

INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA

5 La formación del Sistema Solar

5.1 Introducción

5.2 La nebulosa solar

5.3 Formación de estrellas y planetas

5.4 Formación de lunas

5.5 Diferenciación

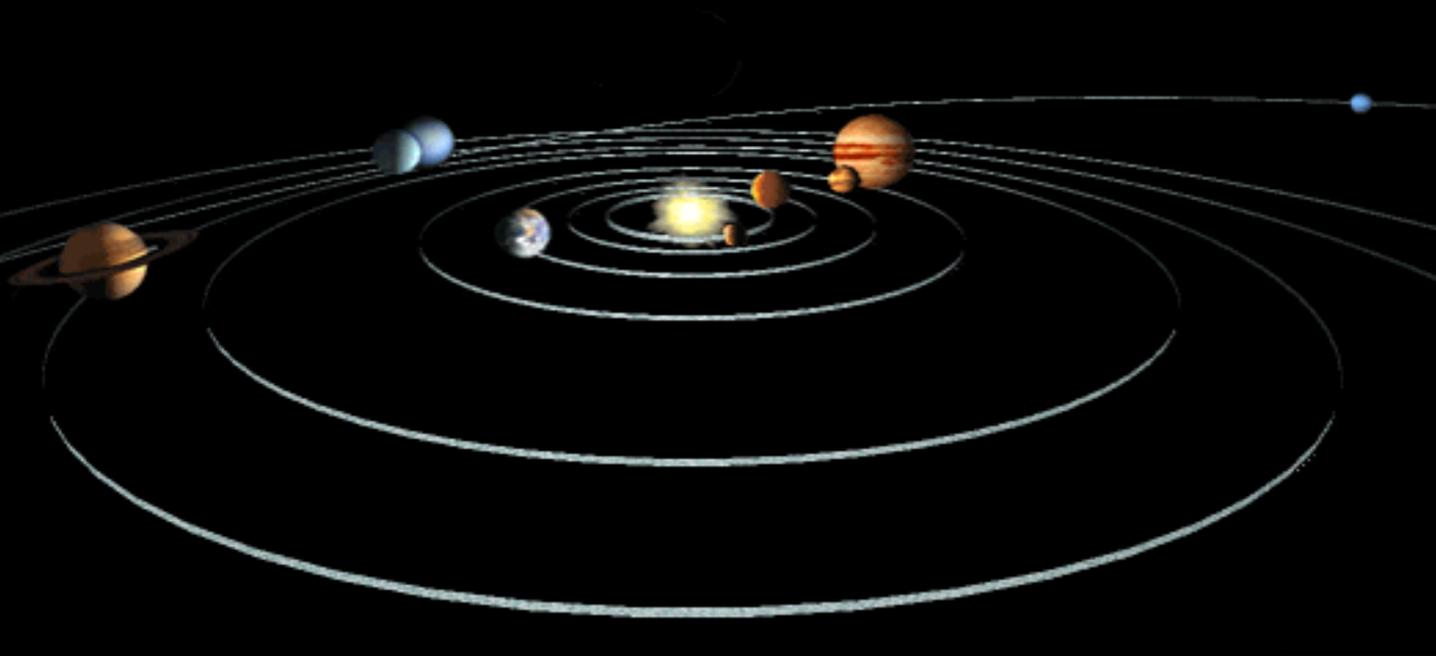
5.6 Formación de la atmósfera

5.7 Cuerpos menores

5.8 Otros sistemas planetarios



El sistema solar en la actualidad



1 Estrella

2 Planetas

~50 Satélites

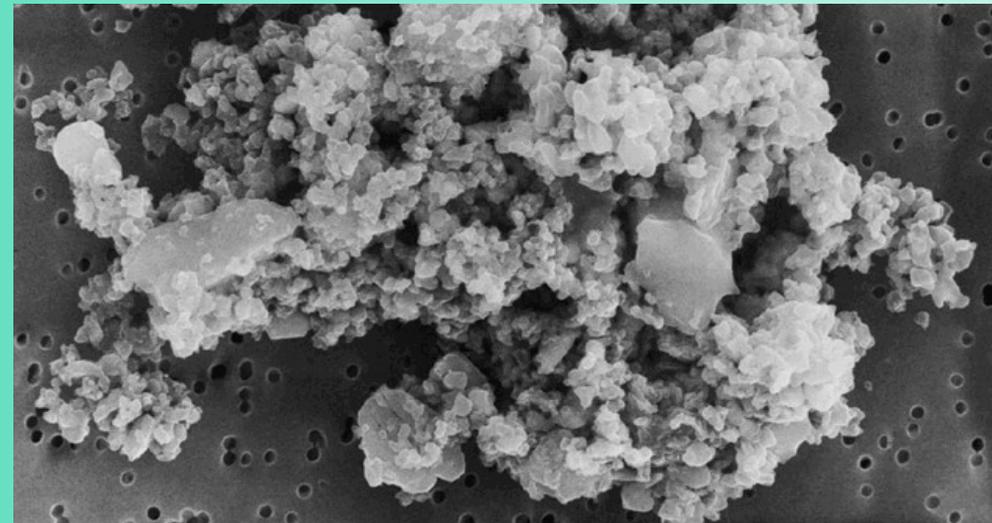
Asteroides

Cometas

P.I-P.

Algunas características del sistema solar

- Órbitas casi en el mismo plano
- Casi todos giran en el mismo sentido.
- Los planetas interiores son rocosos y pequeños, los exteriores grandes y con exterior gaseoso.



El Sol y los planetas gaseosos



Planetas rocosos y lunas



Cómo sabemos lo que sabemos

- Misiones espaciales

Sol (Soho), cometas (Giotto, Rosseta), asteroides, planetas (Voyager, Galileo, Mars, CH), Luna (Apolo, Smart)

- Grandes Telescopios:

HST (órbita), ESO (Chile), Peck (Hawaii), GRANTECAN (Canarias)

- Recogida de muestras extraterrestres

Programa Apolo, meteoritos, rocas lunares y marcianas en la Antártida, polvo interplanetario mediante aeronaves

- Simulación numérica con grandes ordenadores (SETI)

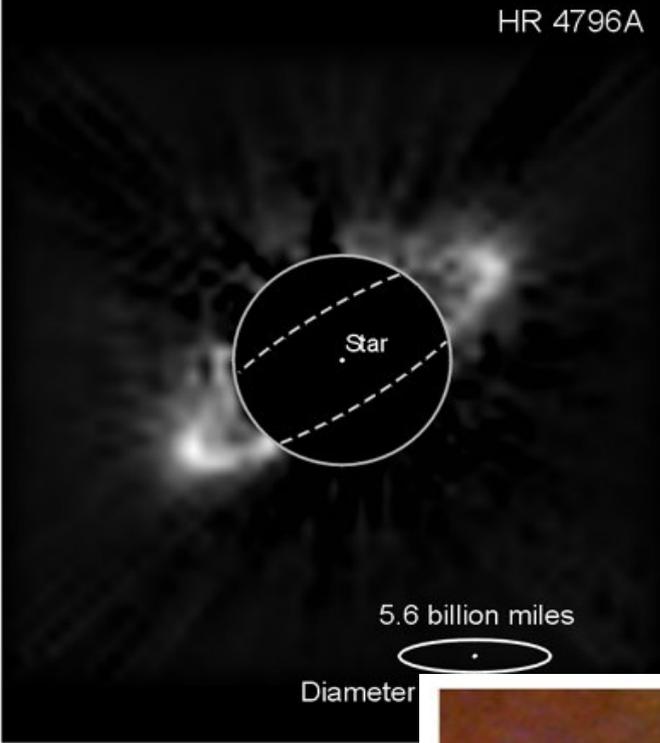
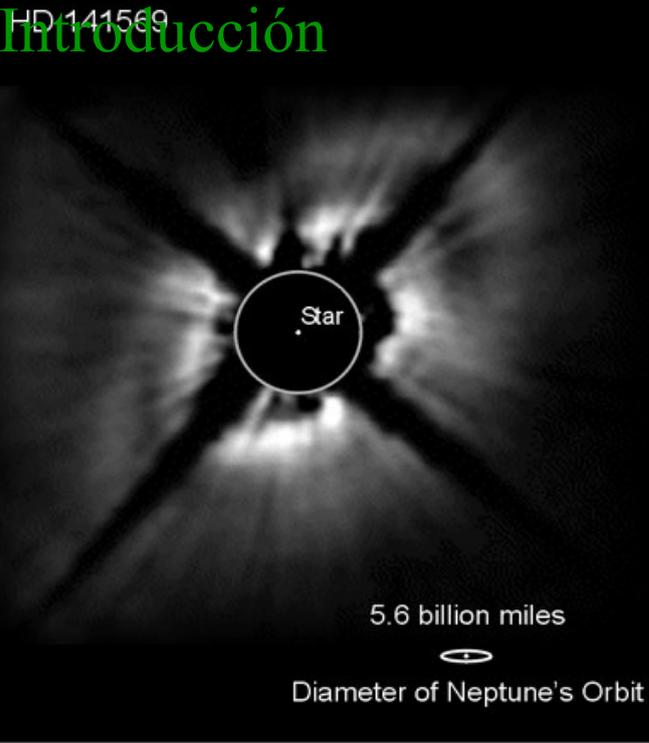
- Laboratorios terrestres y orbitales (MIR, Estación Espacial)

Observaciones de meteoritos

- Gran parte de las evidencias que muestran como se formó el sistema solar se obtienen analizando meteoritos.
- La mayor parte proviene de asteroides del cinturón de asteroides (Eros). Y algunos de Marte o de la Luna.
- La mayor parte de los meteoritos tienen una **edad** cercana a los **4 560 millones de años**
- Un pequeño grupo (acondritas) muestra una **edad mucho menor** (1 300 millones de años). Estos meteoritos se cree que vienen de Marte.



