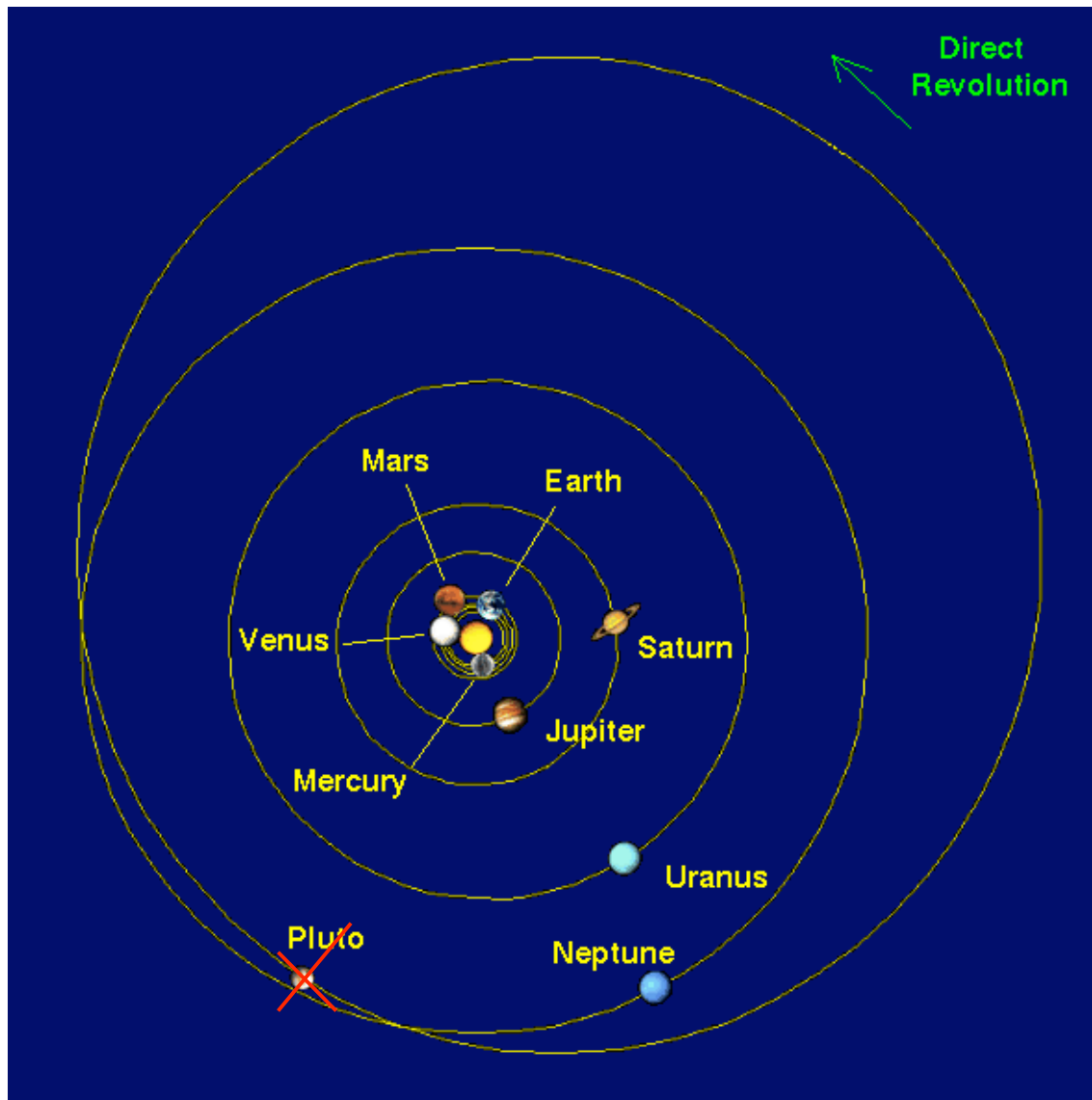


# Tema 4 - 6: El Sistema Solar

4. *Propiedades Generales*
  - *Algunas características*
  - *Leyes de Kepler*
  - *Sistema Tierra-Luna*
5. *Los planetas y sus satélites*
  - *Planetas terrestres*
  - *Planetas Jovianos*
  - *Asteriodes y cometas*
6. *Formación del sistema solar*

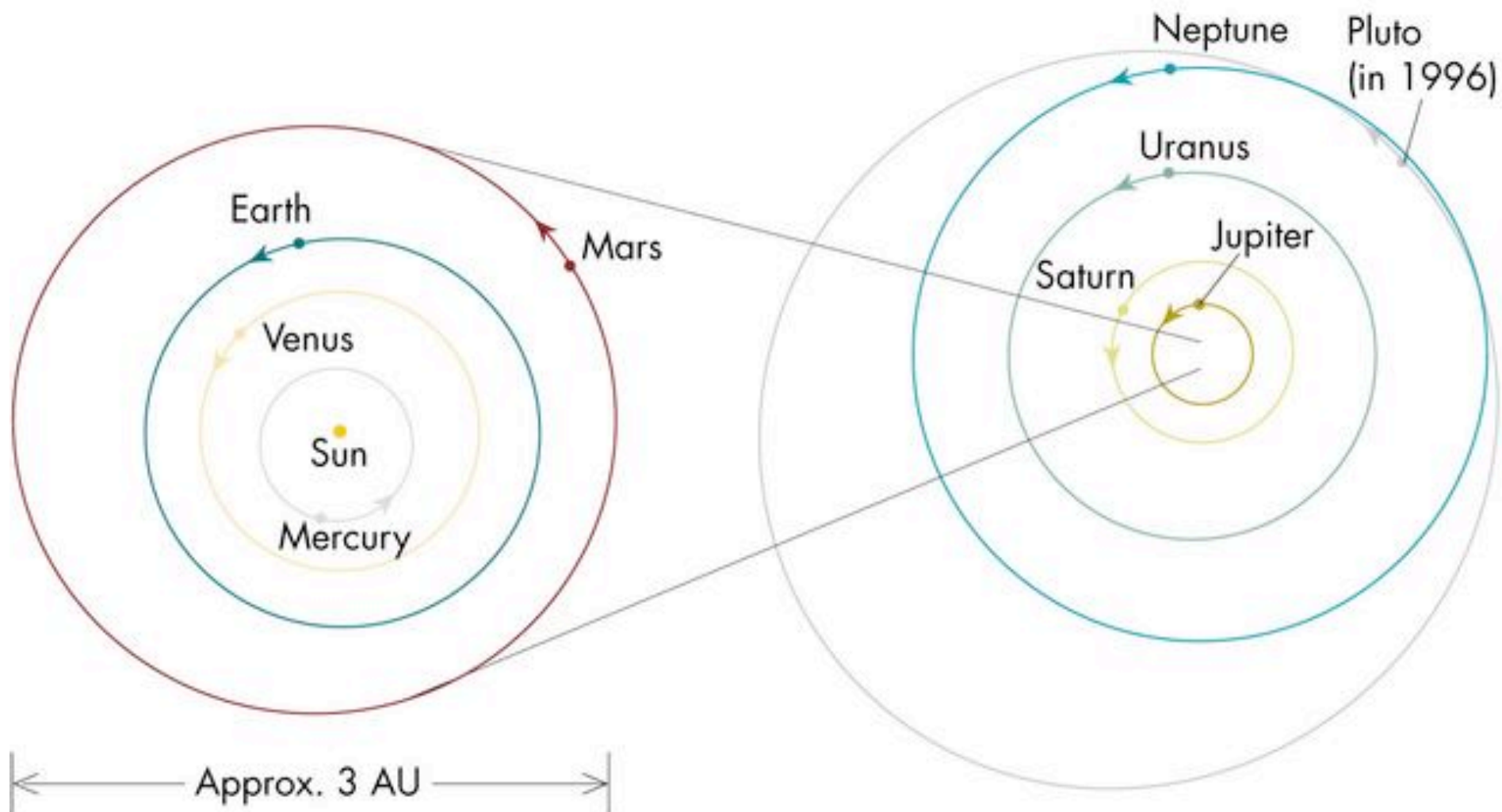
# Componentes y distribución en el sistema solar



