



# Sistema Solar

## Formación de la Tierra

*Planeta evolutivo*

*Planeta Habitable*

*Jaime Campos  
Depto. Geofísica  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
U. de Chile*

La **HABITABILIDAD** puede ser formulada como un balance entre la demanda biológica por energía y el correspondiente potencial para satisfacer esta demanda mediante la transferencia de energía desde el medio ambiente hacia los procesos biológicos.

Un sistema es habitable cuando la tasa de energía transferida iguala o excede la demanda biológica de energía.

Debido a la universal necesidad biológica de energía, la existencia de una estructura de balance de energía también ayuda a constreñir la habitabilidad en los sistemas.

**Balance de energía / Transferencias / Modalidades de disipación de energía**

**Flujos de energía - Flujos de masa**

Conceptos y propiedades “claves”:

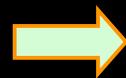
CARÁCTERÍSTICAS DEL SISTEMA SOLAR

CARÁCTERÍSTICAS DE LA TIERRA:

HABITABILIDAD Y PLANETA EVOLUTIVO

La Tierra... un planeta “vivo”

Balance de energía



Transferencias de energía

Modalidades de disipación de energía



Flujos de energía - Flujos de masa

(en el planeta)

*Planeta evolutivo*

*Comencemos  
desde el  
principio...*

Nube  
Grande de  
Magallanes



## ¿Cómo se creó nuestro Sistema Solar y la Tierra?

Los científicos hoy han aceptado ampliamente que el universo en el cual habitamos emergió de una Gran Bola de Fuego (Gran Explosión). En u comienzo esta Bola de Fuego estaba tan caliente que no podían aún formarse los átomos. A comienzos de los años 90 el satélite COBE de la NASA pudo medir y comprobar la existencia de minúsculas ondulaciones de energía o radiación cósmica de fondo en todo el universo que demostraban la validéz de la Teoría del Big Bang (Gran Explosión).

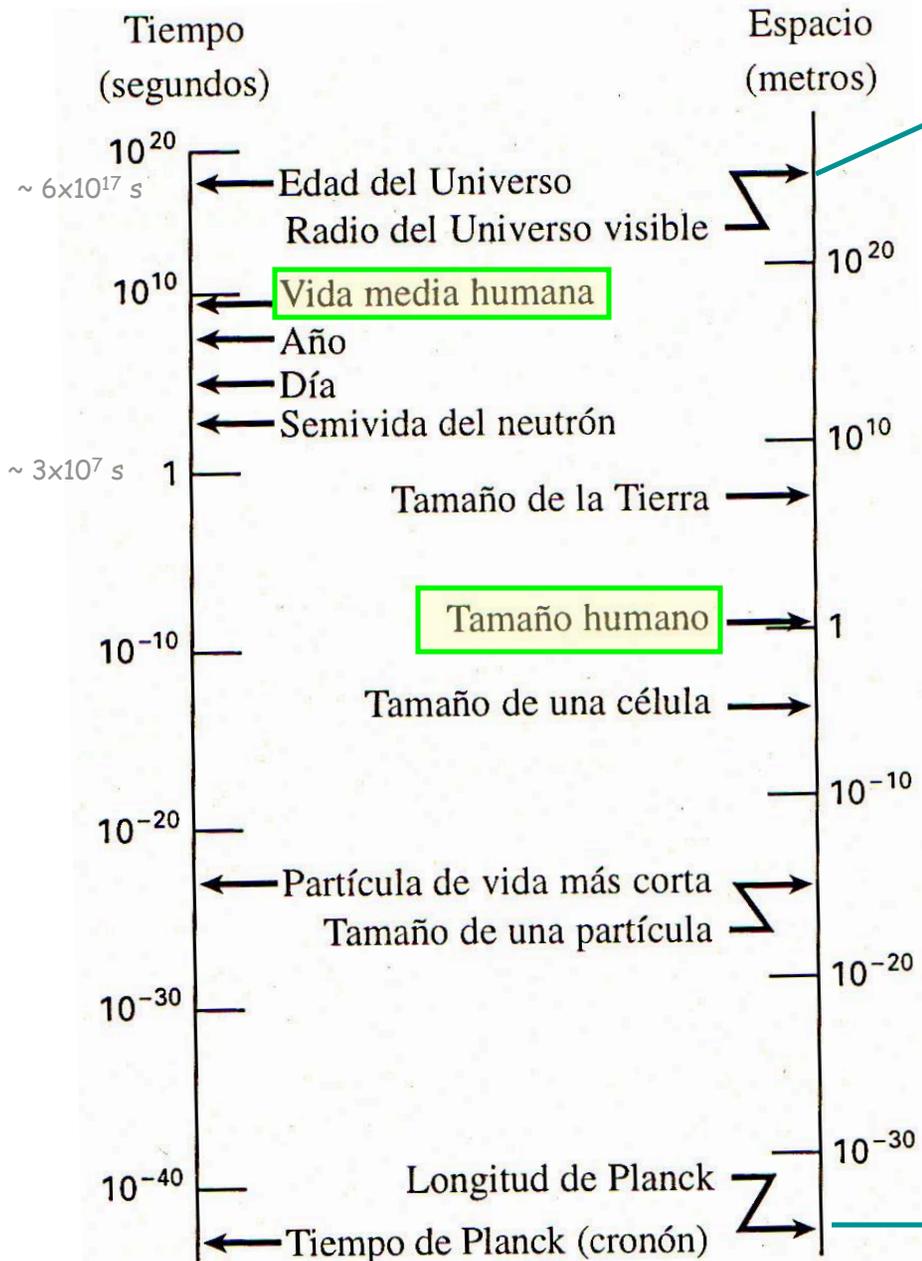
Esta Teoría científica plantéa que el universo se creó hace unos 15 mil millones de años. La radiación de fondo medida por el satélite COBE desde un lado del universo había estado viajando desde hace 15 mil millones de años hasta llegar a nosotros. Esta misma radiación cósmica se observa desde todas las direcciones del universo. Esta observación sustenta de manera muy importante la Teoría de una Gran Explosión o BingBang cuando todo se creó.

# ¿Cómo situarnos para contemplar el universo?

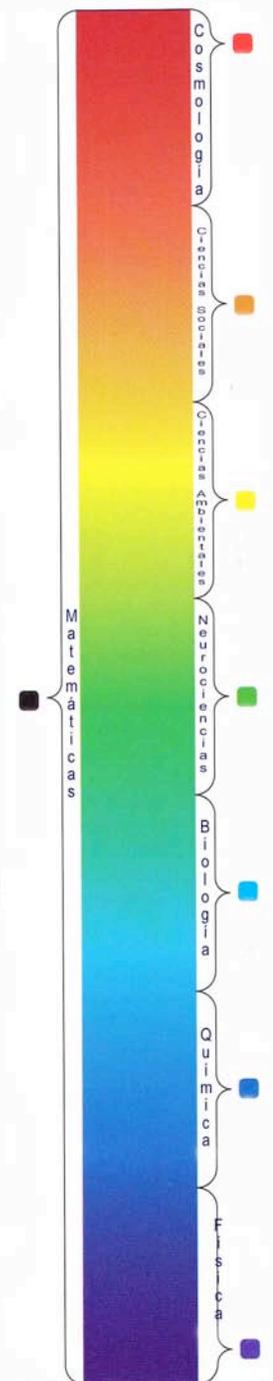
Es importante comprender el concepto de Escalas de Tiempo y de Espacio para intentar darnos cuenta de universo que habitamos.

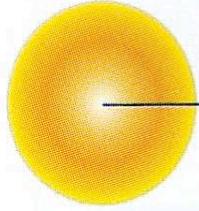
Veremos en las siguientes figuras los límites de lo más grande y de lo más pequeño en el Tiempo y en el Espacio y que permiten tener una mejor idea de nuestro universo.

# ESCALAS EN EL UNIVERSO



- $10^{26}m$   
Tamaño aproximado del Universo observable
- $10^{18}m$   
Tamaño del Supercluster de Galaxias Virgo
- $10^9m$   
Diámetro del Sol
- $10^6m$   
Península de Somalia (Noreste de Africa)
- $10^3m$   
Diámetro del Cráter de meteorito en Arizona
- $10^1m$   
Longitud de un Calamar gigante
- $10^0m$   
Ancho estandar de los rieles de ferrocarril
- $10^{-1}m$   
Longitud de onda de la más alta radiación de UHF
- $10^{-3}m$   
Espesor de un cabello
- $10^{-6}m$   
Tamaño de una espora de Antrax
- $10^{-9}m$   
Diámetro de una molécula "balón" de Carbono-60
- $10^{-18}m$   
Límite superior del tamaño de un electrón
- $10^{-35}m$   
Tamaño teórico de un "string"





Singularidad de la gran explosión inicial (*big bang*).

Era de Planck. Leyes de la física exóticas y desconocidas.

Era de la Teoría de Gran Unificación (GUT). El equilibrio entre materia y antimateria se decanta en favor de la materia.

Era electrodébil, dominada por quarks y antiquarks.

Era de hadrones y leptones. Los quarks quedan confinados al formarse protones, neutrones, mesones y otros bariones.

Los protones y los neutrones se combinan, formando núcleos de hidrógeno, helio, litio y deuterio.

La materia y la radiación se acoplan y se forman los primeros átomos estables.

Desacoplamiento de materia y energía. El universo ópticamente denso deviene transparente a la radiación cósmica de fondo.

Cúmulos de materia forman quásares, estrellas y protogalaxias. Las estrellas empiezan a sintetizar núcleos más pesados.

Se forman nuevas galaxias con sistemas solares alrededor de las estrellas. Los átomos se enlazan para formar moléculas complejas, entre las cuales las moléculas biológicas.

$10^{-43}$  segundos

$10^{-35}$  segundos

$10^{-10}$  segundos

1 segundos

3 minutos

300,000 años

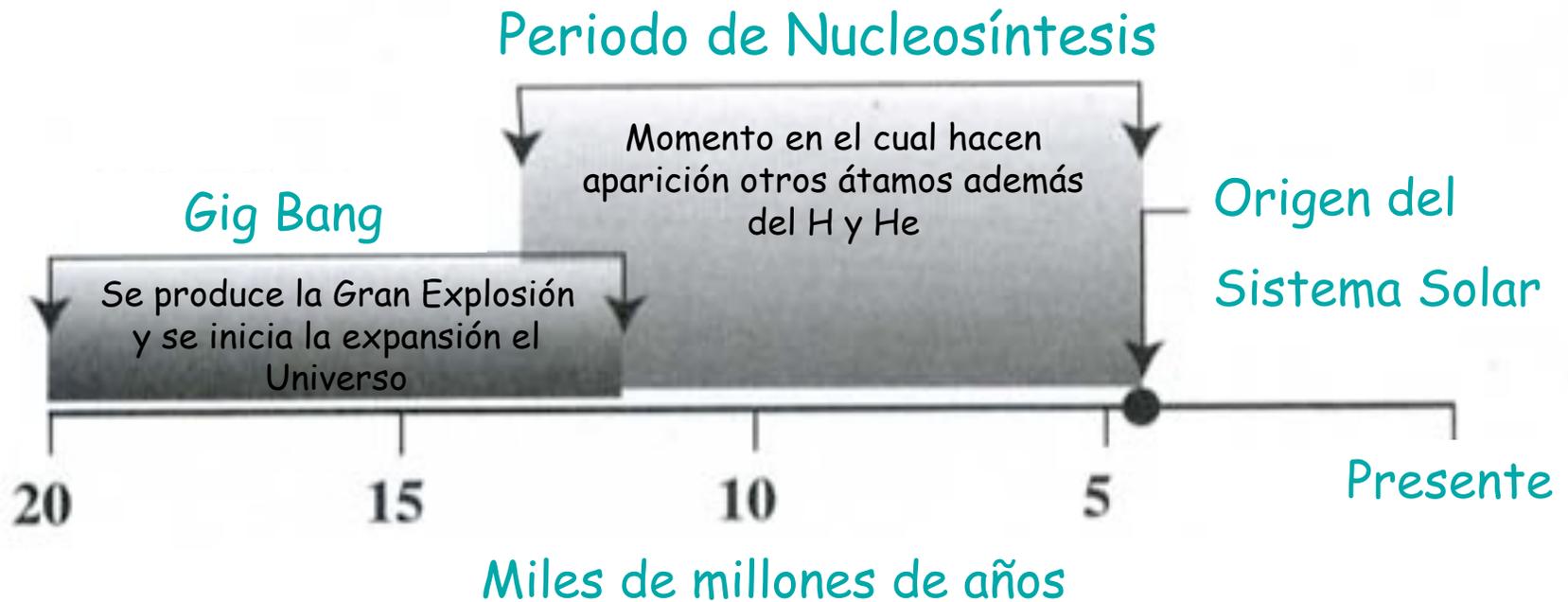
1,000 millones de años

15,000 millones de años

# Prehistoria Galáctica antes del Sistema Solar

- Big Bang hace aprox.  $14 \times 10^9$  años.
- Vía Láctea tomó unos  $1 \times 10^9$  años para formarse.
- Sistema Solar tiene unos  $4.56 \times 10^9$  años.
  