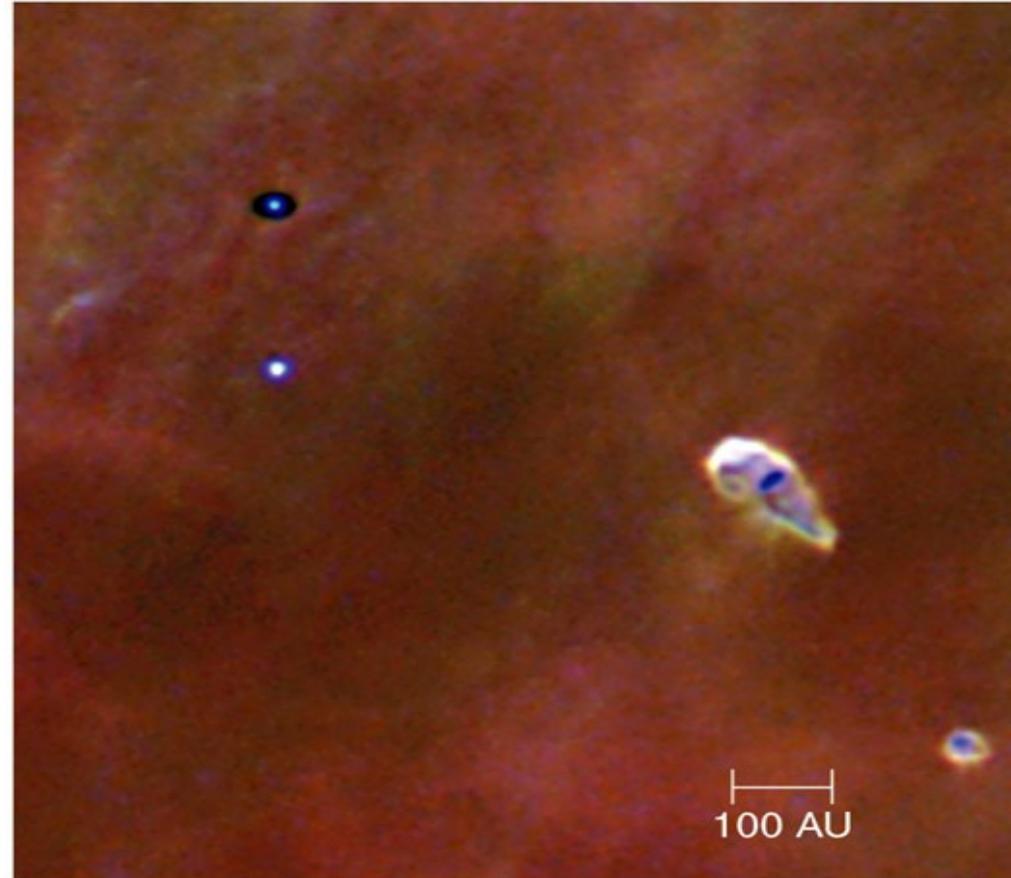
Introducción

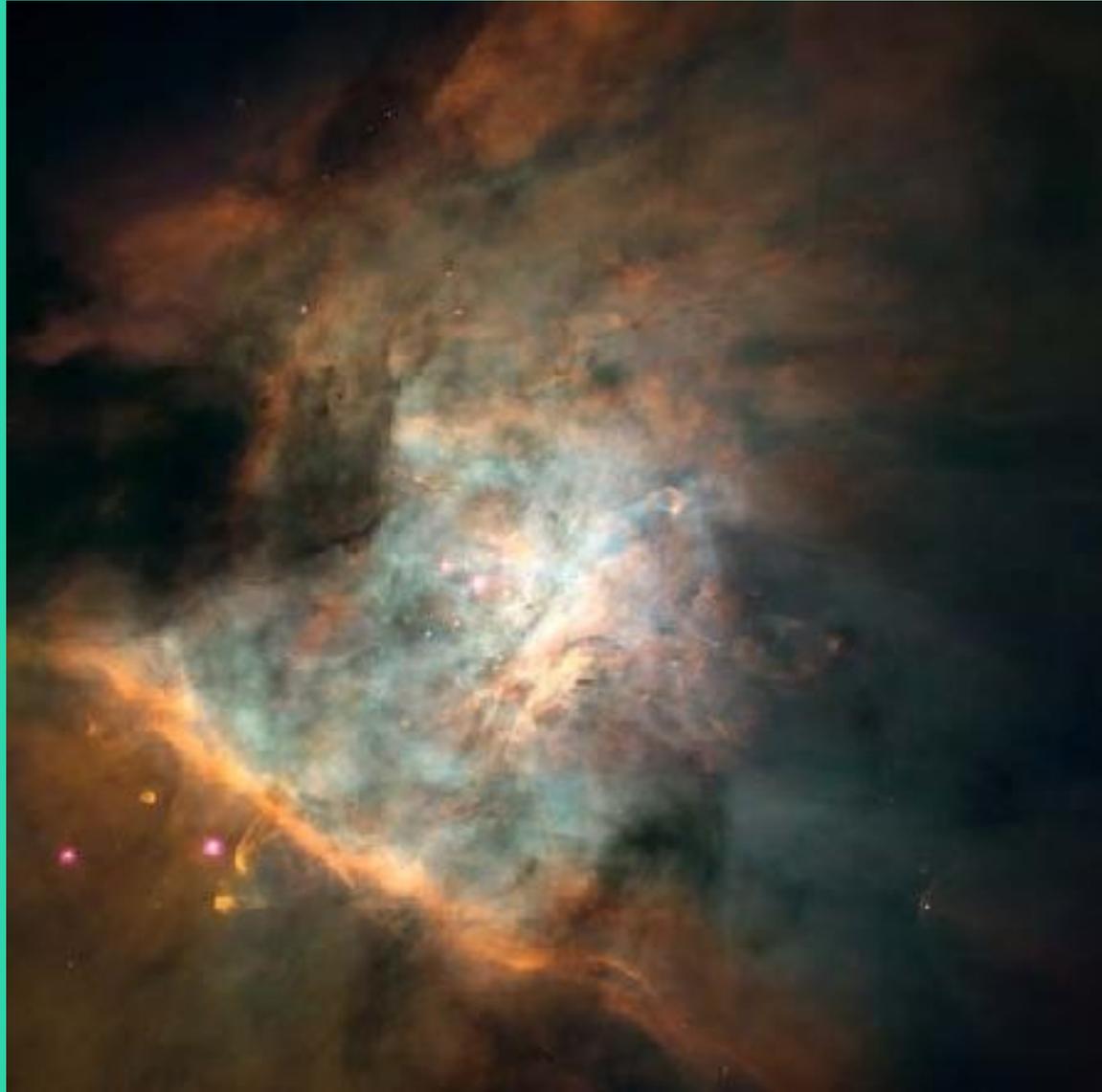


Formación de discos
 “protoplanetarios” alrededor
 estrellas observado por
 Telescopio Espacial Hubble
 (HST) en 1999

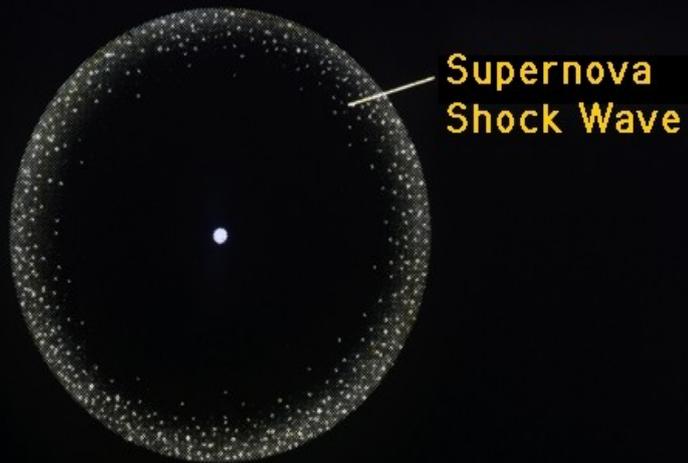
Dust Disks around Stars
 PRC99-03 • STScI OPO • January 8, 1999
 B. Smith (University of Hawaii), G. Schneider (University of Arizona),
 E. Becklin and A. Weinberger (UCLA) and NASA

Estrella joven en la
 Nebulosa de Orión con
 disco protoplanetario
 (oscuro) (HST)

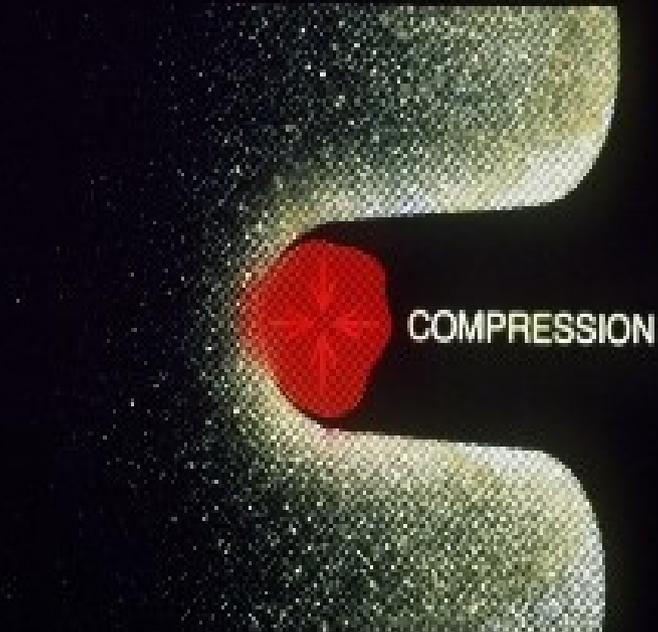




La gran nebulosa de Orión es una inmensa región de nacimiento de estrellas cercana a nosotros. Está formada por estrellas muy jóvenes y nubes de gas y polvo. (Foto HST)



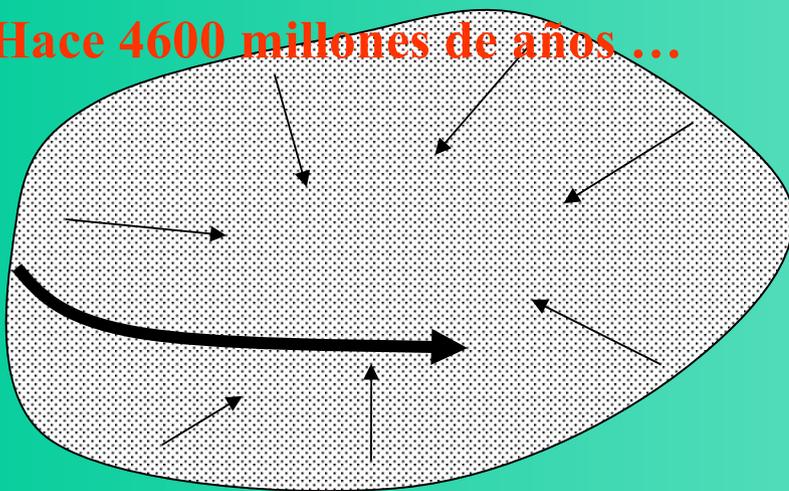
- El sistema solar se formó cuando la nube de gas y polvo fue distorsionada.
- Una explosión de supernova crea una inmensa onda de choque capaz de viajar enormes distancias.



Cuando la onda expansiva alcanza la nube de gas y polvo, la comprime, iniciando de este modo el proceso de formación de un sistema solar.

Hace 4600 millones de años ...

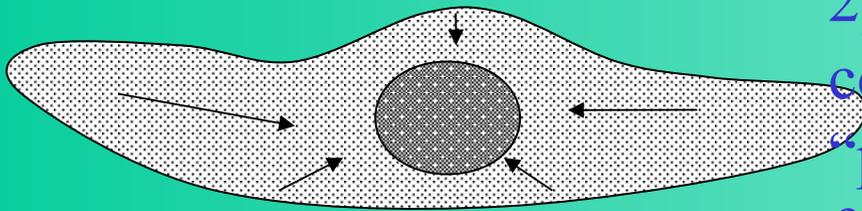
Hace 4600 millones de años ...



Formación de estrellas y planetas

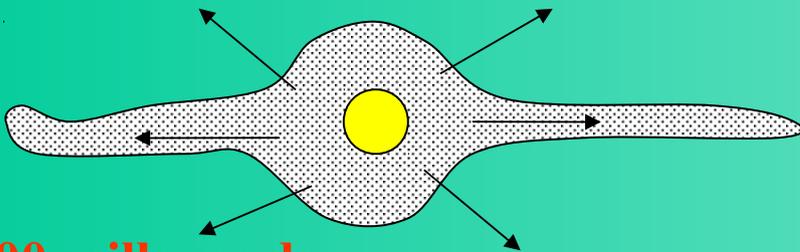
1) La nube de gas molecular (nebulosa) gira muy despacio y empieza a colapsar

2 millones de años después



2) El gas central forma una “protoestrella”; con el gas y el polvo del disco se crean “planetesimales”. La nube condensa y toma forma de disco