Consiste de:

- Sol
- 8 planetas y sus satélites
- Planetas enanas
- Asteroides
- Cometas
- Polvo interplanetario

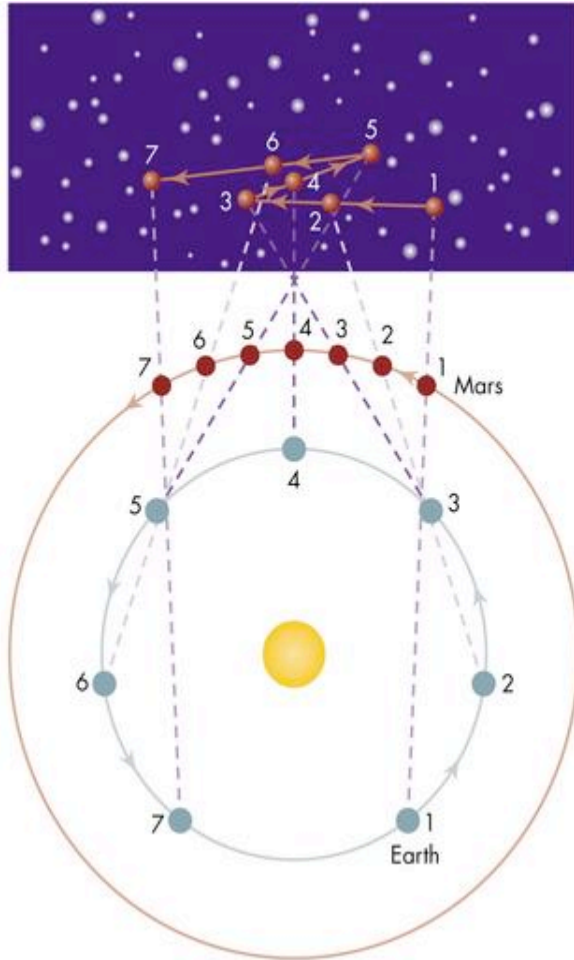
Distancia de la Tierra al Sol: 149.6 millones de km (= 1 Unidad Astronómica)



Planet orbits as seen from above, looking down on Earth's north pole.

Approx. 80 AU

# Movimientos de los planetas visto de la Tierra



Planetas exteriores: Pueden tener movimiento retrogrado

Planetas interiores (Mercurio y Venus): Siempre cerca del Sol → “estrella de la mañana” o “estrella de la tarde”

Oposición de un planeta exterior: Cuando Tierra está exactamente entre planeta y Sol.

Periodo entre dos oposiciones (o otros eventos marcados) (= periodo sinodico)

$$1/P = 1/P_1 - 1/P_2$$

(con  $P_1$  y  $P_2$  los periodos de los planetas)

