrantes bombardearon otros objetos en las últimas etapas de la formación del sistema solar.

# Origen del agua de la tierra



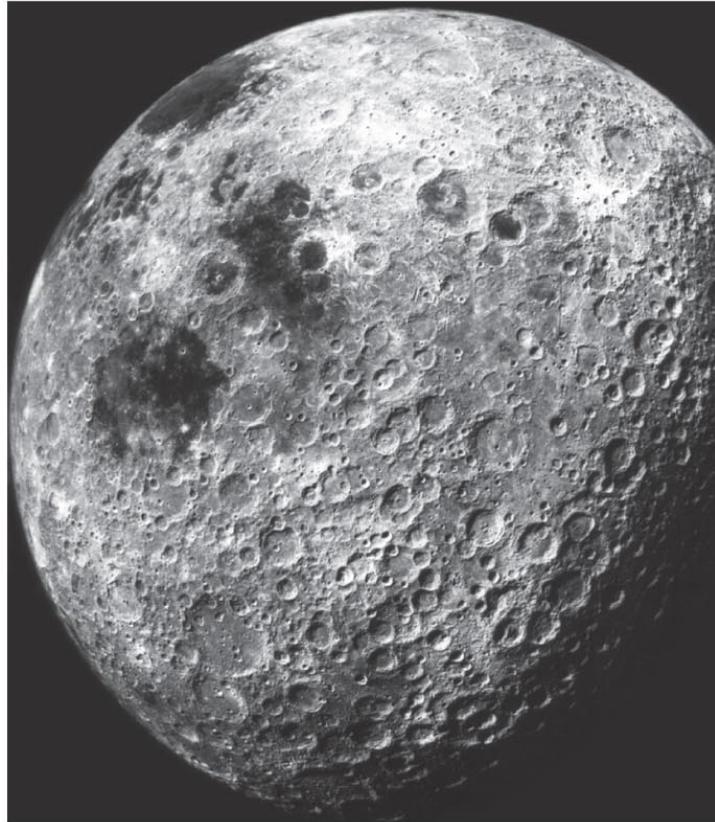
- El agua puede haber llegado a la Tierra por medio de planetesimales helados.

# Lunas capturadas



- Las lunas inusuales de algunos planetas se pueden capturar planetesimales.

# ¿Cómo explicamos la existencia de nuestra Luna?



Si Luna y Tierra se hubieran formado juntos, se habrían acrecido a partir de planetesimales del mismo tipo y, por lo tanto, tendrían aproximadamente la misma composición y densidad. Pero este no es el caso: la densidad de la Luna es considerablemente menor que la de la Tierra, lo que indica que tiene una composición promedio muy diferente.