10 millones de años después

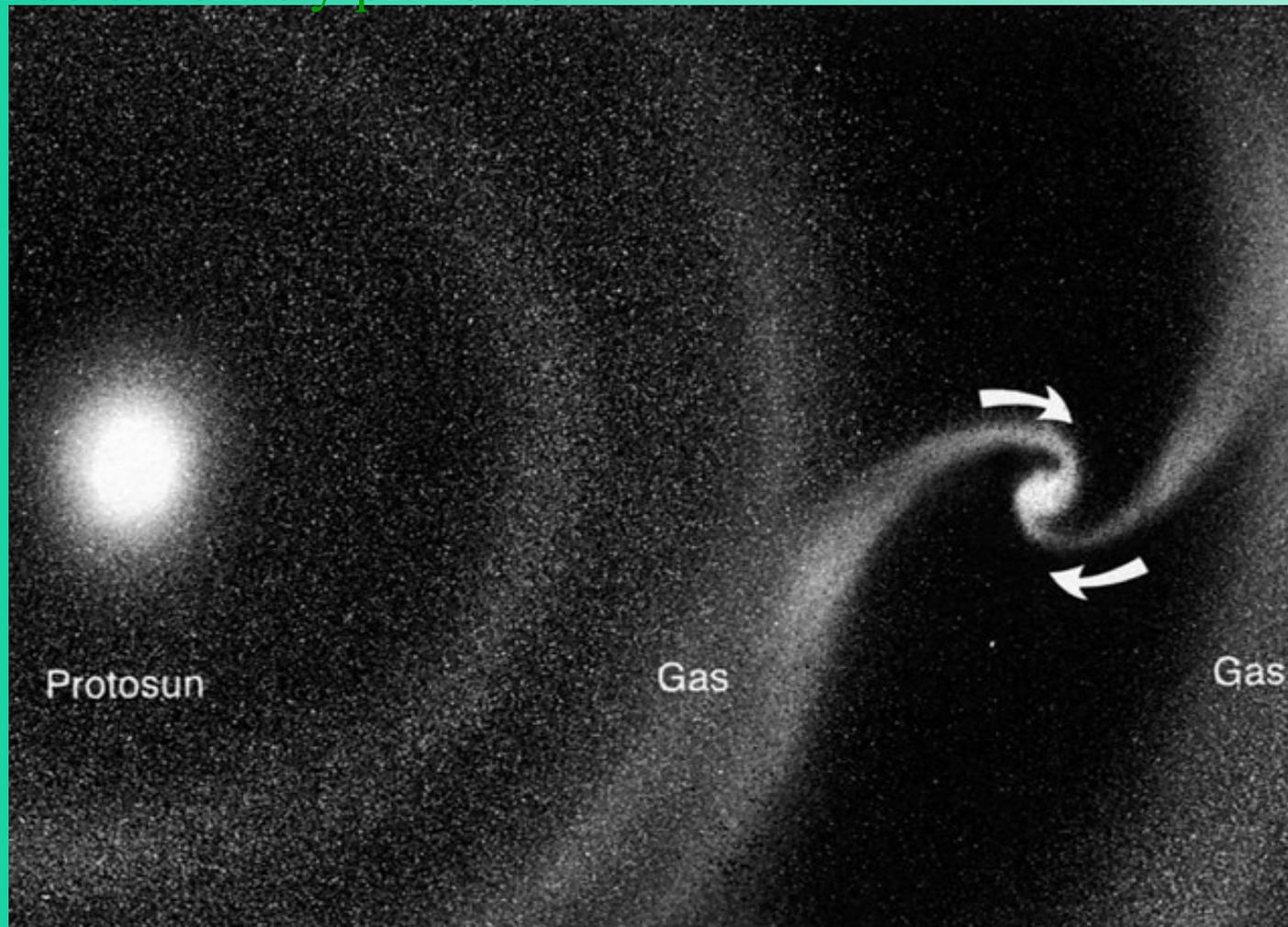


3) Cuando la protoestrella se enciende, se convierte en estrella. El polvo cercano a ella se evapora y, junto al gas de alrededor, es empujado fuera

100 millones de años después



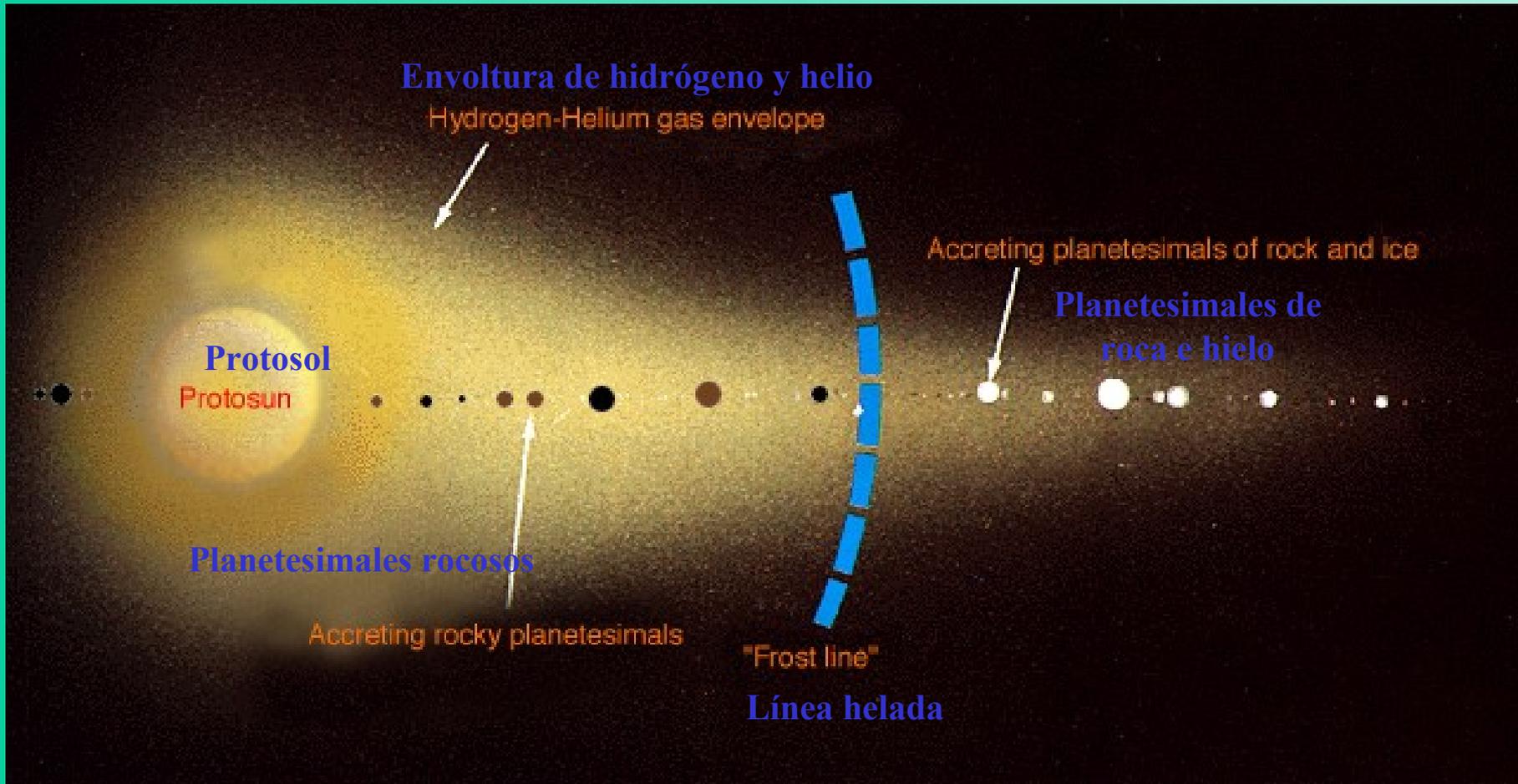
4) La nebulosa desaparece y lo único que queda es la estrella, junto con los planetas.



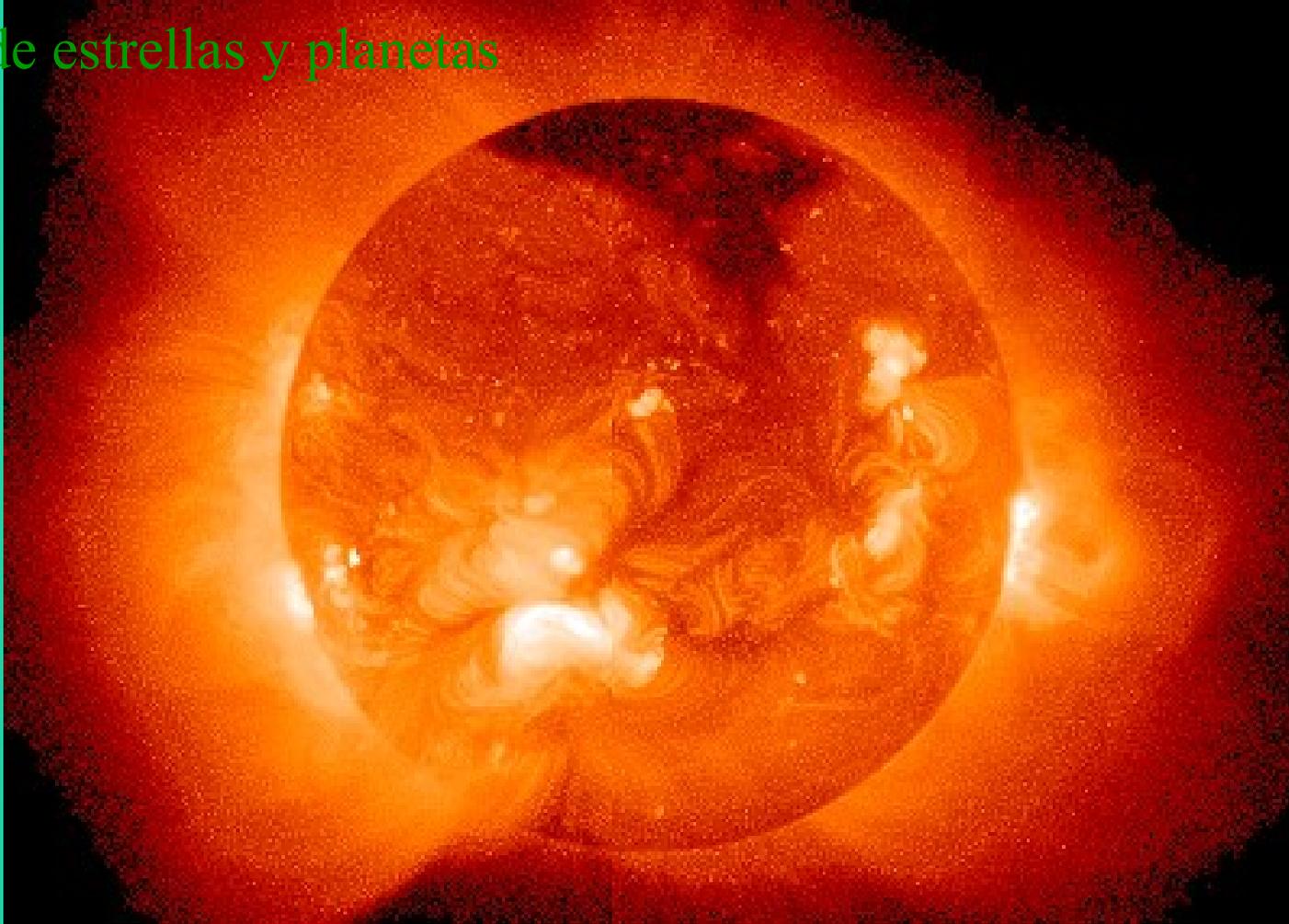
Los planetas se forman en el disco a partir de un núcleo inicial (protoplaneta).

La fuerza de gravedad les hace crecer, capturando el material existente a su alrededor.

Los grandes protoplanetas, fueron incluso capaces de atraer y retener gas.



