

El sistema solar

Curso de introducción a la astronomía

Ernesto Nicola y Mateu Esteban

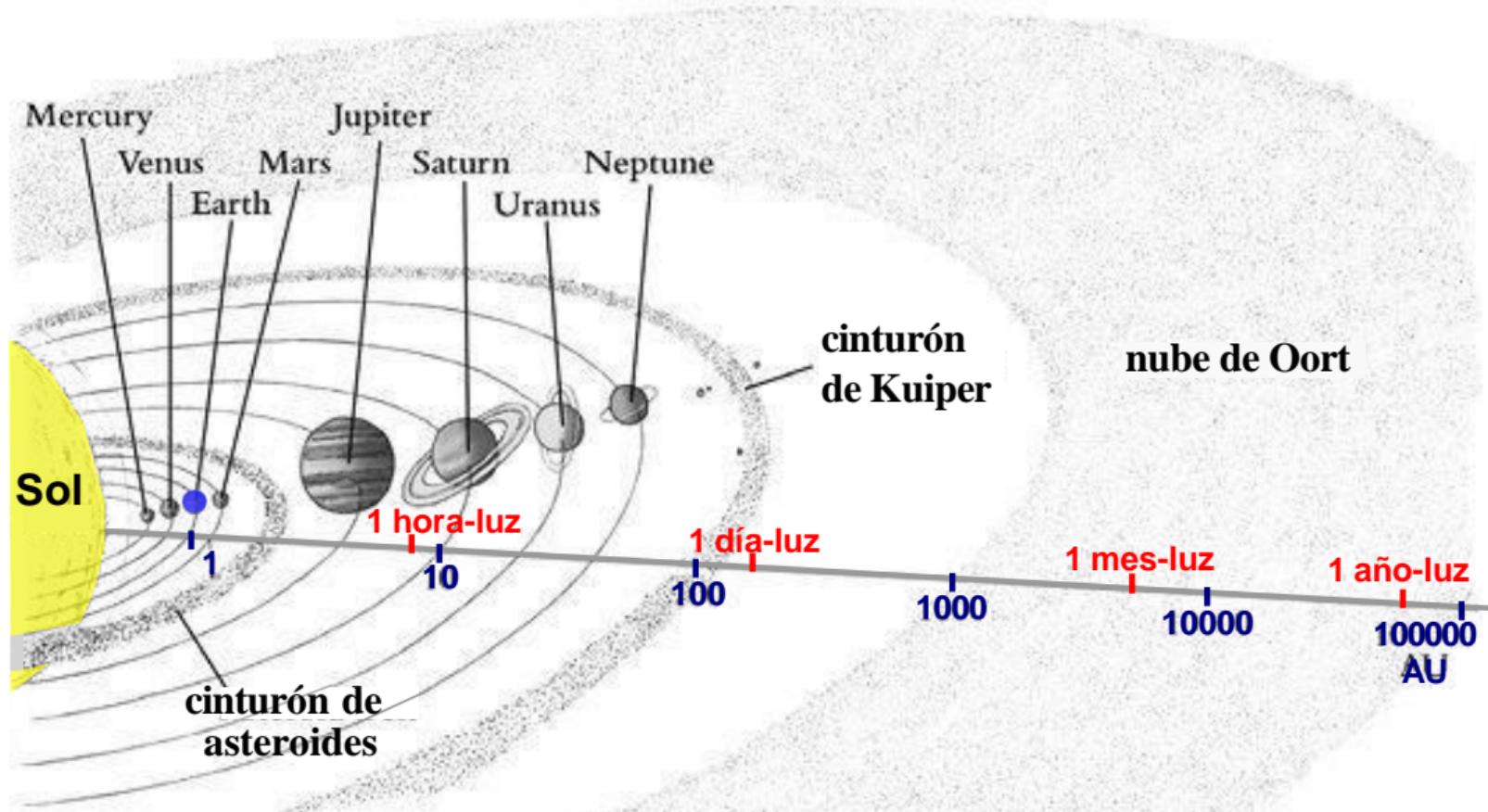
Calvià, 2023-02-11



- 1** Inventario del sistema solar
- 2** Formación del sistema solar
- 3** Planetas rocosos
 - Mercurio
 - Venus
 - Tierra
 - Marte
- 4** Planetas gigantes
 - Júpiter
 - Saturno
 - Urano y Neptuno
- 5** Objetos pequeños del sistema solar
 - Asteroides
 - Objetos transneptunianos (TNOs) y del cinturón de Kuiper
 - Cometas

1 Inventario del sistema solar

Estructura general del sistema solar



Estructura general del sistema solar

1 Una estrella en el centro: el **Sol**

2 **Planetas orbitando al Sol**

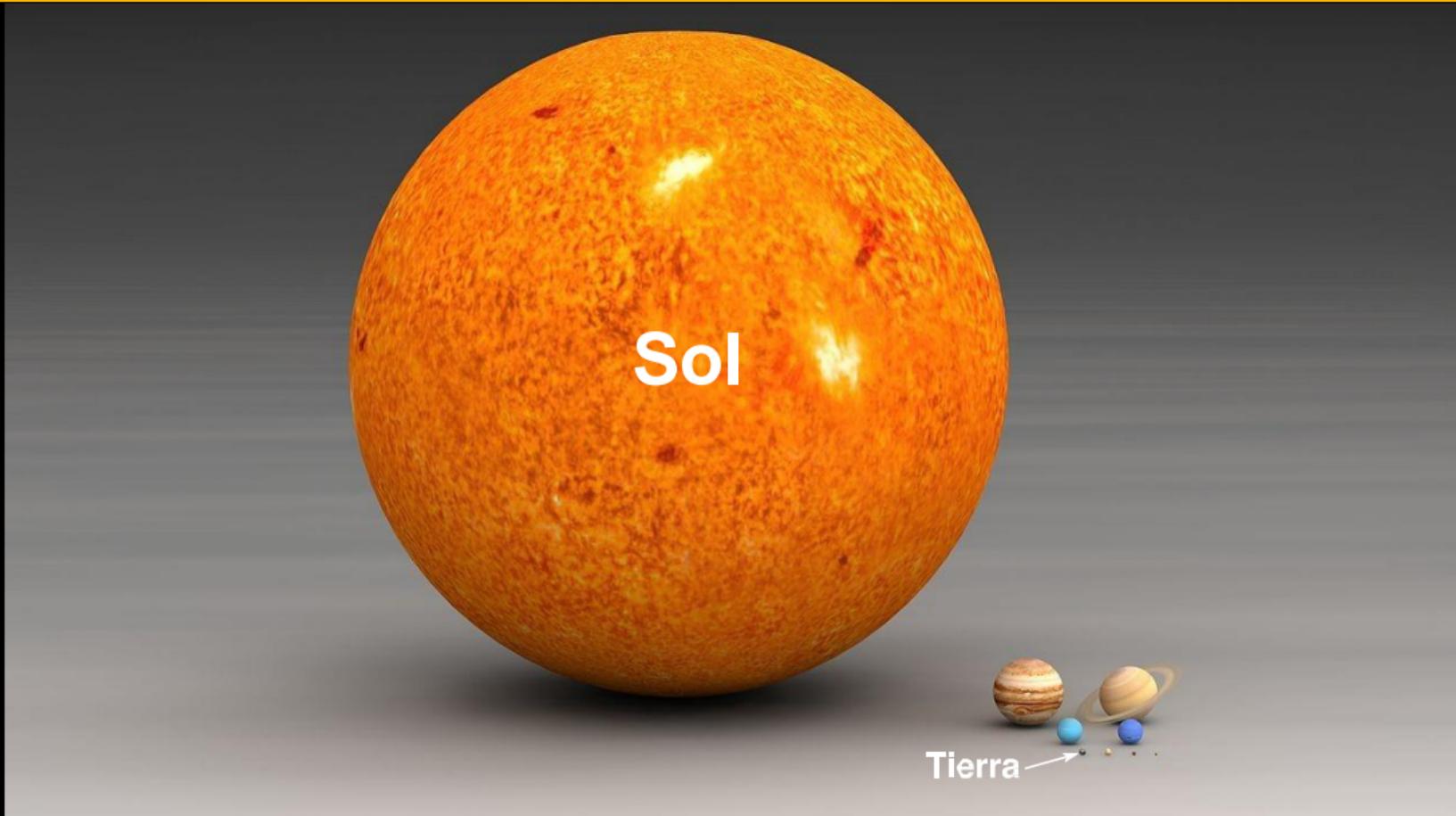
- Planetas interiores: rocosos (Mercurio, Venus, Tierra y Marte)
- Planetas exteriores: gaseosos o helados y gigantes (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno)
- Muchos planetas poseen satélites naturales: lunas

3 **Cinturón de asteroides**, entre los planetas interiores y los exteriores

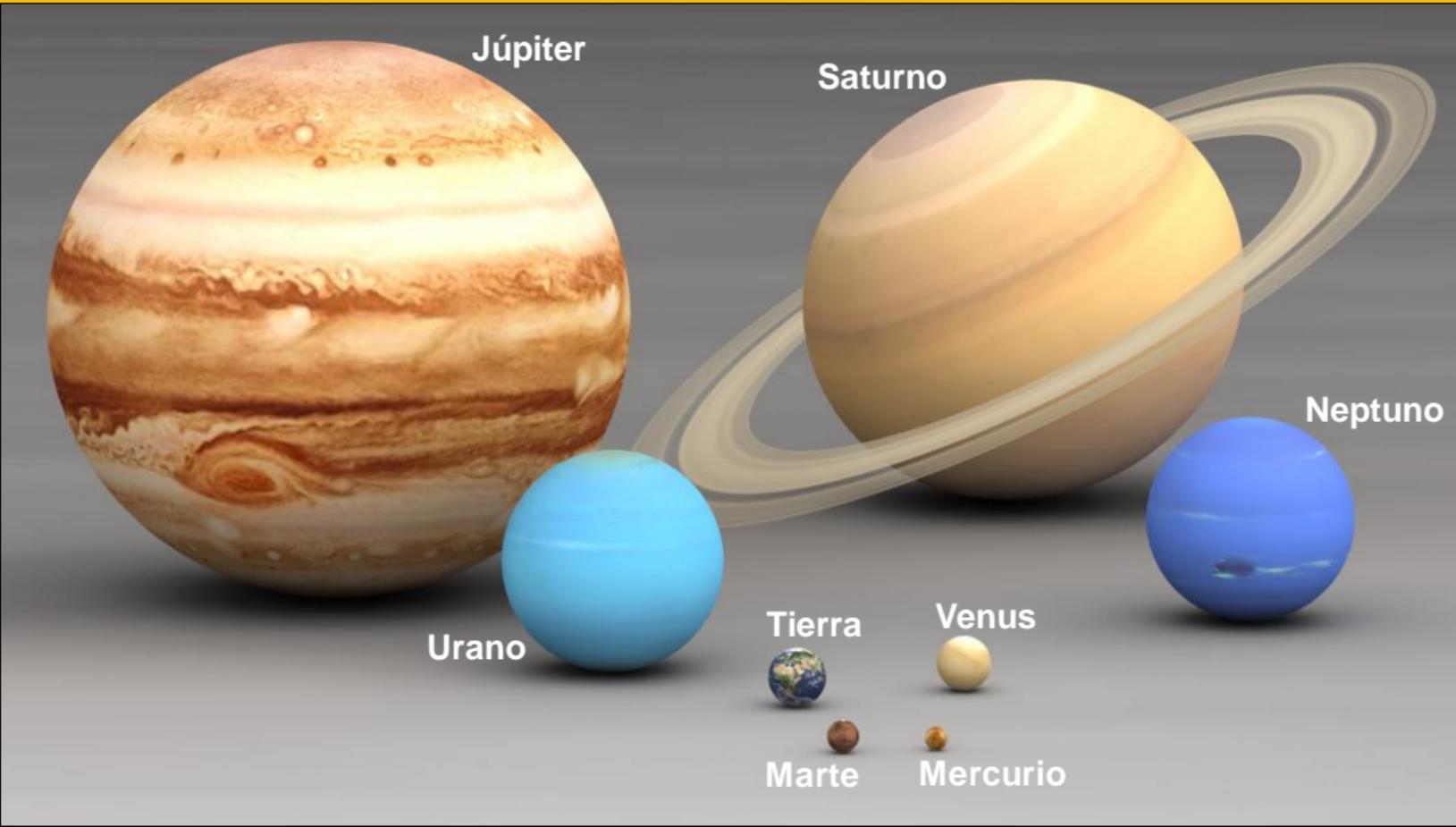
4 Gran cantidad de cometas helados y otros objetos similares

- **Cinturón de Kuiper y la nube de Oort**

El sistema solar a escala: el Sol y los planetas



El sistema solar a escala: los planetas



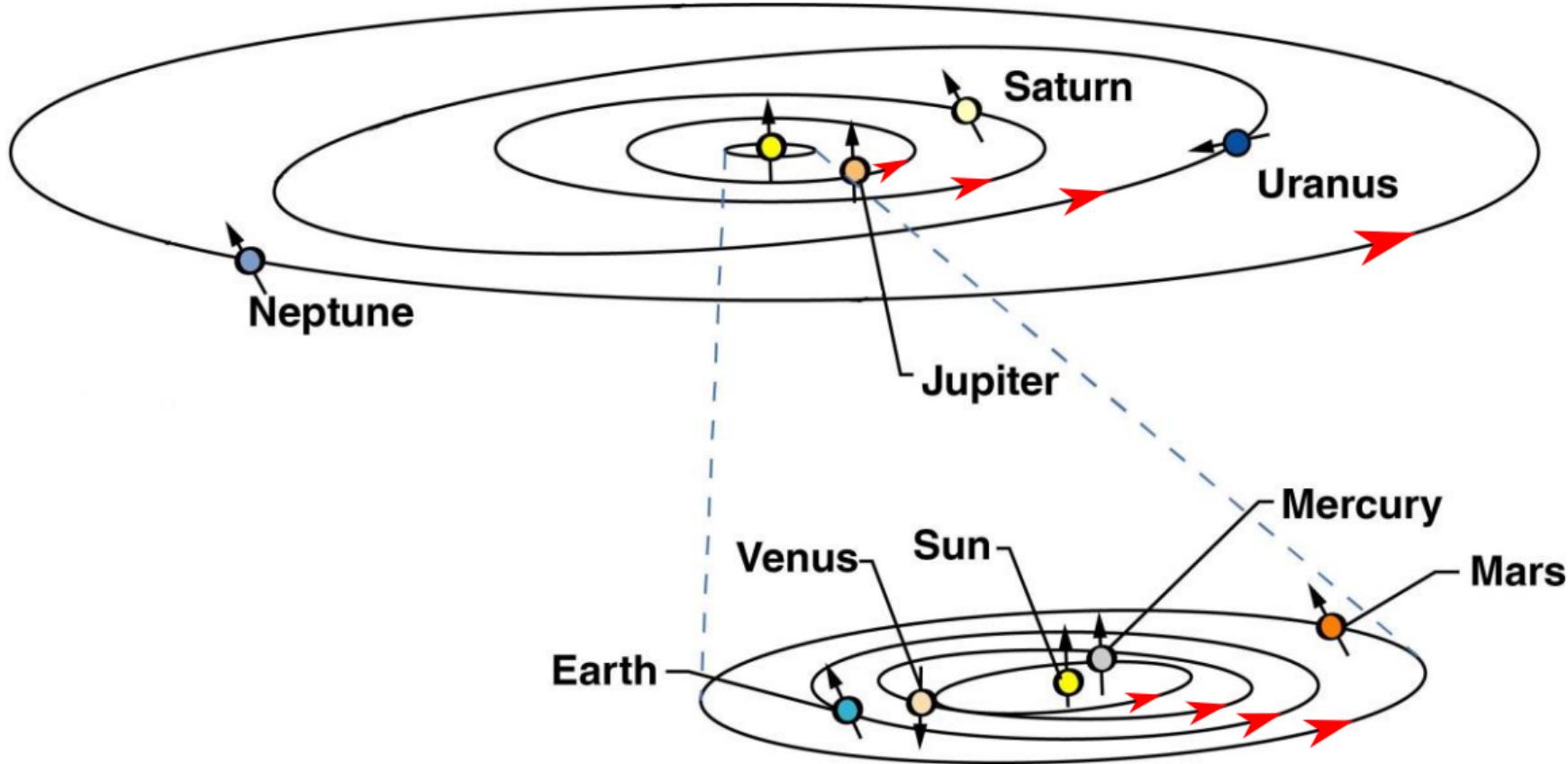
Tamaños y distancias del sistema solar



Si la Tierra fuese una pelota de tenis:

- El Sol sería una casita de 2 plantas a 750 m
- Neptuno sería un melón a 22 km
- El cinturón de Kuiper llegaría a 112 km
- La nube de Oort no cabría en la Tierra
(estaría a un 20% de la distancia entre la Tierra y la Luna)