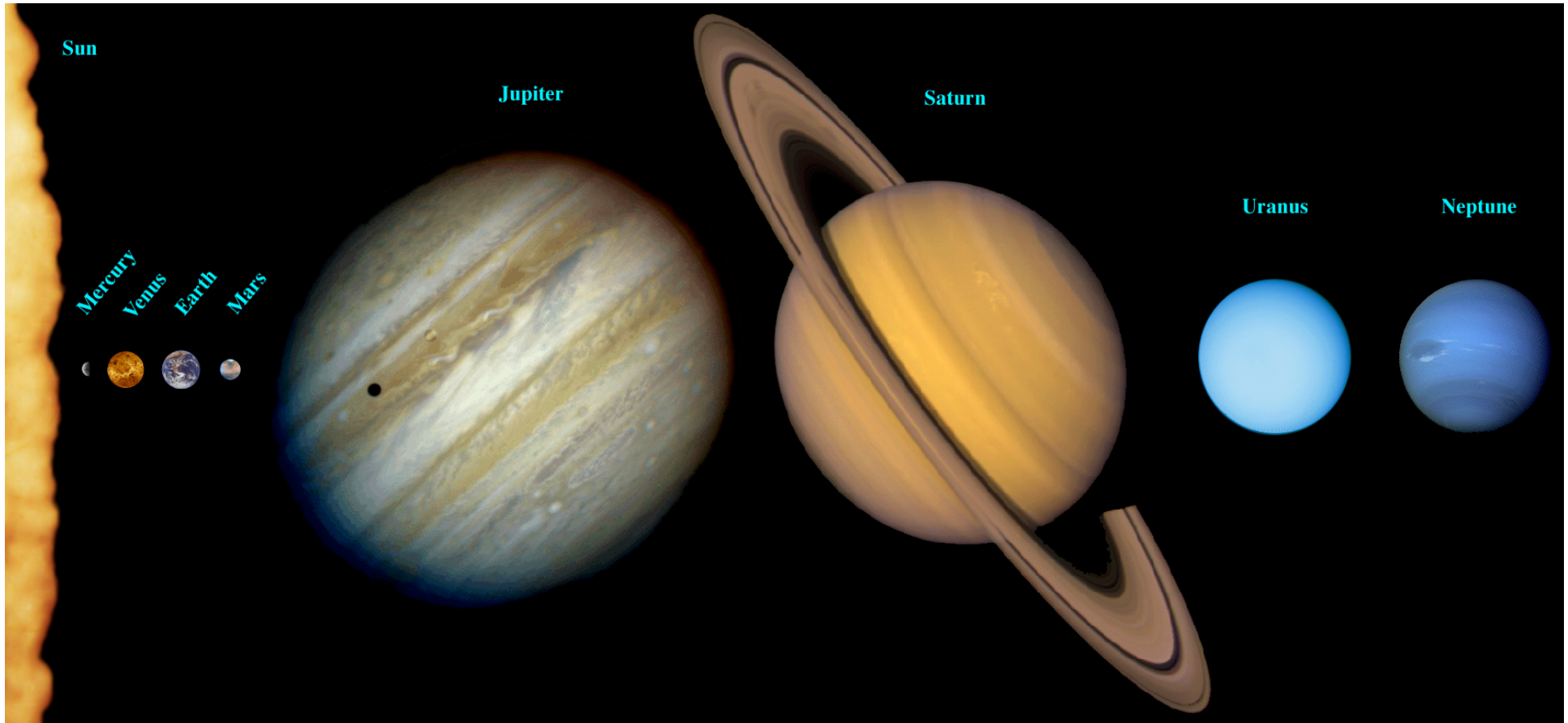




El sol - una estrella

Contiene 99.85% de  
la masa

# Los planetas

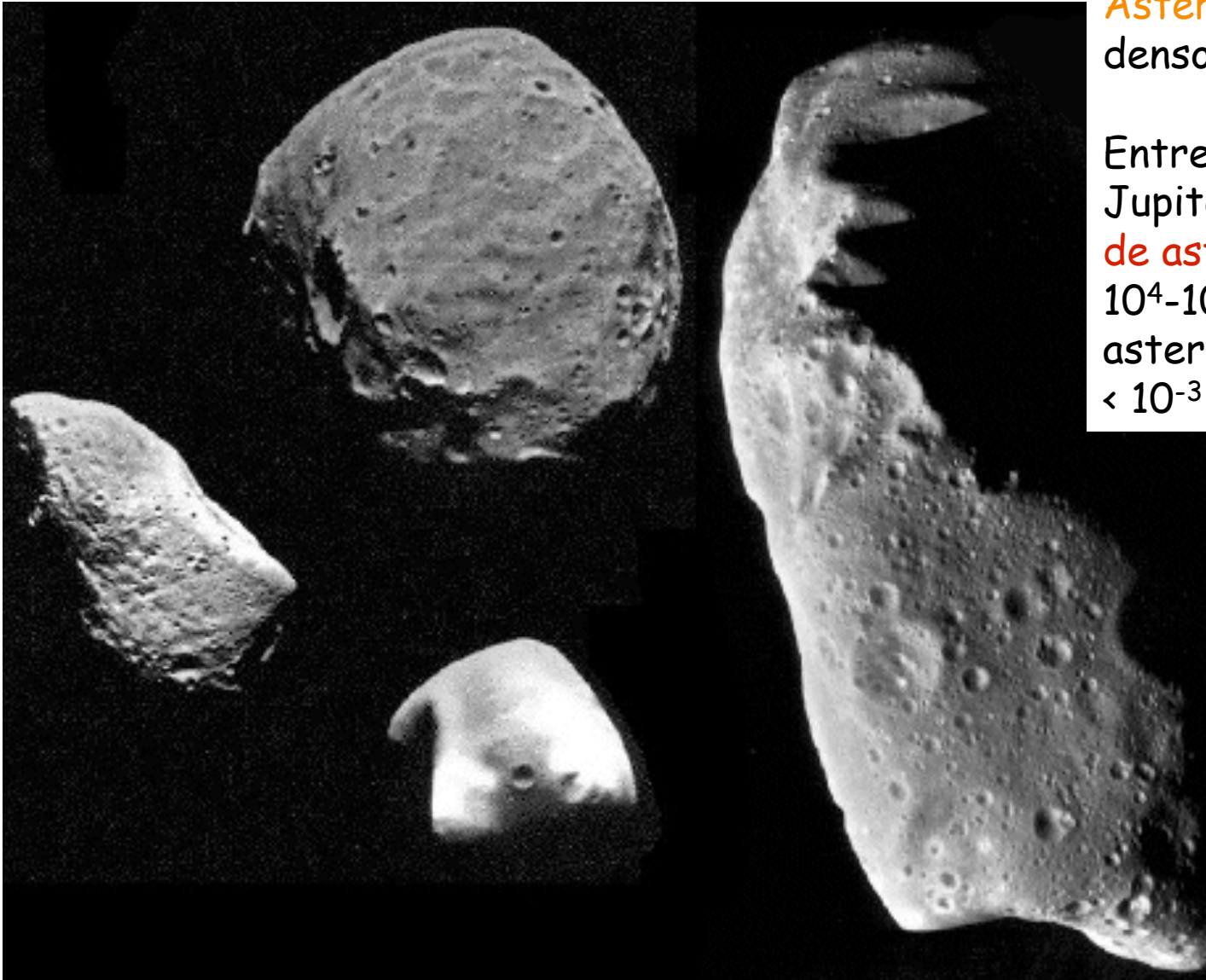


- Todos giran alrededor del sol en el mismo sentido y aproximadamente en el mismo plano (plano de la eclíptica)
- Todos (menos Mercurio y Venus) tienen satélites
- Contienen 98% del momentum angular

# Asteroides - pequeños planetas

**Asteroides** = Cuerpos densos y pequeños

Entre la órbita de Marte y Jupiter hay un "cinturón de asteroides", con unos  $10^4$ - $10^6$  (estimado) asteroides (masa total  $< 10^{-3}$  masa de la Tierra)





• Meteoridos → pequeños asteroides

Cuando entran en la atmosfera → estrella fugaz

Si es suficientemente grande para llegar al suelo → Meteorito

Posibles orígenes:

- Asteroides en cinturón entre Marte y Jupiter chocan → Se rompen y cambian órbita

- Partes de cometas



Se distinguen meteoritos pedregosas (de roca, approx. 75%) y metálicos (principalmente Hierro, approx. 25%)

Lugar excelente para encontrar meteoritos: Antártida

# Cometas

Son "bolas de nieve sucia" con órbitas muy excéntricas.

Son conocidos desde muy antiguo.

Al acercarse al sol, su material se sublima y forma la cola que le hace visible.

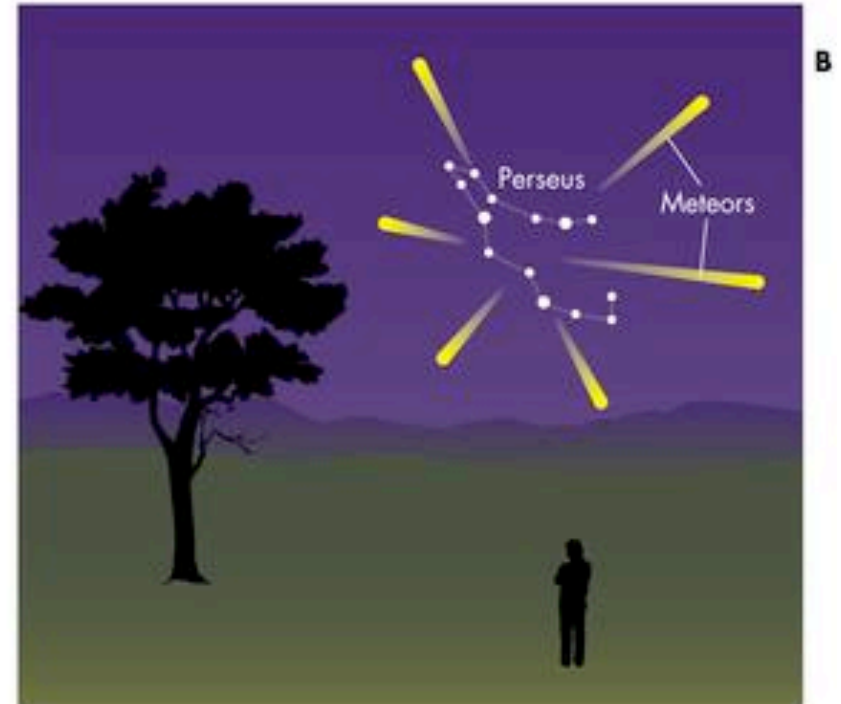
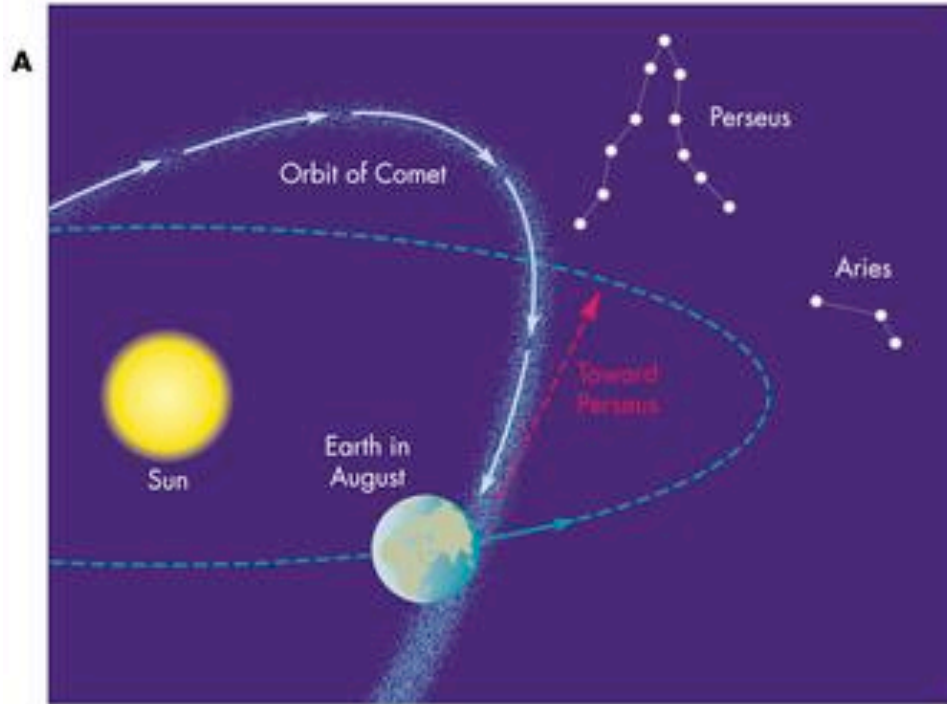
Consisten de un núcleo, halo y dos colas