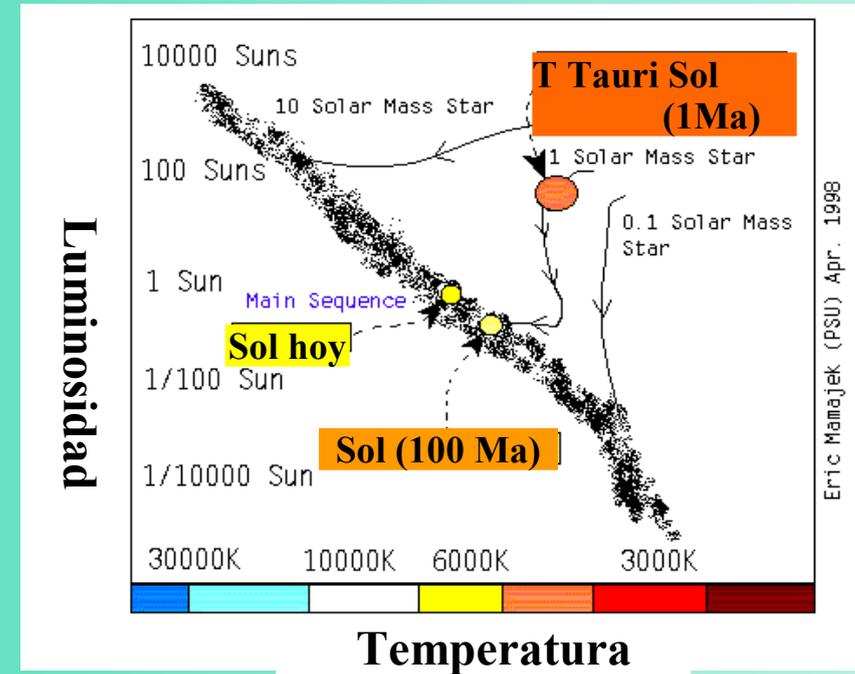
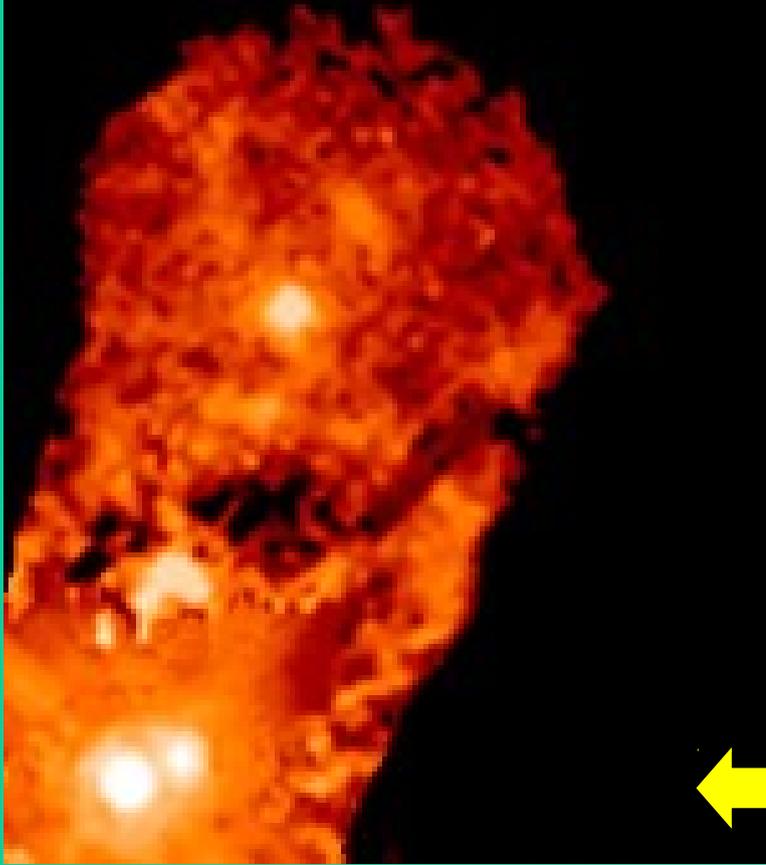
- El tamaño y composición de los planetas depende de su posición en la nebulosa solar. Esto se debe a que la temperatura disminuye conforme nos alejamos del protosol.
- La línea azul muestra el lugar al cual la temperatura empieza a ser lo suficientemente fría como para que los gases se conviertan en hielo. La retención de hielo implica que los planetas puedan crecer mucho más.



Cuando la densidad en el interior del protosol alcanza un valor capaz de producir la fusión del hidrógeno, nuestra estrella se “enciende”. Comienza a radiar energía y partículas al espacio.

Al principio produce altas emisiones, fase T-Tauri, que barre el sistema solar afectando gravemente la evolución de los planetas dependiendo de su distancia al Sol.

Objetos Estelares Jóvenes: T-Tauri



- Localización de T-Tauri en el diagrama HR
- Binaria T-Tauri (Hubble)

- Estrellas muy jóvenes y ligeras ($<10 \times 10^6$ años, $<3 M_{\text{sol}}$) en fase de contracción grav.
- Son un estado intermedio entre protoestrella y estrella de la secuencia principal.
- Muestran un estado inicial en la evolución solar
- Más luminosas que las estrellas de la secuencia principal y sufren cambios muy importantes y erráticos de brillo.
- Las más jóvenes tienen discos de acreción (polvo), las más evolucionadas no.

Hace 4 500 millones de años ...



Los planetas y lunas con superficie sólida fueron bombardeados con los remanentes del material con el que fueron formados.

Este fue el último episodio en la formación de muchos planetas. La superficie de alguno de ellos parece que no ha cambiado desde entonces.

Incluso en la actualidad, con un sistema solar totalmente formado existe una gran cantidad de pequeños planetesimales orbitando al sol

Formación de estrellas y planetas ¹⁵

Muchos planetas, como Mercurio, muestran una gran cantidad de cráteres en la superficie.

La presencia de cráteres indica la fecha en la que dejaron de producirse cambios en la superficie del planeta.

La existencia de volcanes, lluvia, viento elimina las marcas creadas por los impactos.

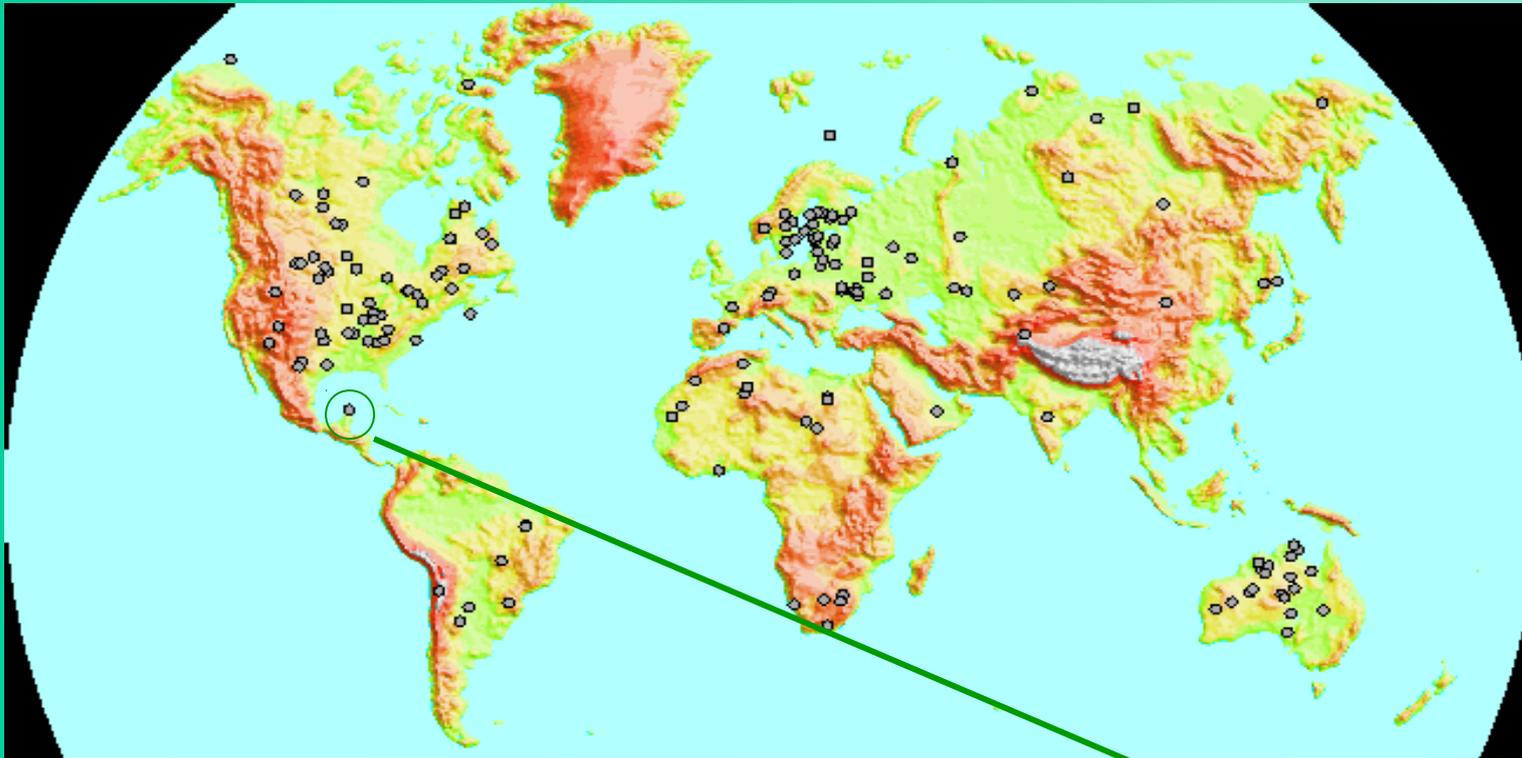
El número y tamaño de los cráteres nos indica la fecha en la que se formó la superficie.

Mercurio ha sufrido muy pocos cambios desde la etapa del último bombardeo



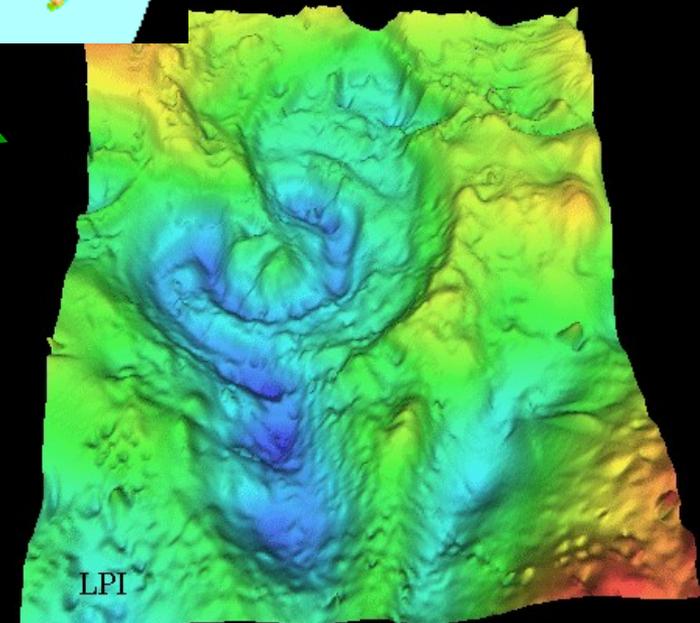
Mercurio visto por Mercury (NASA)

Cráteres sobre la Tierra



Cráteres de impacto sobre la superficie terrestre.

Chicxulub, Península Yucatán (hace 65 millones de años). Imagen del cráter que se piensa causó la extinción de los dinosaurios



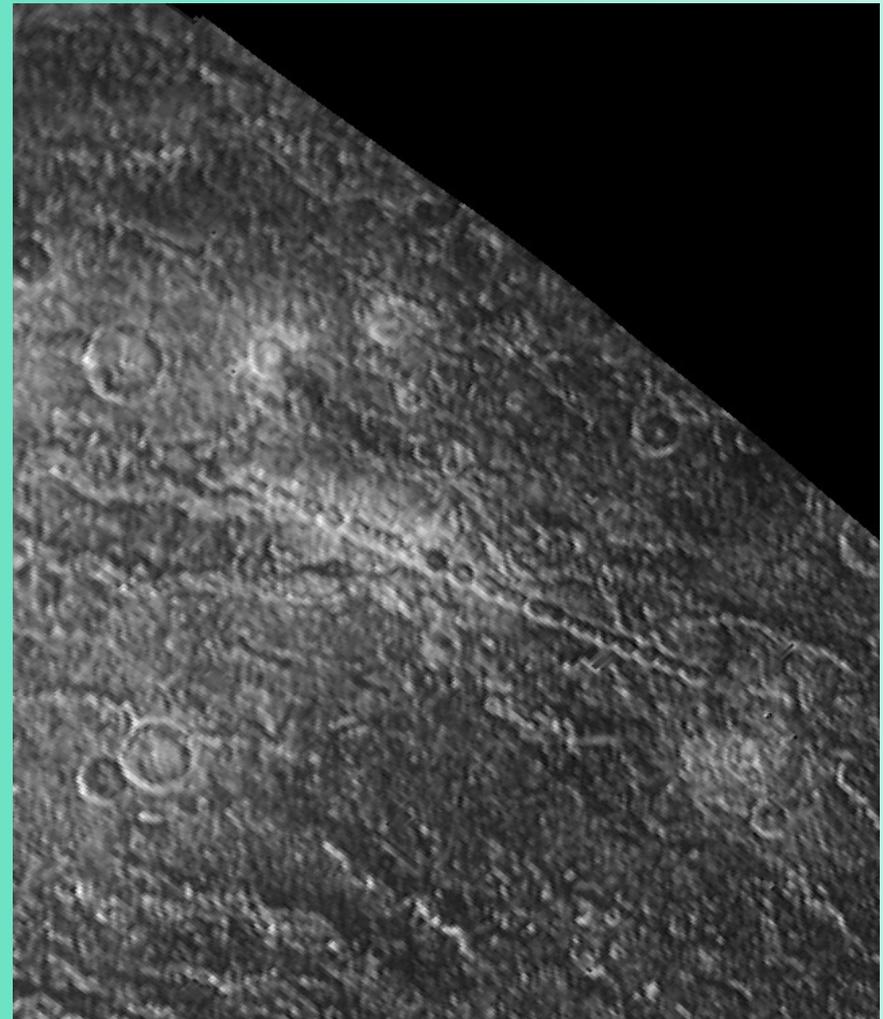
El flujo de cometas, incluso de grandes dimensiones, continúa en la actualidad. Si bien las probabilidades de que un gran impacto con la Tierra ocurra son muy bajas, pero existen.