Órbitas planetarias



Rotación planetaria



MERCURY

$\theta = 0.03^\circ$
58d 15.5h

VENUS



$\theta = 177.4^\circ$
243d 26m



EARTH

$\theta = 23.4^\circ$
23h 56m



MARS

$\theta = 25.2^\circ$
24h 36m



JUPITER

$\theta = 3.1^\circ$
9h 55m



SATURN

$\theta = 26.7^\circ$
10h 33m



URANUS

$\theta = 97.8^\circ$
17h 14m

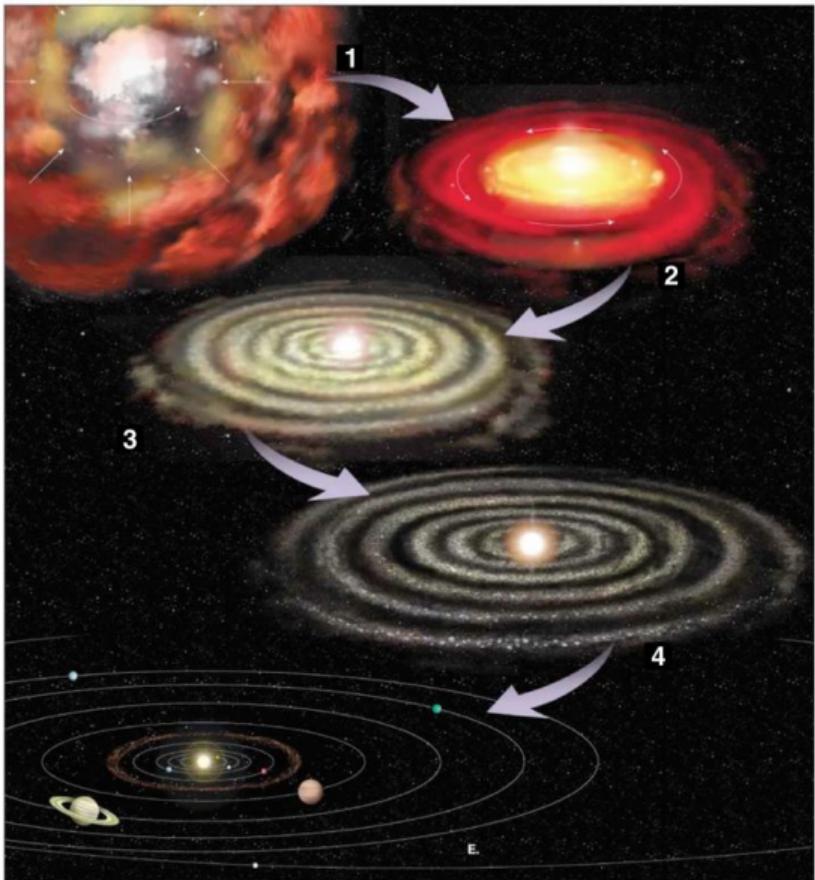


NEPTUNE

$\theta = 28.3^\circ$
16h

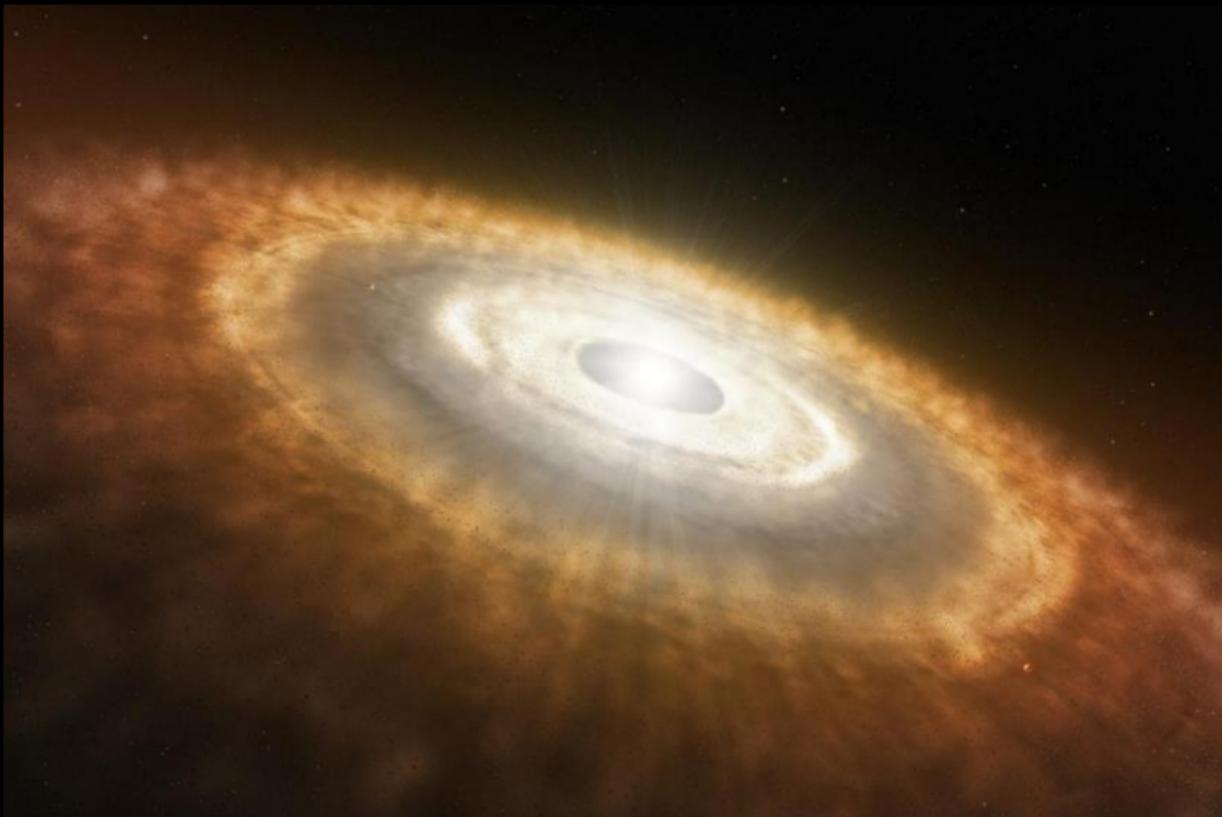
2 Formación del sistema solar

Formación del sistema solar



- 1 Hace 4.600 millones de años, una nube de gas y polvo se comprime debido a la fuerza de la gravedad.
- 2 Al comprimirse la nube de gas adquiere una rotación en sentido anti-horario, **calentándose** y achatándose hasta formar un disco con el proto-Sol en su centro.
- 3 Los materiales del disco colisionan y se agregan entre si hasta formar cuerpos de tamaño mediano que van limpiando partes del disco.
- 4 Este proceso generó unos pocos planetas, unas cuantas lunas y una **inmensa cantidad de objetos pequeños**.

Formación del sistema solar



disco protoplanetario

Ejemplos de discos protoplanetarios

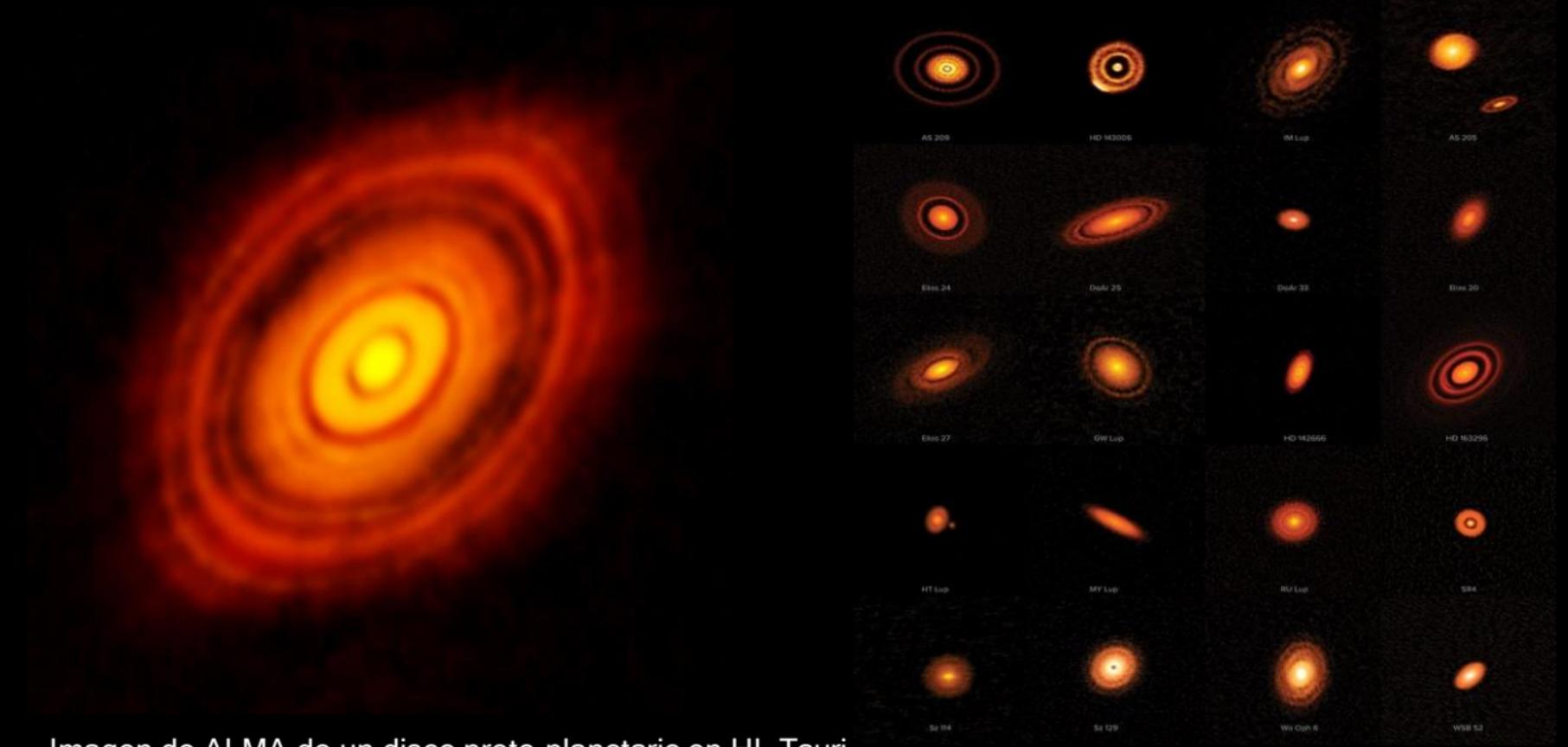


Imagen de ALMA de un disco proto-planetario en HL Tauri

Ejemplos de discos protoplanetarios

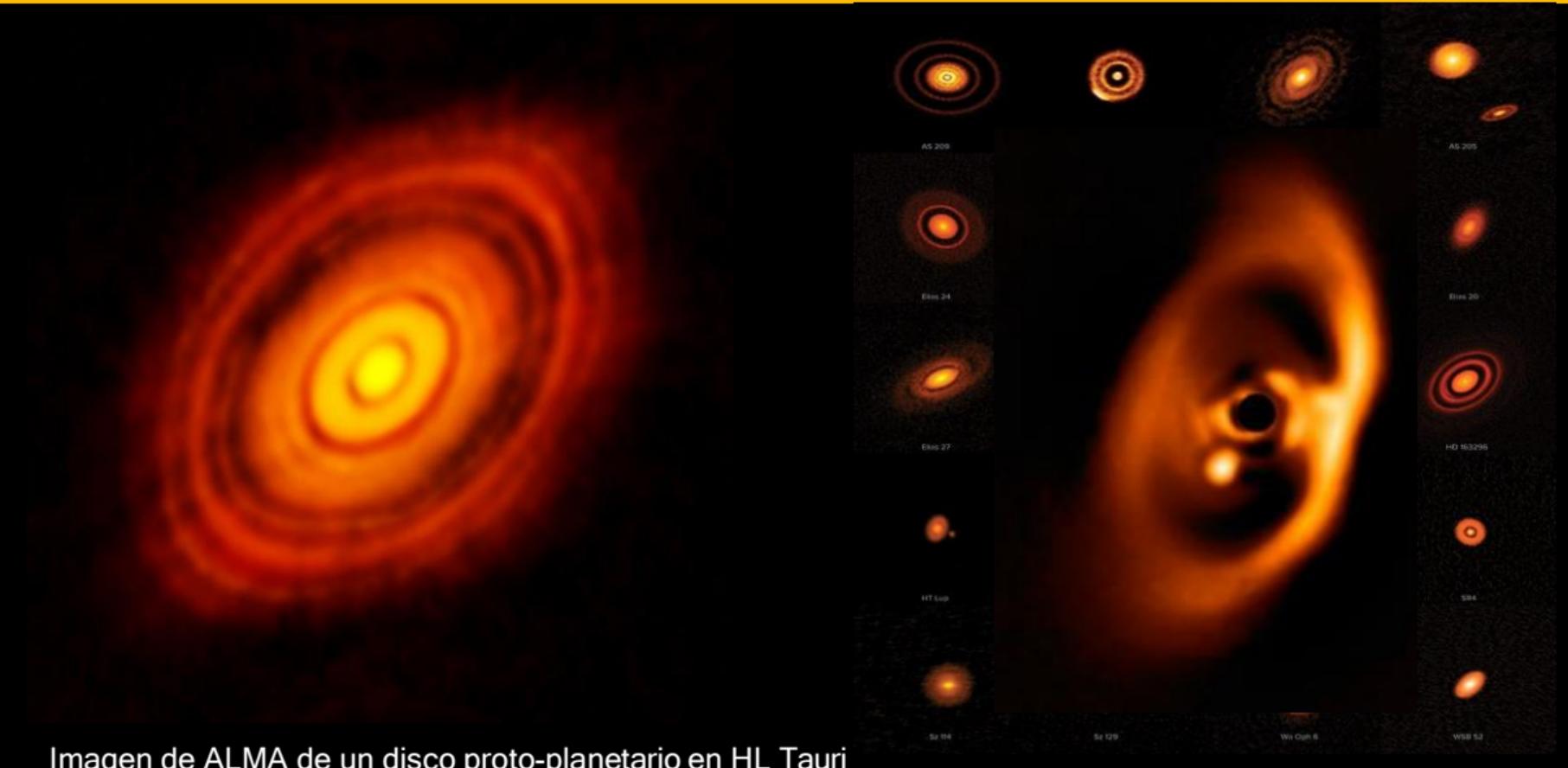
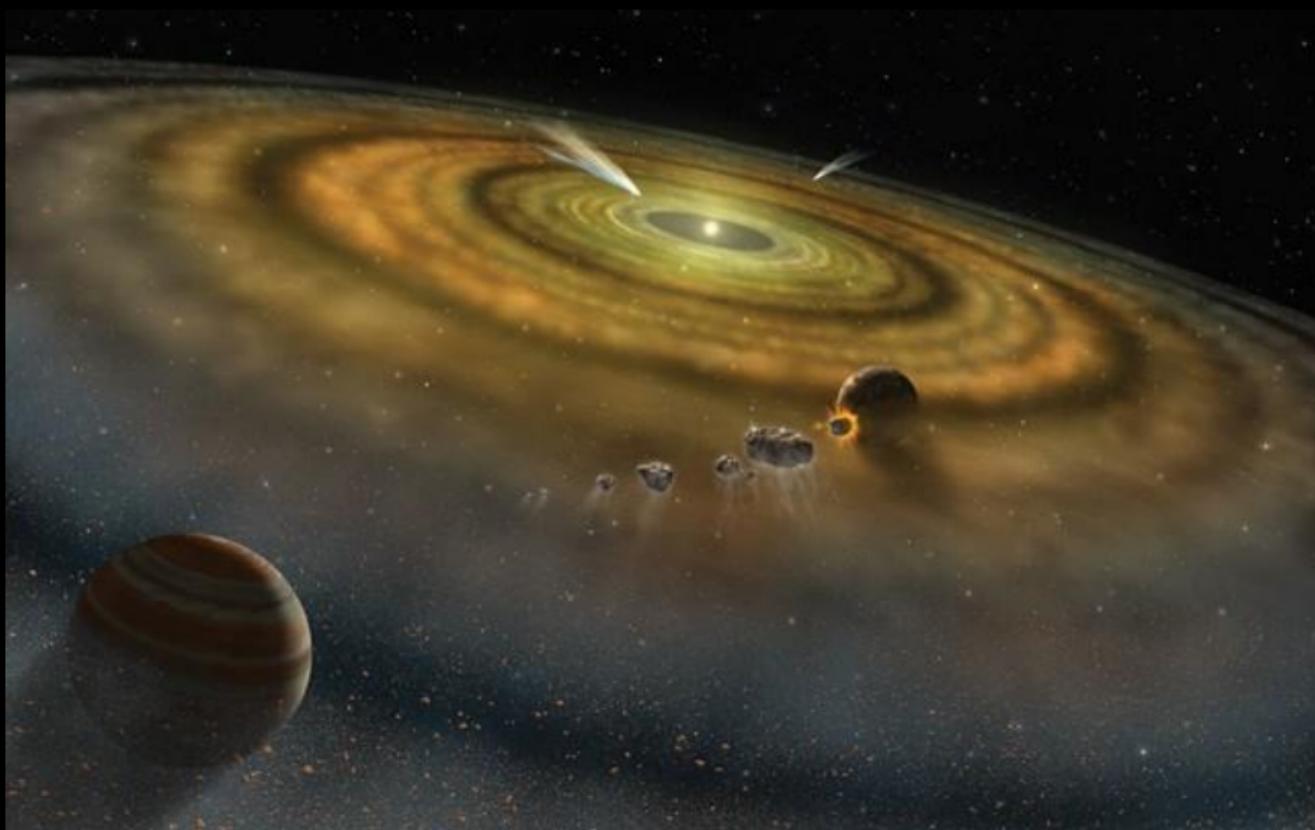


Imagen de ALMA de un disco proto-planetario en HL Tauri

Formación del sistema solar

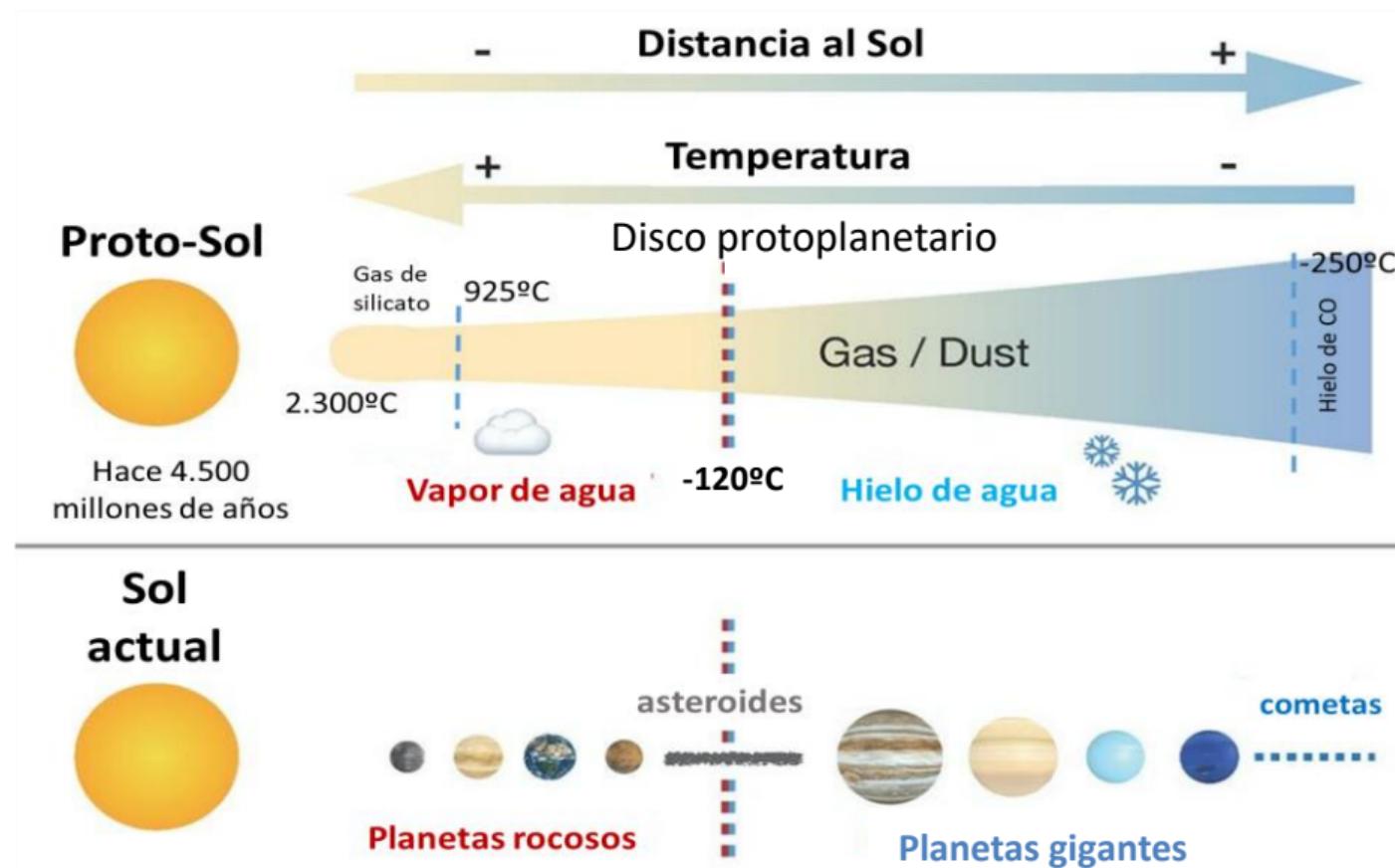


Formación del sistema solar



polvo+gas → planetesimales → protoplanetas → planetas

Formación del sistema solar



Formación del sistema solar



Cerca del proto-Sol



Se forman gotas y polvo

Lejos del proto-Sol

Formación del sistema solar

CONDENSACIÓN

Disco protoplanetario

Hidrógeno y helio
+1% otros elementos

Miles de °C

GAS

OXIDOS

silicatos
metal
sulfuro

HIELOS

agua
metano
amoníaco

monóxido de carbono
cianohídrico
nitrógeno
etano, neón, ...