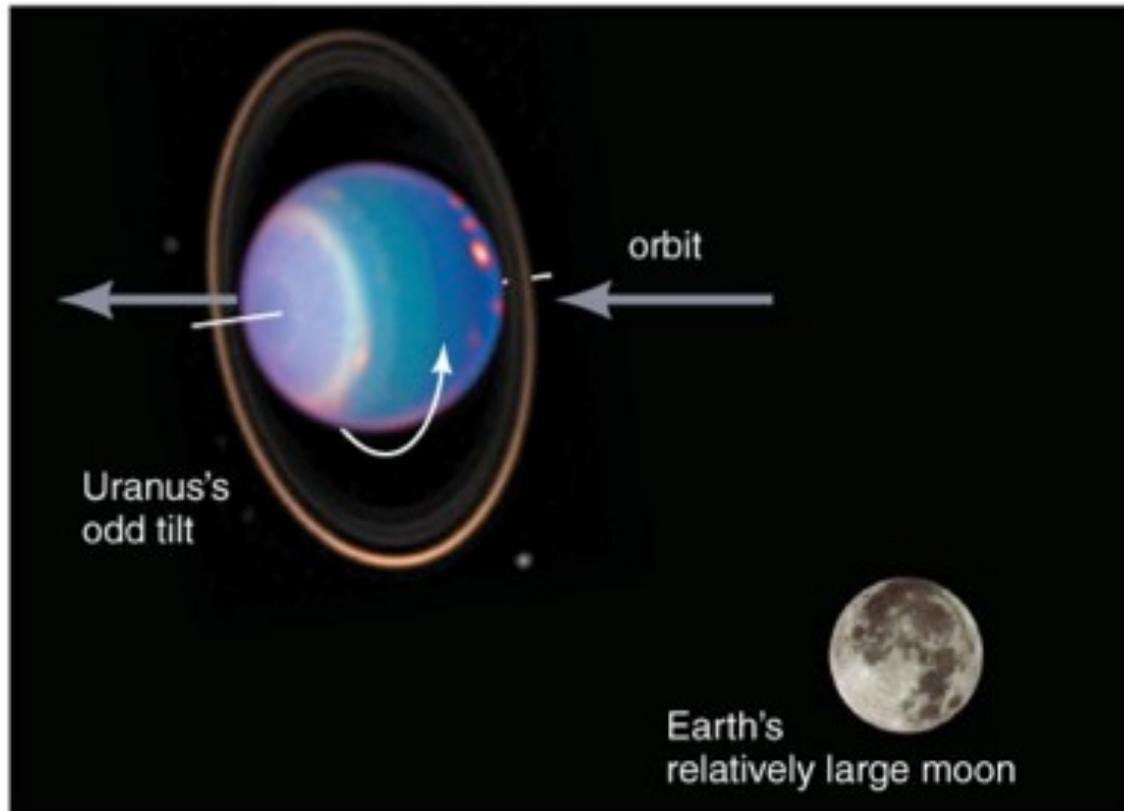
# Impacto gigante

Giant impact stripped matter from Earth's crust.

Stripped matter began to orbit...

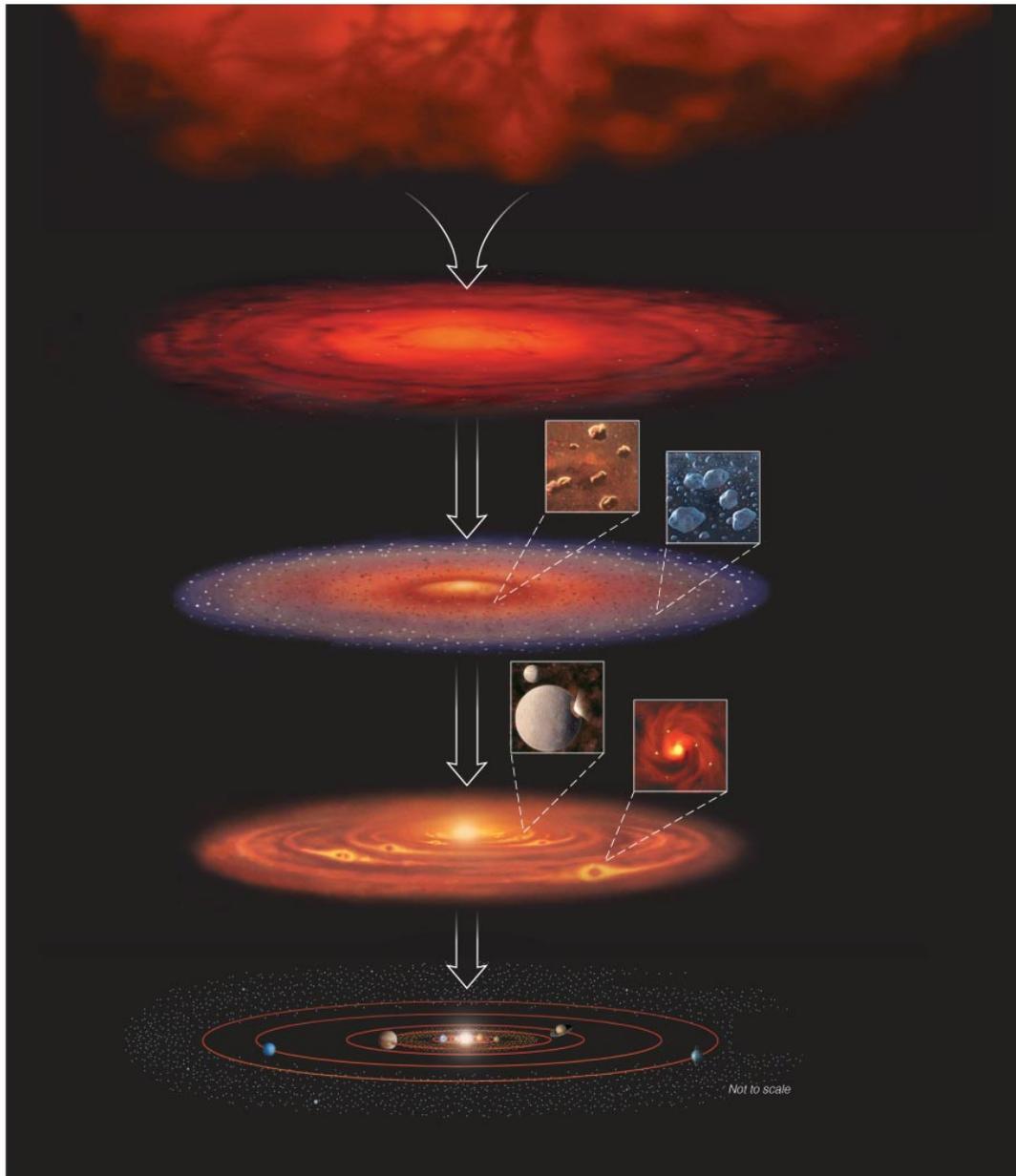
...then accreted into Moon.