- Cola de plasma: debido al viento solar
- Cola de polvo: Debido a presión de radiación

Hay cometas de larga y de corta duración → diferentes orígenes

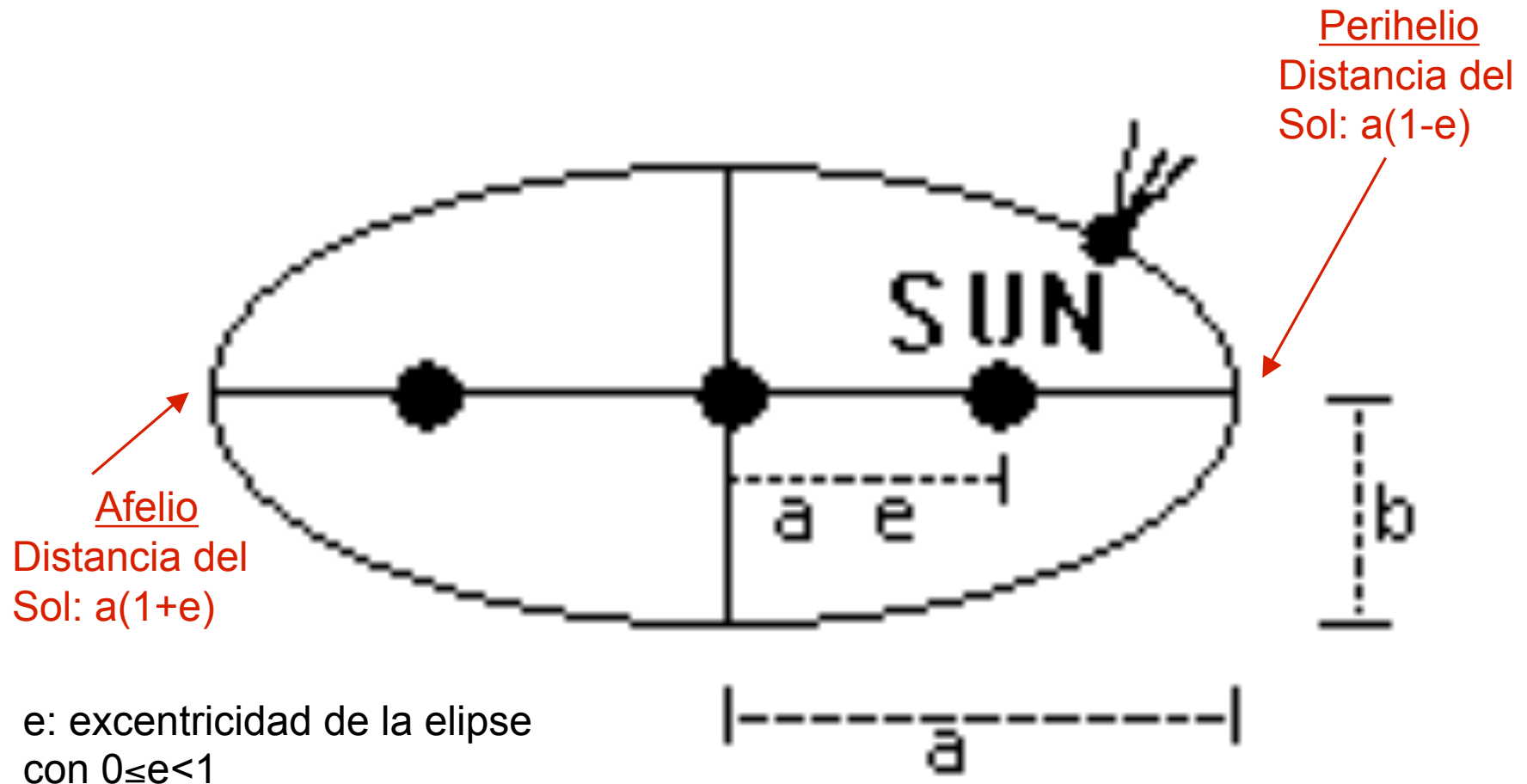


# Lluvias de Meteoritos



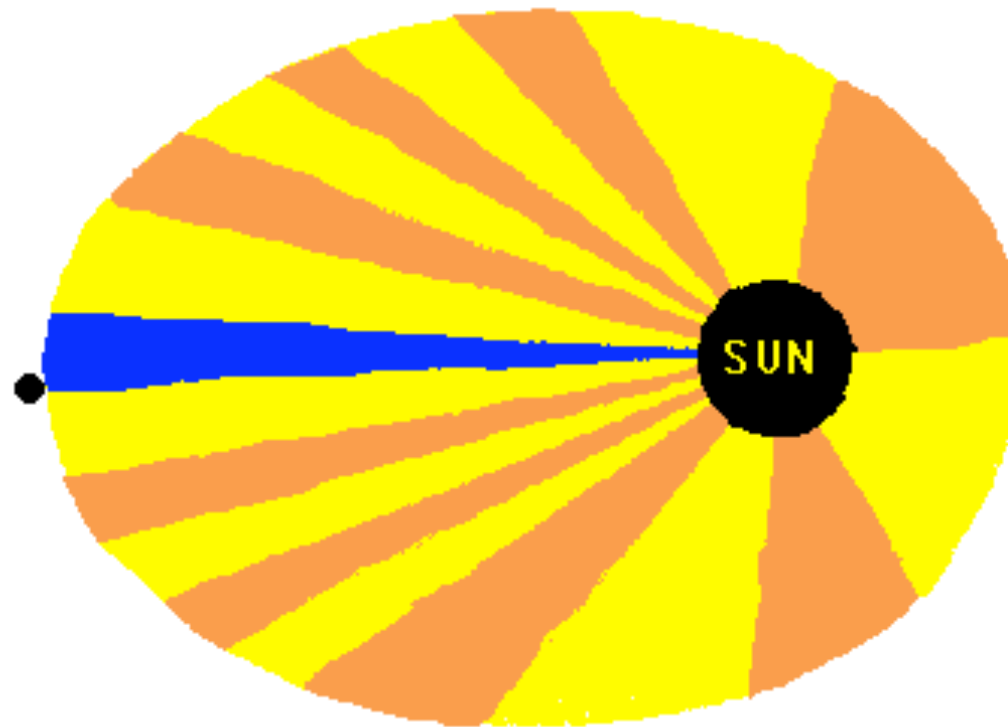
# La primera ley de Kepler

- Los planetas se mueven en órbitas elípticas con el sol en uno de sus focos.
- La eccentricidad de la elipse es  $e = 0.167$  (pequeña)



# Segunda ley de Kepler

La línea que une un planeta con el sol, a lo largo de sus órbitas, describen áreas iguales en tiempos iguales





# Tercera ley de Kepler

El cuadrado del periodo de una órbita,  $T$ , es proporcional al cubo del semieje mayor de la elipse,  $a$ :

$$T^2 = k a^3 \quad k = 4\pi^2 / G(M+m)$$

Donde  $M$  es la masa del sol, y  $m$  la masa del planeta

$$T^2(\text{años}) = a^3(\text{U.A.})$$

(derivado de los valores para la Tierra)