Compuestos orgánicos

Enfriamiento (en el espacio y el tiempo)

2.300°C GAS

1.235°C óxidos refractarios (aluminio, calcio, titanio), uranio, torio, tierras raras

1.025°C hierro, níquel, cobalto, cromo,...

925°C enstatita (silicato de magnesio)

825°C olivino, óxidos de hierro

725°C feldespatos

400°C sulfuro de hierro (troilita)

280° a 150°C Silicatos con agua (OH)

10 a -70°C componentes volátiles (CHONPS, orgánicos)

-100°C Hielo de agua

-125°C "Hielos" de metano y amoníaco

-250°C condensación de N, Ne, etc.

Progresivo enfriamiento del disco proto-planetario

Condensación y deposición de partículas líquidas y sólidas (polvillo)

Formación del sistema solar



De polvo



A planeta



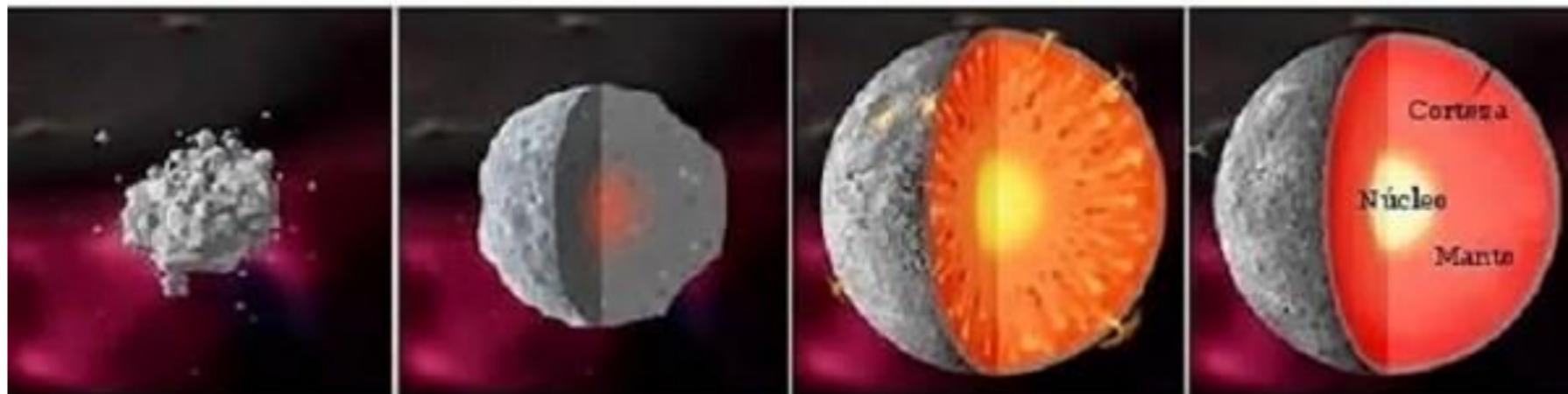
Formación de los planetas: principales procesos



- 1 Condensaciones
- 2 Aglutinaciones
- 3 Colisiones
- 4 Diferenciaciones
- 5 Vulcanismo (magmático y/o crio-vulcanismo)

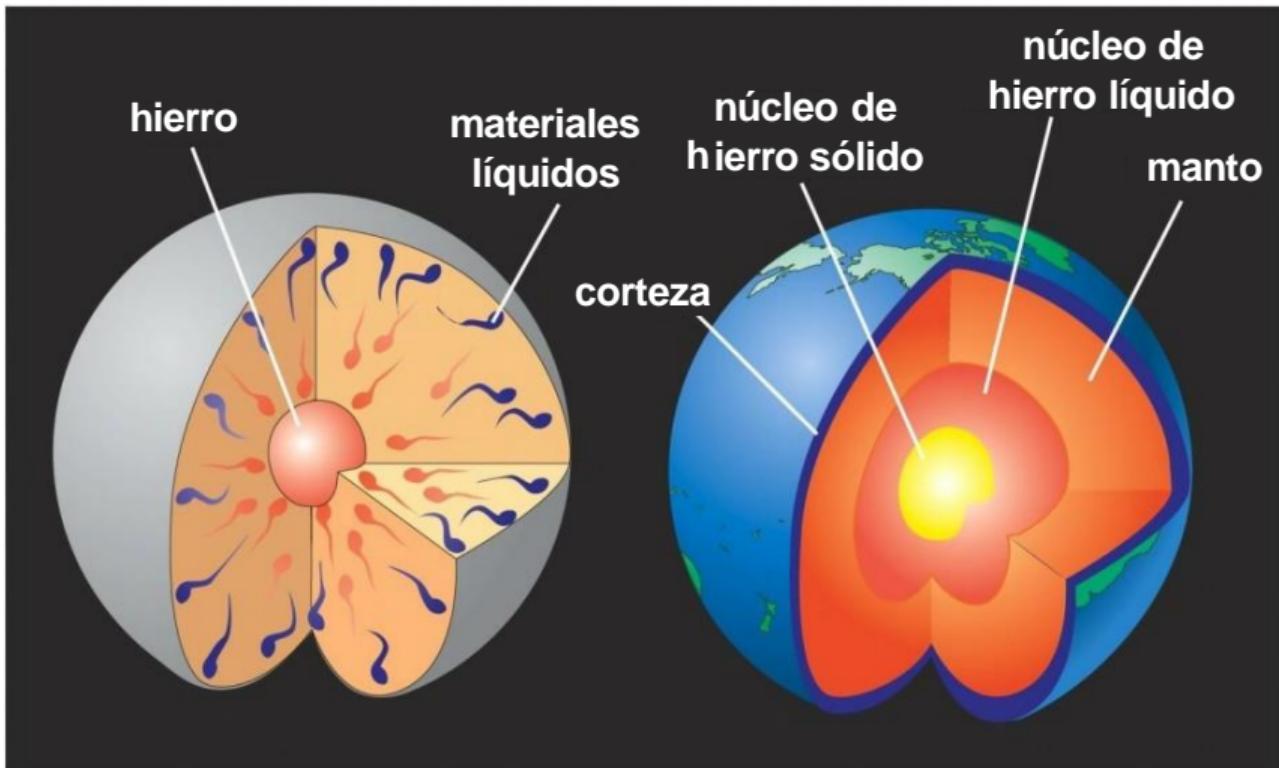


Mecanismo de diferenciación planetaria



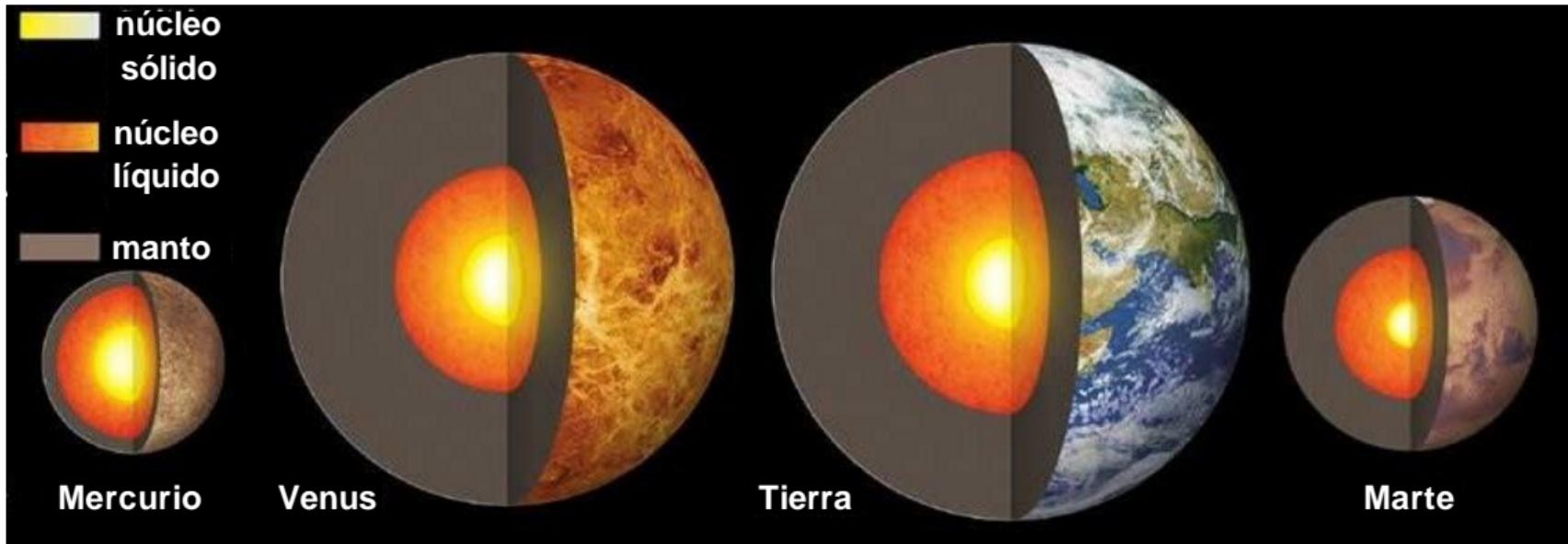
- La **diferenciación planetaria** se produce cuando los componentes de un cuerpo planetario se separan y diferencian desarrollando capas de composición diferente.
 - Ello es debido a los diferentes puntos de fusión y solidificación de los componentes originales, sus diferentes densidades y sus afinidades químicas.
- Los materiales más densos del cuerpo planetario, como pueden ser los metales, se hunden hacia el centro, mientras que los materiales menos densos, como los silicatos, suben a la superficie.
- Este proceso tiende a crear un **núcleo** interior y un **manto** exterior.

Mecanismo de diferenciación planetaria



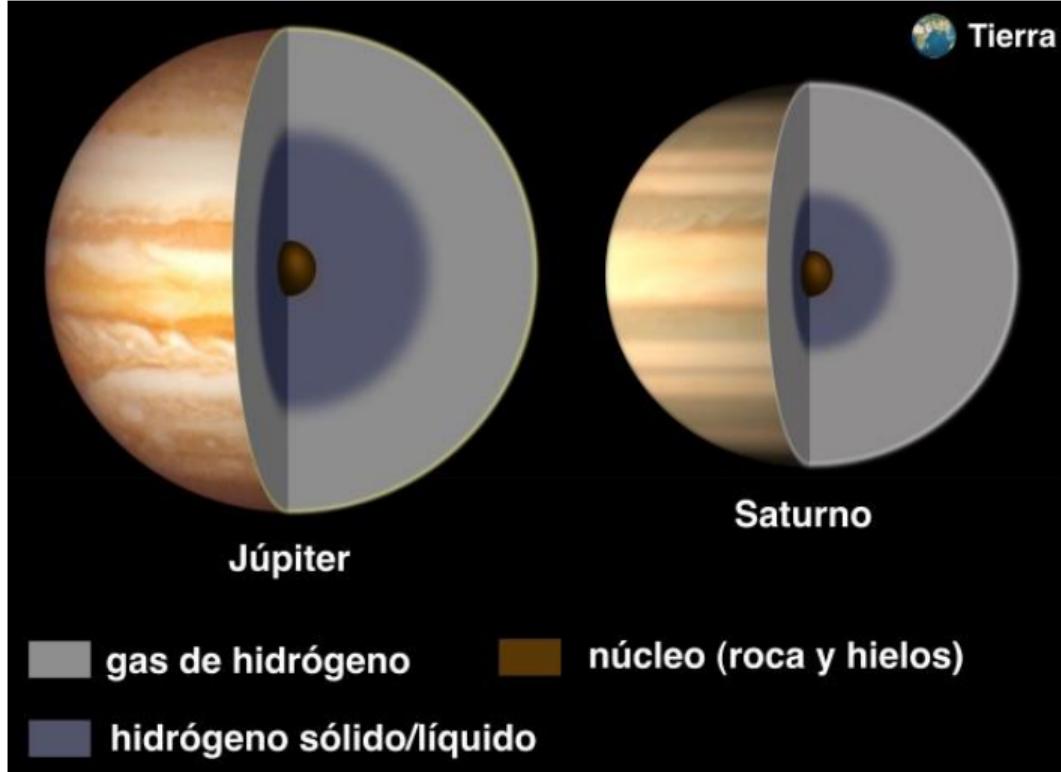
- El proceso de diferenciación planetaria se ha producido en: los planetas, en planetas enanos, en algunos asteroides grandes y en algunos satélites naturales.

Estructura interna: planetas rocosos



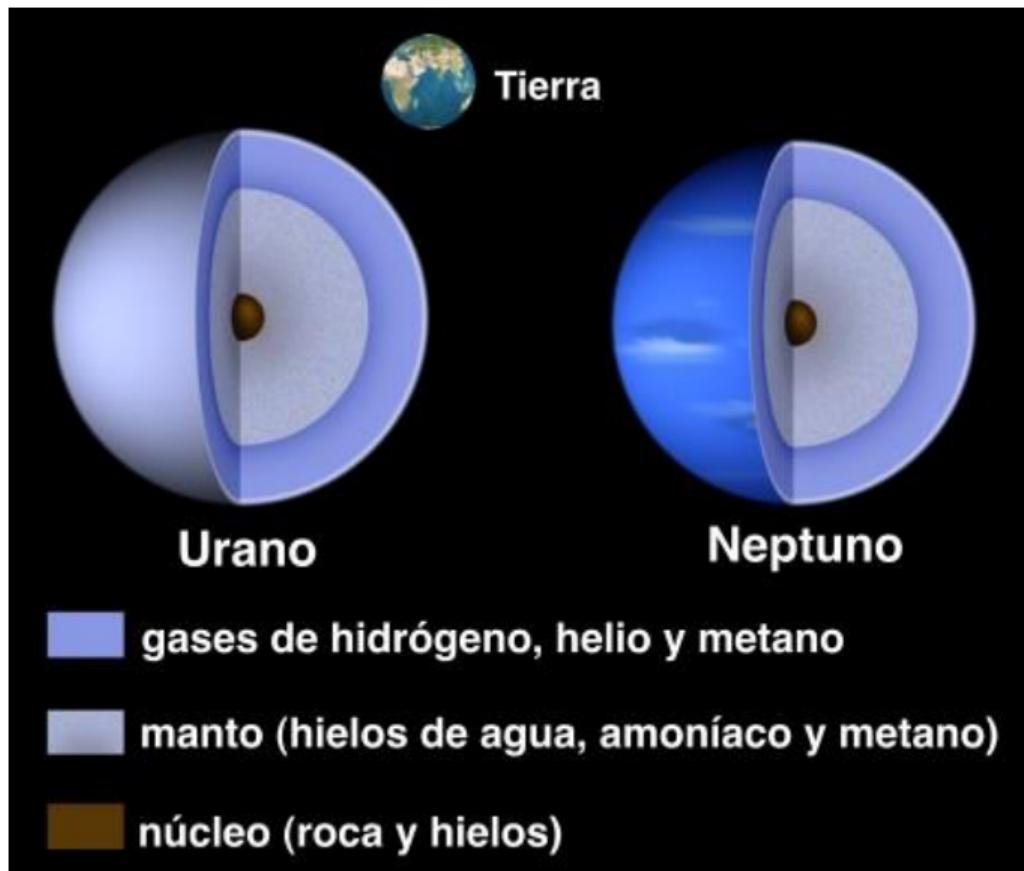
- Todos planetas rocosos tienen en su interior un ncleo metlico cubierto por una capa de rocas (silicatos) que forman el manto, y una corteza de silicatos con una superficie bien definida de separaci6n con la atm6sfera.
- Las complejas interacciones ncleo-manto-corteza-atm6sfera dependen en gran parte de la velocidad de enfriamiento del calor interno.

Estructura interna: planetas "gaseosos" (Júpiter y Saturno)



- Núcleo metálico/rocoso
- Manto profundo de hidrógeno con presiones y temperaturas tan altas que el hidrógeno es sólido/líquido y se comporta eléctricamente como metal.
- La capa más externa está compuesta de hidrógeno líquido a alta presión y temperatura (supercrítico), con corrientes convectivas y lluvias de helio y diamantes.
- Compleja transición gradual a una atmósfera de hidrógeno y helio, con trazas de metano, amoníaco, compuestos orgánicos y sulfurados.
- Los primeros planetas que se formaron en el disco protoplanetario

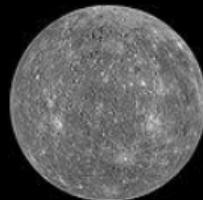
Estructura interna: planetas "helados" (Urano y Neptuno)



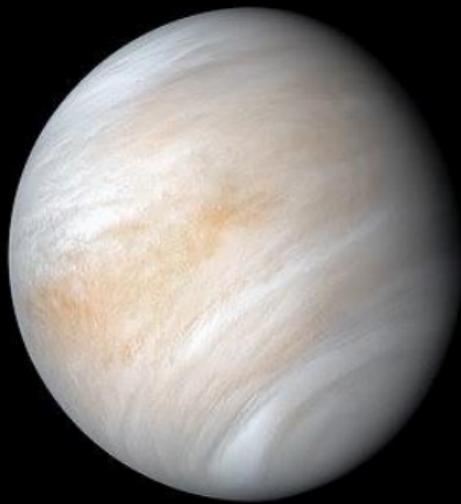
- Núcleo metálico/rocoso, de alta presión y temperatura.
- Manto de “hielos” de agua, amoníaco y metano, de alta presión y temperatura (fluido supercrítico y agua superiónica)
- Importante conductividad eléctrica (océano agua-amoníaco) y corrientes convectivas. Lluvias de diamantes.
- Transición gradual a una atmósfera de hidrógeno y helio, trazas de amoníaco y compuestos orgánicos y sulfurados.