# Rotacion diferente de las de los otros planetas



- Los impactos gigantes también podrían explicar los diferentes ejes de rotación de algunos planetas.

# Fue nuestro sistema solar destinado a ser?



- La formación de planetas en la nebulosa solar parece inevitable.
- Pero los detalles de los planetas individuales podrían haber sido diferentes.

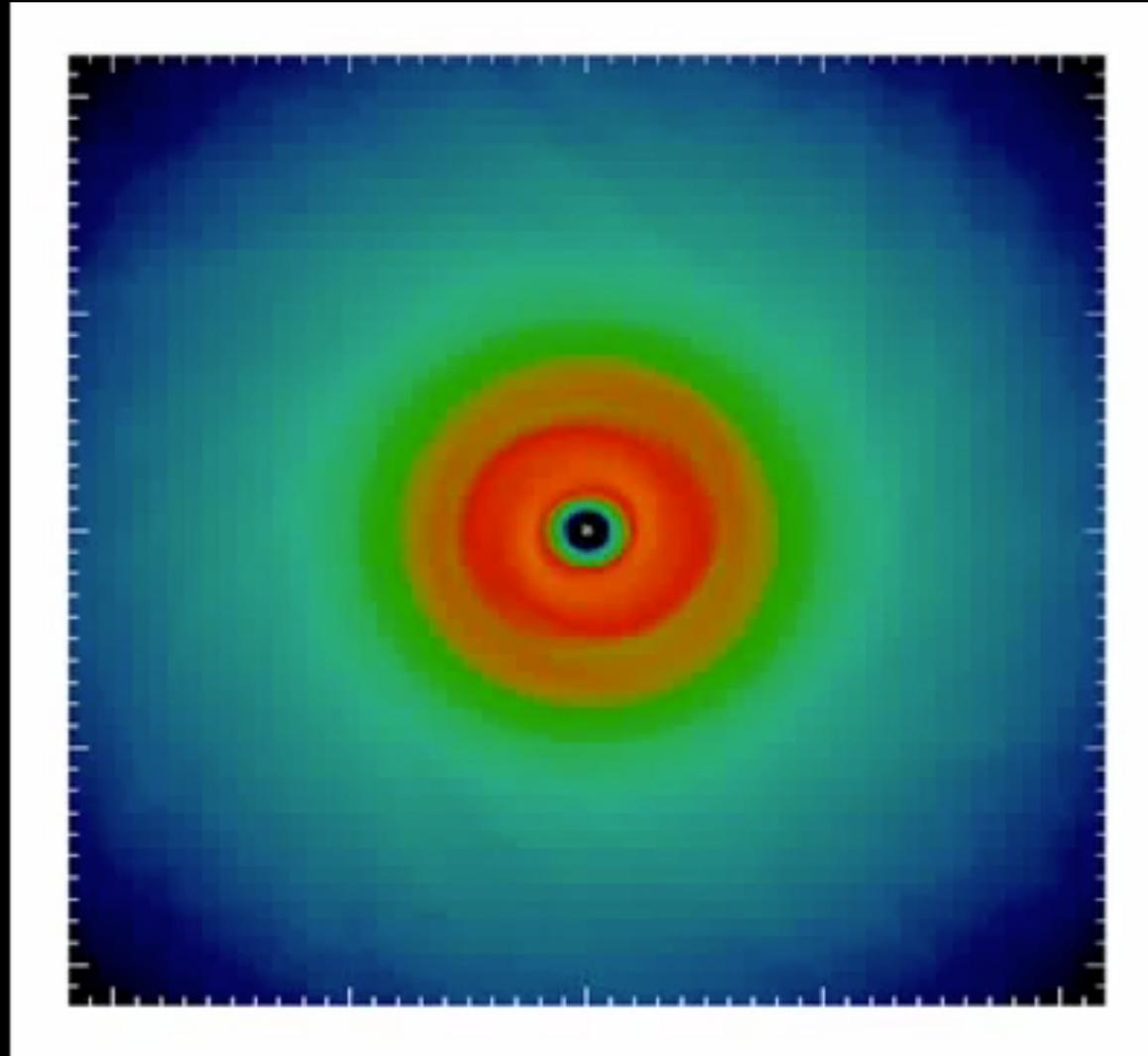
¿Cuál de estos hechos NO es explicado por la teoría nebular?