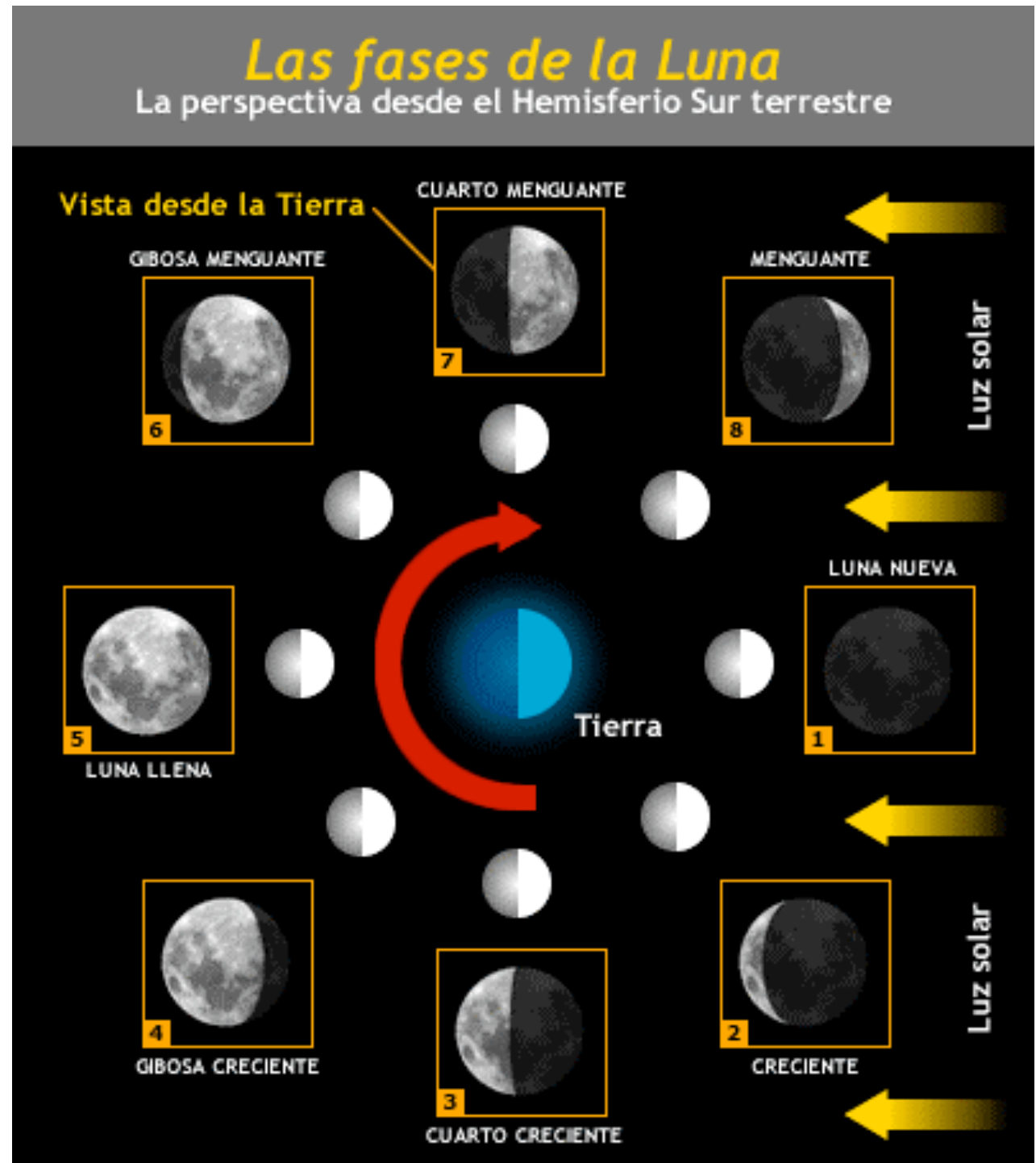
Las tres leyes de Kepler se pueden deducir de la ley de gravitación de Newton (esta es la ley fundamental)

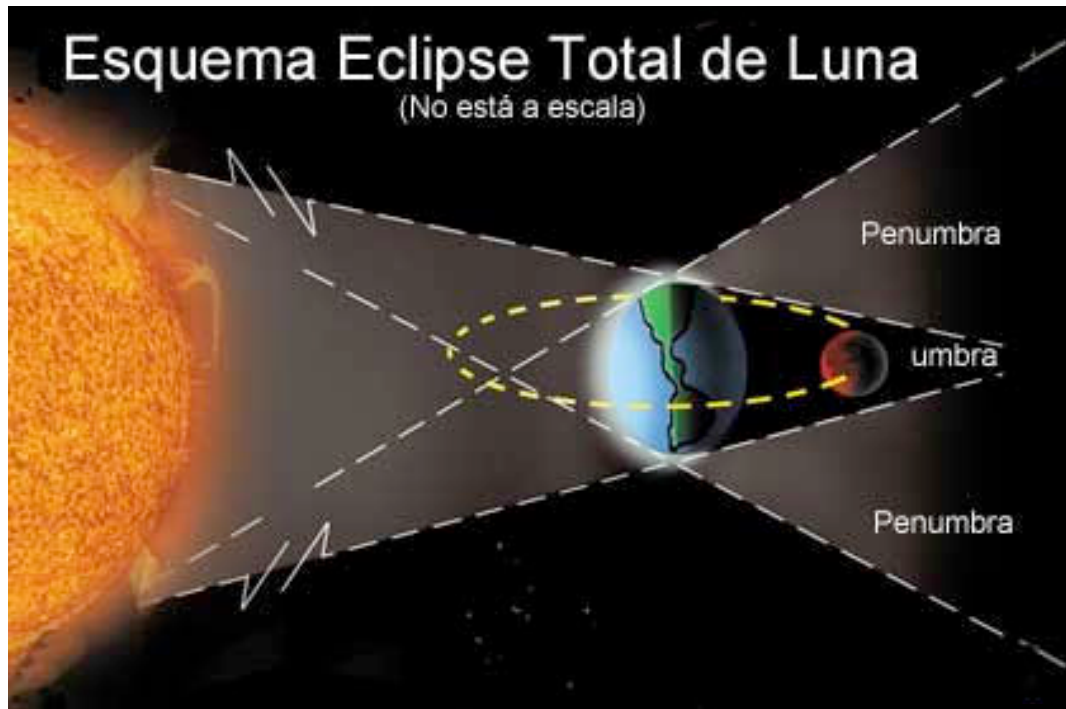
$$F = G Mm/r^2$$

# Sistema Tierra-Luna

- La Luna vuelve a la misma posición con respecto al sol en 29.531 días → eso es el ciclo de las fases lunares (mes sinódico).
- (Mes sidéreo - posición con respecto a las estrellas: 27.322 días)
- Órbita de la Luna está inclinado 5% con respecto a la eclíptica.
- Excentricidad  $e = 0.055$
- Periodo de rotación = mes sidéreo → vemos siempre la misma cara de la Luna (más exacto: 59% debido a la velocidad variable alrededor de la órbita)