- *Hubo mucho tiempo para que cosas sucedieran antes de formarse el Sistema Solar.*
- *Pero desde  $4.5 \times 10^9$  años estamos aislados del resto de la Galaxia.*

# Historia del Universo



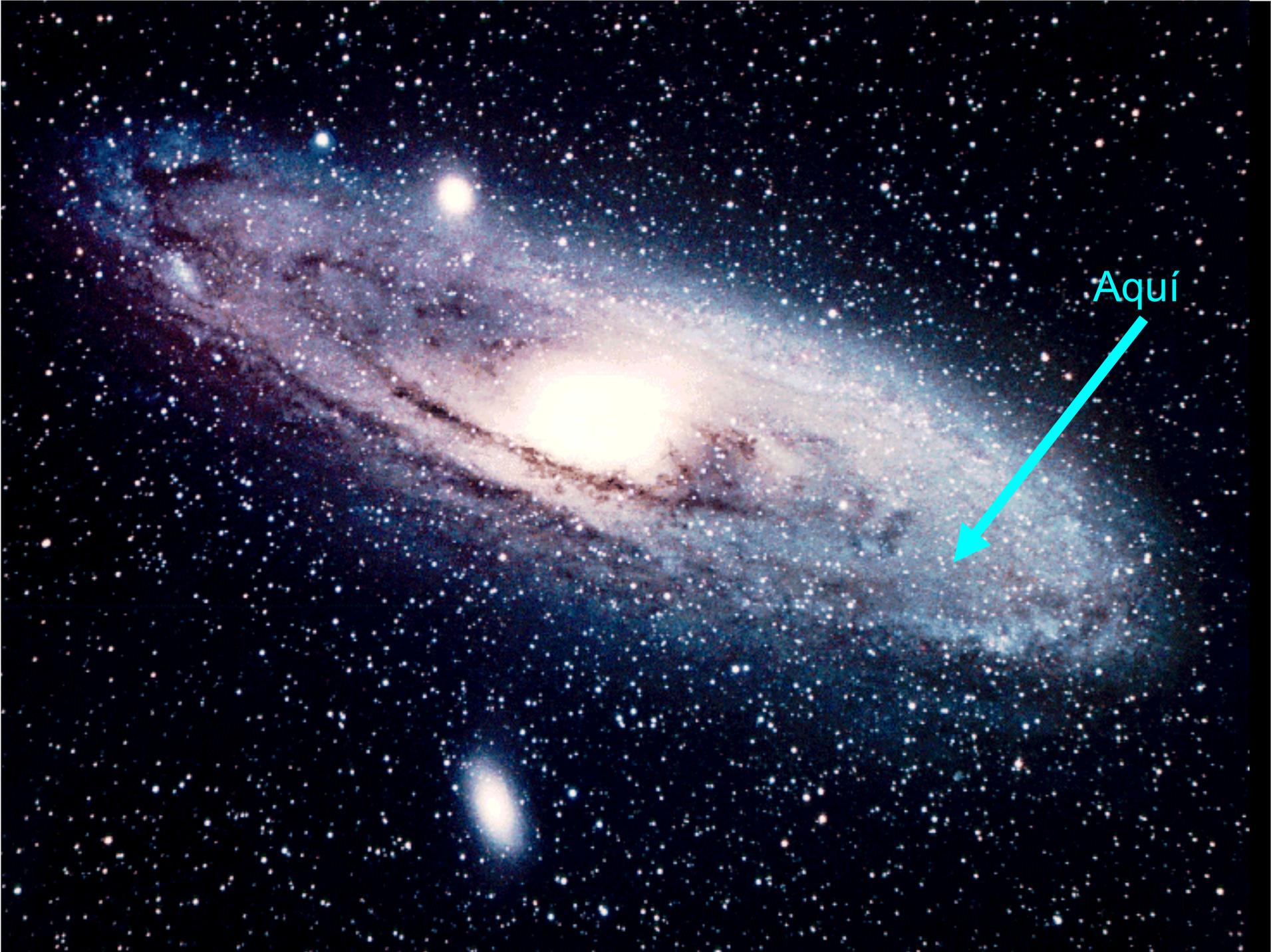


Luego de la primera fase del Big Bang, el Universo inicia la fase donde comienzan a producirse la mayoría de los 103 elementos conocidos de la Tabla Periódica y sus isótopos.

LAS SUPERNOVAS, son explosiones cósmicas espectaculares que ocurren durante el colapso final de la muerte de una estrella.

En ese momento se produce el nacimiento de nuevos átomos y elementos más complejos (Fe, C, O, H<sub>2</sub>, etc...).

La mayoría de los átomos que hoy forman parte de las moléculas y células que conforman tu cuerpo provienen de estas explosiones cósmicas, de estrellas que existieron en el pasado remoto del Universo.



Aquí





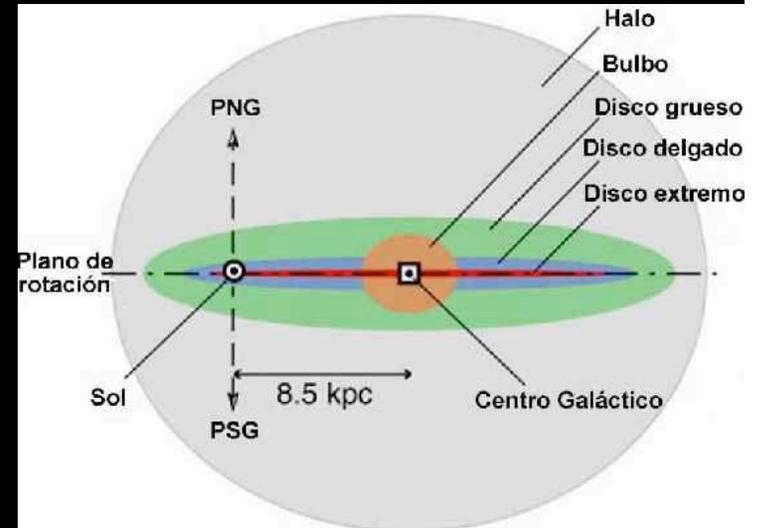
VIA LACTEA

# Nuestro Contexto Galáctico

- Halo de la Vía Láctea
- Principalmente estrellas “viejas” en cúmulos globulares.
- Disco (compuesto preferentemente de estrellas “jóvenes”),
- 4 brazos espirales
- Disco: 300 kpc\* diámetro, 30 pc de espesor.
- Centro (8 kpc de nuestro S. Solar)
- Se cree que el centro tiene un hoyo negro de  $\sim 2.6 \times 10^6 M_{\odot}$ .

Nuestra Galaxia tiene 2 a 4  $\times 10^{11}$  estrellas.  $1 M_{\odot}$  es típico  
No somos especiales!!

Masa total =  $2 \times 10^{12} M_{\odot}$ , principalmente materia oscura.



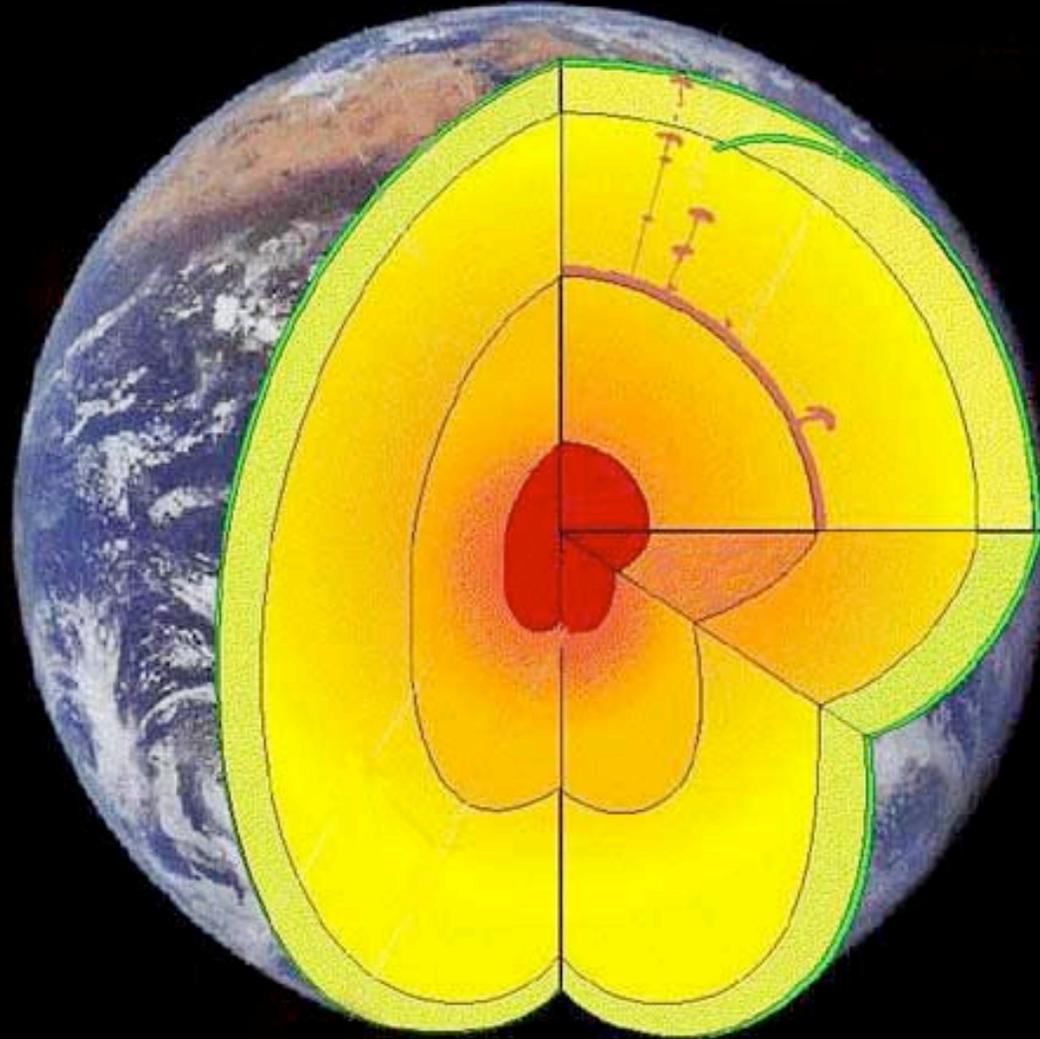
$1 \text{ pc} = 3.08 \times 10^{18} \text{ cm}$ ;  $\text{kpc} = 1000 \text{ pc}$ ;  $1 \text{ año-luz} = 9.46 \times 10^{17} \text{ cm}$ ;

$1 \text{ kilopársec (kpc)} = 1000 \text{ pársec} = 3.260 \text{ años-luz}$ .

El centro de nuestra galaxia está a unos 8 kpc de la Tierra.

La galaxia espiral más próxima a la nuestra, M-31 en Andrómeda, está a unos 900 kpc de distancia).

# La Tierra: Un Planeta Diferenciado



## Sistema Solar

En el presente se han descubierto más de 200 planetas fuera de nuestro sistema solar, orbitando en torno a otras estrellas.

Lejos están los días cuando se creía que la Tierra era el centro de todo el universo. Hoy sabemos que nuestro sol ocupa un lugar discreto en el borde de nuestra galaxia (La Vía Láctea) y que su tamaño y masa es típica entre las centenares de millones de estrellas que existen en nuestro vecindario.

Para explicar cómo se formó nuestro sistema solar, los científicos construyen modelos. Un modelo que dé cuenta de la formación del sistema solar debe tener cumplir con dar cuenta una serie de propiedades básicas que lo caracterizan.

Propiedades de nuestro sistema solar:

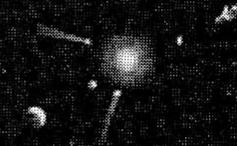
- Nuestro sistema solar es inmensamente plano.
- Consta de planetas principales que giran en torno al Sol: Mercurio, Marte, Venus, la Tierra, Marte, Ceres, Júpiter, Saturno Urano, Neptuno y el sistema binario de planetas enanos Plutón y Charón.
- Las órbitas de los planetas están todas casi en el mismo plano de la órbita terrestre, la eclíptica.
- Según el tamaño, ubicación y composición química, se distinguen dos familias de planetas: los planetas terrestres y los planetas jovianos. Los cuatro más cercanos al Sol son de tamaño pequeño alta densidad, entre 4 y 5,5 gr/cm<sup>3</sup>. Los más grandes tienen una densidad entre 1 y 2 gr/cm<sup>3</sup> y están más alejados del Sol.
- El Sol tiene una composición química que es semejante a la de las nubes interestelar y de las otras estrellas típicas del disco de nuestra galaxia; contiene hidrógeno y helio en un 98% de su masa y el 2% restante se lo distribuyen todos los otros elementos químicos.



**Early stages of rotating cloud  
of gas and dust**

**Rotating cloud  
flattens as it contracts**

**Planets form within  
flattened cloud**



# Etapas de Evolución Planetaria



Nube molecular gigante  
que dio origen a nuestro  
Sistema Solar



Nebulosa Solar en la  
etapa inicial de nuestro  
Sistema Solar



Planetesimales

La Tierra  
Un Planeta Activo

Planeta evolutivo



## La Tierra es un planeta "vivo"...

La Tierra presenta una intensa actividad interna y externa. Esta actividad se manifiesta con erupciones volcánicas, terremotos, tsunamis, tormentas atmosféricas, mareas, erosión de su relieve, deslizamientos, un activo y cambiante campo magnético, un campo de gravedad también que varía, una figura de su superficie en constante cambio y evolución, una biósfera que se manifiesta desde varios kilómetros en las profundidades de la Tierra y hasta varios kilómetros en la atmosfera, etc...

### LA TIERRA ES APTA PARA LA HABITABILIDAD Y ES UN PLANETA EVOLUTIVO

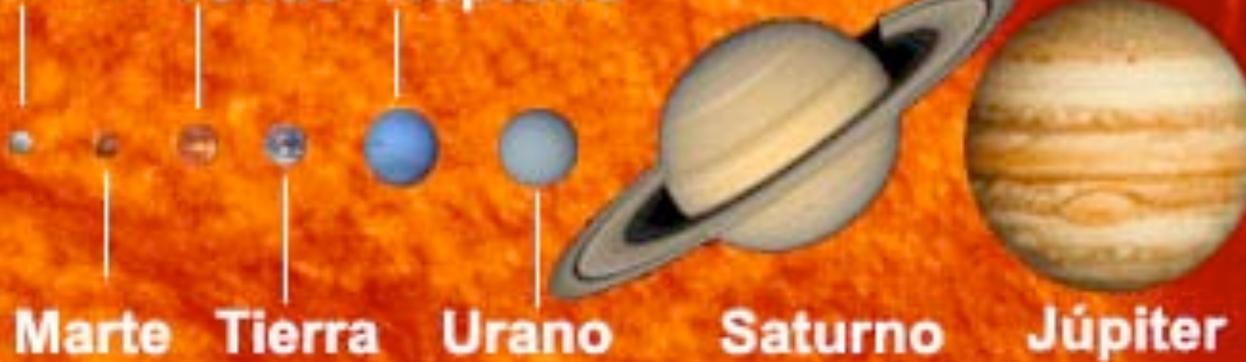
Desde su formación, como un objeto rocoso e inerte hace unos 4 mil 700 millones de años, ha evolucionado hacia un planeta "diferenciado" con diferentes "reservorios" en su interior químicamente y físicamente diferentes: presenta un Núcleo (interno y externo), Manto (superior e inferior), corteza (oceánica y continental), Océano y Atmósfera, y una importante Biósfera cubriendo su superficie (donde habitamos los seres vivos).

- El 99.87% de la masa del sistema ésta contenida en el Sol. Eso indica que la formación del sistema solar es esencialmente la formación del Sol.
- Todos los planetas giran en torno al Sol en el mismo sentido (órbitas elípticas, casi circulares excepto las órbitas de cuerpos menores del sistema solar, como algunos asteroides y los cometas que son francamente excéntricas).
- El 98% del momento angular del sistema solar está en los planetas.



**Sol**

**Mercurio Venus Neptuno**



**Marte Tierra Urano Saturno Júpiter**

El Sol: Los tamaños, las distancias y las temperaturas se encuentran más allá de nuestra experiencia.