3 Planetas rocosos

Los planetas rocosos



Mercurio



Venus



Tierra

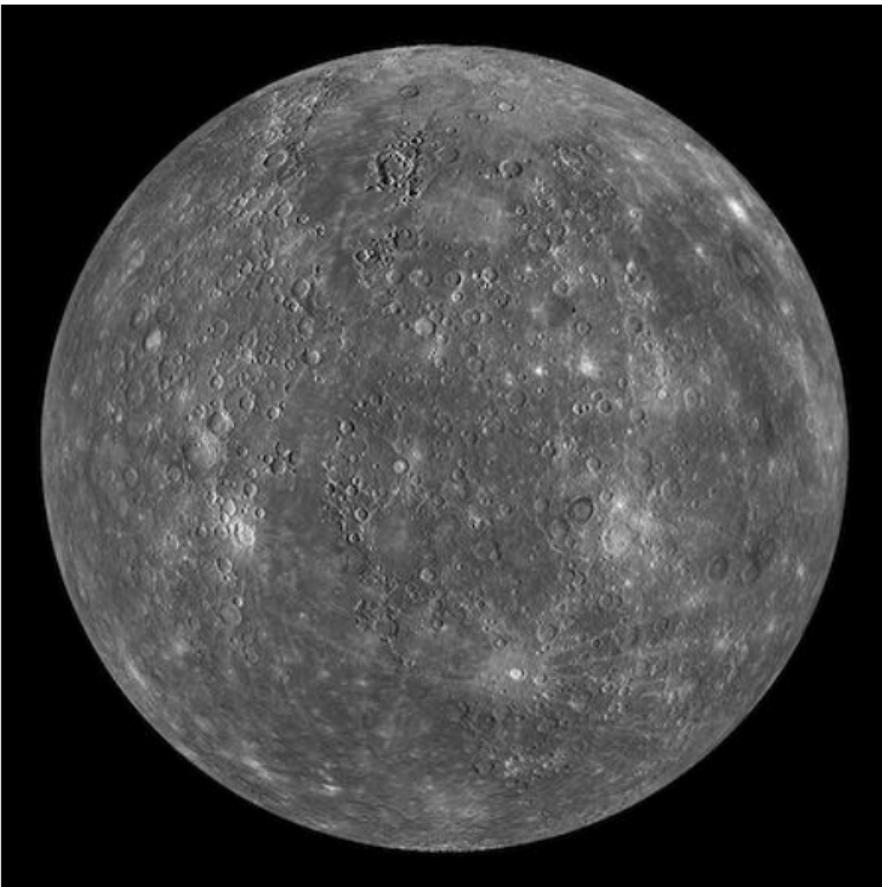


Marte

3 Planetas rocosos

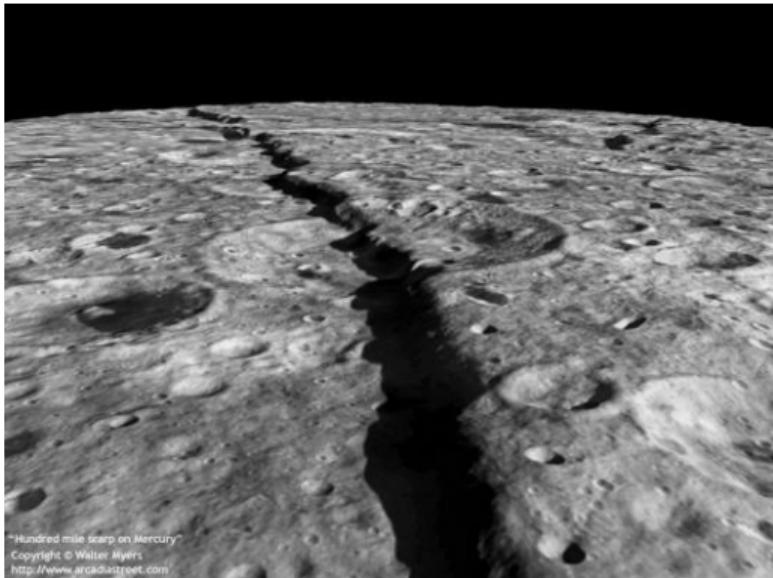
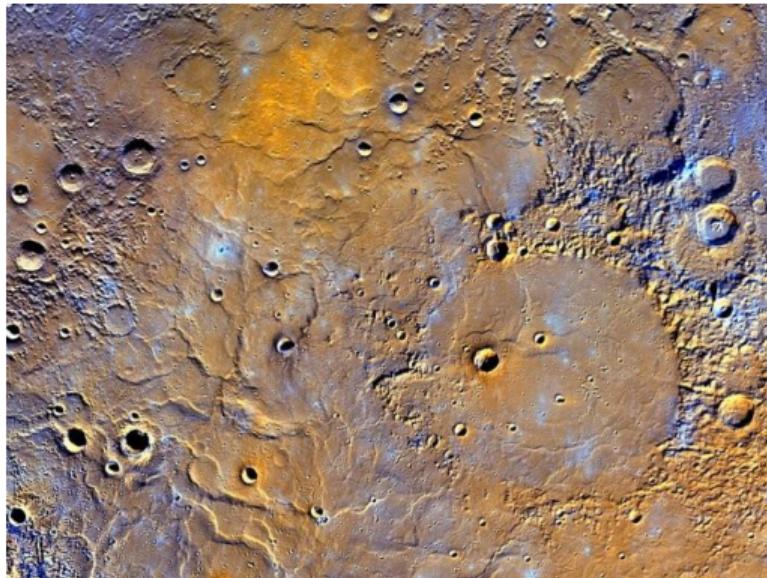
3.1 Mercurio

Mercurio: aspecto general



- Planeta más cercano al Sol
- Atmósfera extremadamente tenue
- Grandes variaciones de temperatura (entre 430°C y -180°C)
- Planeta rocoso muy denso (núcleo metálico muy grande proporcionalmente a su tamaño total)
- La superficie Mercurio tiene un aspecto muy similar a la Luna (pocos cambios geológicos)

La superficie de Mercurio



- Abundantes cráteres de impacto
- Grandes planicies de extensas inundaciones de lava
- Escarpes de varios miles de kilómetros que se formaron al enfriarse y contraerse la corteza.
- Algunos cráteres cerca de las zonas polares contienen hielo de agua

3 Planetas rocosos

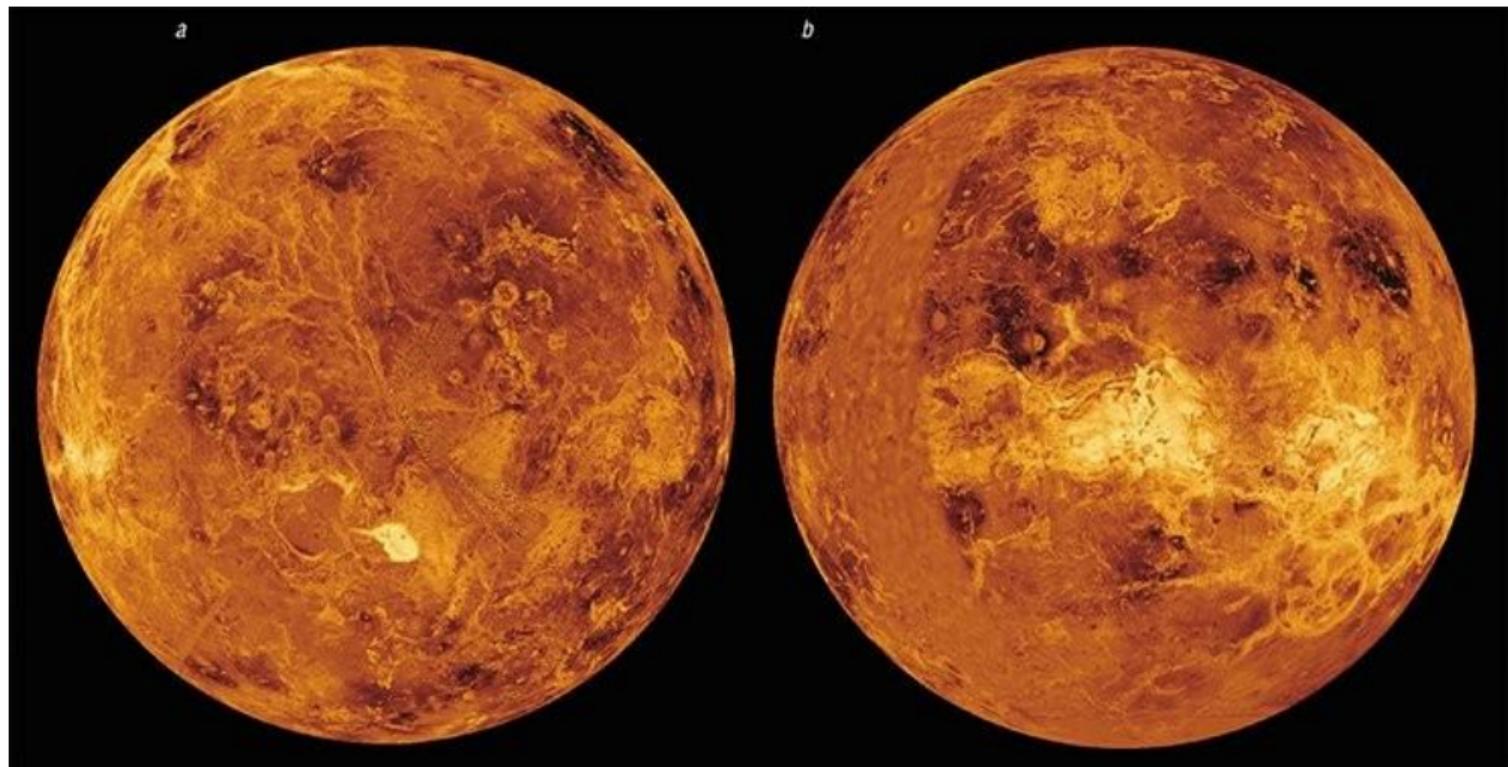
3.2 Venus

Venus y su atmósfera



- Es el planeta mas caliente del sistema solar (400°), efecto invernadero.
- Venus tiene una atmósfera muy densa compuesta de dióxido de carbono con nubes de ácido sulfúrico.
- La presión atmosférica en su superficie es 100 veces mayor que la de la Tierra
- La superficie se estudia con ondas de radio y micro-ondas

La superficie de Venus



- Posee una superficie rocosa con montañas, valles y planicies con centenares de volcanes y unos pocos cráteres de impacto (cambios geológicos recientes).

3 Planetas rocosos

3.3 Tierra

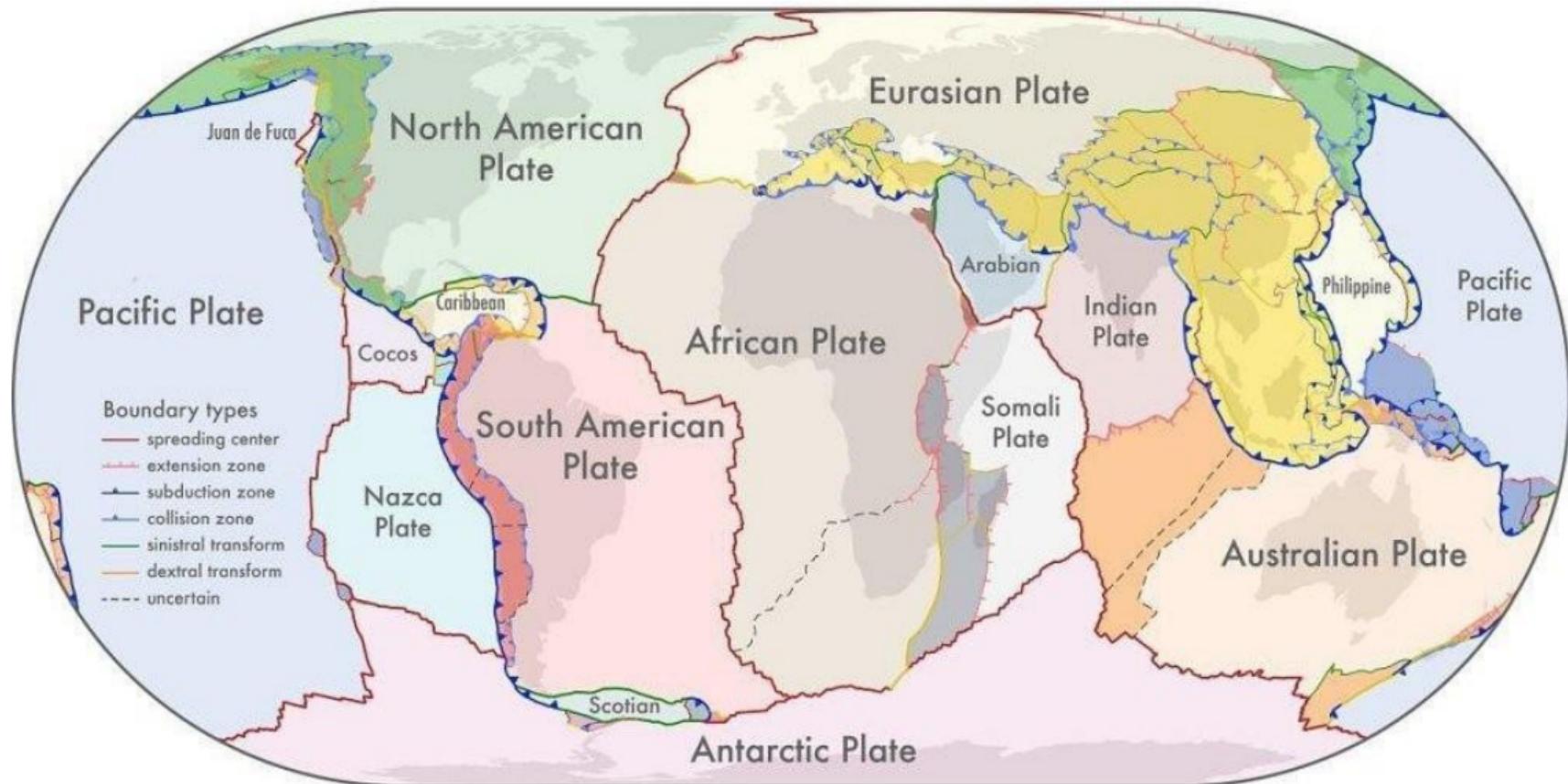
La Tierra y su Luna



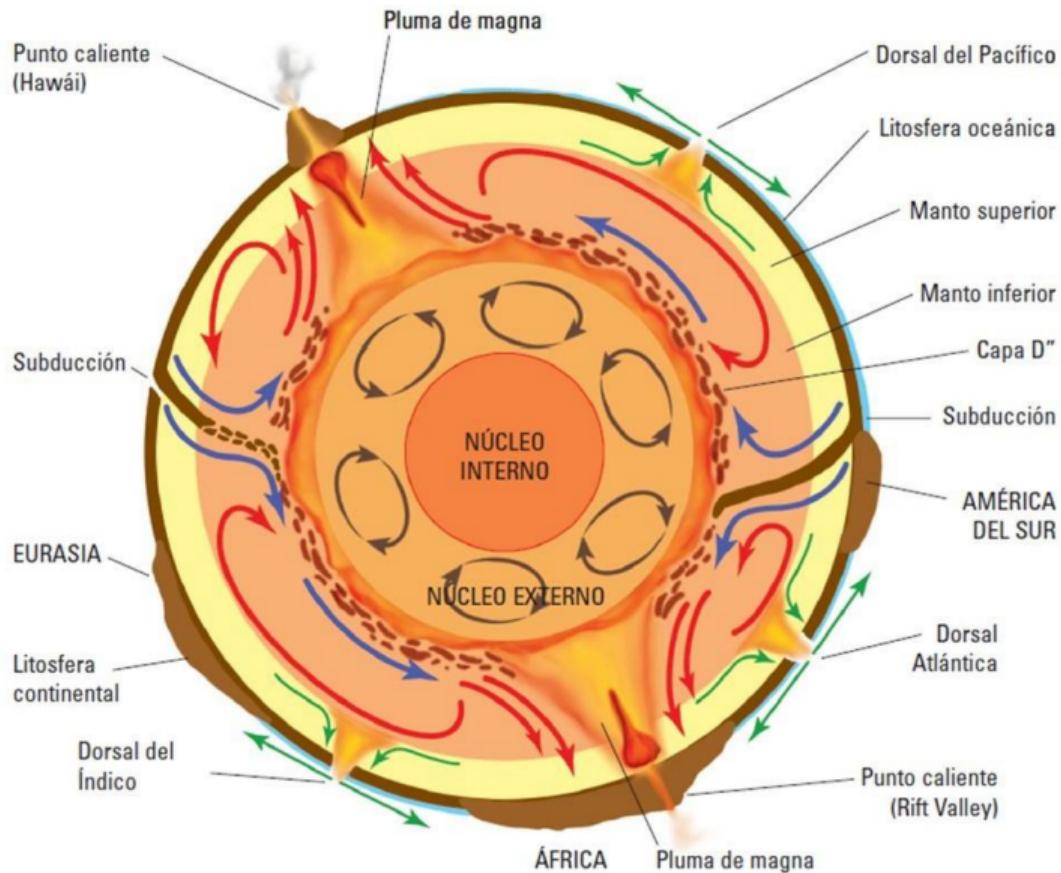
La Tierra y su superficie



La Tierra: tectónica de placas



La Tierra: la máquina global



La Luna



- La Luna es relativamente grande comparada con la Tierra.
- Se formó por impacto(s) de proto-planeta(s) con la Tierra en formación.
- Extensamente cubierta de cráteres de impacto de diferente tamaño y por grandes planicies basálticas llamadas "maria".
- La Luna posee una atmósfera extremadamente tenue
- Se ha comprobado la existencia de agua en la Luna