# Fases lunares





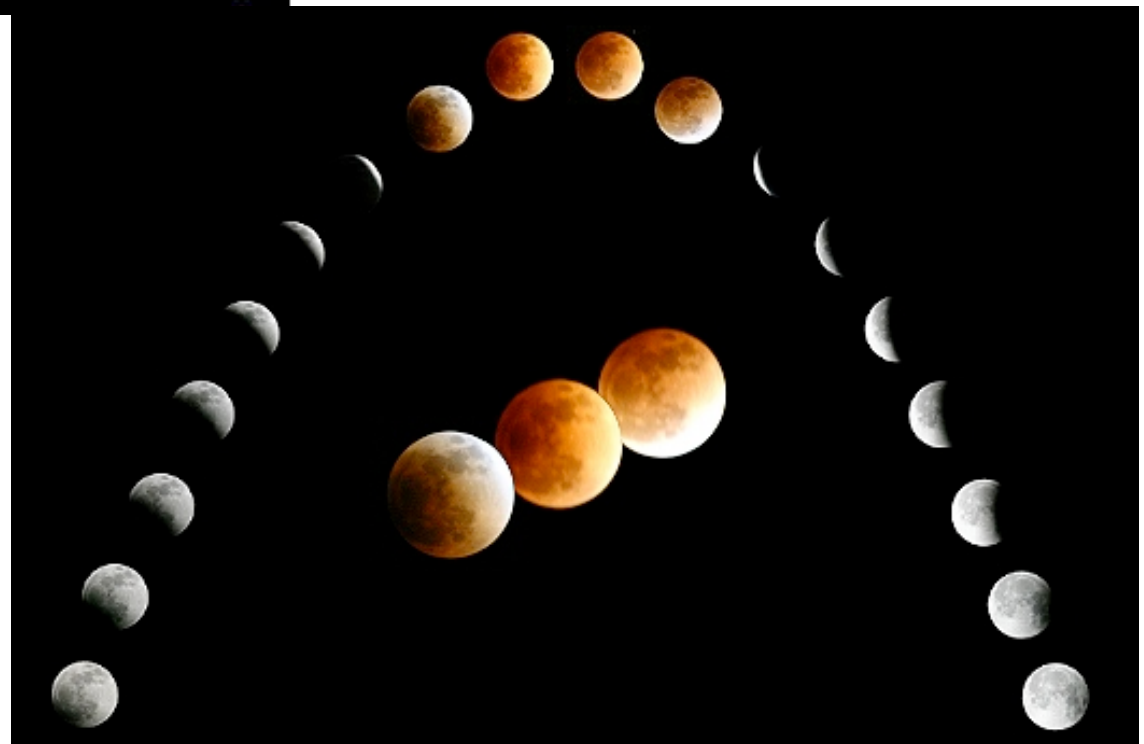
# Eclipse Lunar

Diferentes fases de la eclipse.  
En la fase total, la Luna está iluminada por luz del sol refractada en la atmósfera de la tierra (por eso el color rojizo)

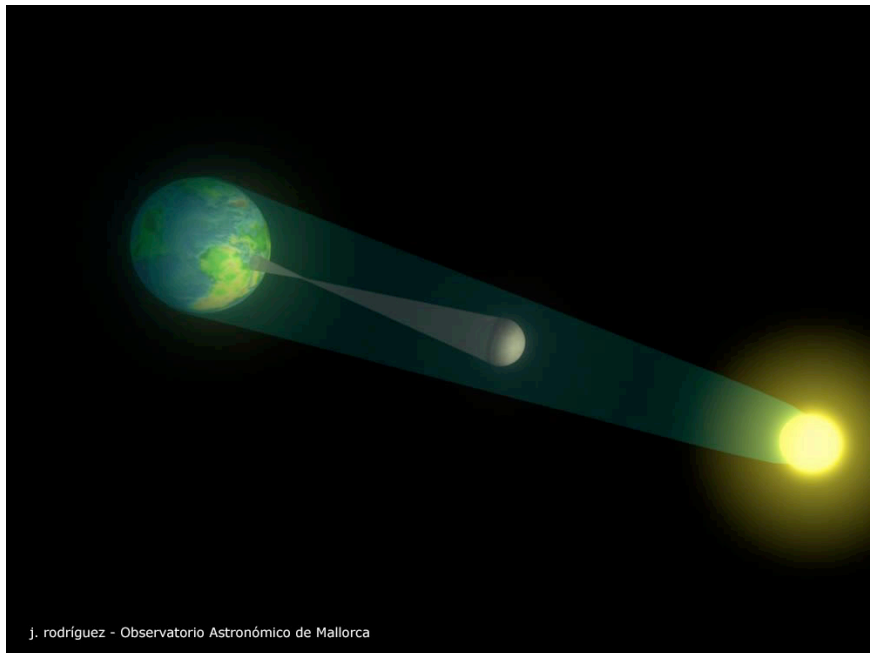
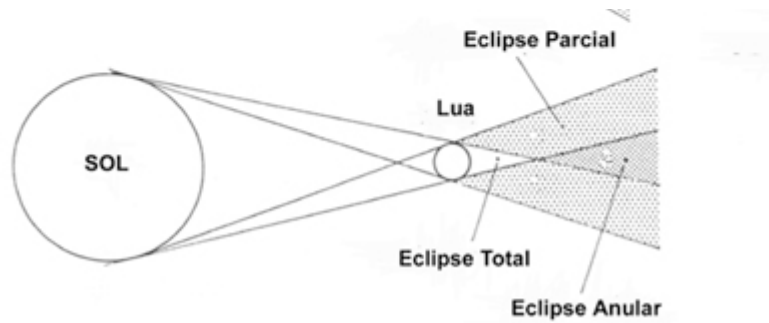
Las eclipses lunares tienen lugar solamente cuando hay Luna llena.

Duración máxima de parte total: algo menos de 1 hora 50 minutos.

Duración de todos los fases: Varias horas.