- El diámetro del Sol es de aproximadamente 1,390,000 km. El diámetro promedio de la Tierra es de 12,740 km. Cerca de 110 Tierras podrían ser colocadas a lo largo del diámetro del Sol.
- El volumen del Sol, que es de  $1.406 \times 10^{18} \text{ km}^3$ , es inimaginable. Aproximadamente 1,300,000 Tierras podrían caber dentro del Sol.
- Su masa es de  $1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$ , equivalente a la masa de cerca de 300,000 Tierras.

La estructura del Sol está separada en varias regiones: la región interior, la fotosfera, la cromosfera, la región de transición, la corona y el viento solar.

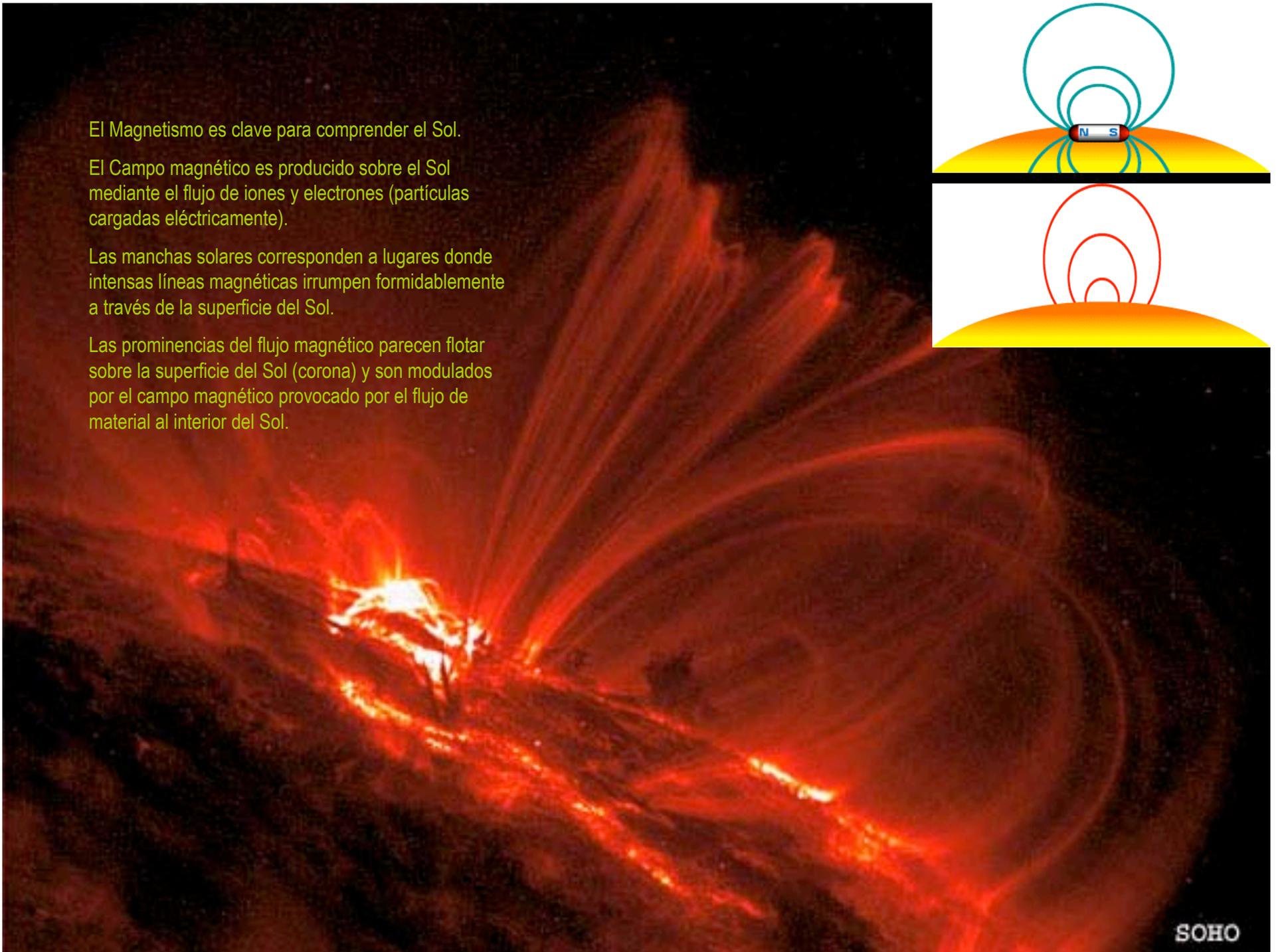
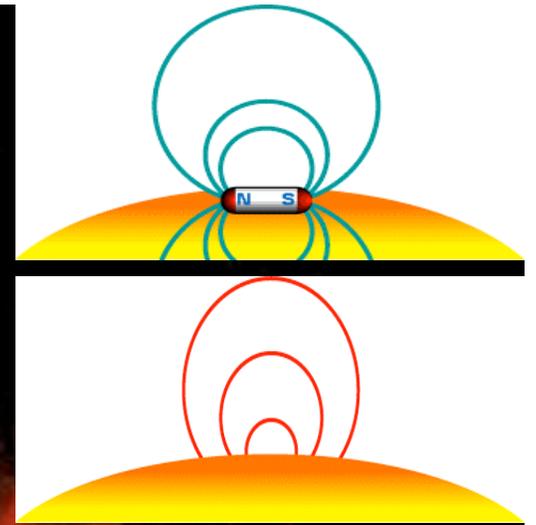


El Magnetismo es clave para comprender el Sol.

El Campo magnético es producido sobre el Sol mediante el flujo de iones y electrones (partículas cargadas eléctricamente).

Las manchas solares corresponden a lugares donde intensas líneas magnéticas irrumpen formidablemente a través de la superficie del Sol.

Las prominencias del flujo magnético parecen flotar sobre la superficie del Sol (corona) y son modulados por el campo magnético provocado por el flujo de material al interior del Sol.



Campo Magnético: ciclo cada 22 años.  
Ciclo de las manchas solares: 11 años.  
El ciclo del campo magnético solar presenta exactamente el doble de período del ciclo de las manchas solares.

La fotosfera tiene una temperatura de unos 5500 grados Celsius y una mancha solar típica unos 3900 grados Celsius.



## El Sistema Solar

El Sol es la fuente más importante de energía electromagnética (principalmente en la forma de luz y calor) de nuestro sistema solar.

La estrella más cercana es Próxima Centauri a una distancia de 4.3 años-luz.

Nuestro sistema solar, junto con otras estrellas locales visibles en una noche despejada, orbita en torno al centro de nuestra galaxia (disco espiral con más de 200 mil millones de estrellas = Vía Láctea).

La Vía Láctea tiene 2 pequeñas galaxias orbitando en la vecindad, visibles desde el hemisferio Sur. Estas pequeñas galaxias son la Gran Nube de Magallanes y la Pequeña Nube de Magallanes.

La galaxia más cercana a nuestra Vía Láctea es la Galaxia de Andrómeda. Esta es una Galaxia Espiral como la nuestra, pero 4 veces más masiva y está a 2 millones de años-luz de distancia.

La Vía Láctea es una de miles de millones de Galaxias conocidas.

Los planetas y muchos de los satélites y asteroides giran alrededor del Sol en la misma dirección en órbitas casi circulares.

Mirando desde arriba el Sistema Solar sobre su polo Norte, los planetas orbitan en una dirección contrapunteos del reloj.

Los planetas orbitan en torno al Sol casi todos en un mismo plano: Eclíptica (Plutón es un caso especial ya que su órbita está inclinada en unos  $18^\circ$  c/r a la Eclíptica).

## Composition del Sistema Solar

El Sol contiene el 99.85% de toda la masa del Sistema Solar.

Los planetas, los cuales condensaron a partir del mismo disco de material que formó el Sol, contiene solo 0.135% de la masa del Sistema Solar.

Jupiter contiene más del doble de la materia de todos los otros planetas combinados.

Los Satelites de los planetas, cometas, asteroides, meteoritos, y el medio interplanetario constituye el restante 0.015%.

Tabla con la lista de la distribución de la masa dentro de nuestro Sistema Solar.

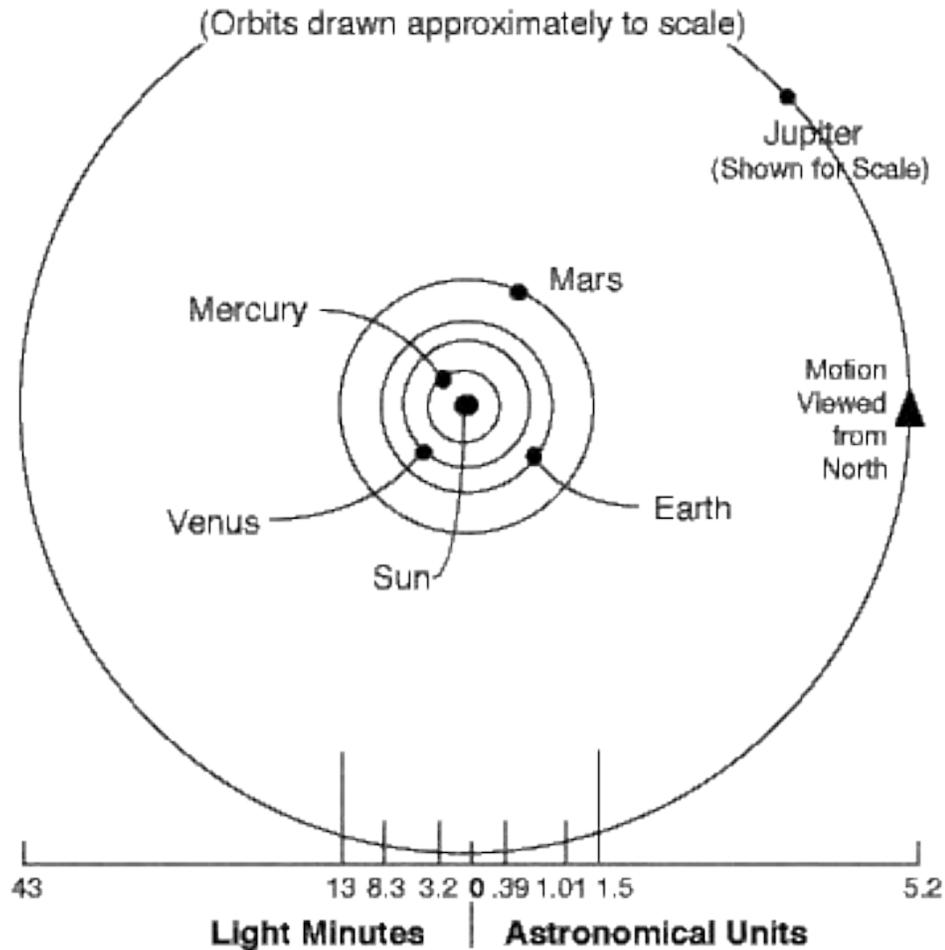
<b>Sol:</b>	<b>99.85%</b>
<b>Planetas:</b>	<b>0.135%</b>
<b>Cometas:</b>	<b>0.01% ?</b>
<b>Satélites:</b>	<b>0.00005%</b>
<b>Planetas menores:</b>	<b>0.0000002% ?</b>
<b>Meteoritos:</b>	<b>0.0000001% ?</b>
<b>Medio Interplanetario:</b>	<b>0.0000001% ?</b>

## Planetas Terrestres

Corresponden a los 4 planetas internos del Sistema Solar (Mercurio, Venus, Tierra y Marte).

Venus, Tierra, y Marte tienen atmósferas significativas, mientras que en Mercurio ésta es prácticamente inexistente.

### Mean Distances Of The Terrestrial Planets From The Sun

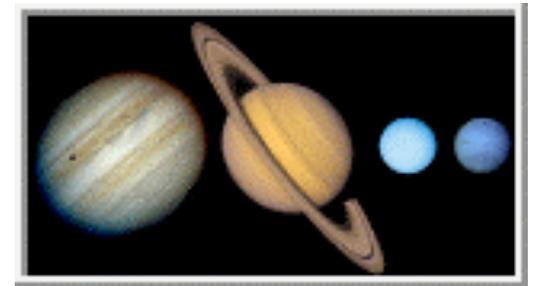
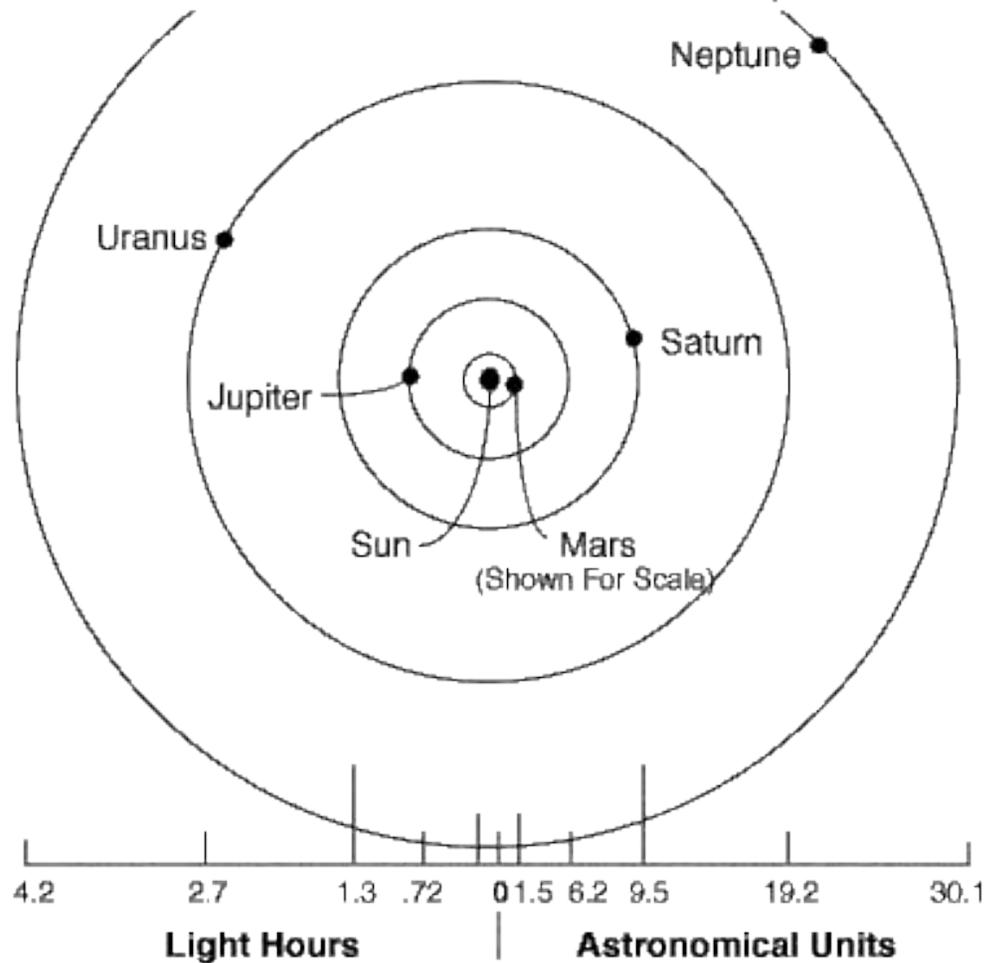