Formación de la Luna: teoría del gran impacto



3 Planetas rocosos

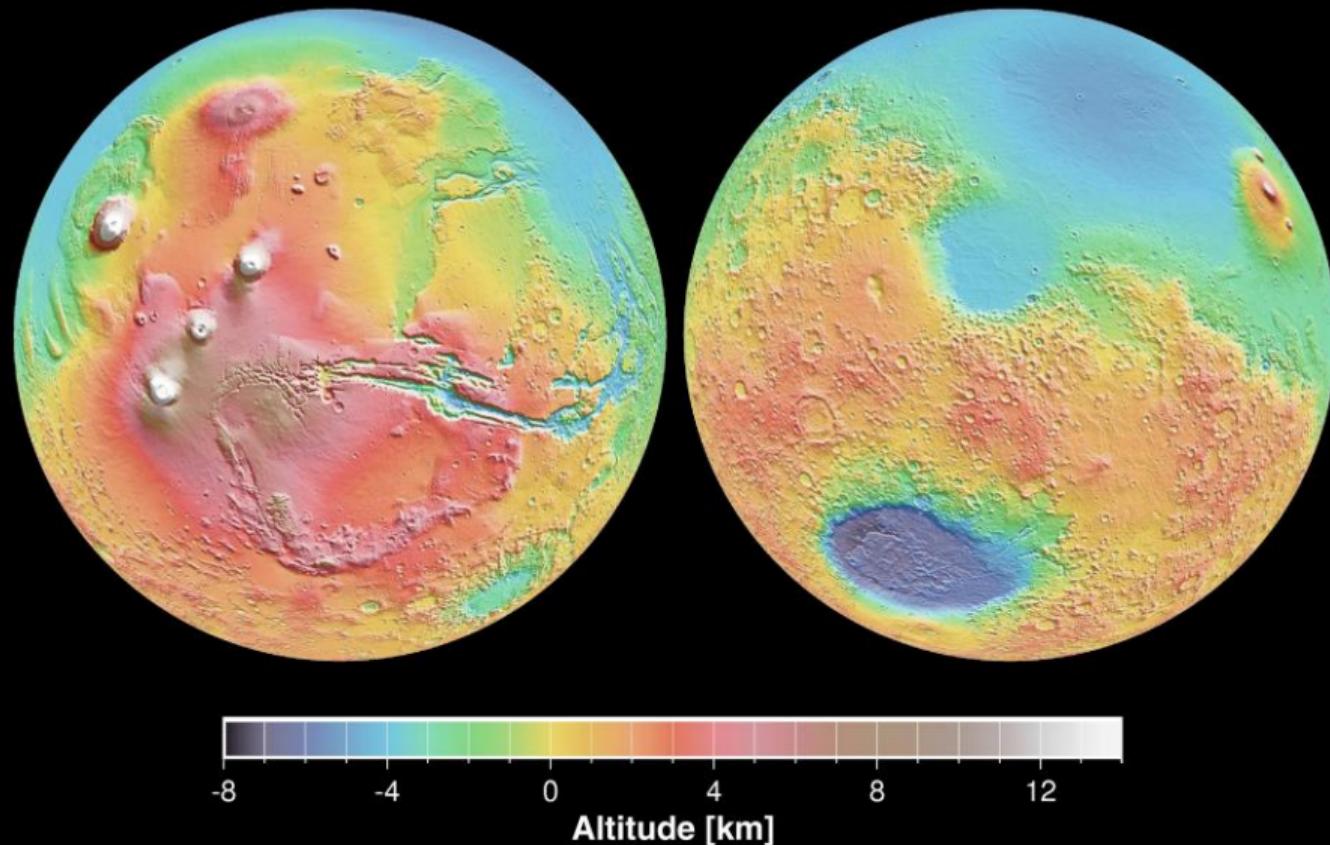
3.4 Marte

Marte

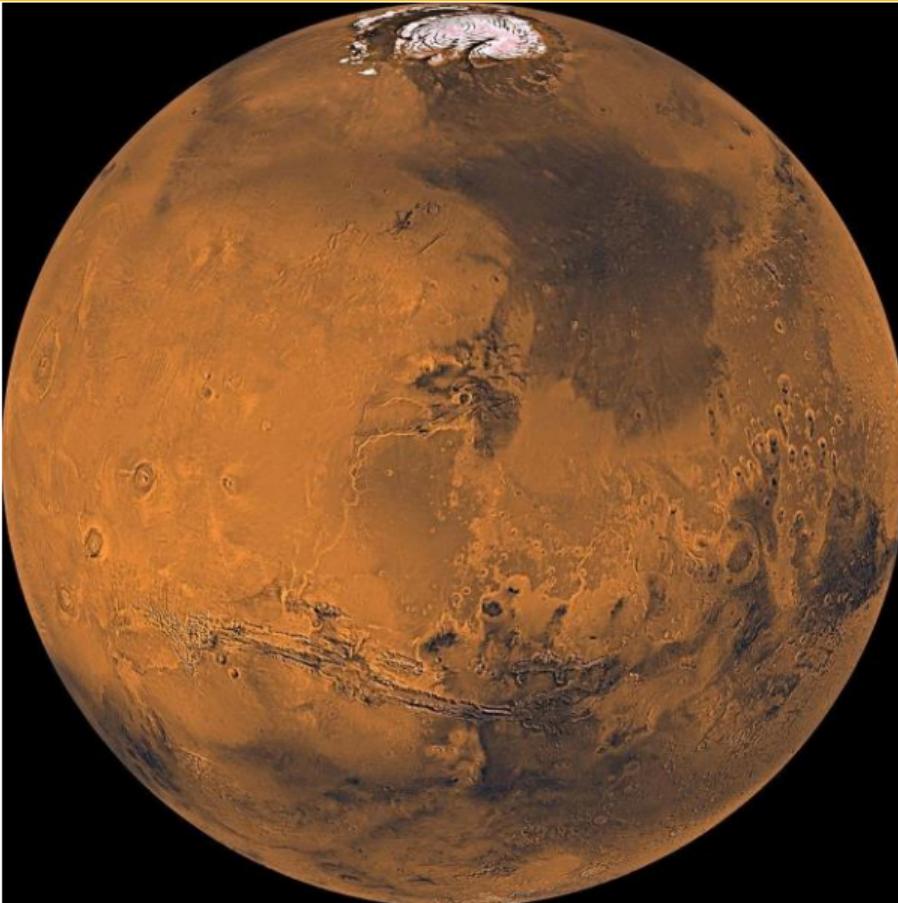


- Marte tiene casi la mitad del tamaño de la Tierra.
- Es un planeta frío, con temperaturas medias de -63°C.
- Actualmente solo tiene una tenue atmósfera de CO₂.
 - La atmósfera fue muy relevante en el pasado (pero la perdió debido a su pequeño tamaño y la extinción de su campo magnético).

Marte y su superficie



Aqua en Marte



- Marte tiene casquetes de hielo de agua en los polos
- Actualmente Marte no posee agua líquida en su superficie.
- En el pasado Marte fue más caliente y poseyó una atmósfera gruesa y grandes cantidades de agua líquida

Lunas de Marte

Phobos



Deimos



- Probablemente son asteroides capturados gravitatoriamente por Marte

4 Planetas gaseosos y helados

Planetas gaseosos y helados

Sol

Planetas gigantes

“gaseosos”

“helados”



Júpiter



Saturno



Urano

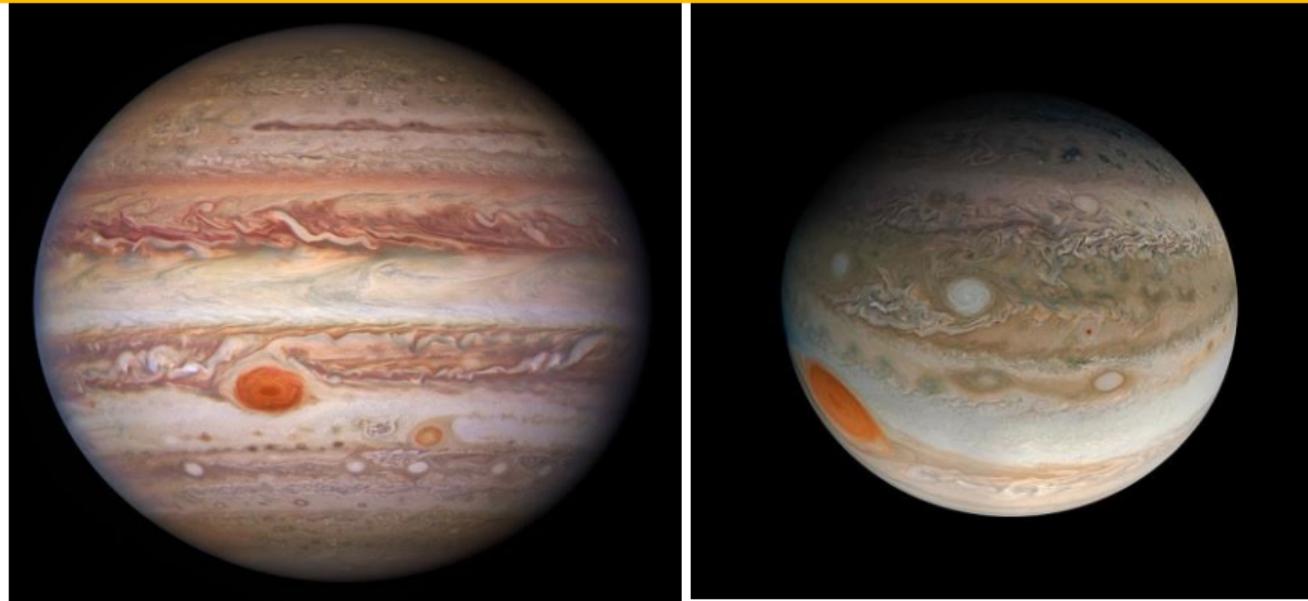


Neptuno

4 Planetas gaseosos y helados

4.1 Júpiter

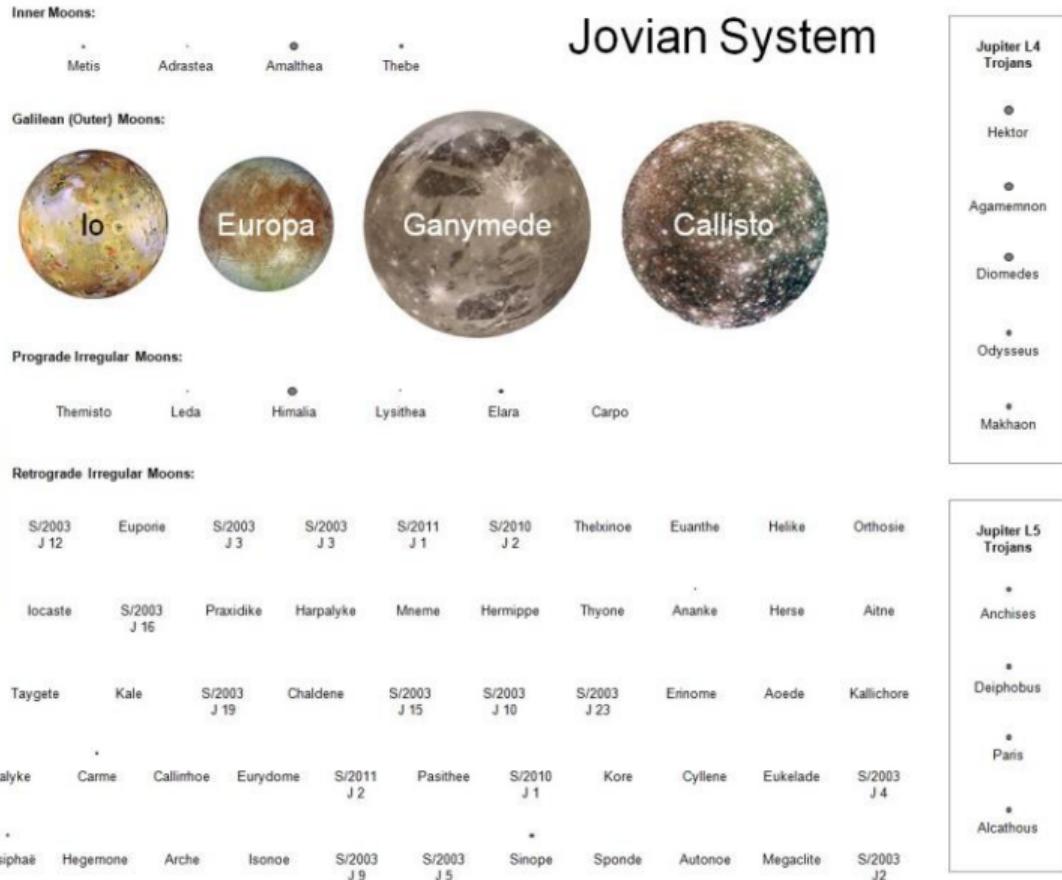
Júpiter y su atmósfera



- Atmósfera muy gruesa y turbulenta gradualmente pasando a un manto supercrítico
- Hidrógeno gaseoso coloreado por amoníaco, metano, compuestos orgánicos sulfurados.
- Atmósfera interna con hidrógeno líquido; lluvia de helio y diamantes.
- Gran Mancha Roja: huracán persistente (al menos desde hace 350 años)

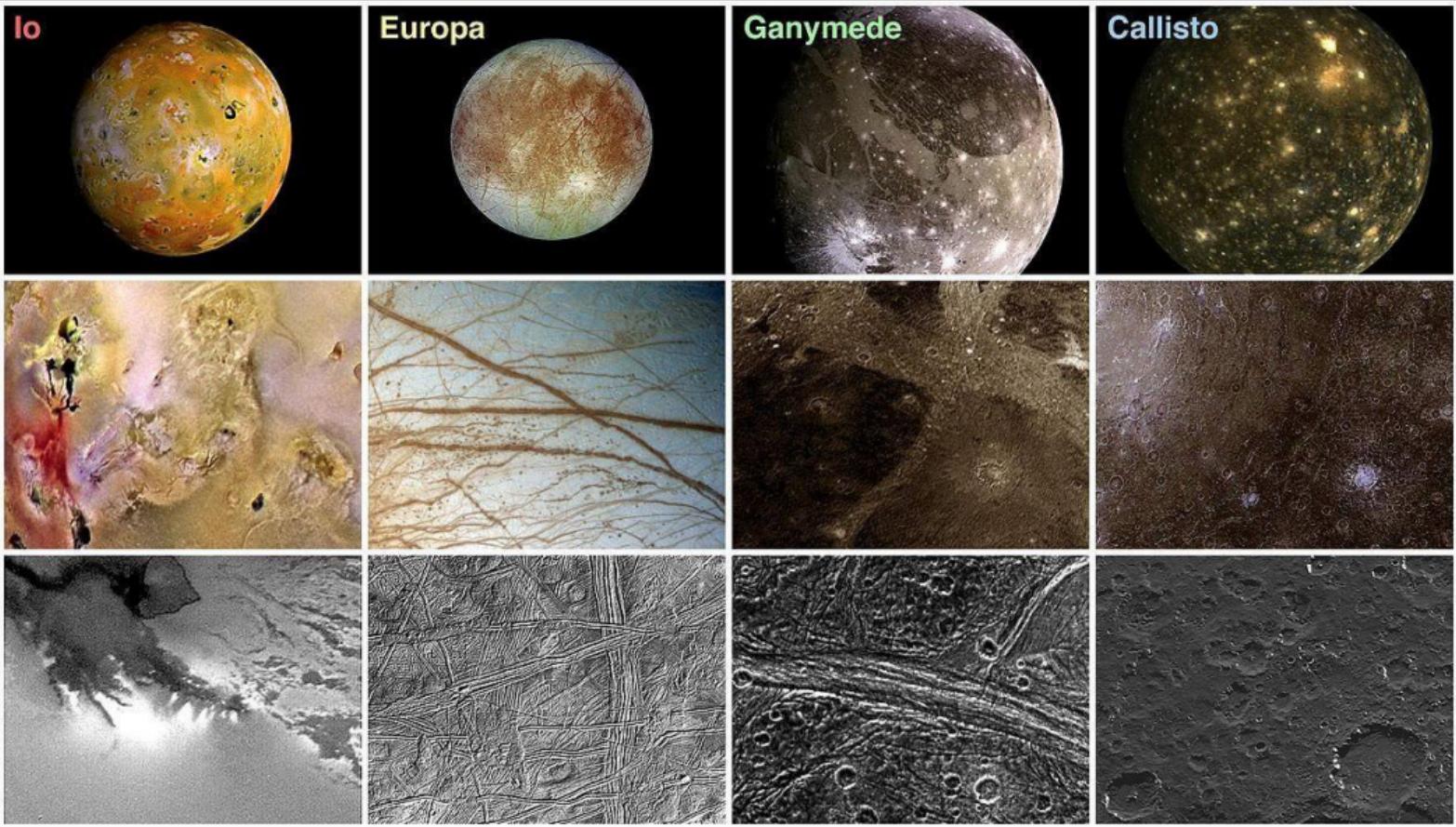
Lunas de Júpiter

Jupiter



- Júpiter tiene 92 lunas
- Lunas galileanas de Júpiter: Hay 4 lunas son mucho más grandes que el resto
 - Io
 - Europa
 - Ganímedes
 - Callisto

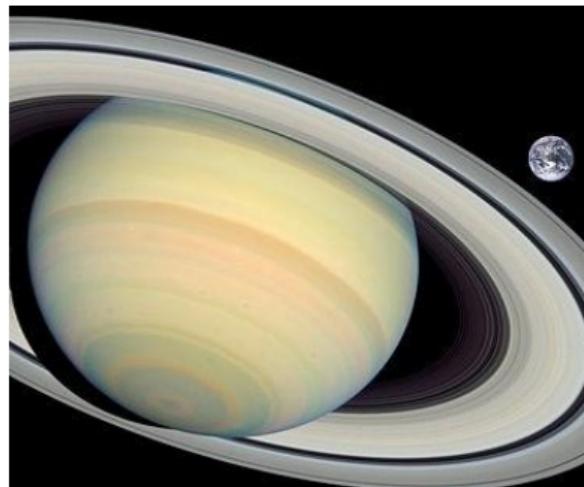
Las lunas galileanas de Júpiter



4 Planetas gaseosos y helados

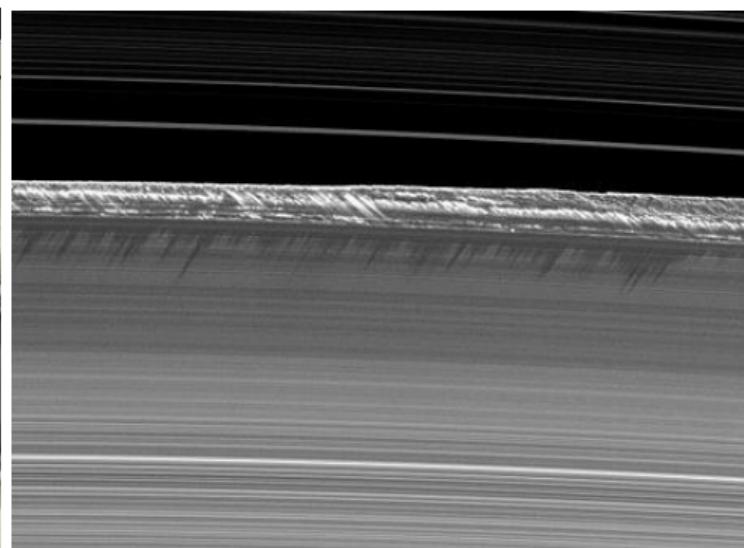
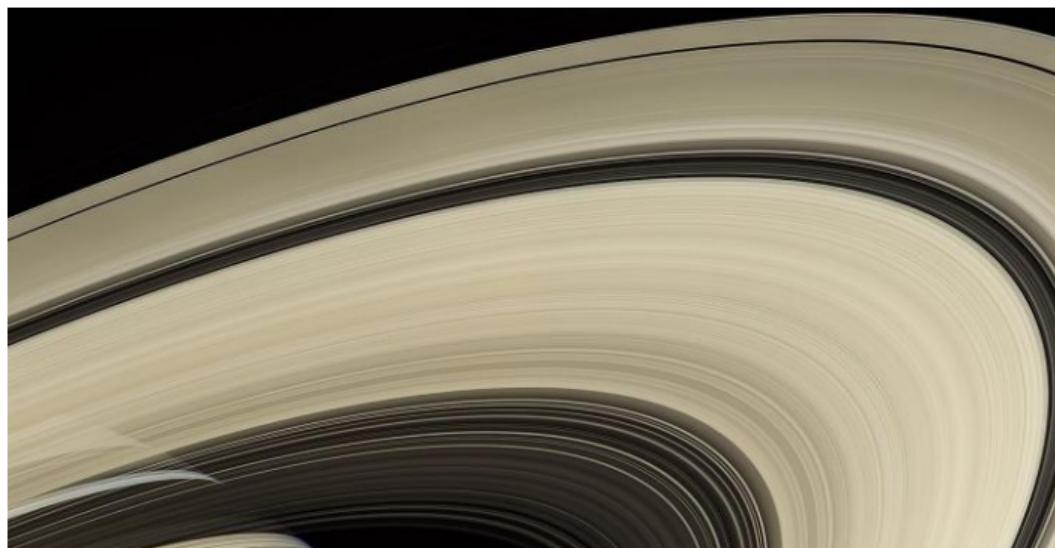
4.2 Saturno