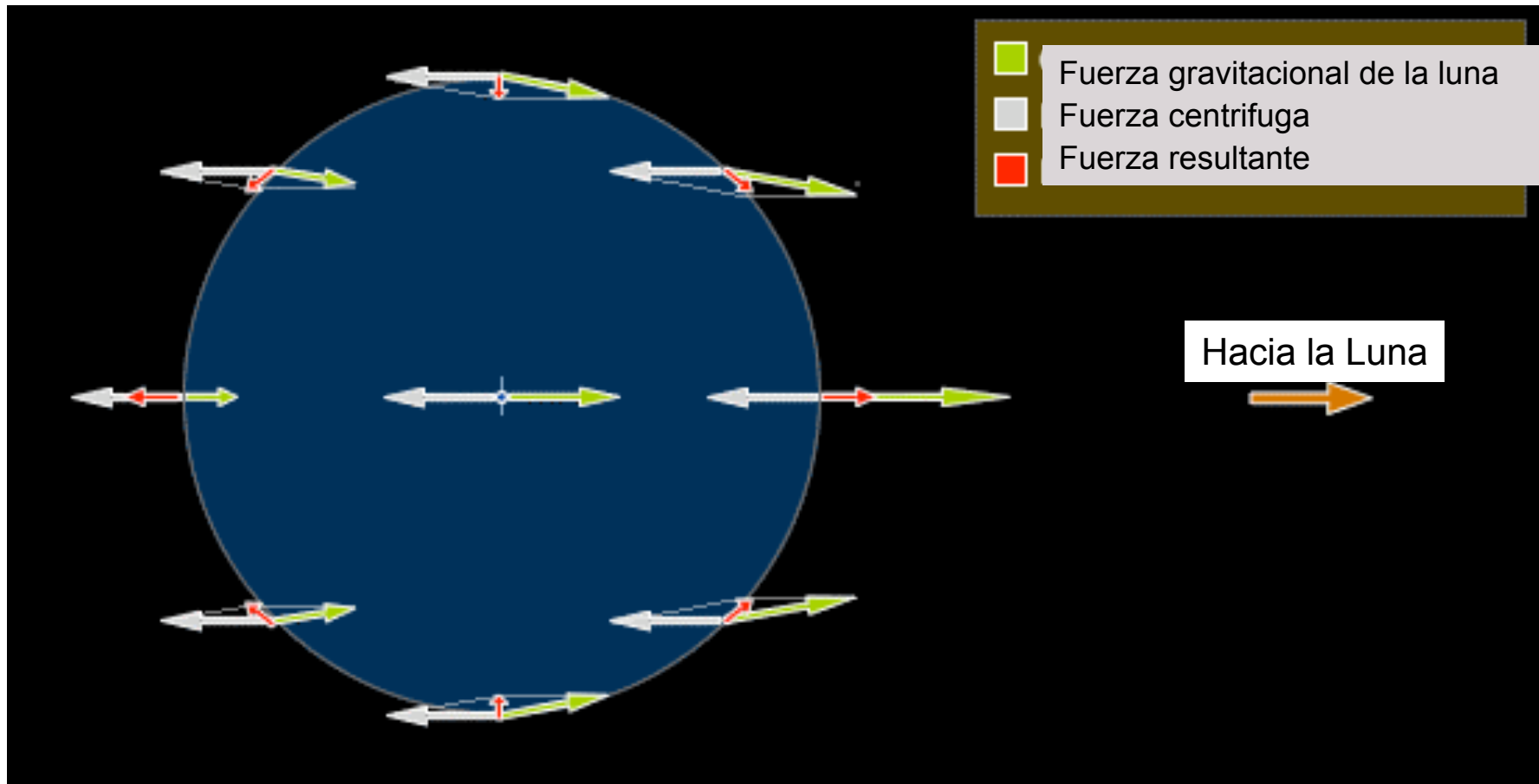
# Eclipse solar



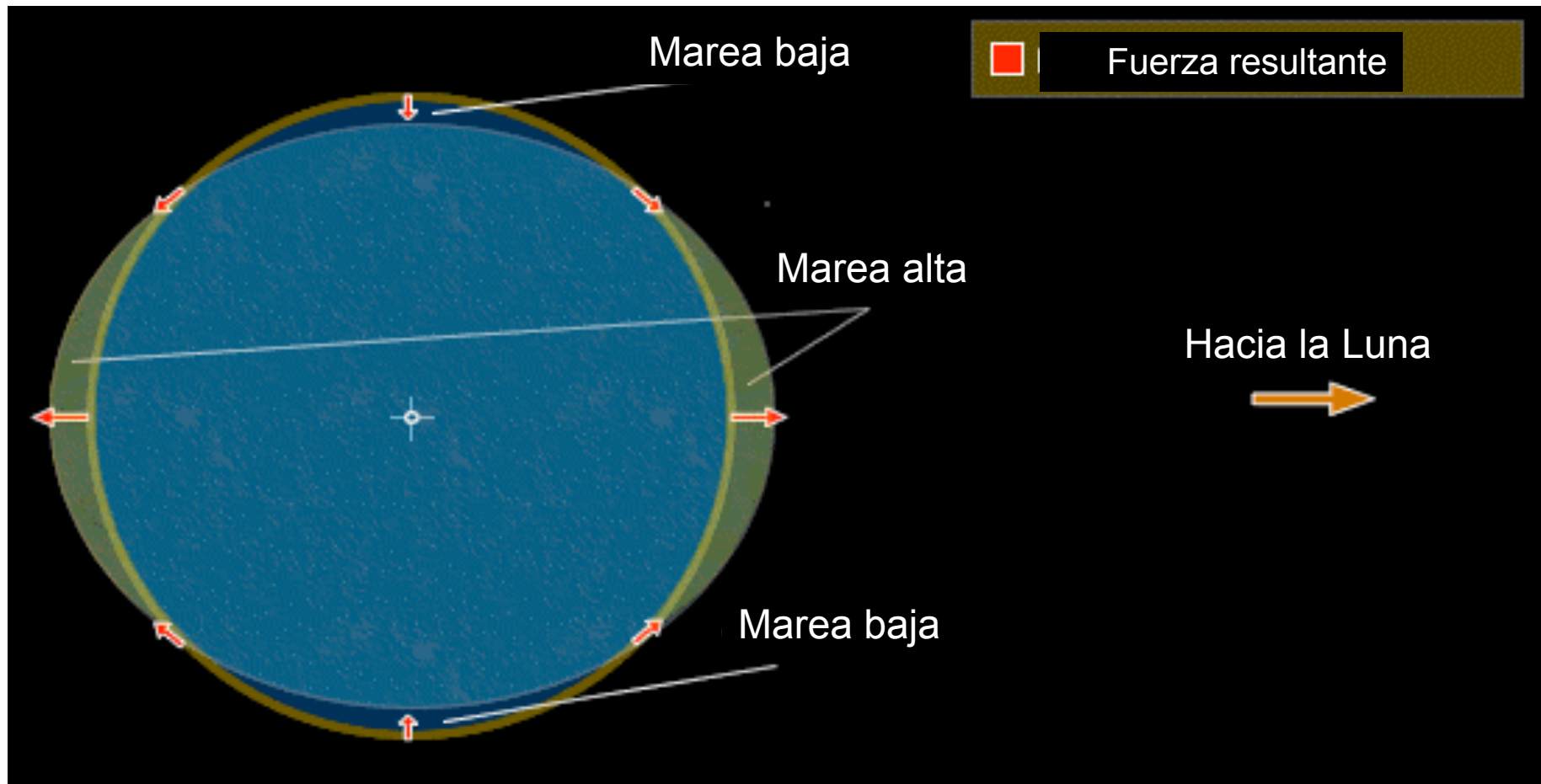
# Mareas

La Tierra y la Luna están orbitando su centro de gravedad.