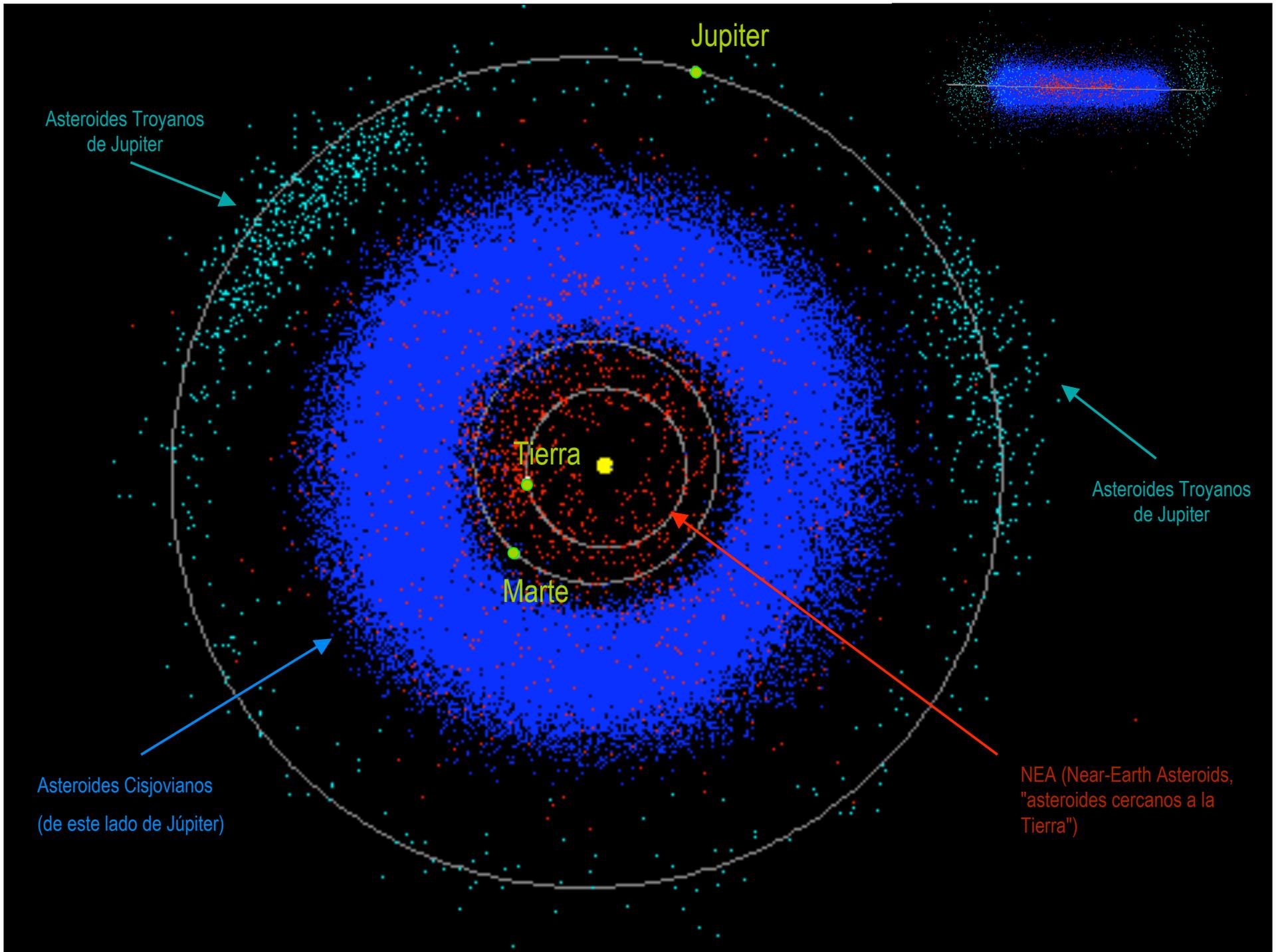
## Planetas Jovianos

[Jupiter](#), [Saturn](#), [Uranus](#), y [Neptune](#) son conocidos como los Planetas Jovianos (todos son planetas gigantes).

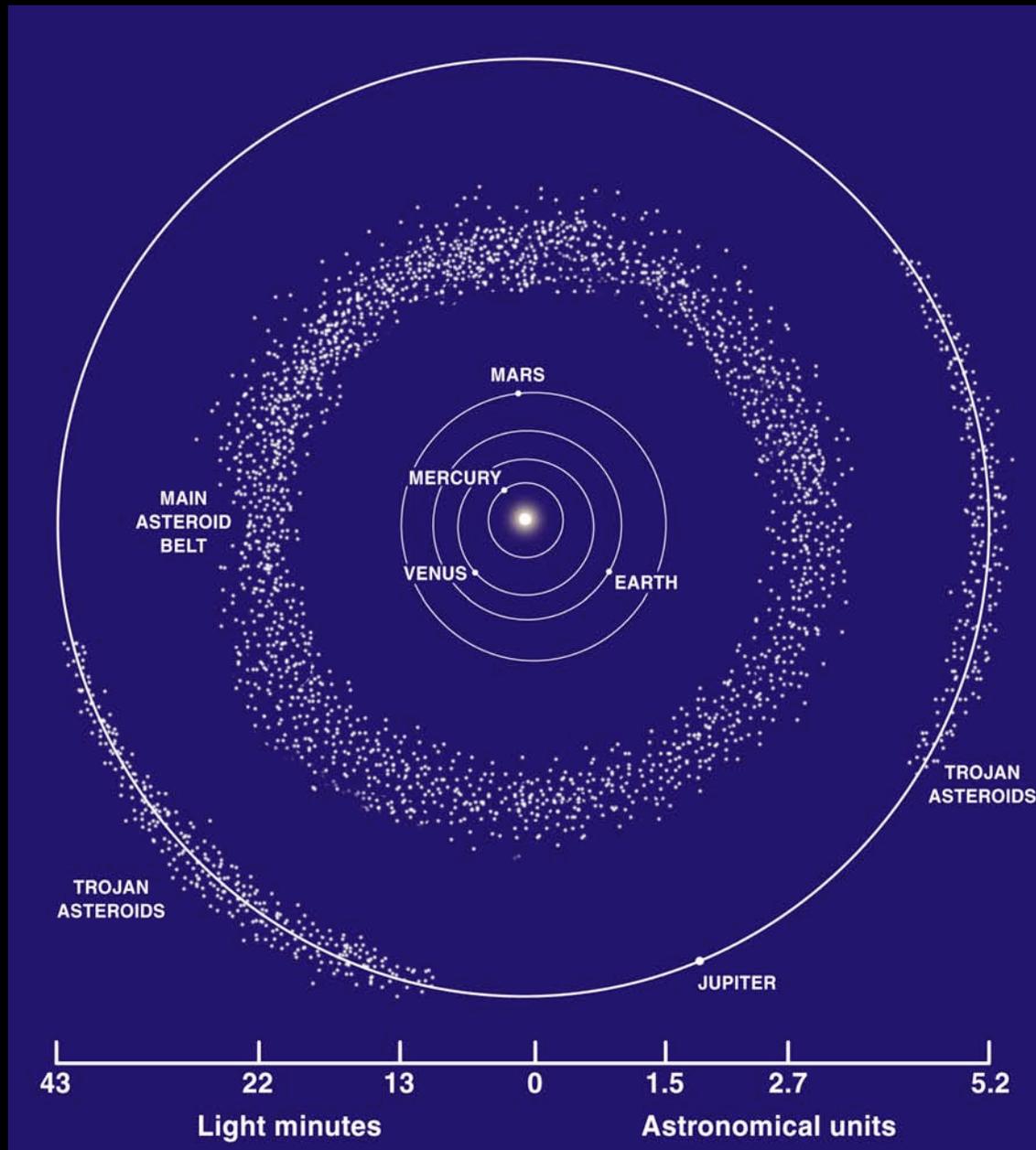
### Mean Distances Of The Jovian Planets From The sun

(Orbits drawn approximately to scale.  
Pluto omitted to accommodate scale)