- a) Hay dos tipos principales de planetas: terrestre y joviano.
- b) Los planetas orbitan en la misma dirección y plano.
- c) Existencia de asteroides y cometas.
- d) Número de planetas de cada tipo (cuatro terrestres y cuatro jovianos).

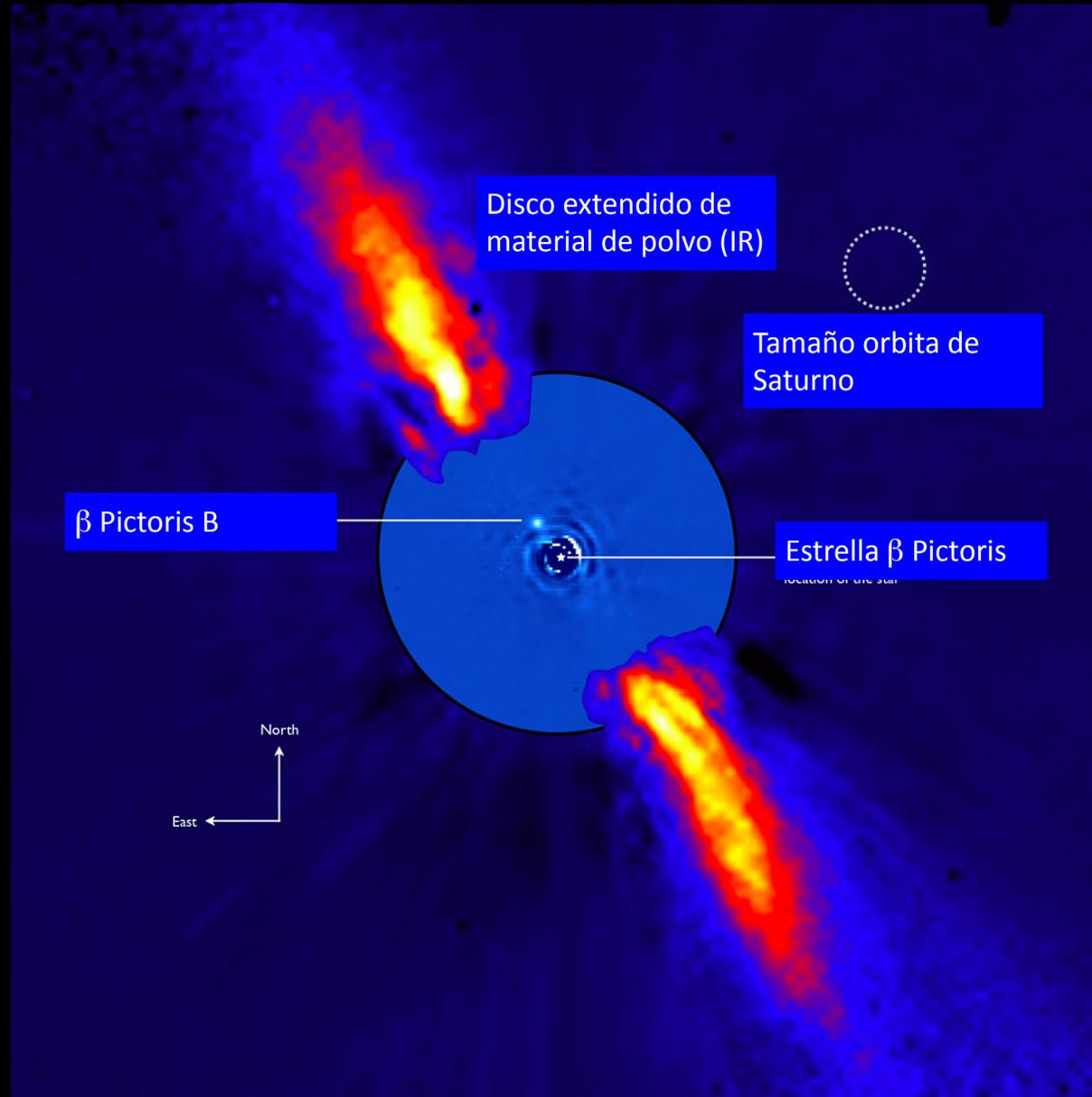
¿Cuál de estos hechos NO es explicado por la teoría nebular?