En 1995 el Cometa Shoemaker-Levy 9 impactó el planeta Júpiter.



En esta imagen se puede apreciar una cadena de cráteres debido al impacto de un cometa que se dividió antes de caer sobre Calisto (luna de Júpiter)

!!!! Cometa sobre el Sol!!!!



Simulación por ordenador



Simulación por ordenador 2



INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA

5 La formación del Sistema Solar

5.1 Introducción

5.2 La nebulosa solar

5.3 Formación de estrellas y planetas

5.4 Formación de lunas

5.5 Diferenciación

5.6 Formación de la atmósfera

5.7 Cuerpos menores

5.8 Otros sistemas planetarios



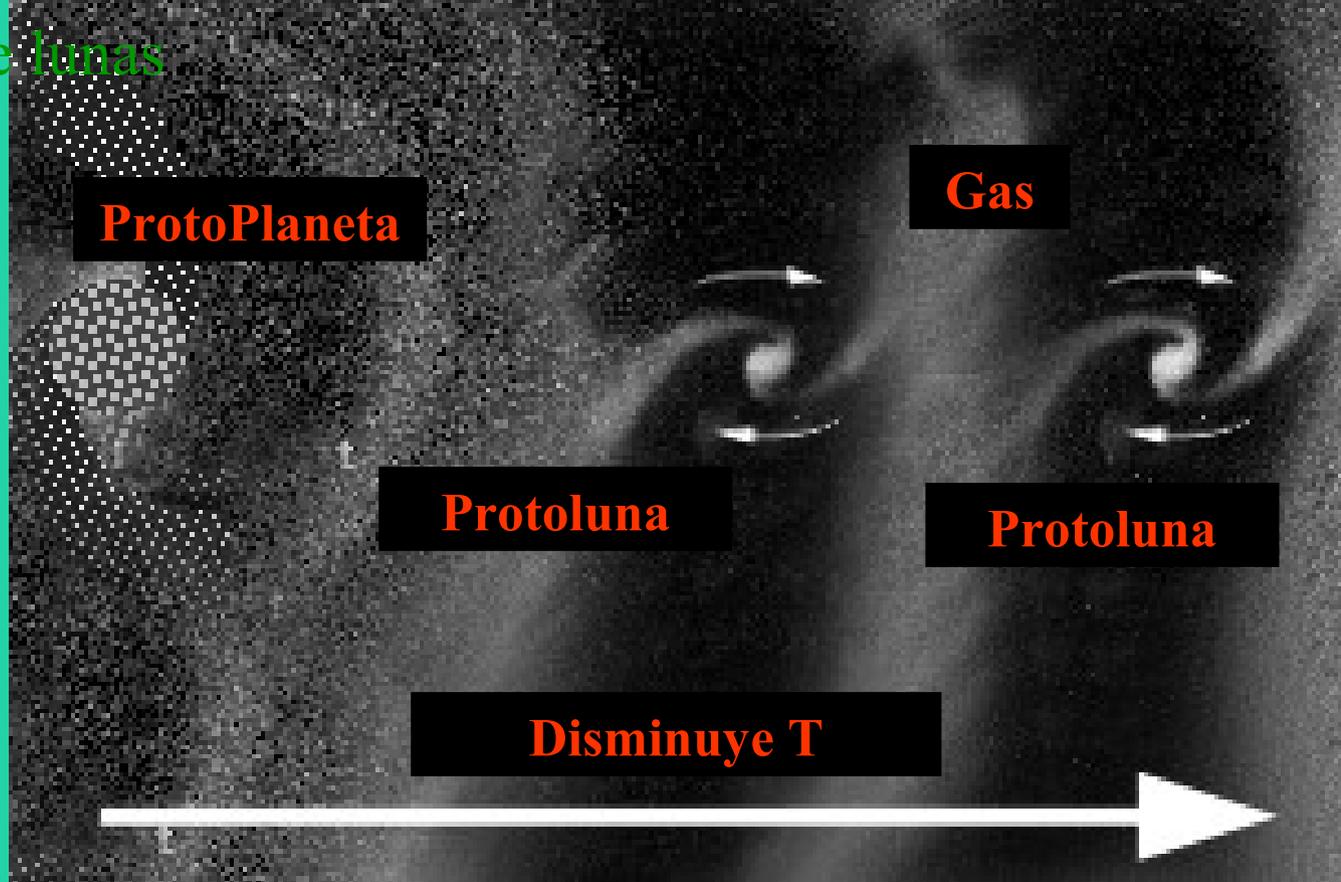
Formación de Lunas

Existen tres teorías que explican la existencia de satélites alrededor de un planeta:

- 1) Las lunas vienen del planeta que lo orbita, formaron parte de él y en un momento dado se separaron
- 2) Las lunas son restos o planetesimales capturados por la fuerza de atracción del planeta
- 3) El planeta y sus lunas se formaron a la vez a partir de la nebulosa solar, de un modo similar al que se formó el planeta.



Muchas de las lunas que orbitan otros planetas son en realidad “asteroides” capturados. Un detalle que muestra claramente que es un asteroide capturado es su forma no esférica. Lunas de este tipo son Fobos y Deimos (Marte) y Nereida (Neptuno), que tiene la peculiaridad de girar en sentido contrario

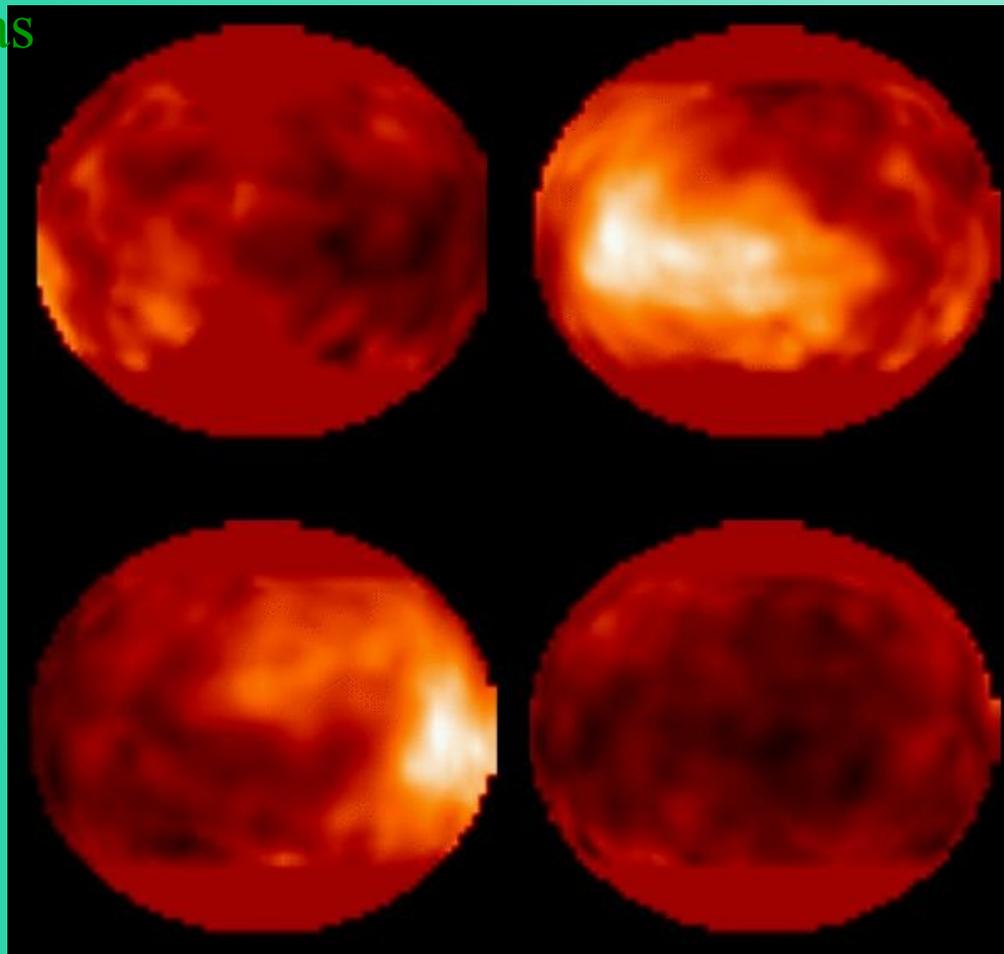


La teoría de la coformación explica el origen de las lunas como objetos que se formaron de la nube de gas y polvo inicial a la misma vez que el planeta al que están orbitando.

Las “protolunas” atraen material hacia sí mismas de la nube de gas y polvo original. Esta teoría explica la existencia de satélites helados alrededor de los planetas gigantes del sistema solar exterior.

La temperatura a la que se formaron las lunas decrece conforme te alejas del planeta, y esta diferencia de temperatura explica las distintas características de los satélites que orbitan un mismo planeta.

Titán



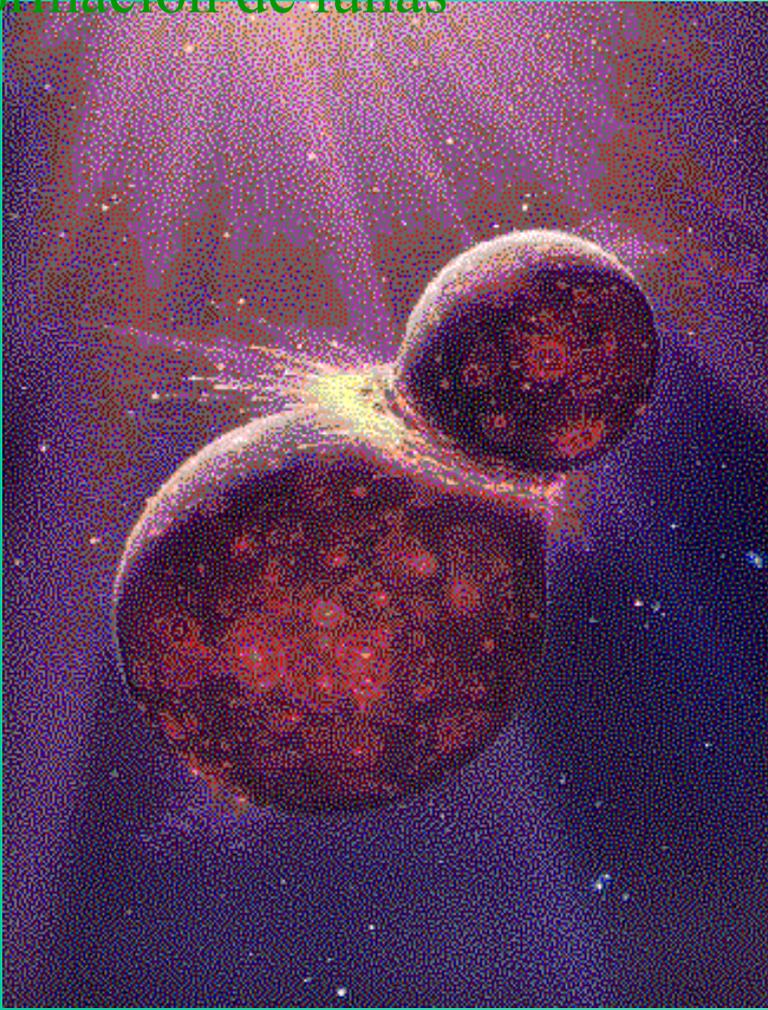
Titán, el satélite mayor de Saturno, es un caso extraño en la evolución de satélites. Se formó a la misma distancia de Saturno que Ganímedes de Júpiter o que Tritón de Neptuno, sin embargo es el único que tiene atmósfera.

La diferencia es que Saturno está más lejos que Júpiter del Sol, y se formó en un lugar lo suficientemente frío como para que el nitrógeno condensase. Y la diferencia con Tritón es que el lugar donde se formó Titán fue lo suficientemente cálido para permitir la evaporación muy lenta de nitrógeno.