# Recordemos la escala de Unidad Astronómica (AU)

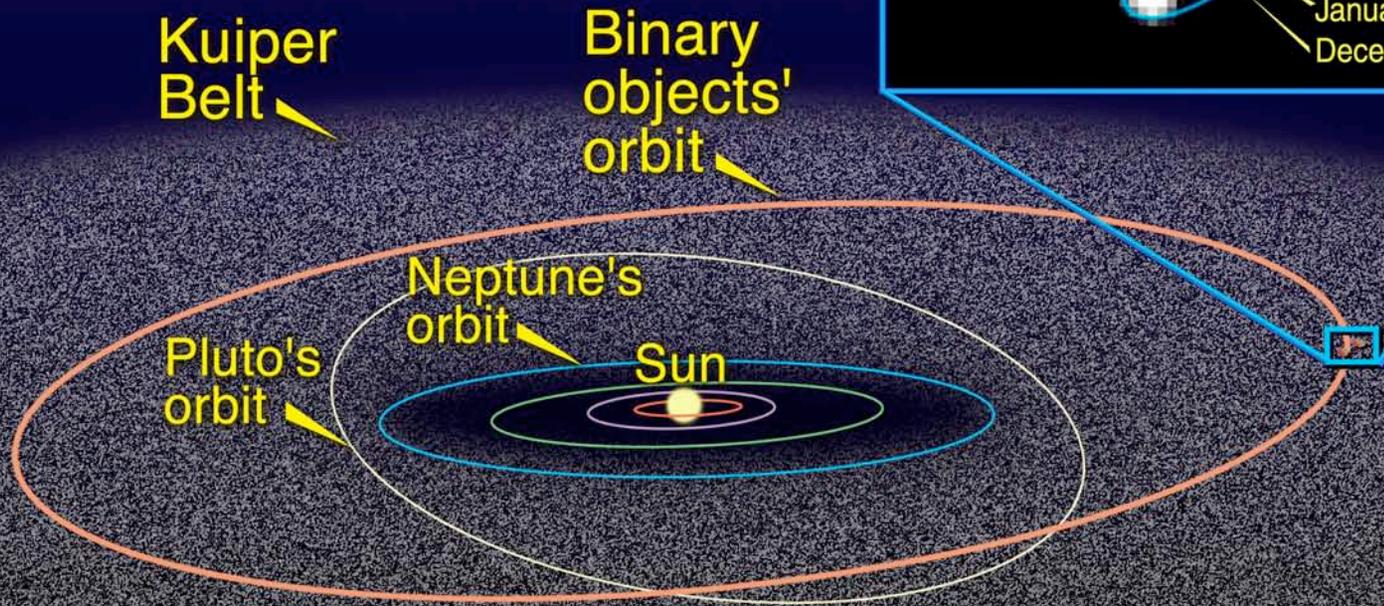


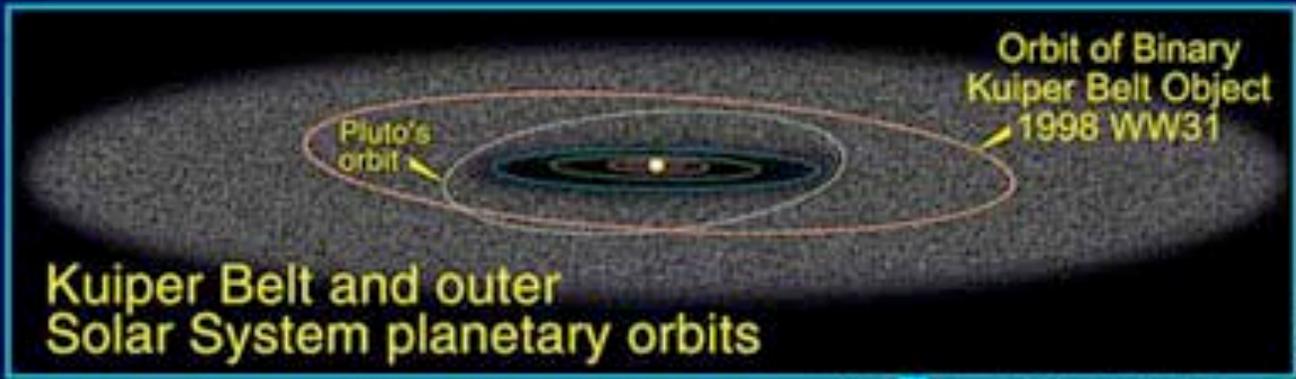
# Kuiper Belt Object 1998 WW31

**Binary objects  
orbit each other**

July 2001  
August 2001  
September 2001

February 2002  
January 2002  
December 2001



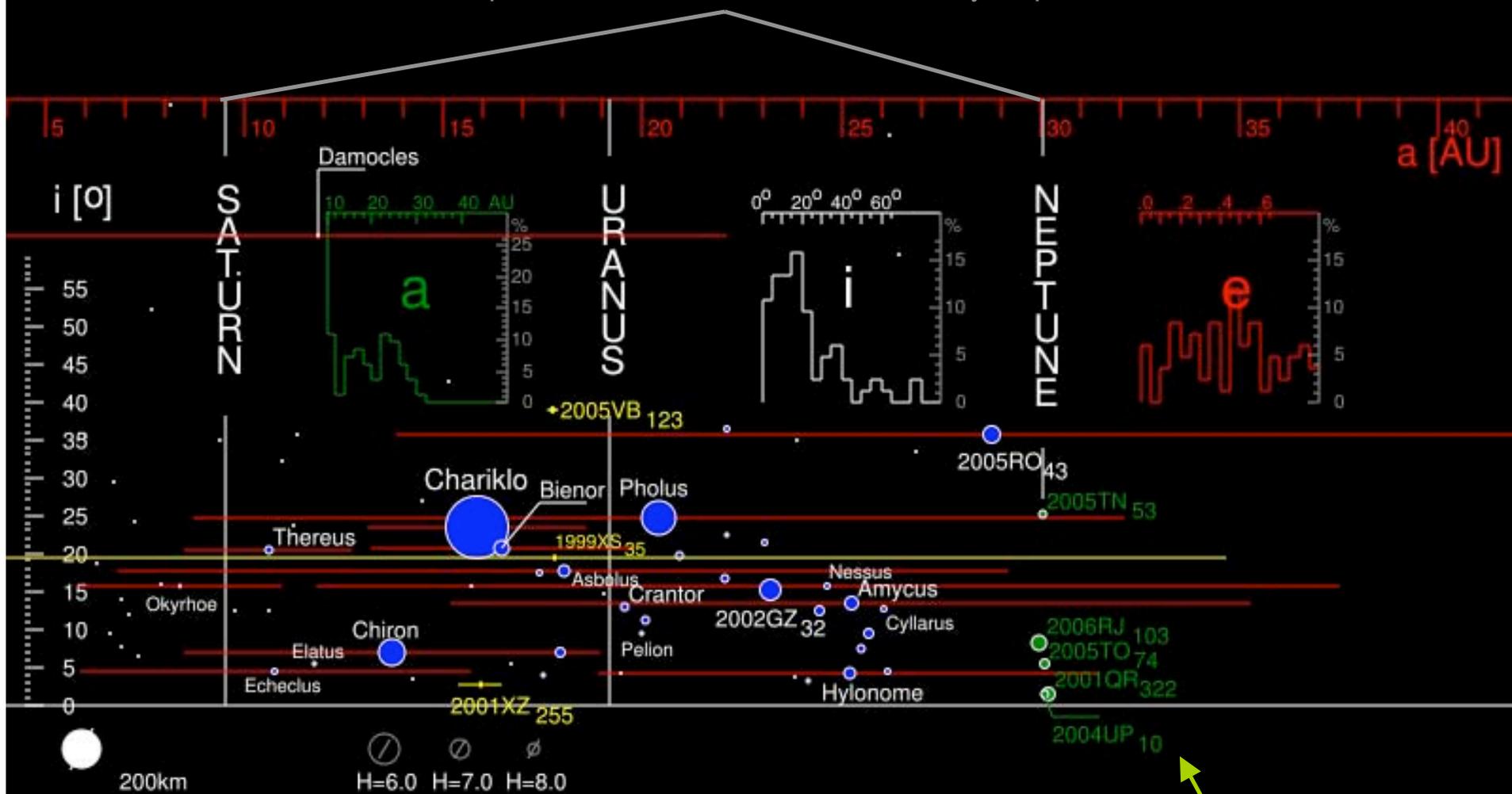


A large, spherical cutaway drawing of the Oort Cloud, showing a vast, dense field of small white dots representing billions of comets. The cloud is roughly spherical and extends far beyond the Kuiper Belt. A blue line points from the text box to the center of the cloud.

**The Oort Cloud (comprising many billions of comets)**

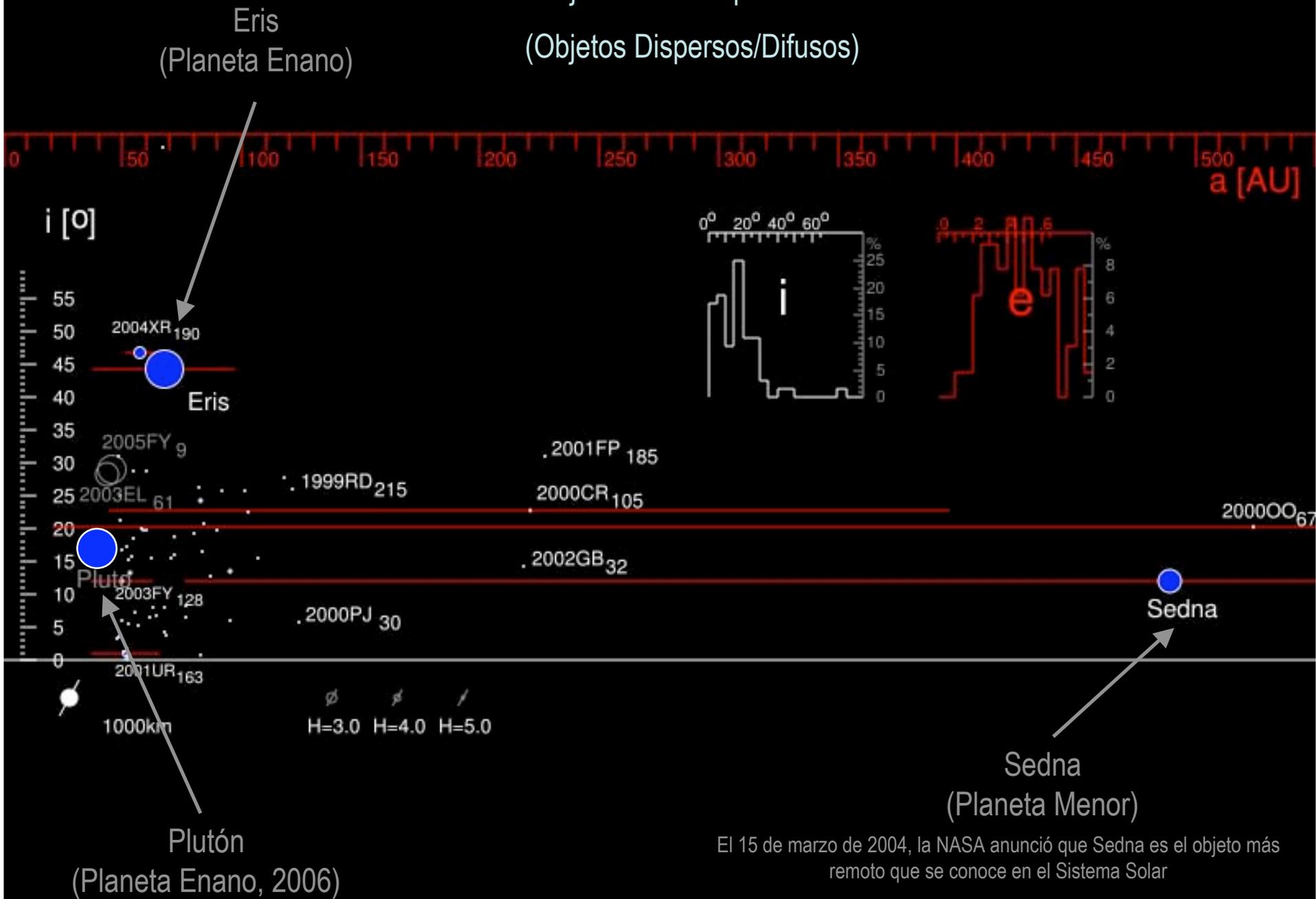
*Oort Cloud cutaway drawing adapted from Donald K. Yeoman's illustration (NASA, JPL)*

# Centauros o planetoides helados entre Saturno y Neptuno



Asteroides Troyanos  
conocidos de Neptuno

# Objetos Transneptunianos (Objetos Dispersos/Difusos)



El 15 de marzo de 2004, la NASA anunció que Sedna es el objeto más remoto que se conoce en el Sistema Solar



Sedna  
(2003VB<sub>12</sub>)  
1.700 km.  
diámetro

Eris (2003UB<sub>313</sub>), 2.700 km. diámetro

Quaoar, 1.250 km. diámetro

Plutón, 2.302 km. diámetro

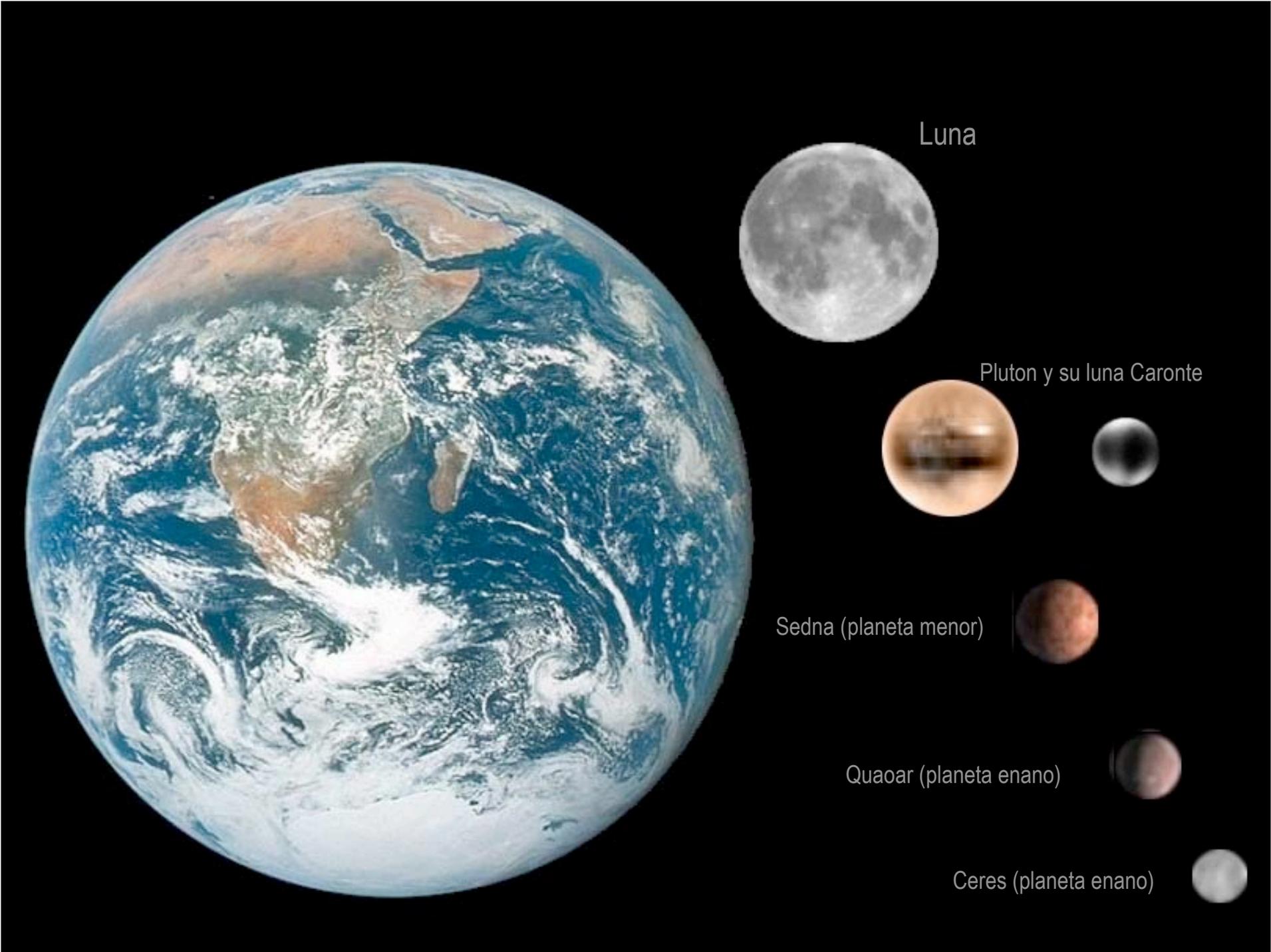
Luna



Ceres

(Planeta enano; UAI,  
24 Agosto 2006)