Saturno su atmósfera y sus anillos



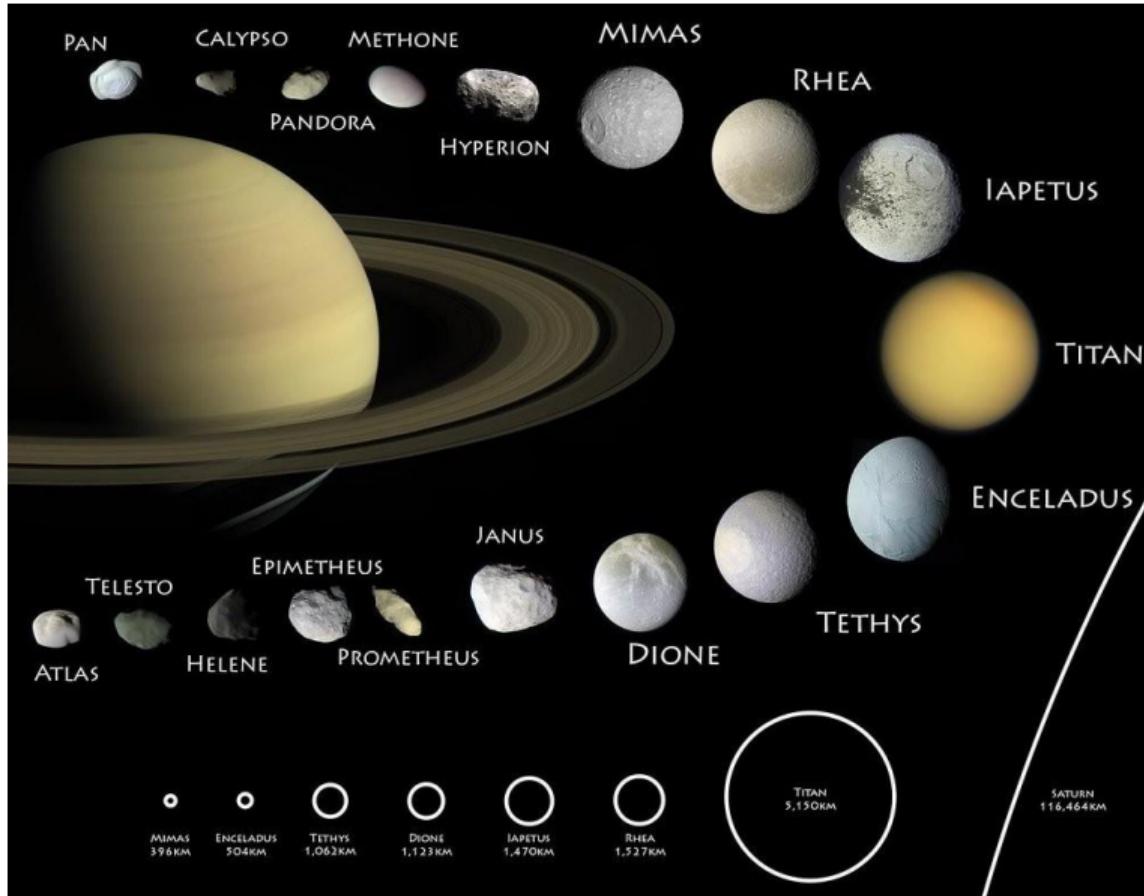
- La atmósfera es parecida a la de Júpiter, pero menos turbulenta.
- Los **anillos** están formados por partículas de hielo (pocos cm. a pocos m.).
 - Algunas lunas generan separaciones entre los anillos, la separación más grande es la **división de Cassini**
 - El diámetro de los anillos es de 250.000km (2/3 de la distancia Tierra-Luna)

Los anillos de Saturno



- Cada anillo mayor está compuesto de muchos mini-anillos
- Los anillos son muy finos: en promedio tienen solo 10 metros de espesor!
- Los anillos están siendo renovados continuamente.

Las lunas de Saturno: posee 83 lunas

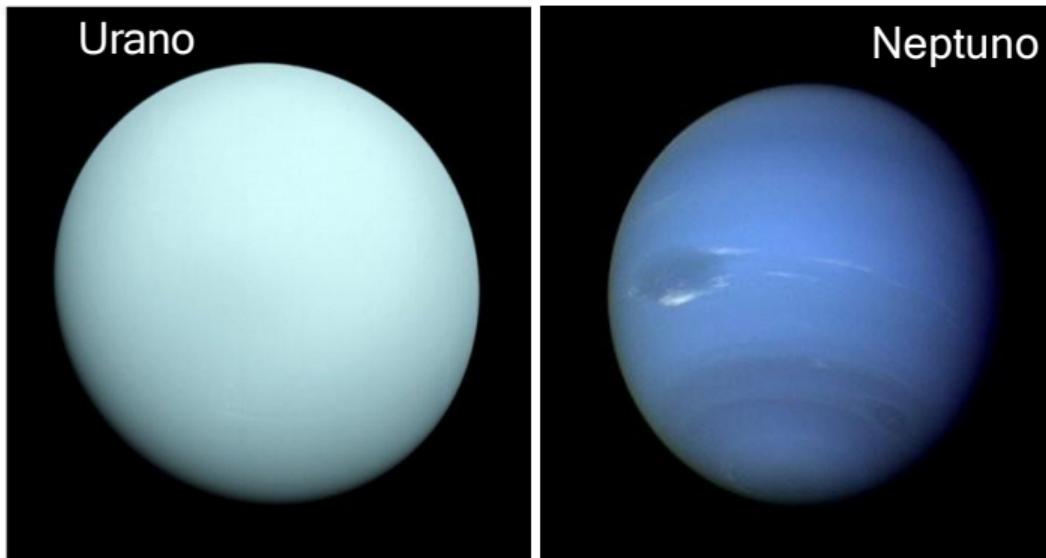


- Titán es mayor que Mercurio, tiene una densa atmósfera y lagos y ríos de metano
- Encélado posee un océano bajo su superficie y presenta erupciones de agua en forma de geysers.
- Encélado y/o Titán podrían albergar algún tipo de vida

4 Planetas gaseosos y helados

4.3 Urano y Neptuno

Urano y Neptuno: características



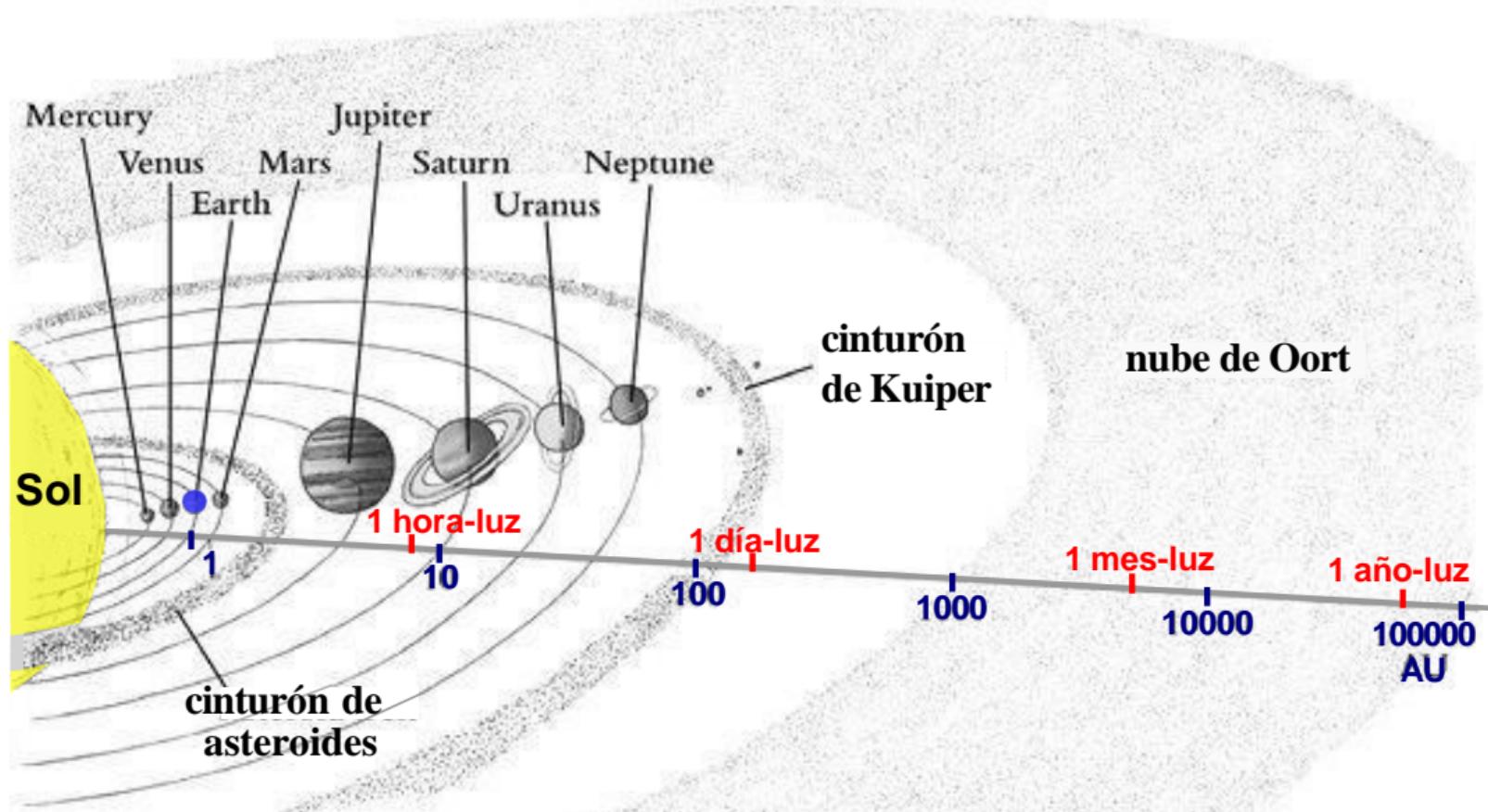
- Tienen anillos (igual que Saturno y Júpiter) y composiciones similares
- Tonos azulados debidos a trazas de metano
- Neptuno irradia mucho mas calor interno que el que recibe del Sol, con una atmósfera muy turbulenta y vientos de hasta 2100 km/h (mucho más que en Júpiter)
- Urano irradia menos energía interna; tiene la atmósfera planetaria más fría del sistema solar.

Las lunas de Urano y Neptuno

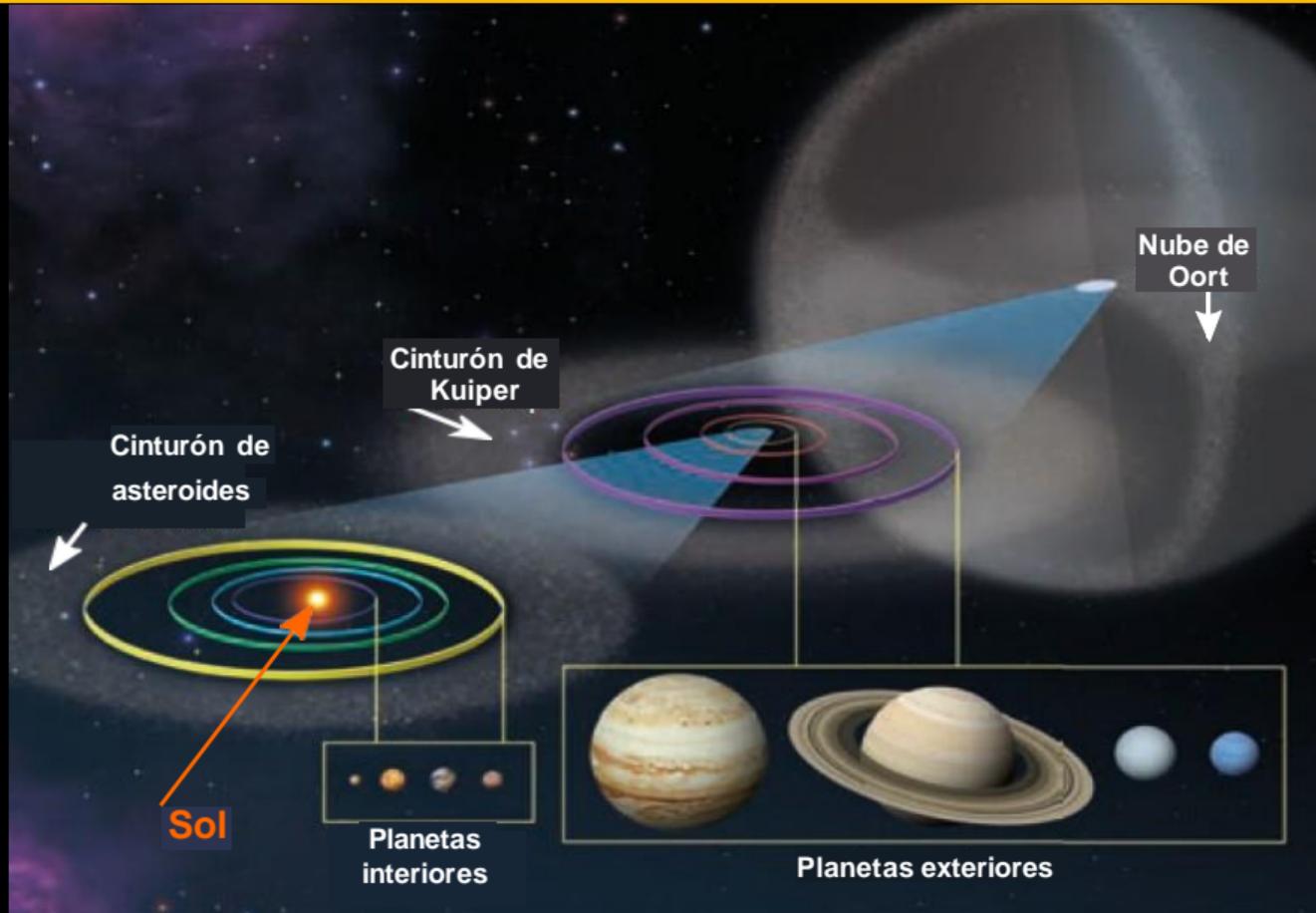
- | Urano | Neptuno |
|----------------------------|----------------------------|
| Puck | Proteus |
| Miranda | |
| Ariel | Triton |
| Umbriel | Nereid |
| Titania | + al menos
11 lunas más |
| Oberon | |
| + al menos
21 lunas más | |
- Tienen muchas lunas con importante crio-vulcanismo
 - A diagram showing the Earth's Moon on the left, followed by a row of smaller, dark, irregularly shaped bodies representing the outer solar system's major moons. From left to right, they are labeled: Miranda, Ariel, Umbriel, Titania, Oberon, Naiad, Proteus, and Triton. The Earth is shown on the right, with its blue oceans and green continents visible.
 - Tritón es retrógrado y probablemente un objeto transneptuniano capturado (mayor que Plutón, pero con cierto parecido).
 - La corteza es de hielo de nitrógeno y de agua, cubriendo un océano subterráneo líquido y muestra actividad geológica reciente.
 - Núcleo metálico/rocoso