La Luna, algunas observaciones



- Ningún otro planeta tiene un satélite tan grande comparado con su tamaño (excepto Plutón).
- Tiene un núcleo muy pequeño de hierro
- La densidad es aproximadamente la misma que la del manto terrestre
- El oxígeno tiene la misma composición isotópica que la Tierra

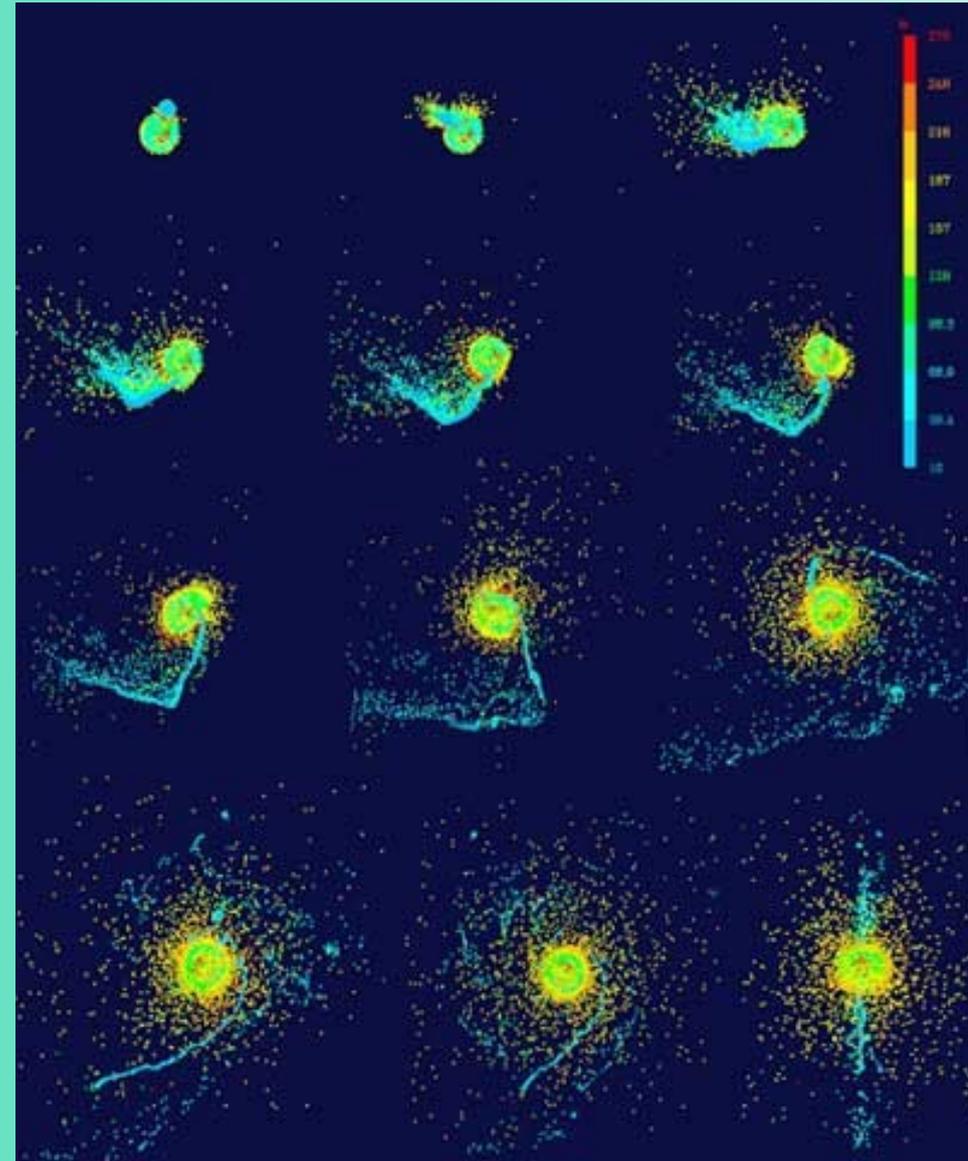


Luna

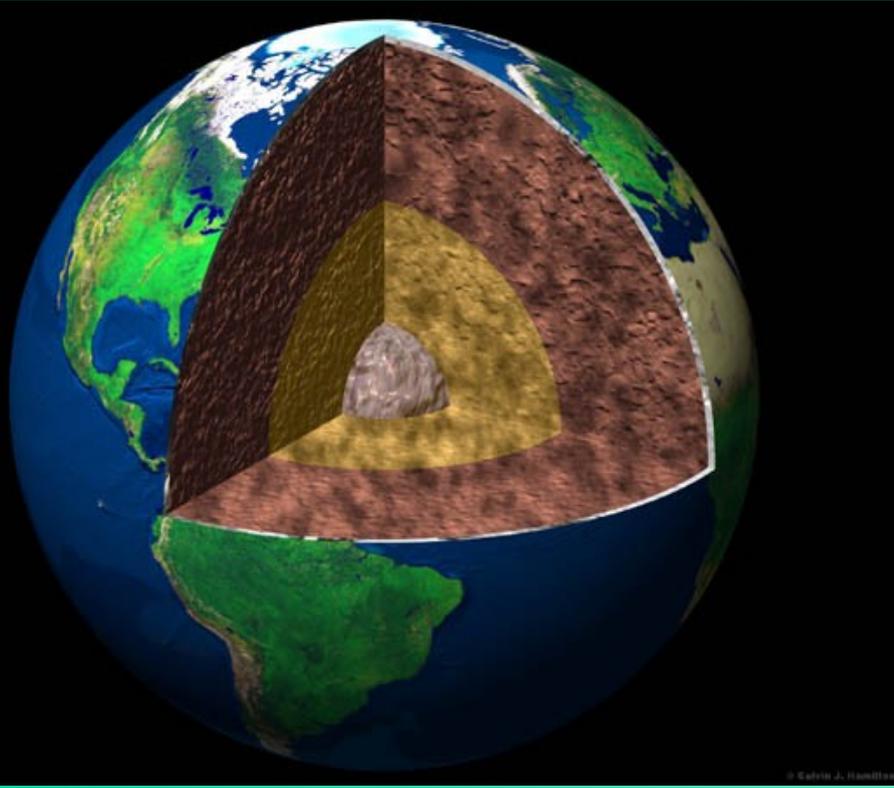
Un caso único es el de la Luna, que se formó debido al impacto de un planetesimal enorme, quizás del tamaño de Marte.

La simulación muestra como tal impacto envió a la órbita terrestre la cantidad suficiente de material como para formar la Luna.

Esta teoría explica la composición de nuestro satélite, muy parecida al del manto terrestre y la misma composición isotópica de oxígeno.



Diferenciación



Capas de la Tierra:

- Atmósfera e hidrosfera
- Corteza (baja densidad, 6-35 km)
- Manto (densidad intermedia ~3000 km)
- Núcleo (alta densidad ~3000 km)
 - Capa externa líquida
 - Capa interna sólida

Cuando la formación de los planetas llegó a su final. Los interiores de algunos planetas se separaron en capas según sus propiedades.

La temperatura del interior del cuerpo se debió a la energía debida al bombardeo y a la existencia de elementos radiactivos en su interior.

Si el cuerpo estaba lo suficientemente caliente, los elementos de su interior se fundieron y se pudieron separar según su densidad, de manera similar a la separación entre agua y aceite.

Como **diferenciación** entendemos separación en capas. Los elementos planetarios en los que se separan son hierro y silicatos de roca. El hierro cae al centro del planeta y forma un núcleo.

Diferenciación

Tierra y Marte son dos ejemplos de planetas que si y no se diferenciaron durante sus respectivas historias:

La Tierra tiene un núcleo de Fe y Ni, con un manto de silicato de rocas y una corteza exterior. Tiene magnetosfera debido a su núcleo de hierro.

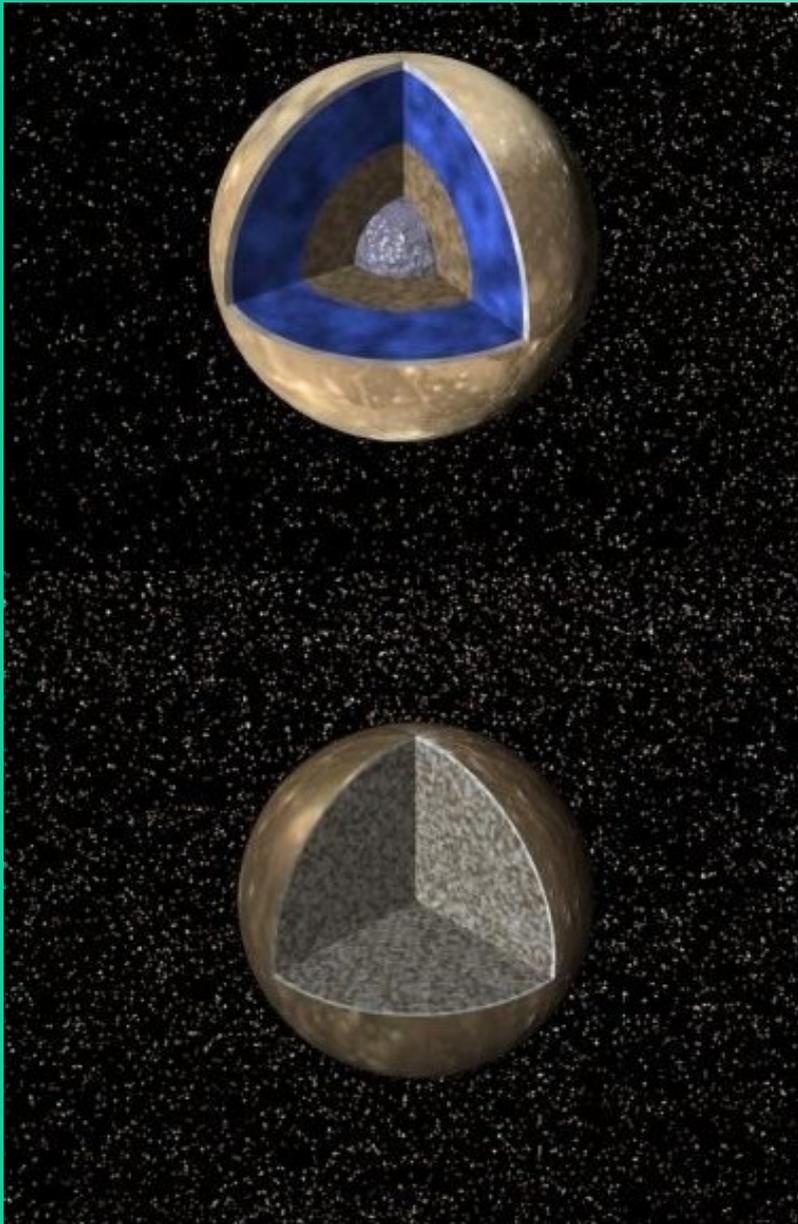
Marte tiene gran cantidad de hierro en su superficie, debido a que no se diferenció. No tiene campo magnético.

La falta de diferenciación nos indica la temperatura interior del planeta durante su formación. Marte puede que se calentara demasiado tarde para poder diferenciarse completamente, además Marte no posee tanto material radioactivo como la Tierra, lo que elimina esta fuente de calor.

La no diferenciación en Marte afectó a la evolución de su superficie, particularmente a su capacidad de generar actividad volcánica y tectónica de placas. Por este motivo Marte presenta superficie muy viejas



Diferenciación en Satélites



Las lunas de Júpiter Ganímedes y Calisto son ejemplos de lunas contiguas que si y no se diferenciaron tras formarse.

Ganímedes parece tener un núcleo muy bien definido, con un manto helado y una corteza.