Luna

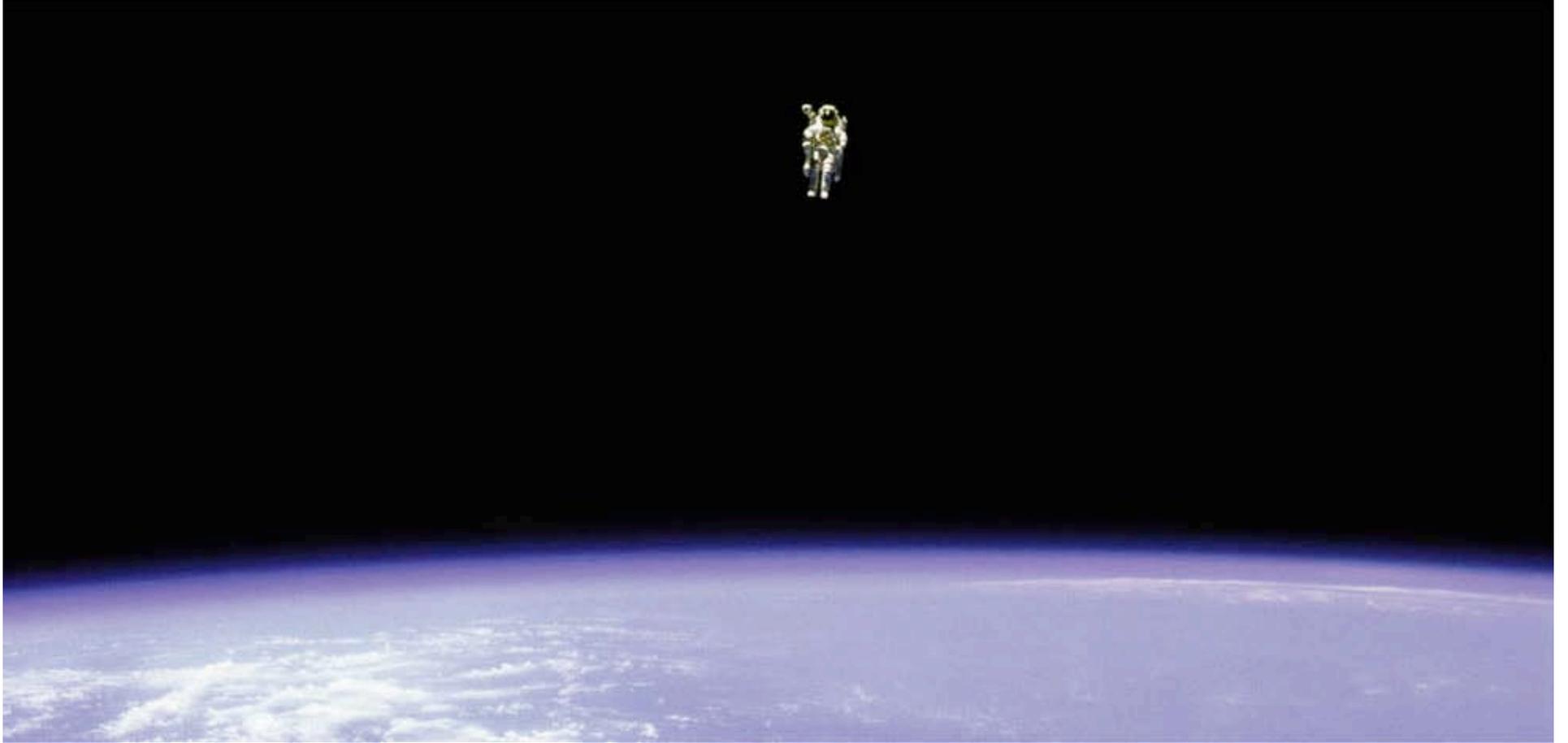
Pluton y su luna Caronte

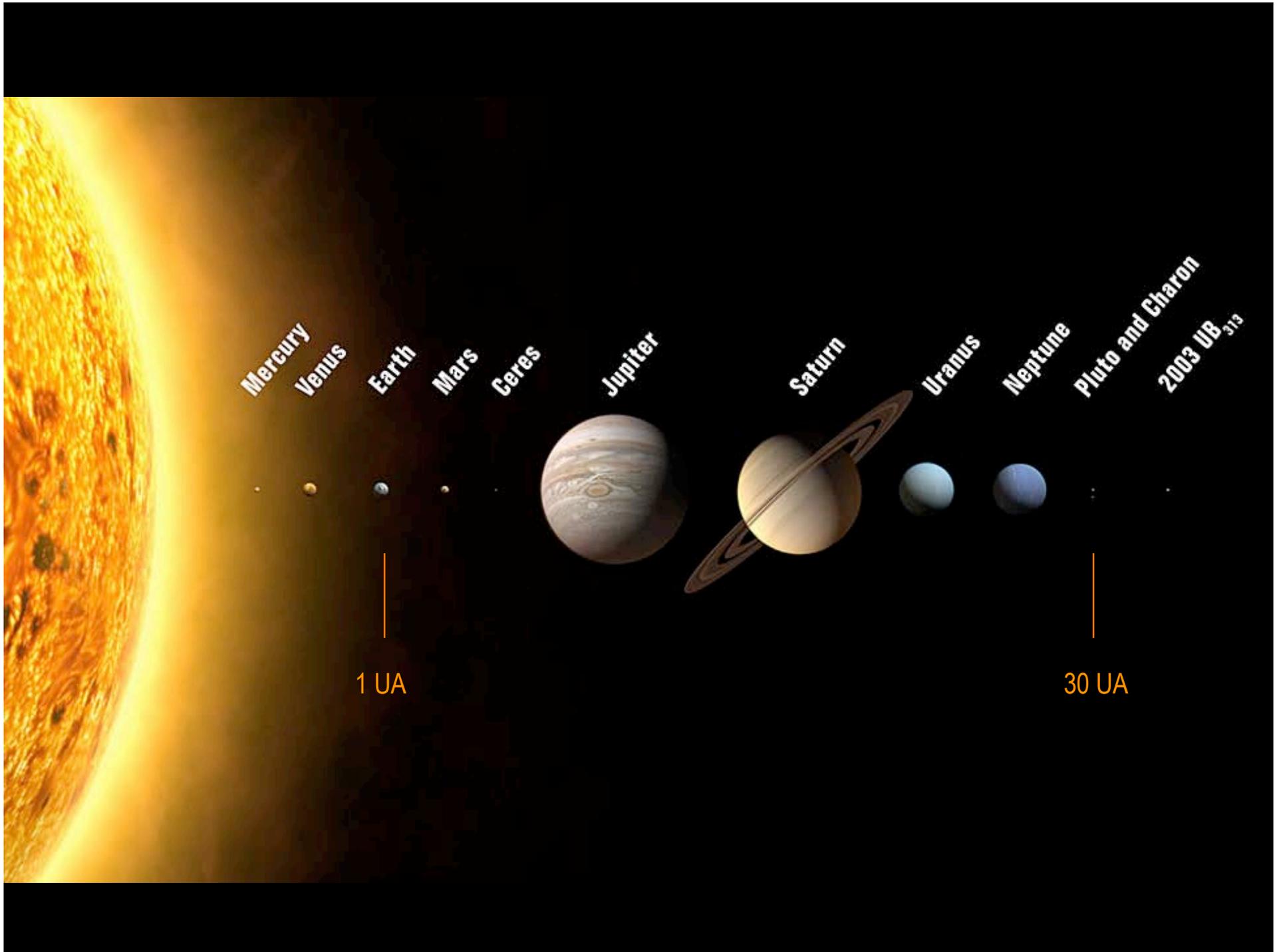
Sedna (planeta menor)

Quaoar (planeta enano)

Ceres (planeta enano)

Volvamos ahora a revisar los planetas de nuestro sistema solar...





Mercury

Venus

Earth

Mars

Ceres

Jupiter

Saturn

Uranus

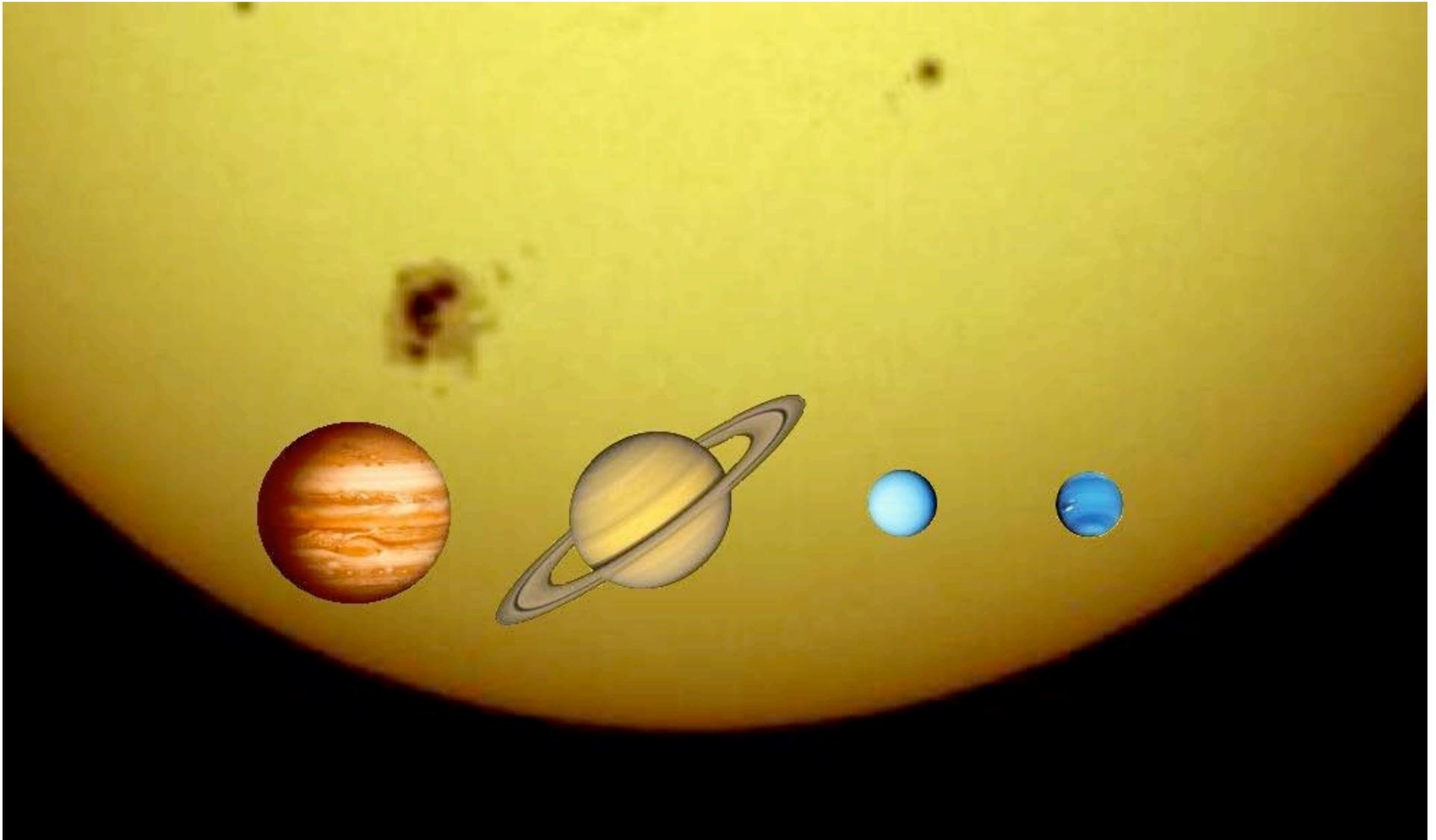
Neptune

Pluto and Charon

2003 UB<sub>313</sub>

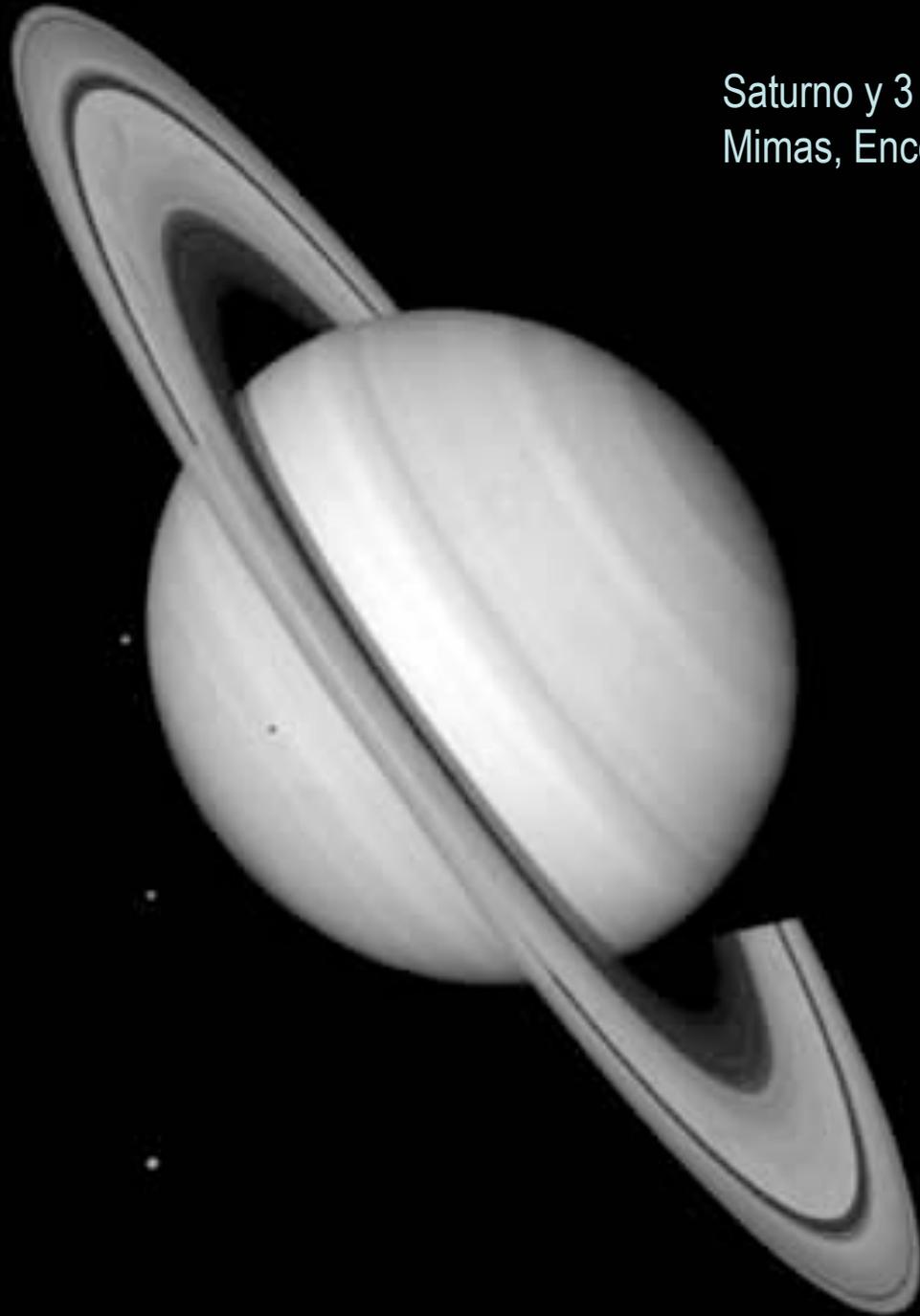
1 UA

30 UA



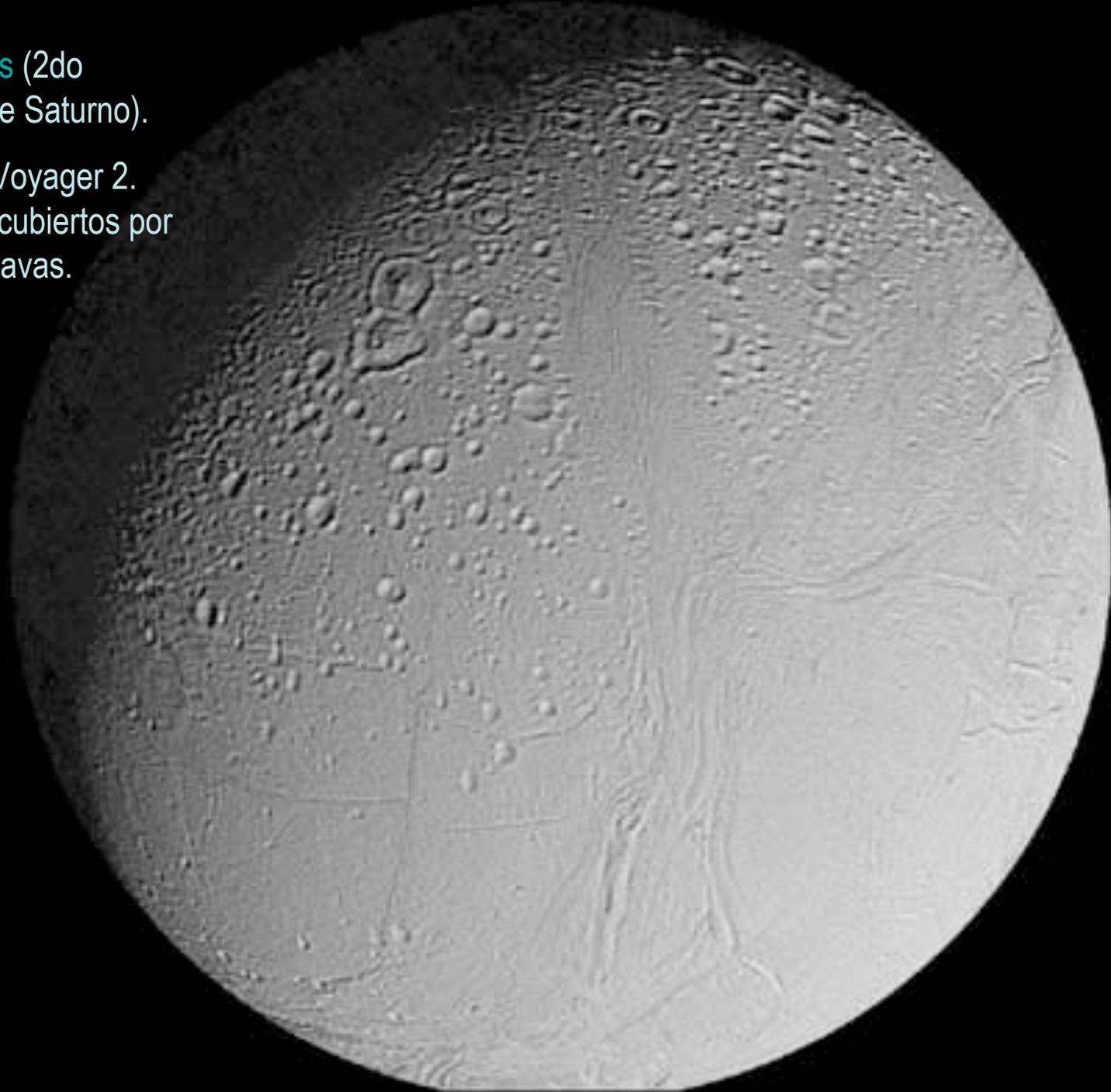
Planetas Gigantes Gaseosos / Planetas de Hielo

Saturno y 3 de sus lunas:  
Mimas, Enceladus y Tethys.