5 Objetos pequeños del sistema solar

Estructura general del sistema solar



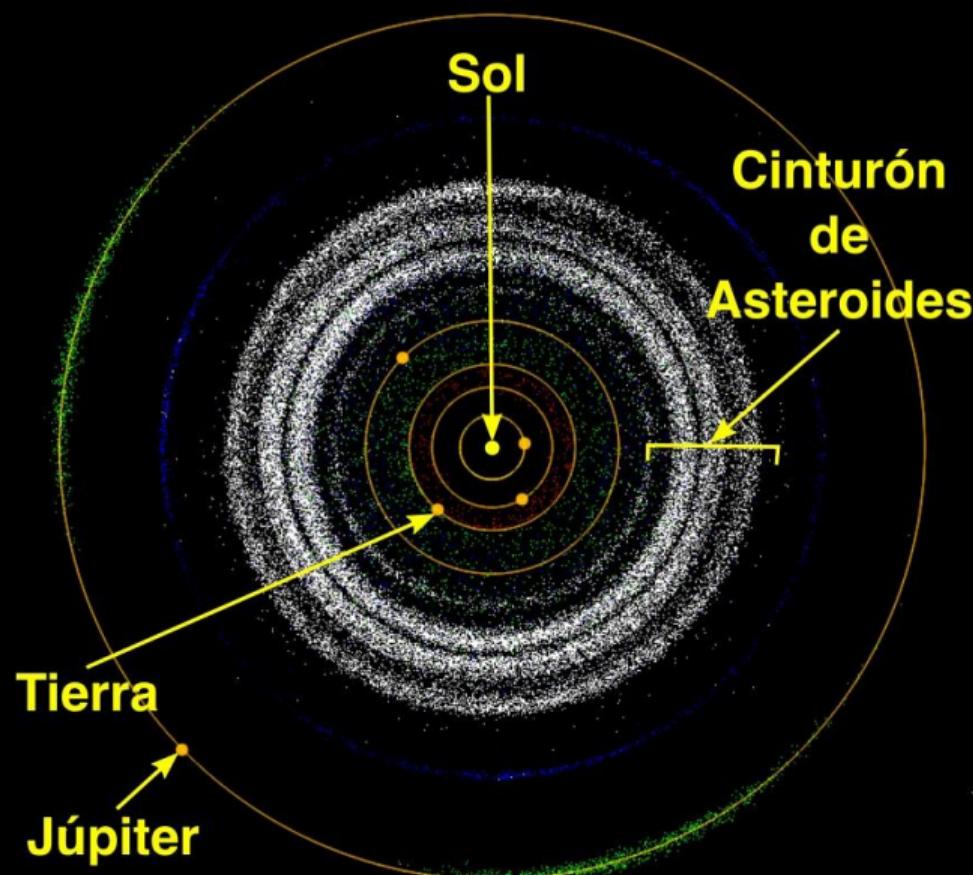
Cinturón de Kuiper y nube de Oort



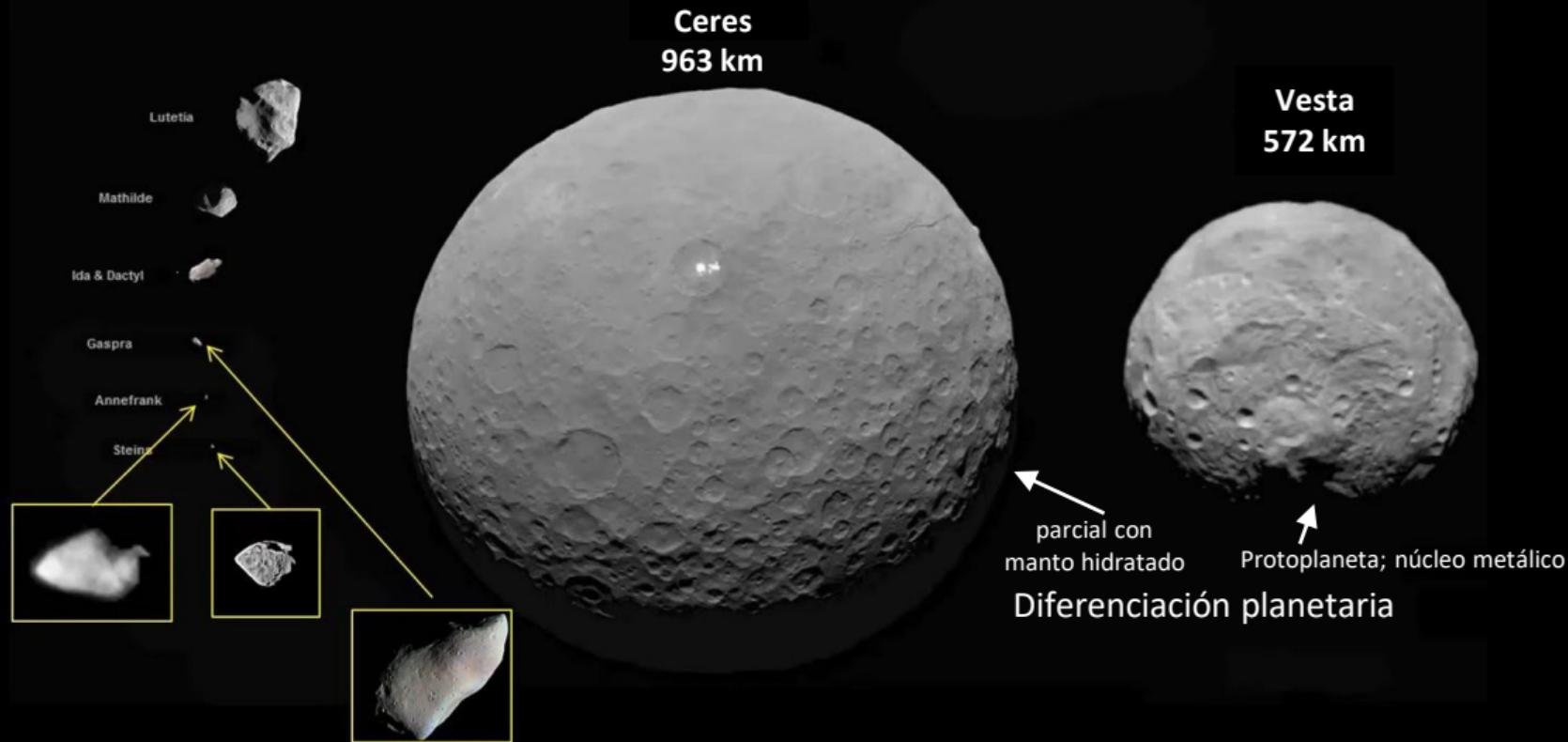
5 Objetos pequeños del sistema solar

5.1 Asteroides

Cinturón de asteroides



Asteroides visitados por misiones espaciales



- 8 asteroides del cinturón principal han sido visitados por misiones espaciales:
- Ceres, Vesta, Lutetia, Mathilde, Ida/Dactyl, Gaspra, Annefrank y Steins

Near Earth Objects (NEOs): algunos ejemplos



433 Eros (17km; NEAR Shoemaker, NASA)



101955 Bennu (0,5km; OSIRIS-REx, NASA)

5 Objetos pequeños del sistema solar

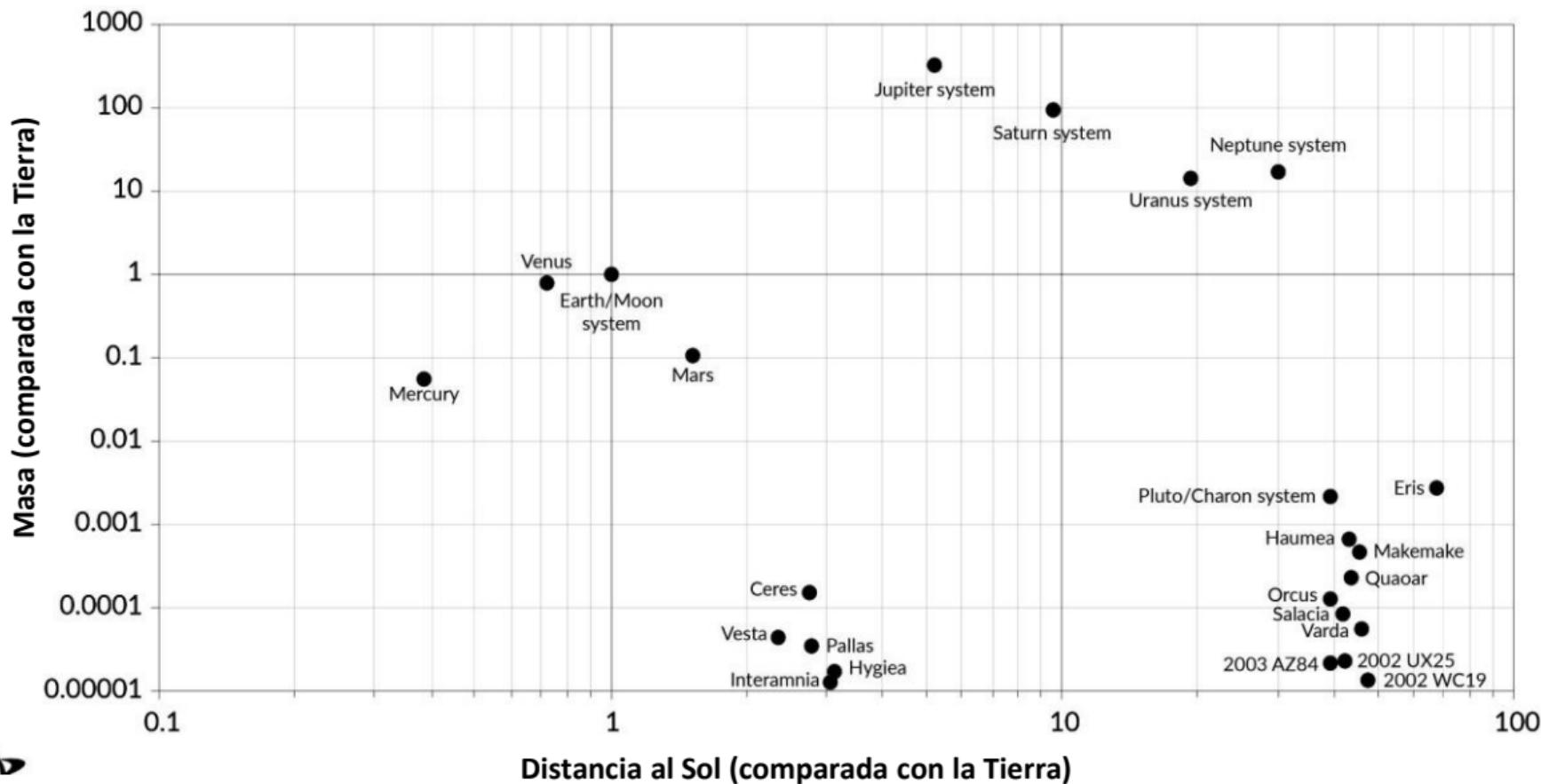
5.2 Objetos transneptunianos (TNOs) y del cinturón de Kuiper

Objetos transneptunianos (TNOs) y del cinturón de Kuiper

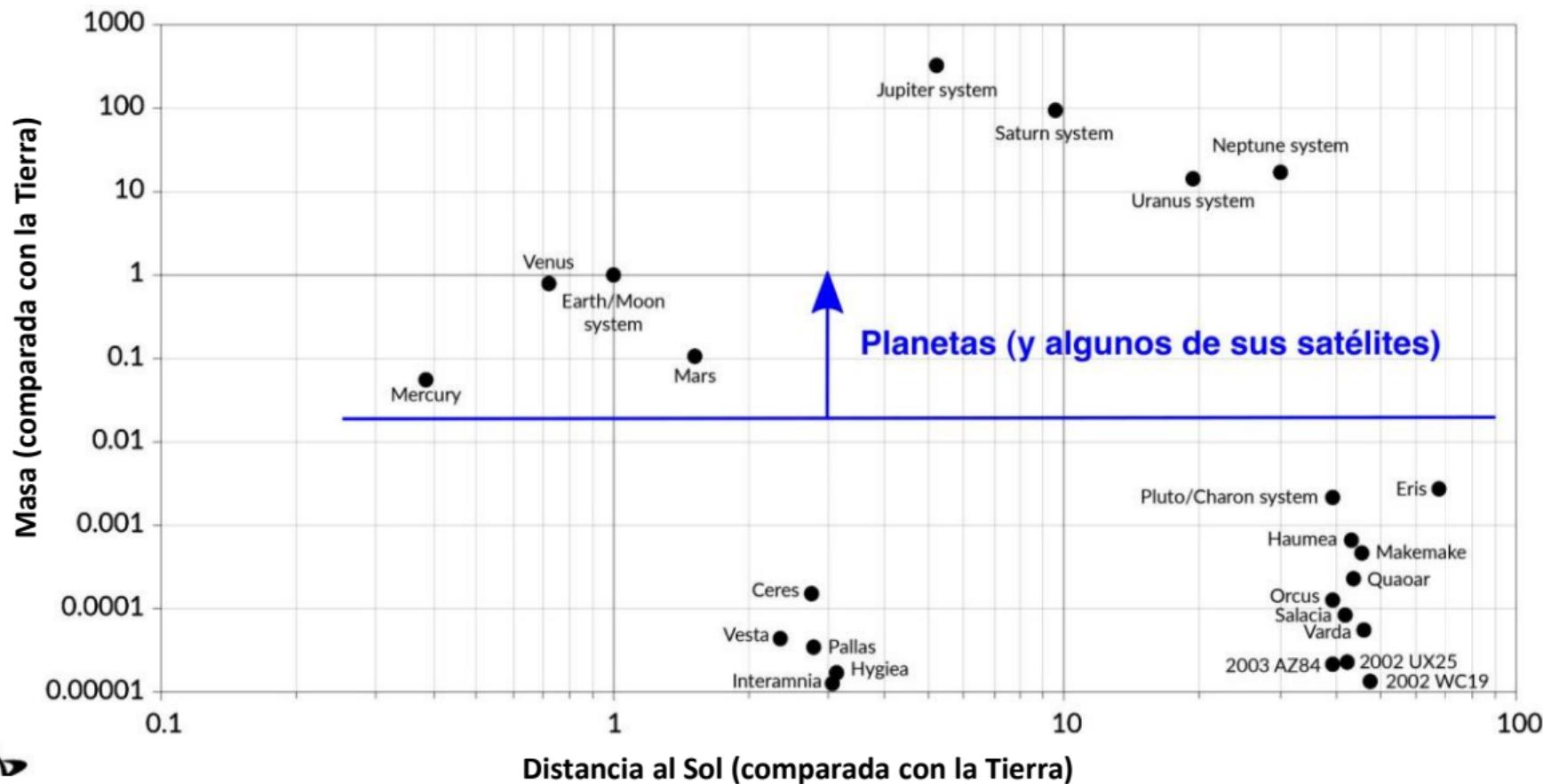


- Algunos de los objetos pueden llegar a medir más de 2.300 km (Eris), pero probablemente existan objetos más grandes todavía no descubiertos.

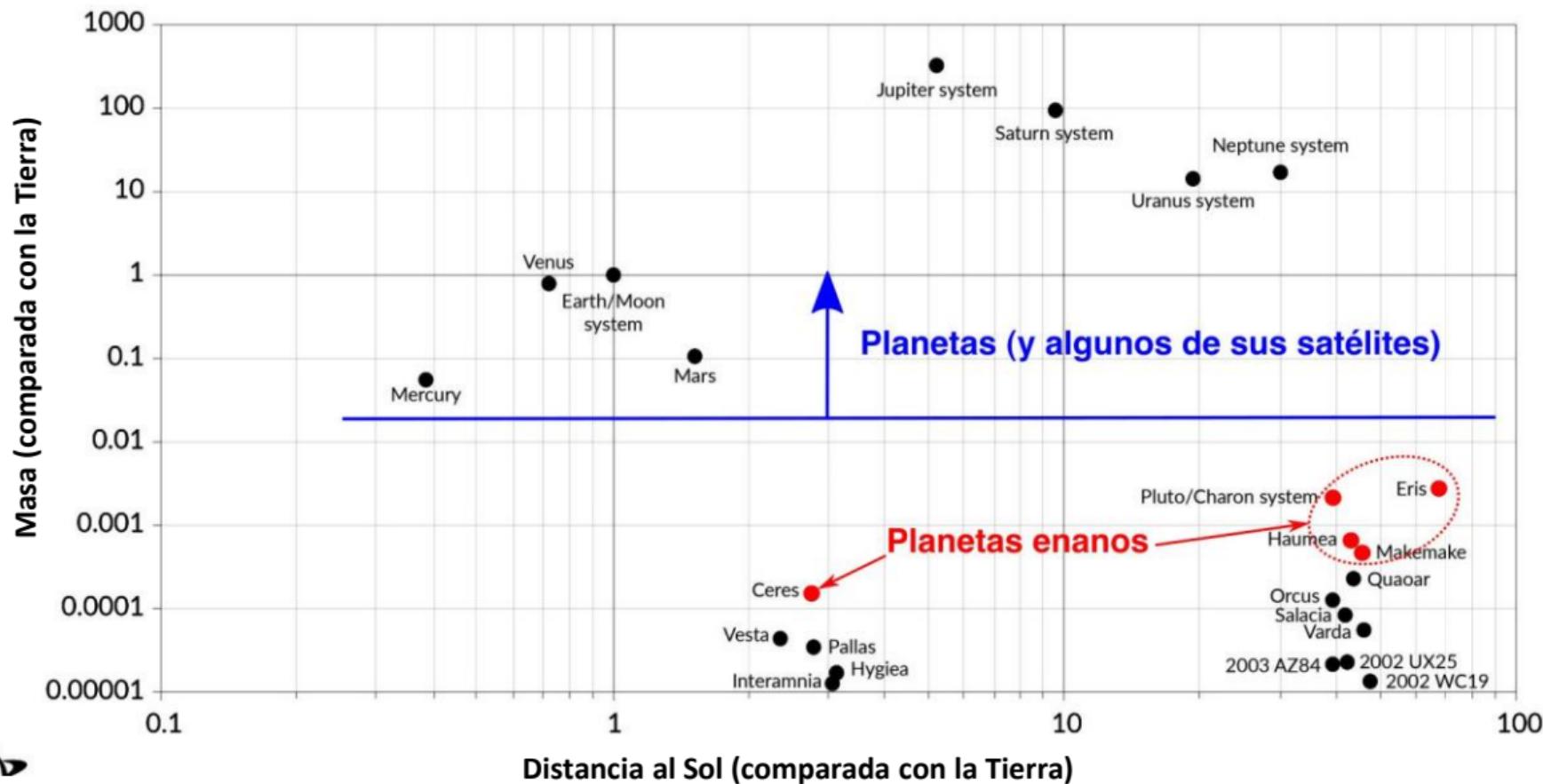
Planetas, planetas enanos y otros objetos masivos



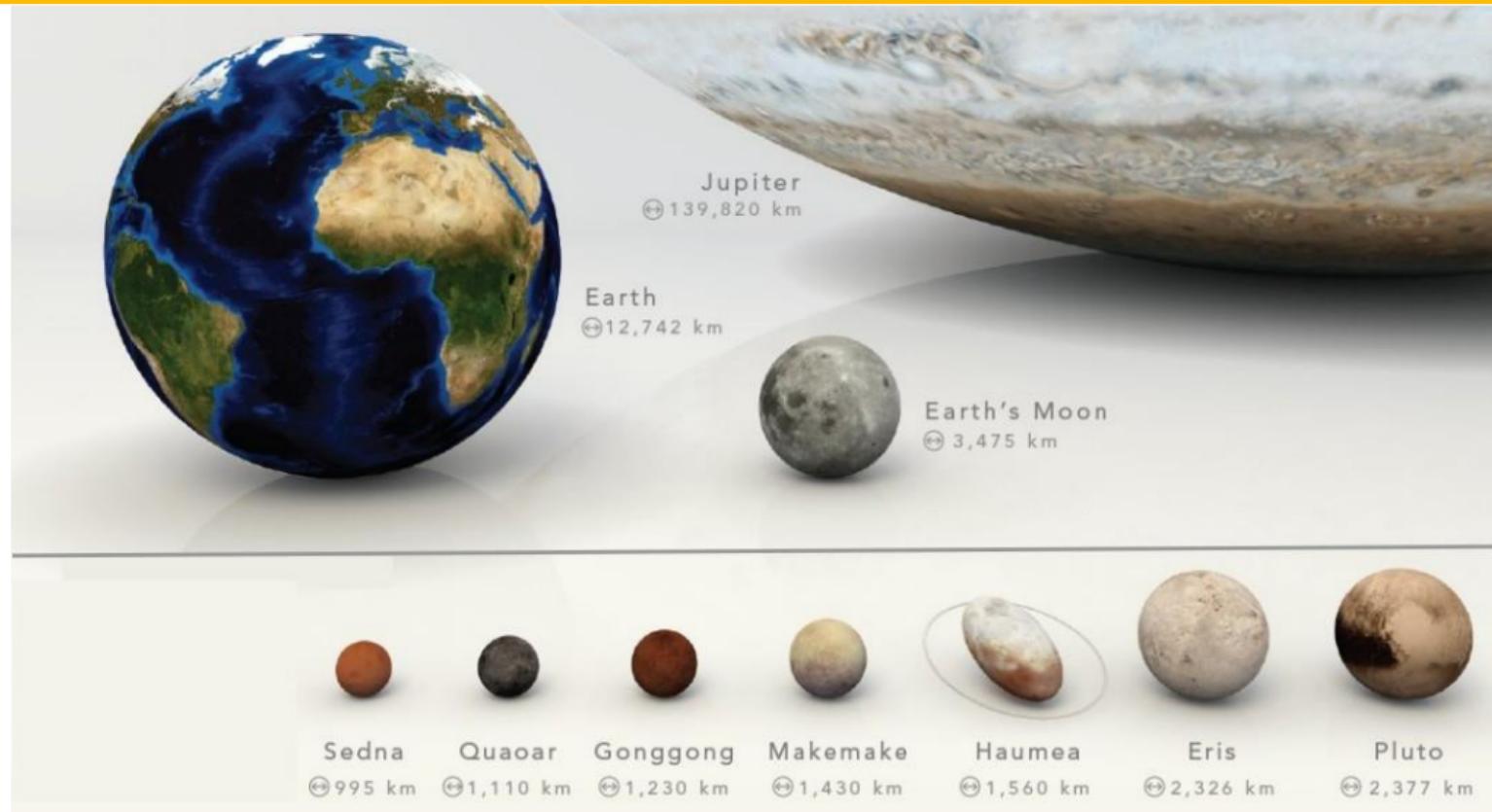
Planetas, planetas enanos y otros objetos masivos



Planetas, planetas enanos y otros objetos masivos



Planetas enanos actuales y futuros?