Calisto parece ser completamente homogénea. De nuevo la falta de diferenciación nos puede indicar la temperatura interior del las lunas cuando se formaron

INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA

5 La formación del Sistema Solar

5.1 Introducción

5.2 La nebulosa solar

5.3 Formación de estrellas y planetas

5.4 Formación de lunas

5.5 Diferenciación

5.6 Formación de la atmósfera

5.7 Cuerpos menores

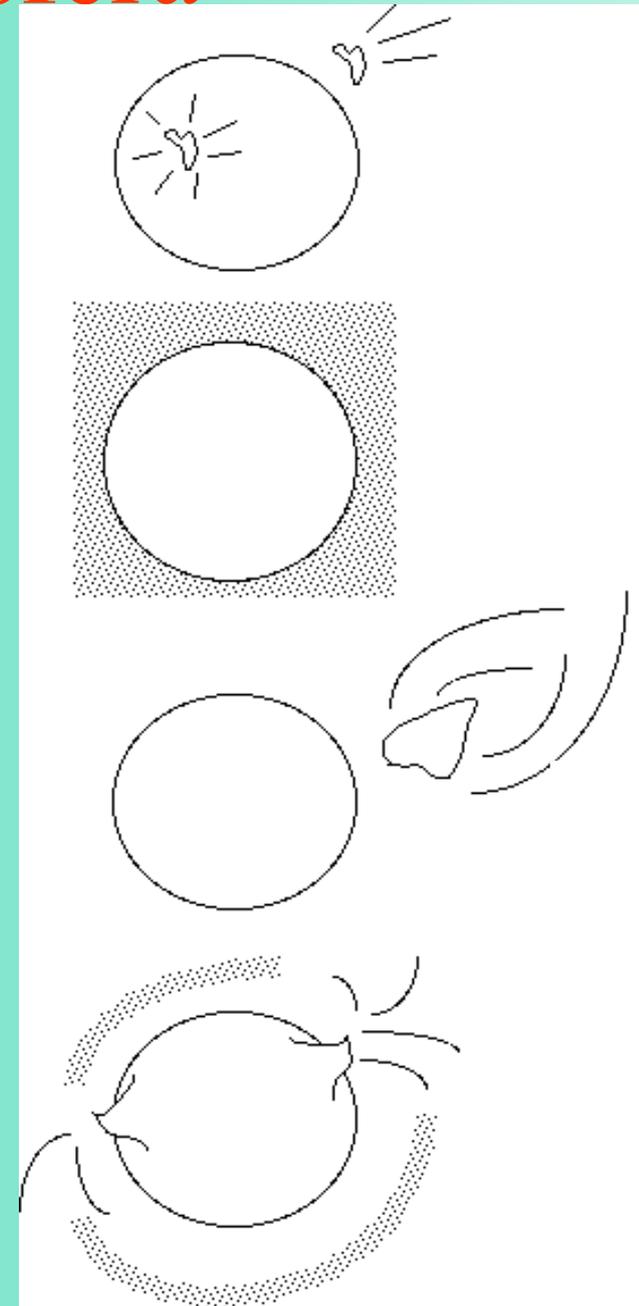
5.8 Otros sistemas planetarios



Formación de una atmósfera

Existen cuatro posibilidades para la formación de una atmósfera:

- 1) La atmósfera se formó a la vez que el planeta por agregación de planetesimales.
- 2) Los gases de la nube original fueron atraídos por el planeta mientras se formaba, dando lugar a la atmósfera.
- 3) El impacto de cometas ricos en volátiles depositó gases en la atmósfera una vez que el planeta estaba formado.
- 4) Erupciones volcánicas llevaron los gases a la superficie provenientes del interior del planeta



Formación de la atmósfera



Las atmósferas de los planetas gigantes han evolucionado desde que se formaron a partir de la nebulosa solar. ¿Cuánto han evolucionado?, no se sabe a ciencia cierta.

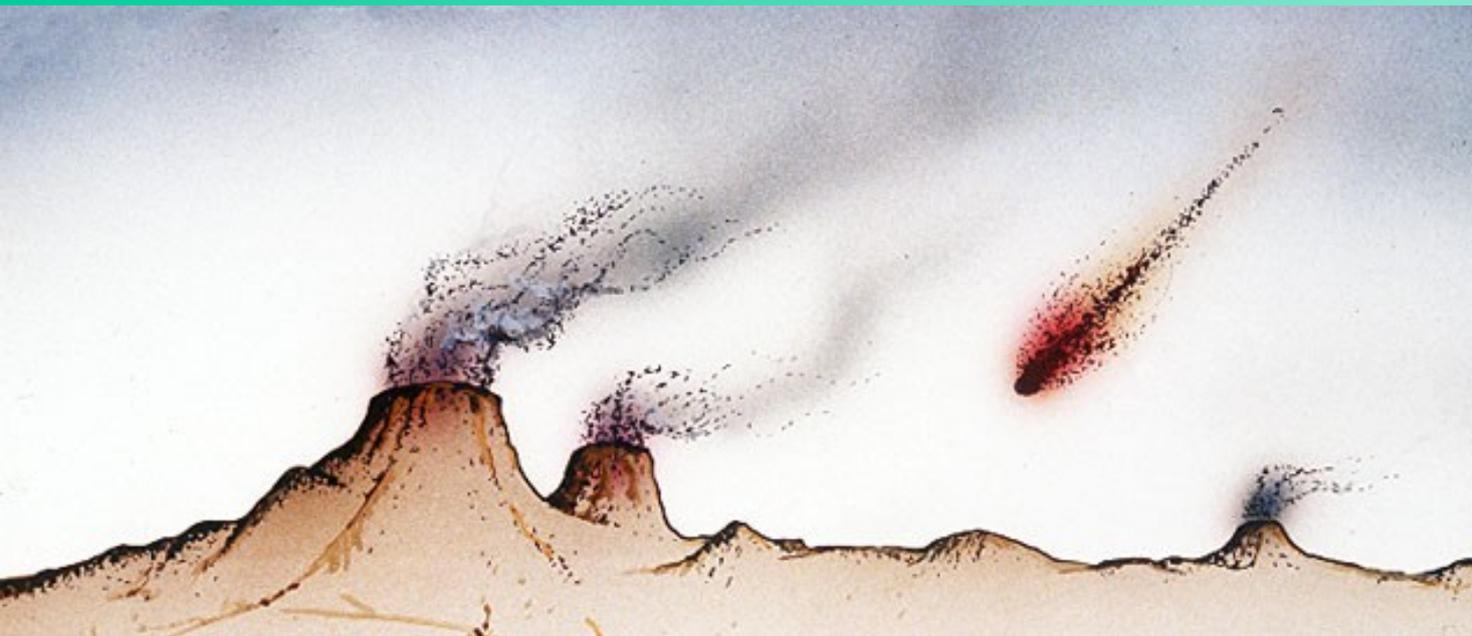
Debido a su gran gravedad, la mayor parte de la atmósfera permanece en su lugar (los planetas terrestres perdieron toda ella). La concentración de hidrógeno y helio en Júpiter nos indica la concentración de estos elementos en la nebulosa solar cuando se formó.

Origen de la atmósfera terrestre

La atmósfera terrestre primigenia (H, He) fue eliminada totalmente durante la etapa T-Tauri. Por tanto la atmósfera actual, compuesta principalmente de N_2 , O_2 , H, He, H_2O y CO_2 , no tiene nada que ver con la primigenia.

El origen de la actual atmósfera se debe a la acción conjunta de volcanes y cometas.

Volcanes emiten una gran cantidad de gases provenientes de los materiales fundidos del interior de la Tierra. Sin embargo estos gases H_2O , CO_2 , SO_2 , N_2O , ... no son las moléculas mayoritarias, ya que hubo una “evolución” atmosférica debida a la acción del sol, la existencia de océanos y la aparición de la vida.



Cometas de entre 10 y 100 km de diámetro, proporcionaron la mayor parte del agua de la Tierra.

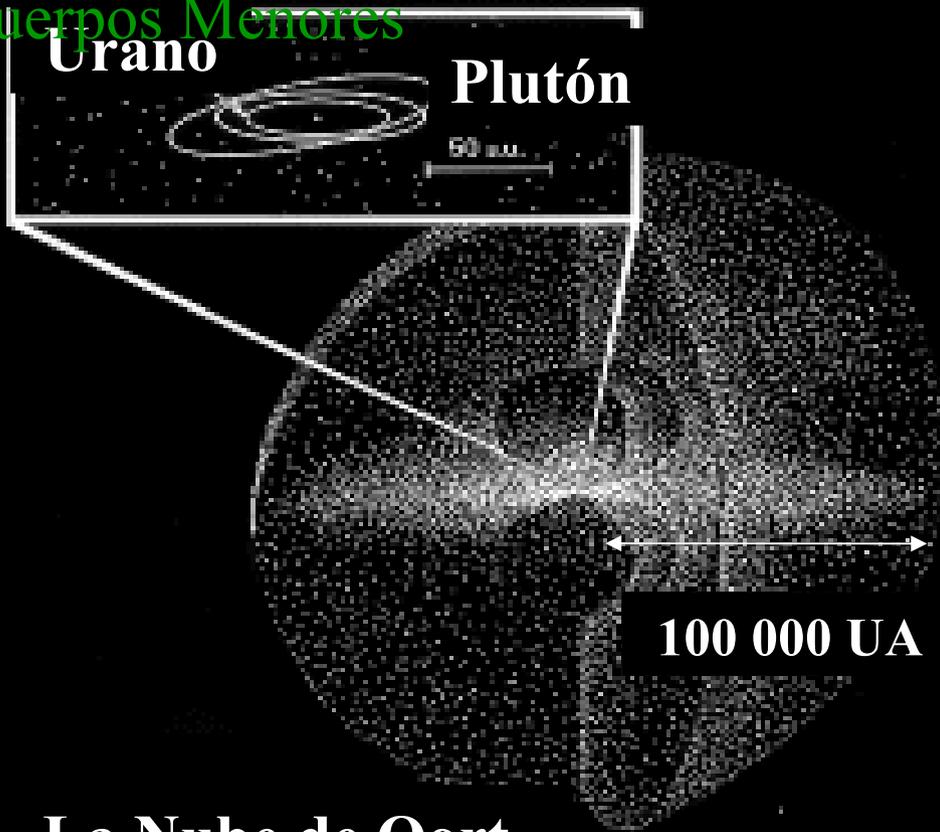
El proceso continúa en la actualidad, aunque con tamaños cometarios mucho más modestos

Cometas

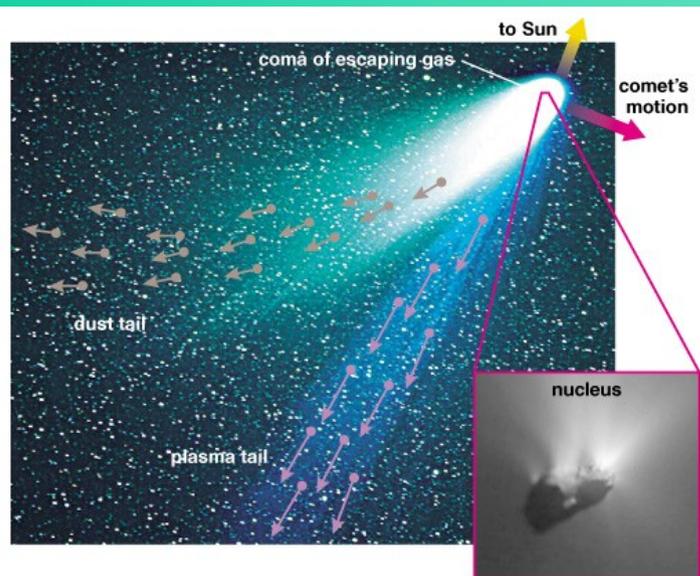
Los cometas son los planetesimales que existían en el sistema solar exterior.

Cometas entre Júpiter y Neptuno fueron expulsados hacia el exterior, formando la Nube de Oort, una gigantesca esfera que rodea al sistema solar y situada a ¡100 000 UA!

La Nube de Oort



© 1999 Pearson Education, Inc.



Copyright © Addison Wesley.

Los cometas más allá de la órbita de Neptuno pudieron crecer y permanecer en órbitas estables. Plutón es el más grande de ellos.

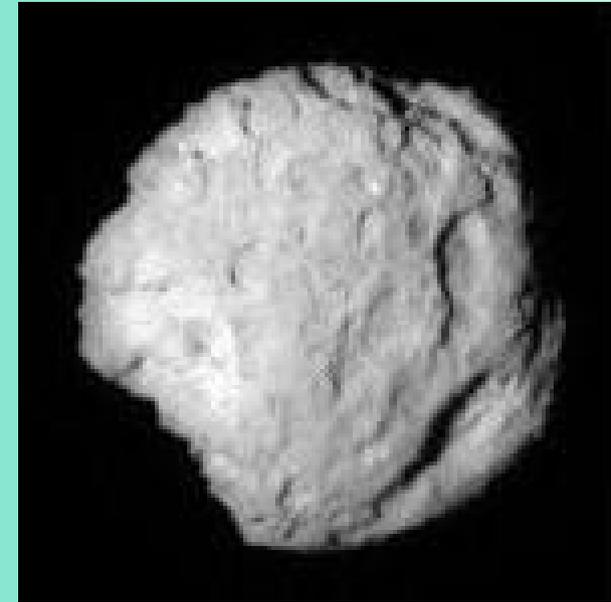
Cuando un cometa se acerca al sol muestra su característica cola debido a la interacción con el viento solar.