Enceladus (2do  
Satélite de Saturno).

Foto del Voyager 2.  
Cráteres cubiertos por  
flujos de lavas.

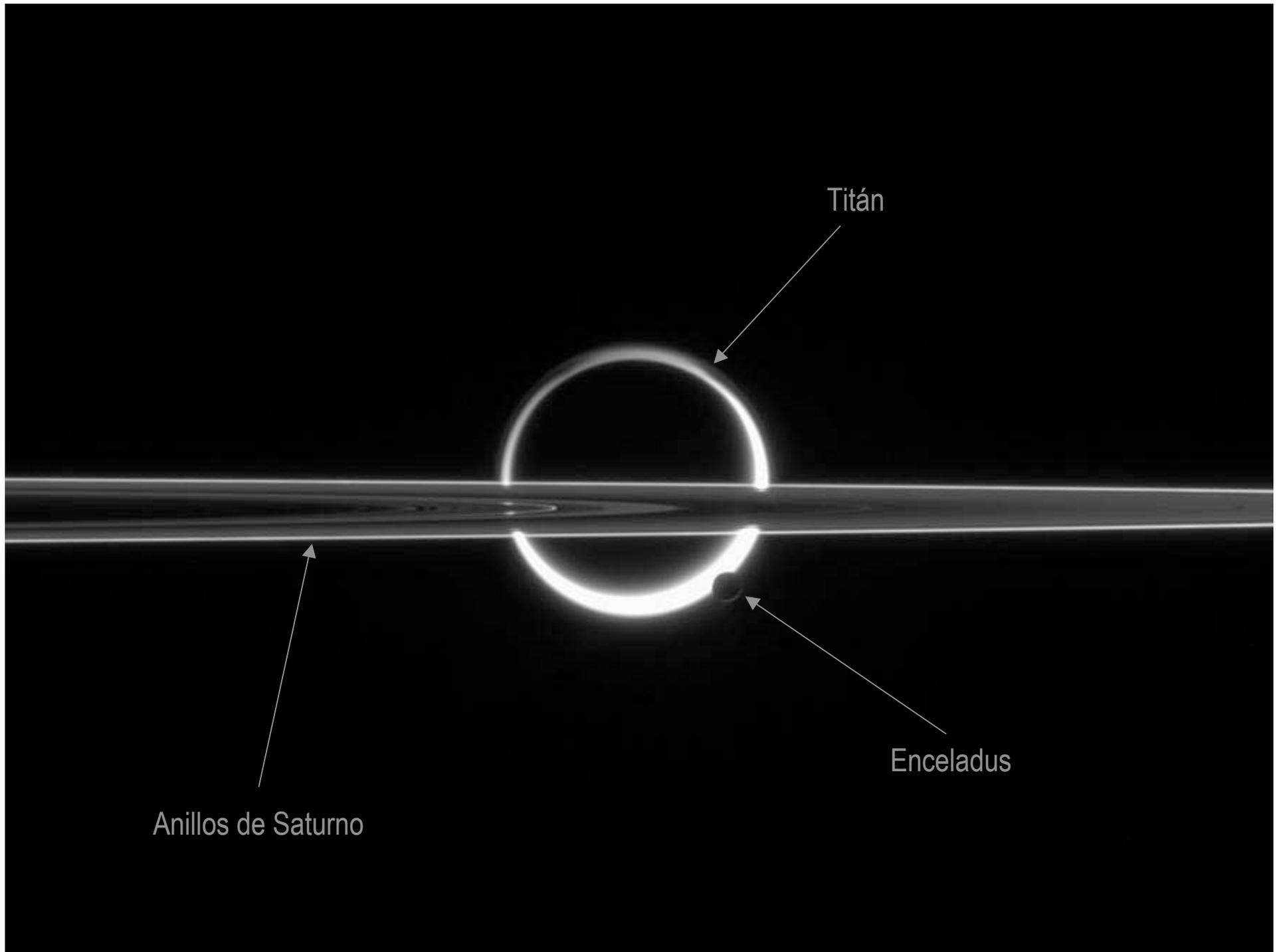


Mimas, satélite más interno de las lunas grandes de Saturno.

Cráter Herschel tiene una altura aprox. de 5 km, su monte central alcanza 6 km.

El diámetro de esta luna es 394 km.



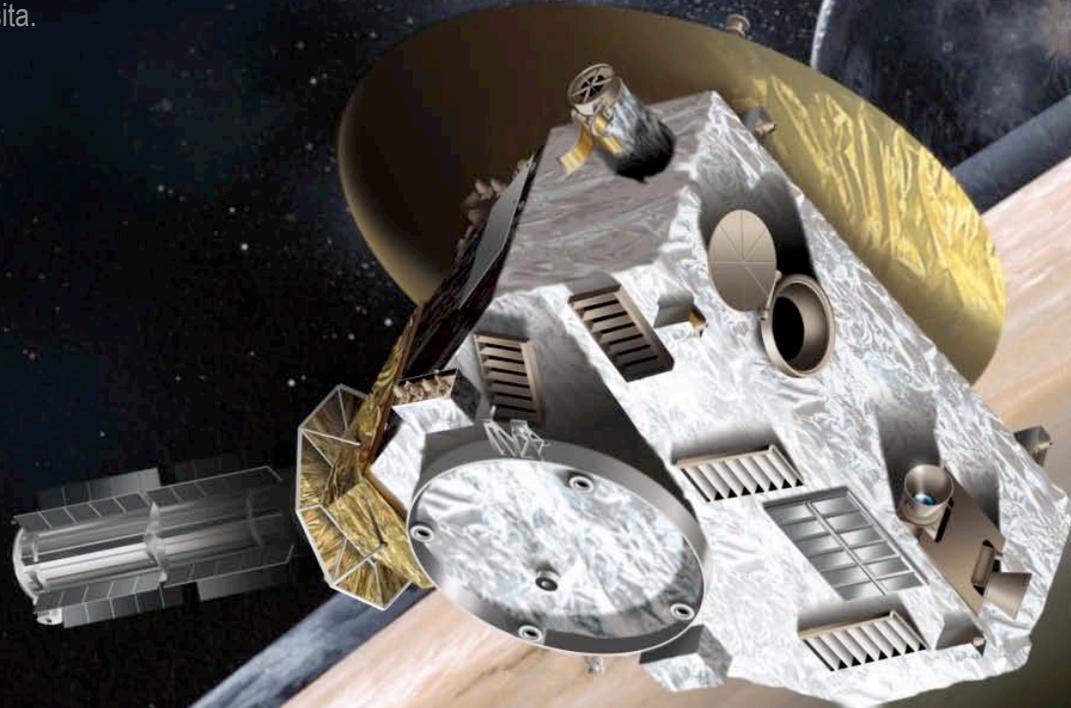


Titán

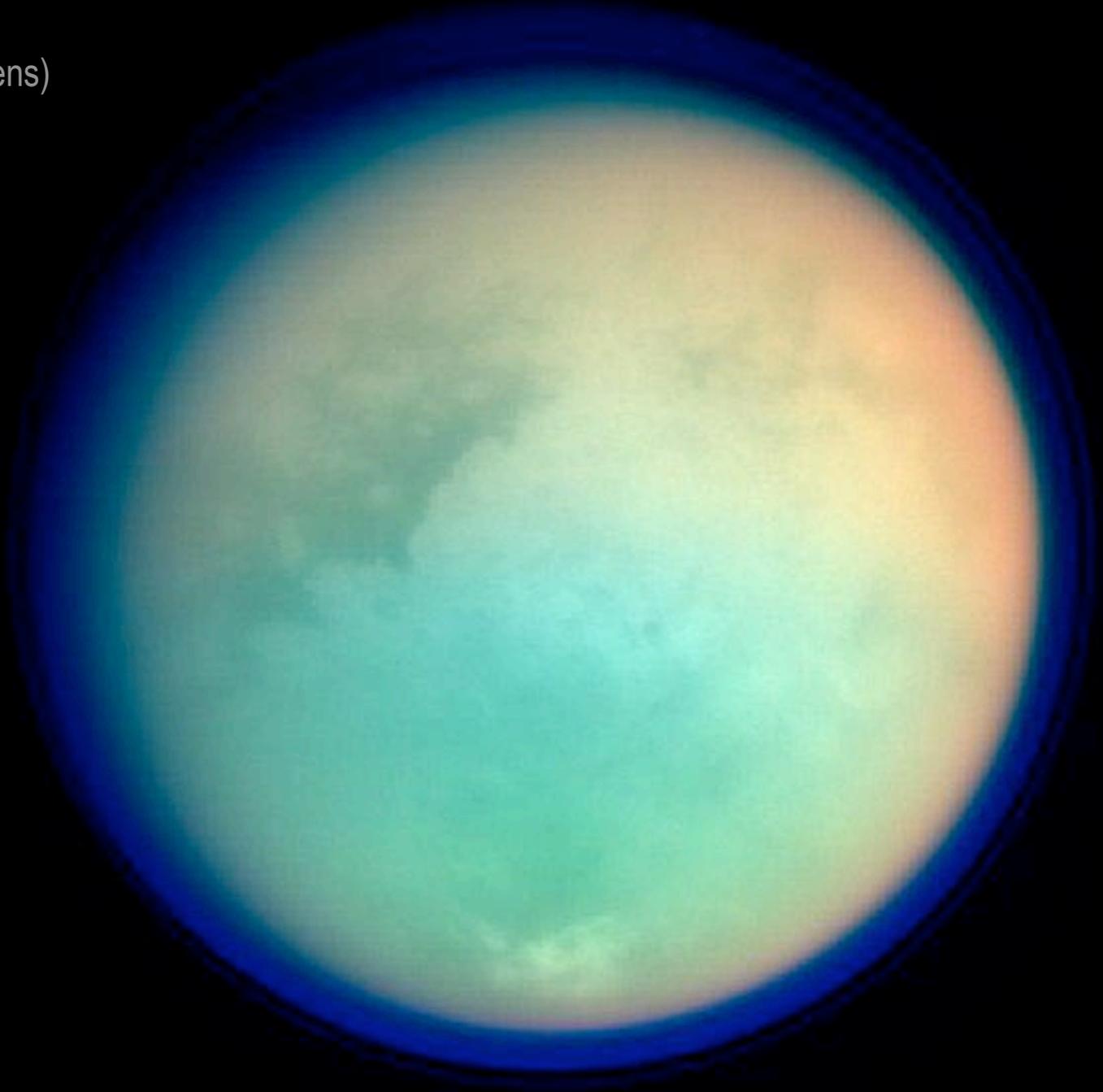
Anillos de Saturno

Enceladus

Cassini-Huygens : proyecto conjunto de la NASA, la ESA y la ASI. Es una misión espacial no tripulada cuyo objetivo es estudiar el planeta Saturno y sus satélites naturales. La nave espacial consta de dos elementos principales: la nave Cassini y la sonda Huygens. El lanzamiento tuvo lugar el 15 de octubre de 1997 y entró en la órbita el 1 de julio de 2004. El 25 de diciembre de 2004 la sonda se separó de la nave y alcanzó la mayor luna de Saturno, Titán, el 14 de enero de 2005, momento en el que descendió a la superficie del planeta para recoger información científica. Se trata de la primera nave que orbita Saturno y el cuarto artefacto espacial humano que lo visita.



Titan  
(Cassini/Huygens)



Mercurio



Venus



Tierra

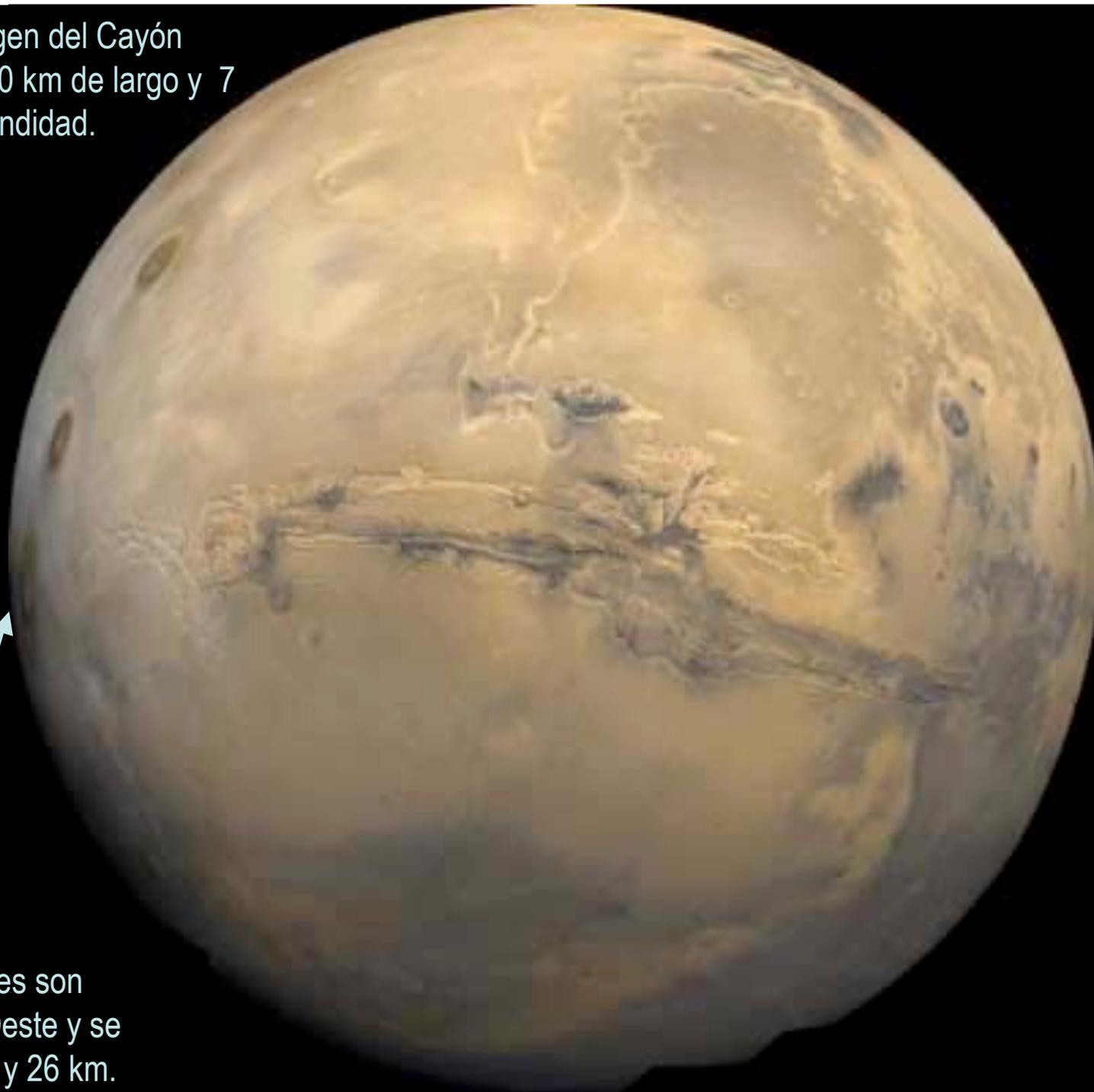


Marte



Planetas Rocosos (Corteza / Manto)

Marte: imagen del Cayón central, 4000 km de largo y 7 km de profundidad.