Reconocidos por la IAU como planetas enanos: Eris, Plutón, Haumea, Makemake (y Ceres)

5 Objetos pequeños del sistema solar

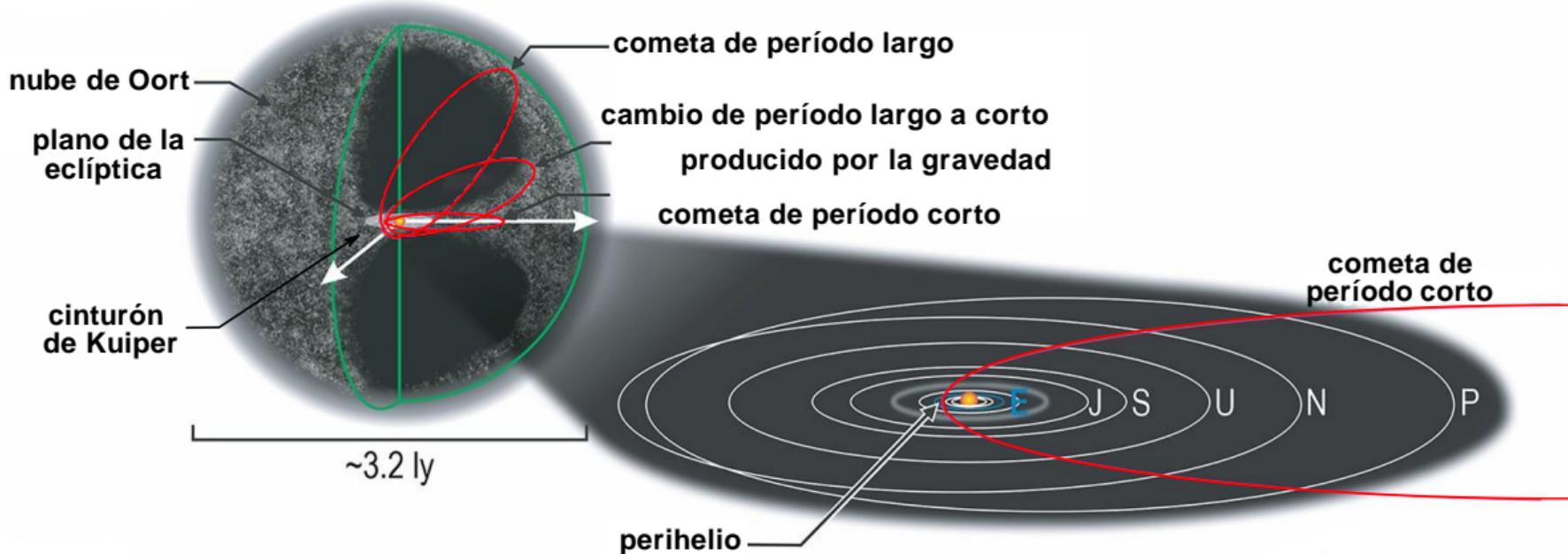
5.3 Cometas

Los cometas



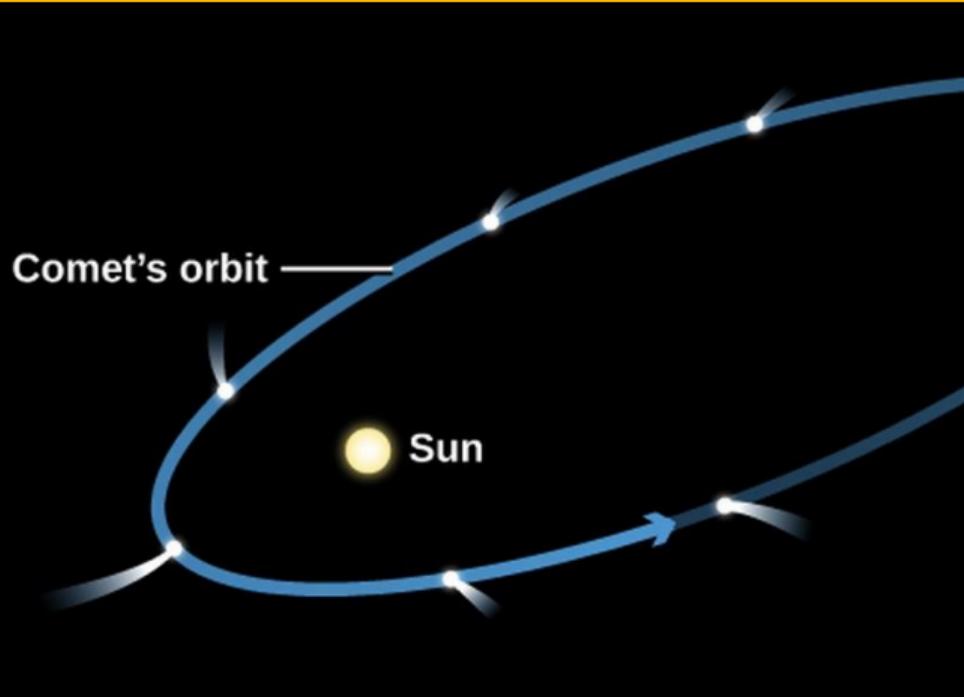
Cometa Neowise (C/2020 F3 (NEOWISE))

Orbitas de los cometas y su origen



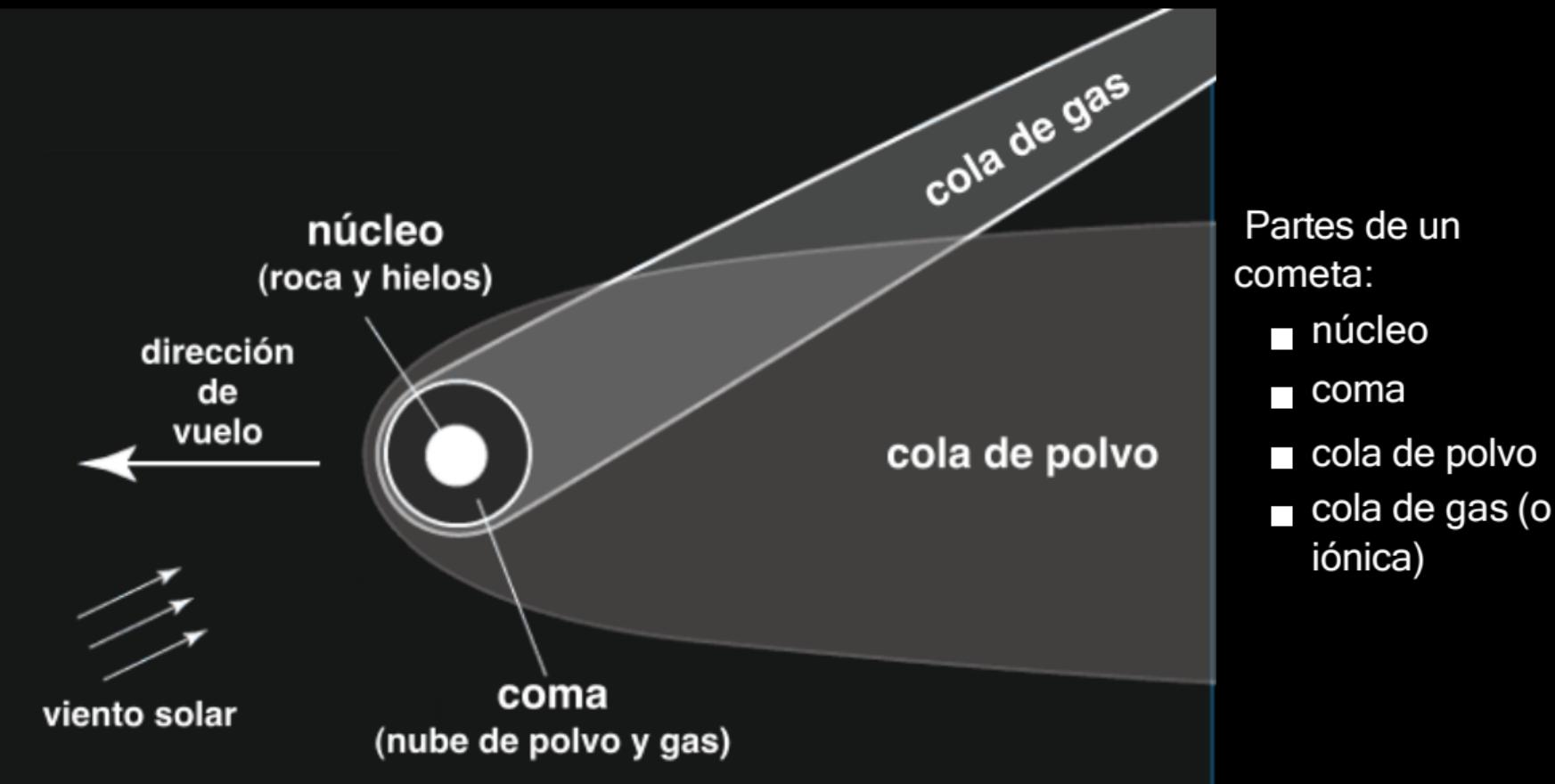
- Las órbitas de los cometas son muy **elípticas** y no necesariamente en el plano de la Eclíptica (el plano del sistema solar)
- Suelen tener **períodos de revolución largos o muy largos**, entre 3,3 años (2P/Encke) y muchos cientos de años o milenios.

Colas de los cometas



- Cuando el cometa se acerca al Sol, desarrolla una **cola**
 - La cola puede a llegar a ser muy grande (qué puede llegar a tener una longitudes de más de 20 veces la distancia Tierra-Luna!)
 - La cola suele estar dirigida en dirección contraria a la posición del Sol

Anatomía de un cometa

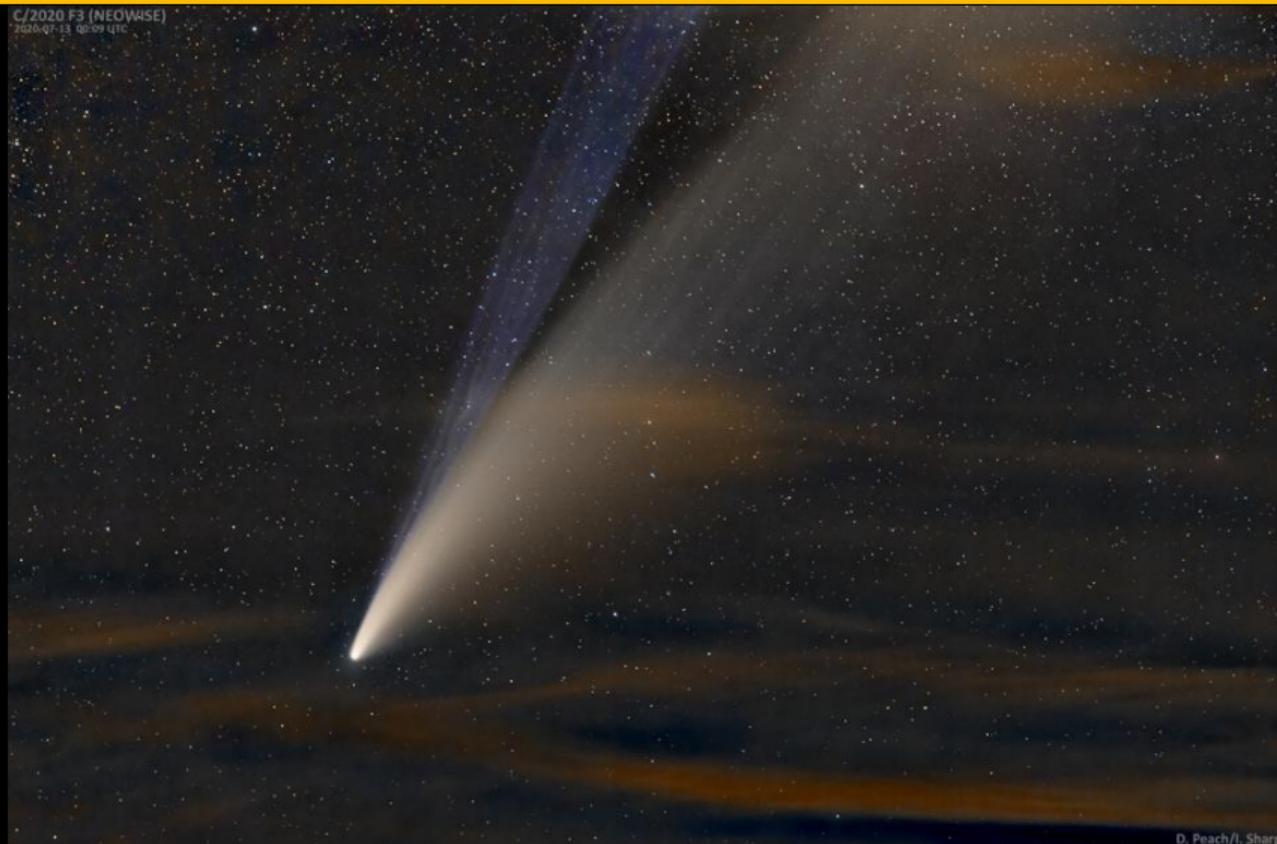


Anatomía de un cometa: núcleo



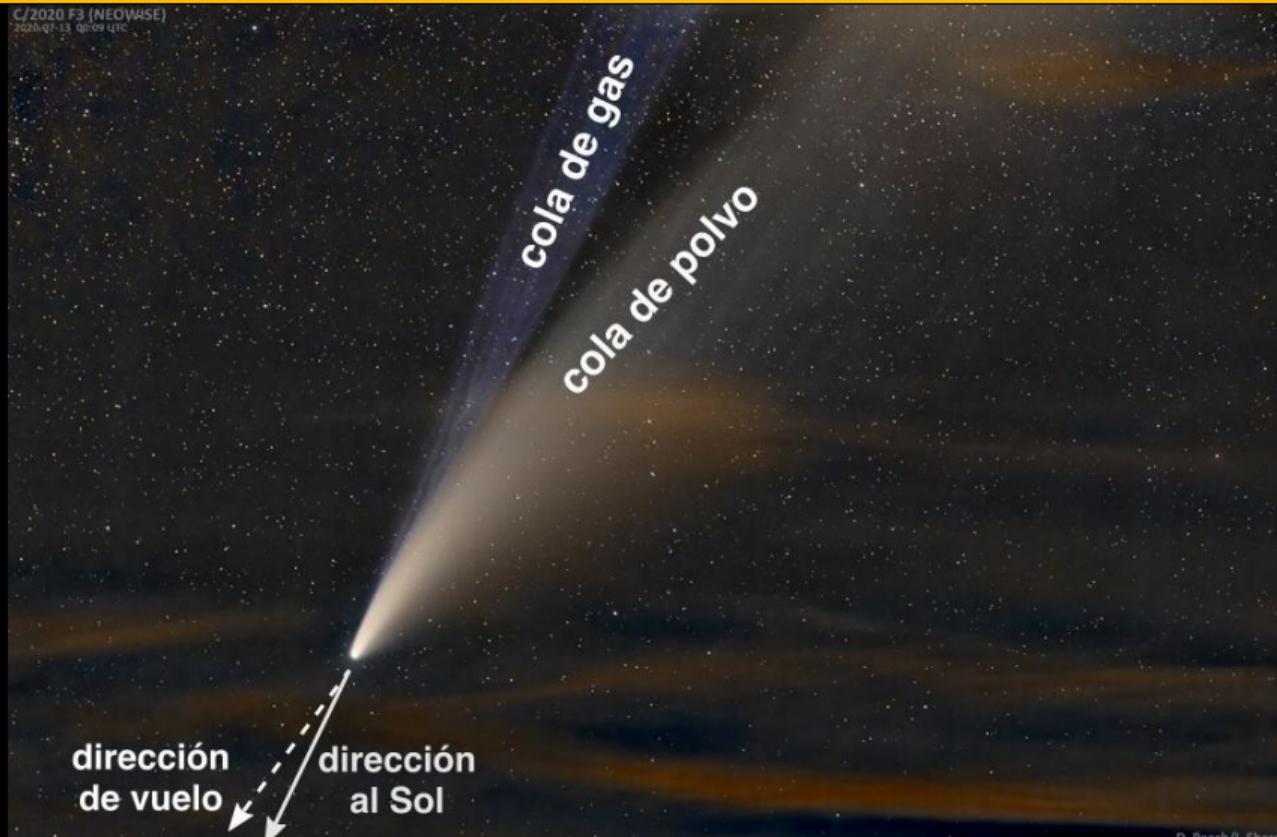
Ejemplos: Núcleos de los cometas: 67P/Churyumov-Gerasimenko y 103P/Hartley

Anatomía de un cometa: colas de polvo y gas



Cometa Neowise (C/2020 F3 (NEOWISE))

Anatomía de un cometa: colas de polvo y gas



Cometa Neowise (C/2020 F3 (NEOWISE))

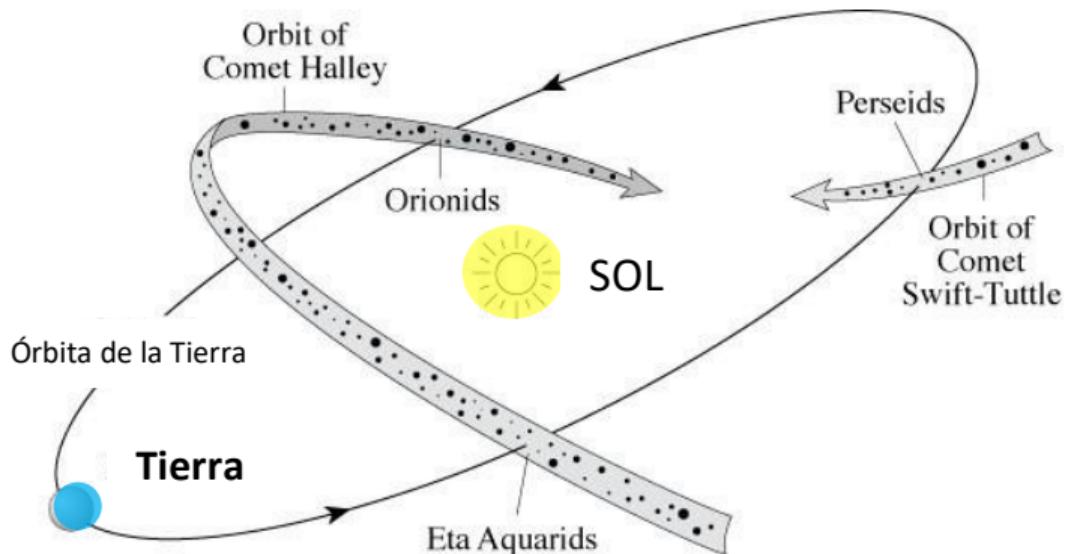
5 Objetos pequeños del Sistema Solar

Las lluvias de meteoros y su relación los cometas

Lluvias de meteoros



Lluvias de meteoros y la órbita de los cometas



- Las lluvias de meteoros se producen cuando la Tierra intersecta la órbita de un cometa.
- En la órbita del cometa suelen haber restos de polvo cometario que el cometa ha ido desprendiendo.
- Hay varios cometas que inter-secccionan la órbita de la Tierra: se producen varias lluvias de meteoros a lo largo del año.

6 Resumen: estructura general del sistema solar

**Todo el
sistema solar**



**El Sol, los planetas y
el cinturón de Kuiper.**



NGC 6543

Planetary Nebula