Cometas, la llave del Sistema Solar

Los cometas se pueden considerar como remanentes de los planetesimales que formaron el sistema solar. Por lo que su estudio nos puede proporcionar claves importantes para conocer las primeras etapas y la evolución del sistema solar.

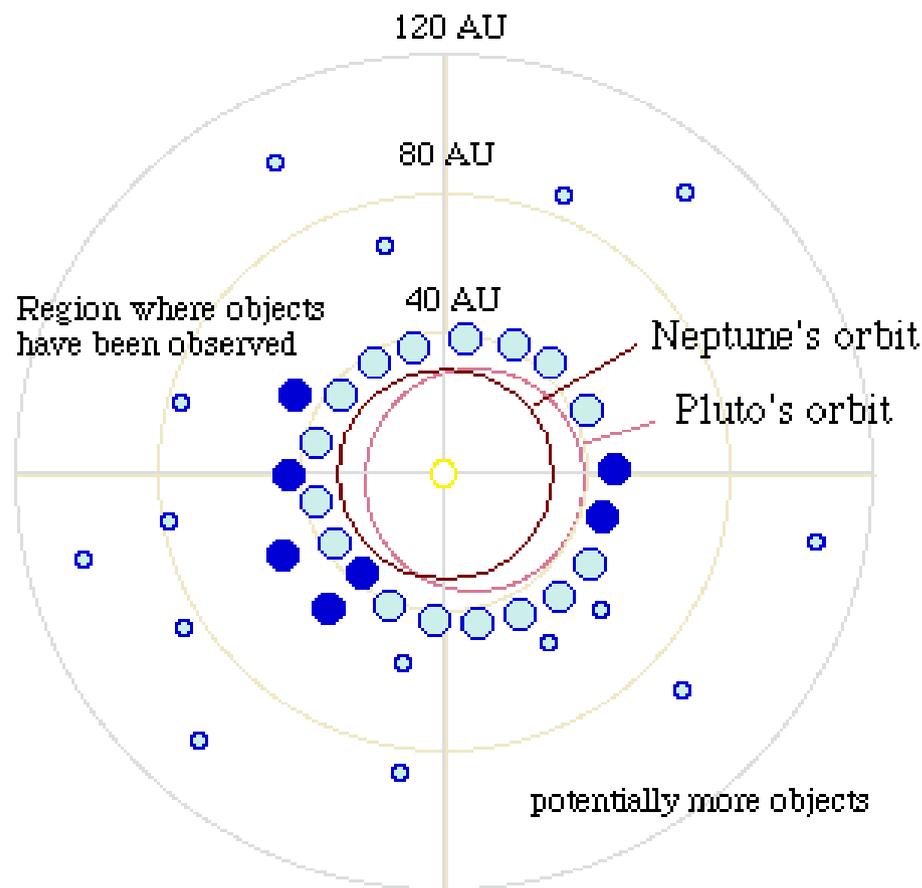


Rosetta (ESA) es la misión de estudio cometario más ambiciosa hasta la fecha. Consta de un orbitador y un “lander” para estudiar las características del cometa 67 P/Churyumov-Gerasimenko



En enero de 2004, Stardust (NASA) pasó a tan solo 236 km del Cometa Wild 2 y capturó miles de partículas que llegarán a la Tierra en Enero de 2006.

Qué pasa con Plutón



Mas allá de la órbita de Plutón, hay una región con gran número de objetos pequeños (10-50km) y oscuros. Tardan cientos de años en dar la vuelta al sol, su velocidad es muy baja y, por tanto, son muy difíciles de detectar.

Estos objetos pueden ser el remanente de planetesimales.

A esta zona se le denomina El cinturón de Kuiper, quien predijo su existencia en 1951.

Como se ve en la figura, Plutón podría ser uno más de ellos.

Asteroides

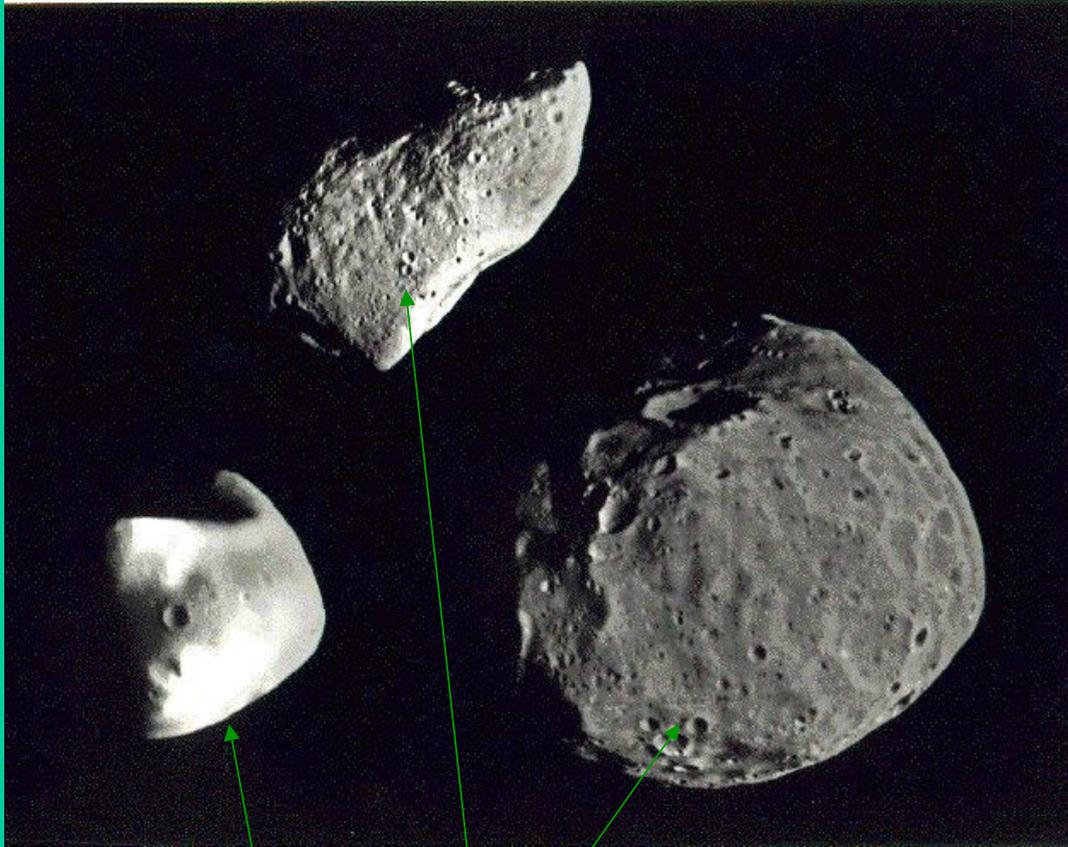
Los asteroides son planetesimales que se encuentran en el sistema solar interno.

La mayor parte de los asteroides se concentra en un cinturón entre las órbitas de Marte y Júpiter (más de 100 000)

Se piensa que son el resultado de un planeta que no se pudo formar debido a la acción gravitacional de Júpiter.

El pequeño tamaño de Marte comparado con Venus y Tierra, también hace pensar que Júpiter evitó que creciera hasta el tamaño de sus parientes rocosos

Júpiter también puede sacar de su órbita a un asteroide sacándolo del sistema solar y, ocasionalmente, haciéndolo colisionar con otros planetas.



Los asteroides tienen forma irregular. En esta imagen (NASA) se muestra Gasptra con las dos lunas de Marte (Fobos y Deimos).

¿Tenemos una teoría de formación del sistema solar correcta?

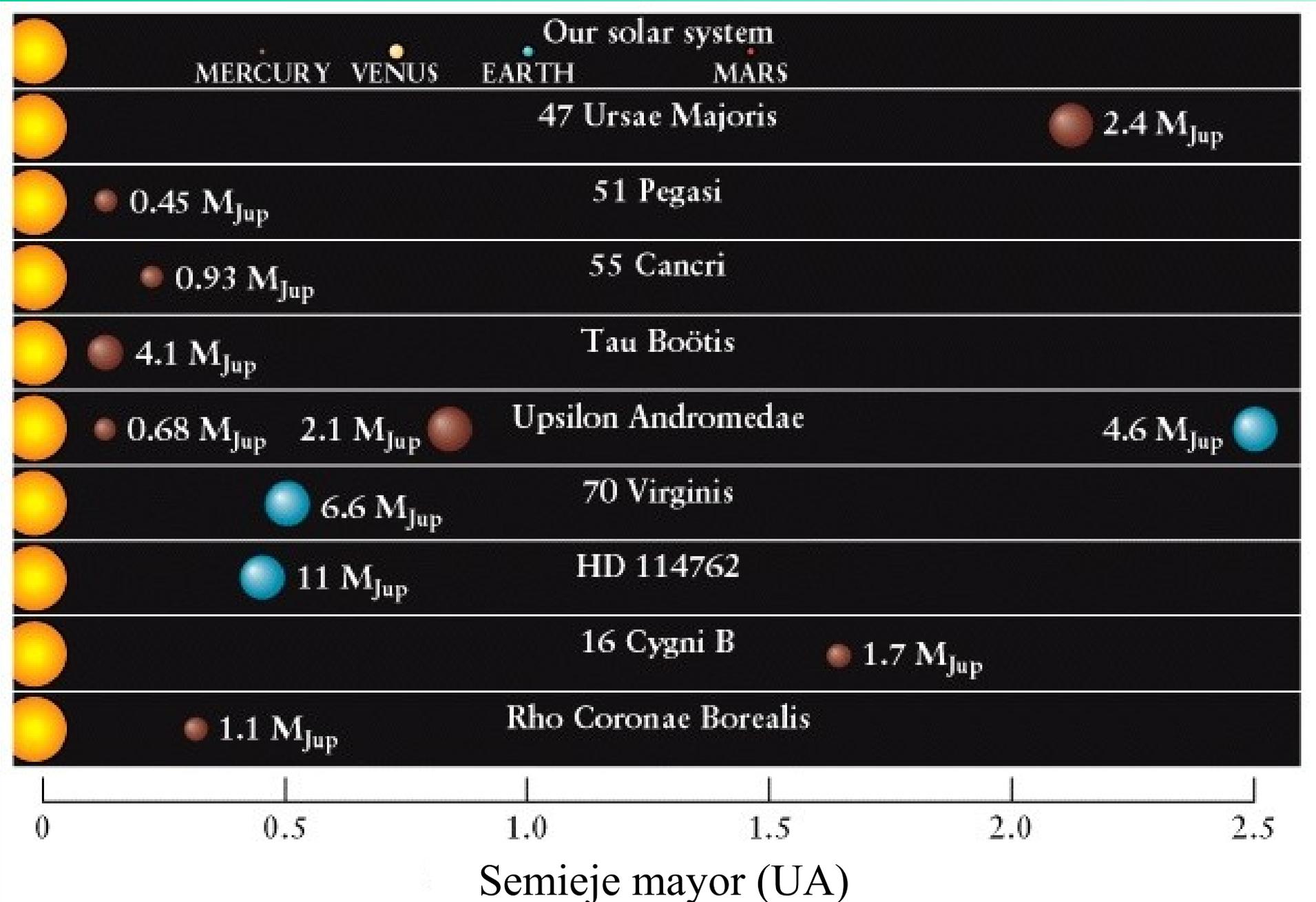
SI

1. Podemos explicar la mayor parte de las propiedades del sistema solar, incluyendo las excepciones.

Comprobando nuestra teoría

1. ¿Podemos encontrar discos protoplanetarios?
2. ¿Podemos encontrar otros sistemas planetarios?
3. ¿Explica nuestra teoría los otros sistemas planetarios?

Sistemas Planetarios



Gracias por su atención