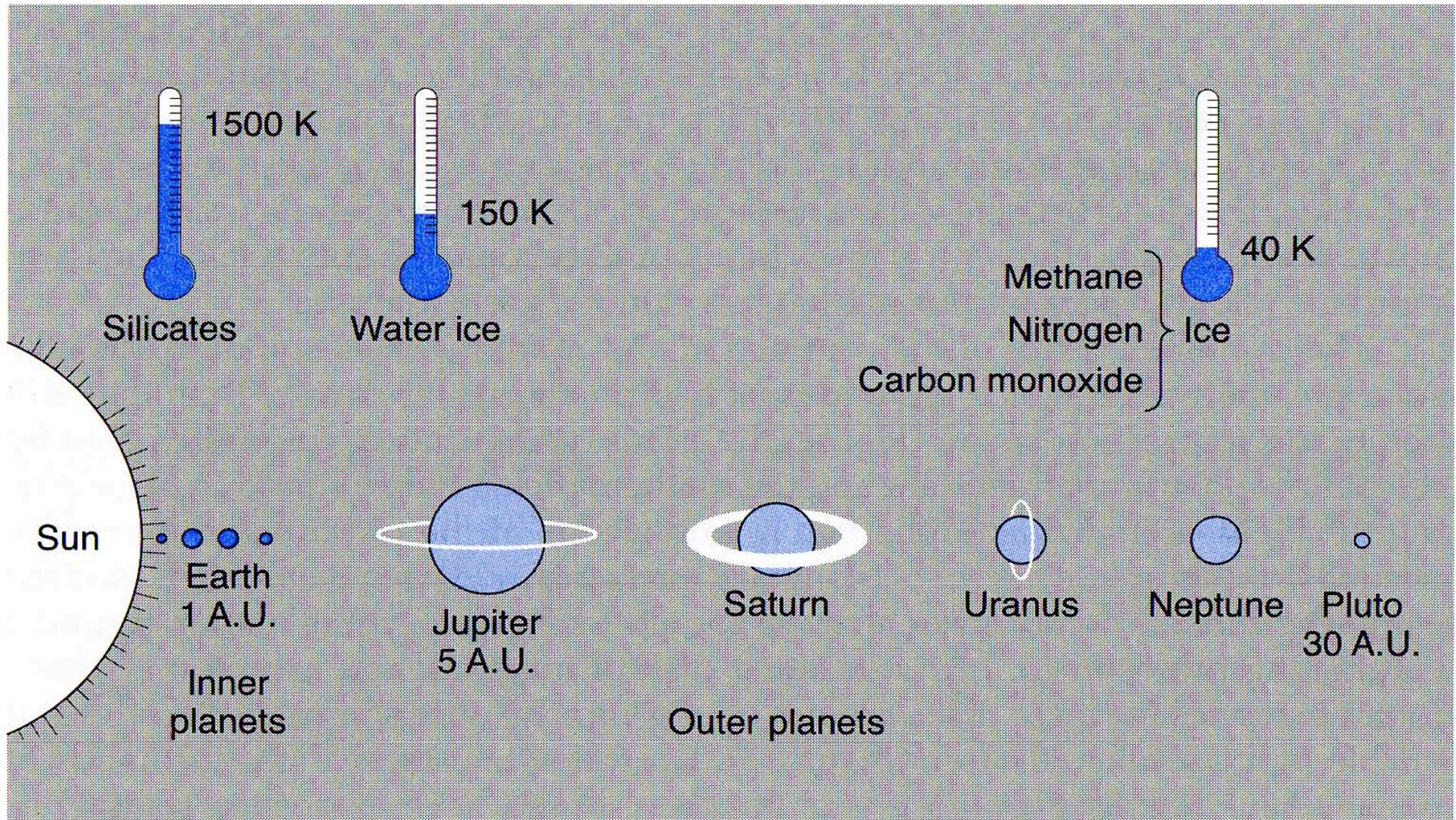


Tres volcanes son visibles al Oeste y se elevan a 18 y 26 km.

La densa atmósfera de dióxido de carbono de Venus esconde el planeta bajo una gruesa capa de nubes y calienta su superficie a  $460^{\circ}\text{C}$





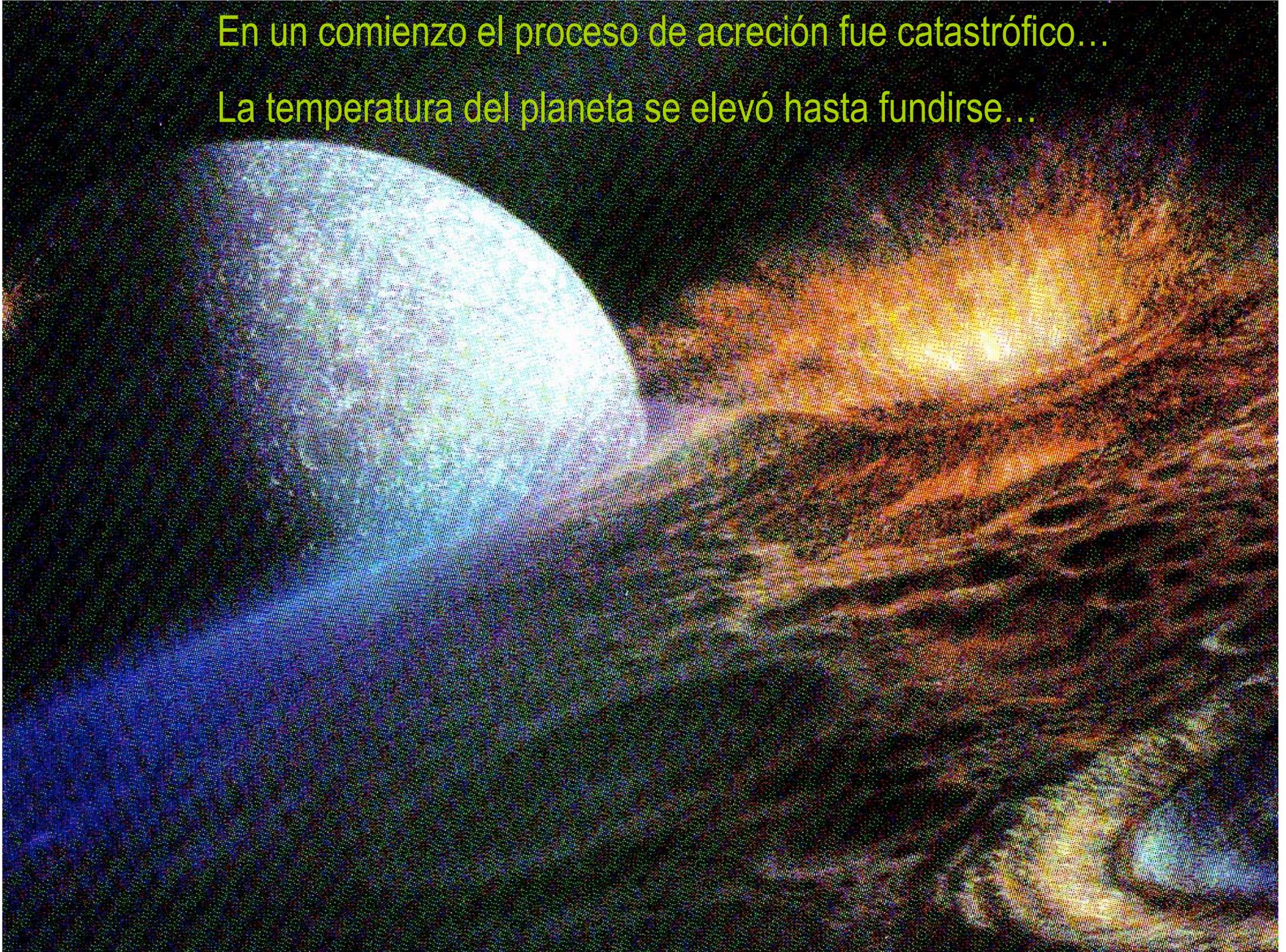


En los primeros momentos del desarrollo del Sistema Solar, las altas temperaturas cerca del Sol permitieron que solo las rocas condensaran, y éstas acrecieron para formar los planetas internos pequeños y densos. En las zonas más frías (partes exteriores de la nebulosa), el agua condensaría para formar hielo, de modo que hielo y rocas fueron disponibles para crear los núcleos masivos de los planetas gigantes. Estos núcleos a su vez habrían capturado H y He de la nebulosa para crear las atmósferas fluidas y gaseosas que estos objetos poseen.



En un comienzo el proceso de acreción fue catastrófico...

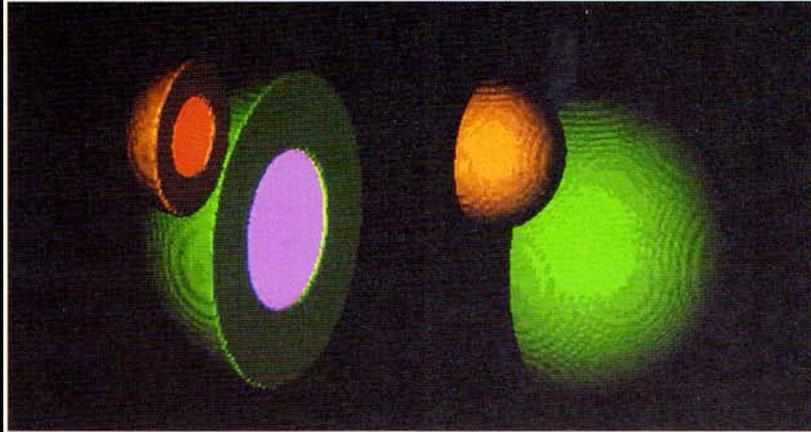
La temperatura del planeta se elevó hasta fundirse...



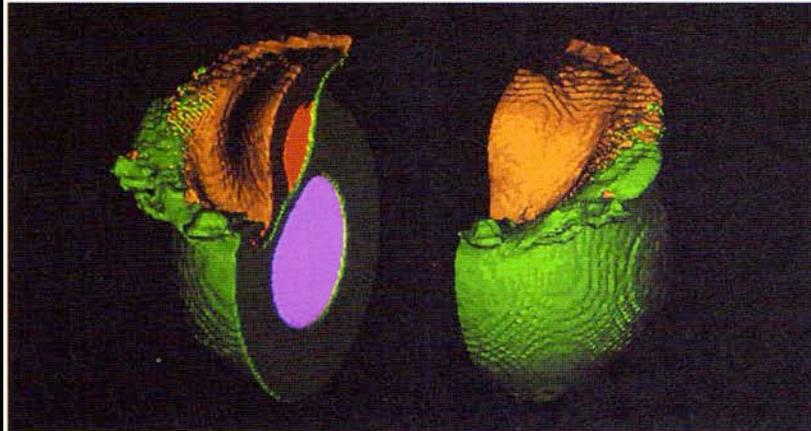
Hace unos 3,9 mil millones de años la Luna nace por el impacto sobre la Tierra de un cuerpo del tamaño de Marte ...



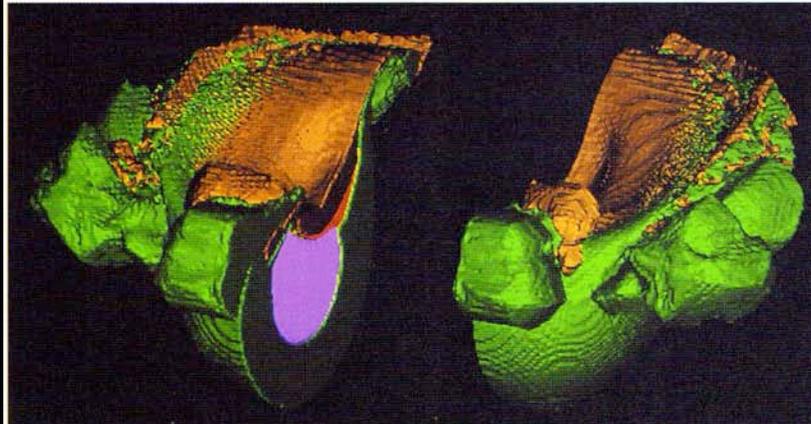
(a)  $t = 0$



(b)  $t = 804$  s



(c)  $t = 1600$  s



# Las Lunas de . . .

Tierra Marte Júpiter Saturno Urano Neptuno Plutón



Luna

Fobos

Deimos



Io



Europa



Ganimedes



Calisto

+ al menos  
24 lunas  
más pequeñas

- Mimas
- Encélado
- Tetis
- Dione
- Rea



Titán

- Hiperión
- Japeto
- Febe

+ al menos  
21 lunas  
más pequeñas

- Puck
- Miranda
- Ariel
- Umbriel
- Titania
- Oberón

+ al menos  
15 lunas  
más pequeñas



Tritón

- Nereida

+ al menos  
6 lunas  
más pequeñas

Tierra