- a) Hay dos tipos principales de planetas: terrestre y joviano.
- b) Los planetas orbitan en la misma dirección y plano.
- c) Existencia de asteroides y cometas.
- d) Número de planetas de cada tipo (cuatro terrestres y cuatro jovianos).**

(1) ¿Qué causó los patrones de movimiento en el Sistema Solar?



# Soporte a esta teoría



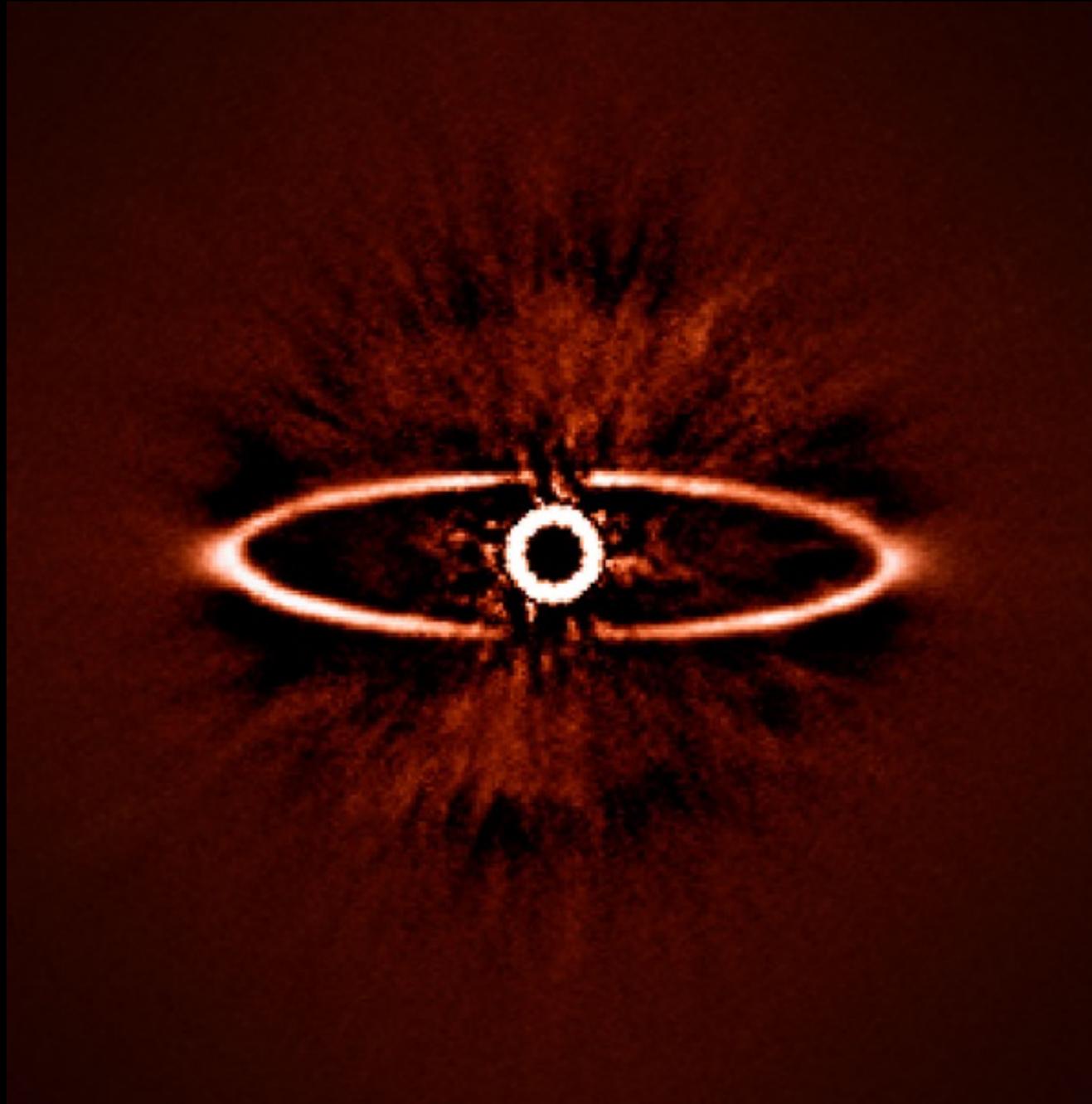
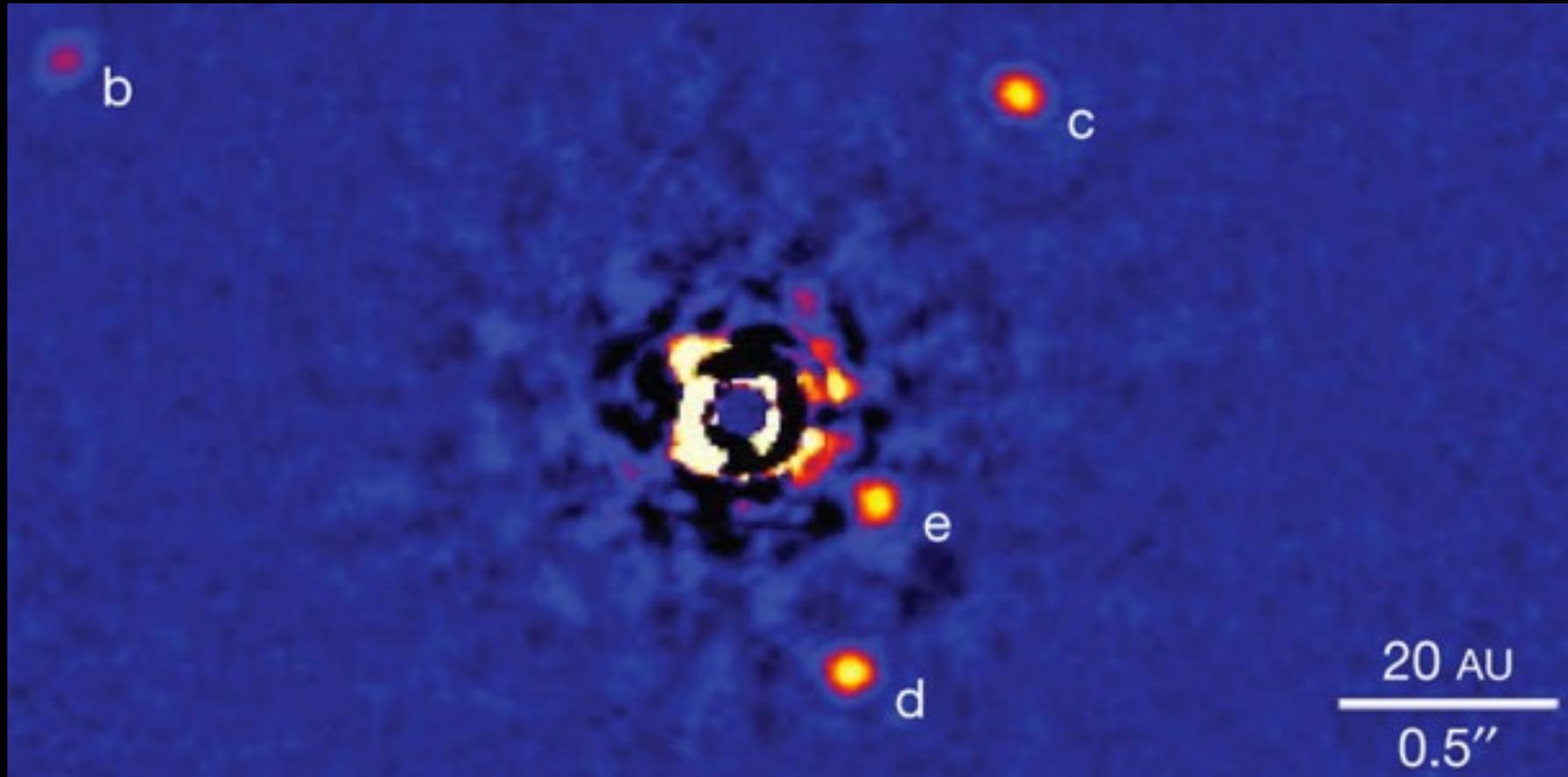


Imagen de HD4796 con el instrumento SPHERE/VLT

## Soporte a esta teoria



Imágenes directas infrarrojas del sistema planetario HL8799.

## Soporte a esta teoria

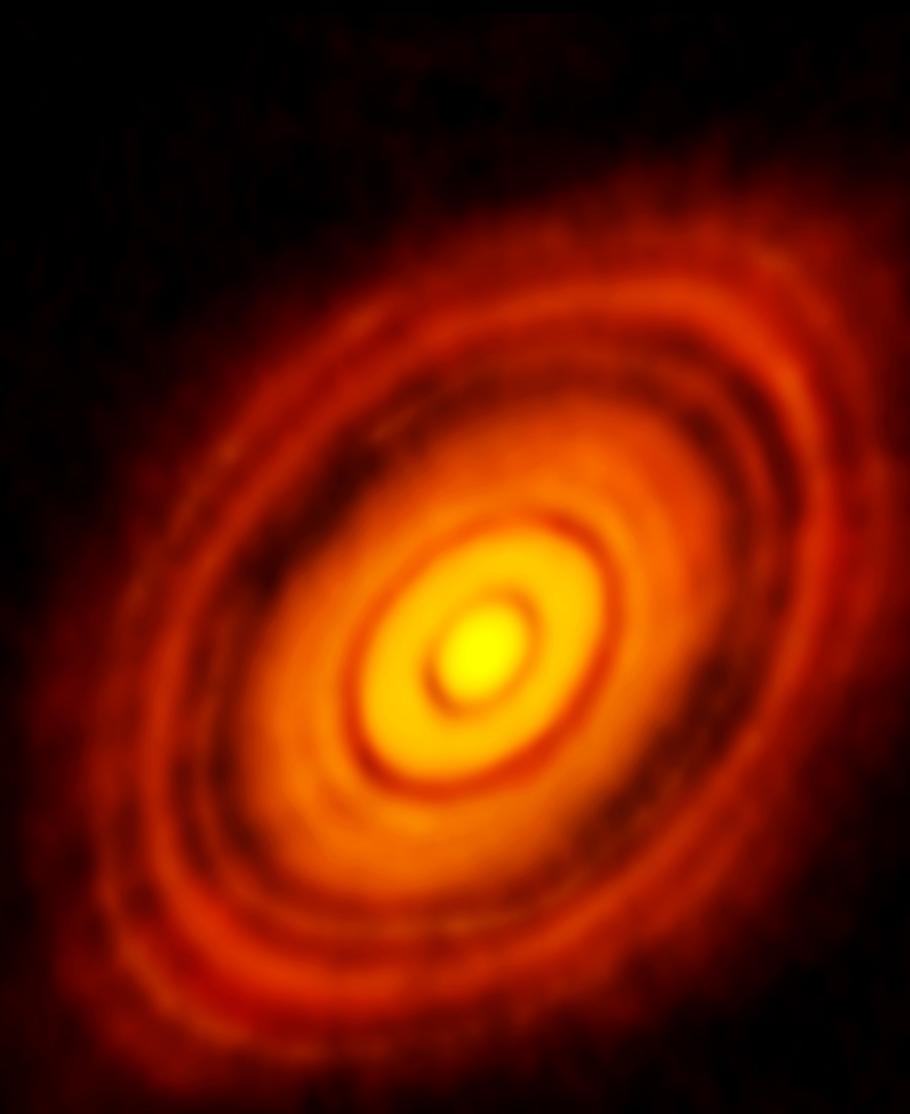


Imagen del material de polvo alrededor de la estrella HL Tauri usando ALMA.