La Tierra experimenta una fuerza centrífuga debido a este movimiento

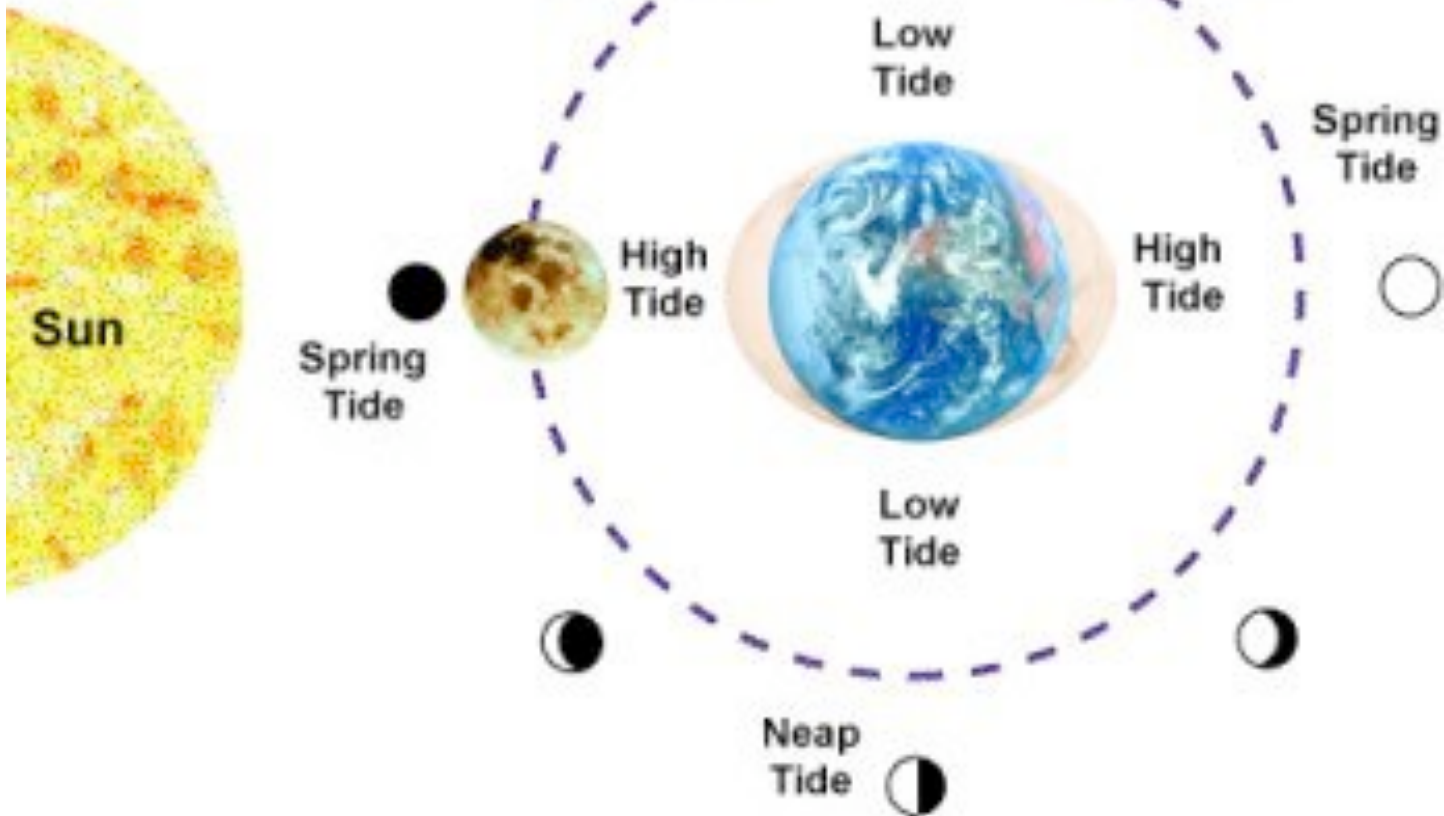


# Mareas



# El efecto del sol en las mareas.

El efecto del Sol es la mitad de fuerte que el efecto de la Luna





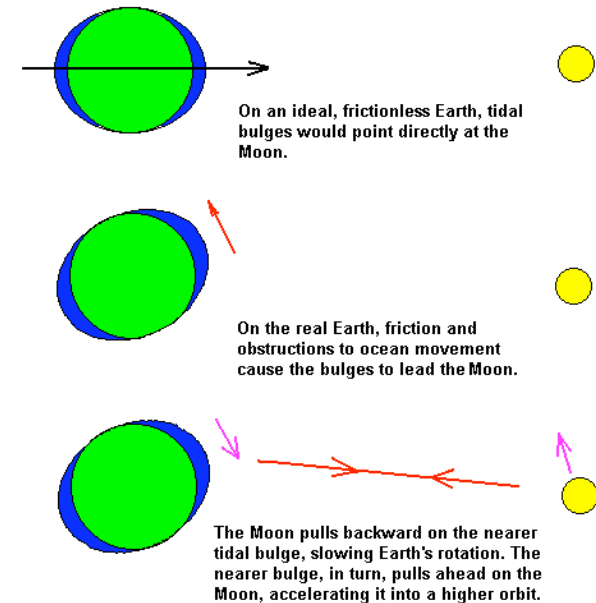
# Efectos de la marea en la Luna y la Tierra

En la Luna → Causó la rotación sincronizada de la Luna  
Cuando la Luna aún no era sólida, la Tierra producía mareas en la la roca fluida de la Luna. Fricción entre estas mareas y la roca interior sólida frenaba la rotación de la Luna hasta que mostraba siempre la misma cara a la Tierra.

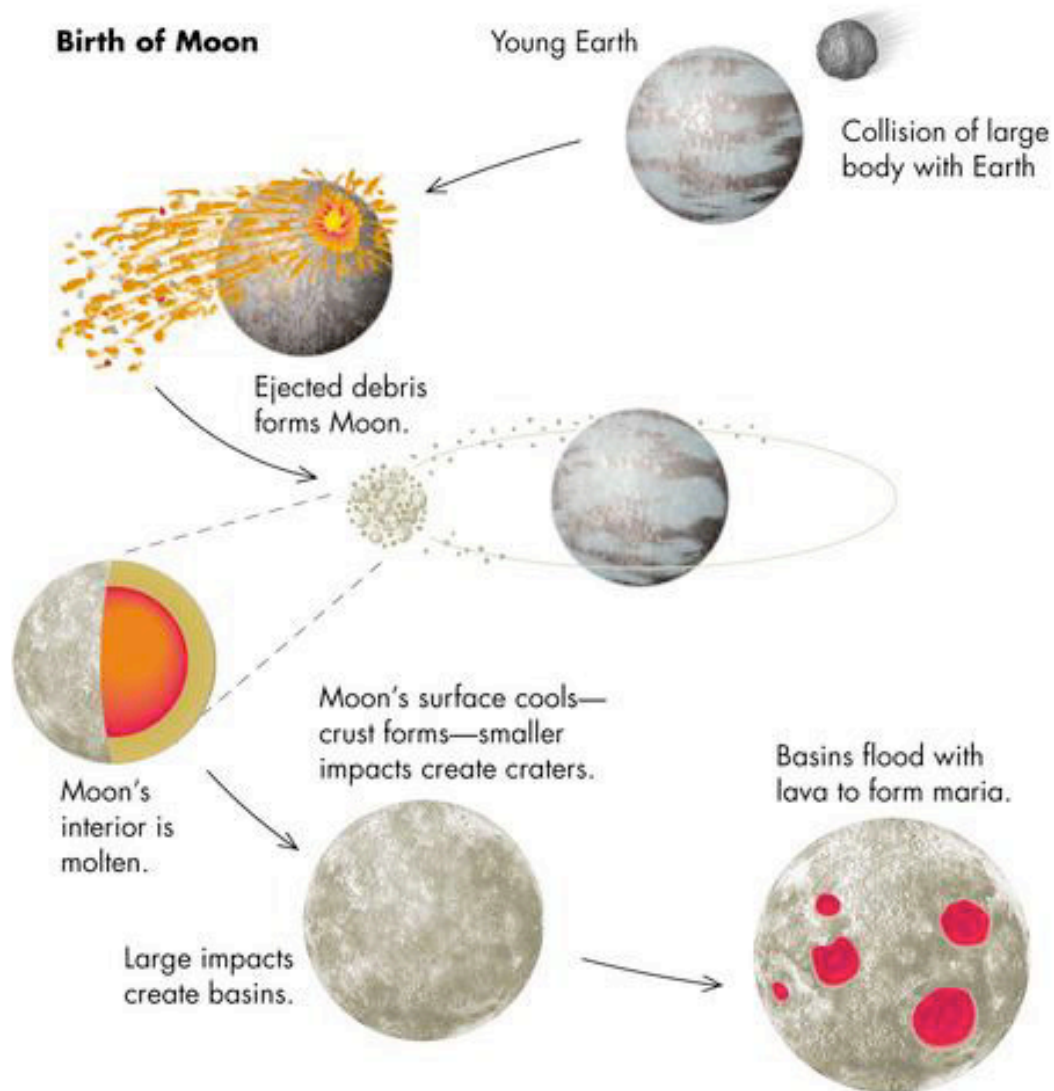
→ La Luna se va alejando de la Tierra (3.8 cm por año), debido a la energía transferido por el "tirón" de la marea. La marea alta está movido unos 10 grados con respecto a la línea Tierra-Luna debido a la fricción.

En la Tierra → Frena la rotación debido a la fricción (igual a lo que pasó a la Luna)

Se estima que después de su formación el periodo de rotación de la Tierra era solamente 6-8 horas.



# Probable formación de la Luna



## Evidencias observacionales:

- ❑ No tiene agua incorporado en las rocas
- ❑ Tiene menos elementos densos (p.e. hierro) que la tierra

Otras teoría descartadas de la formación de la Luna:

**Cocreación:** Formado al mismo tiempo que la Tierra

- No explica las diferencias en la composición de materia

**Teoría de separación:** La Luna fue expulsada de una Tierra en rápida rotación

- No explica porque rocas en Luna no contiene agua

**Teoría de captación:** La Tierra captó la Luna

- Es difícil
- No explica similitud de materia

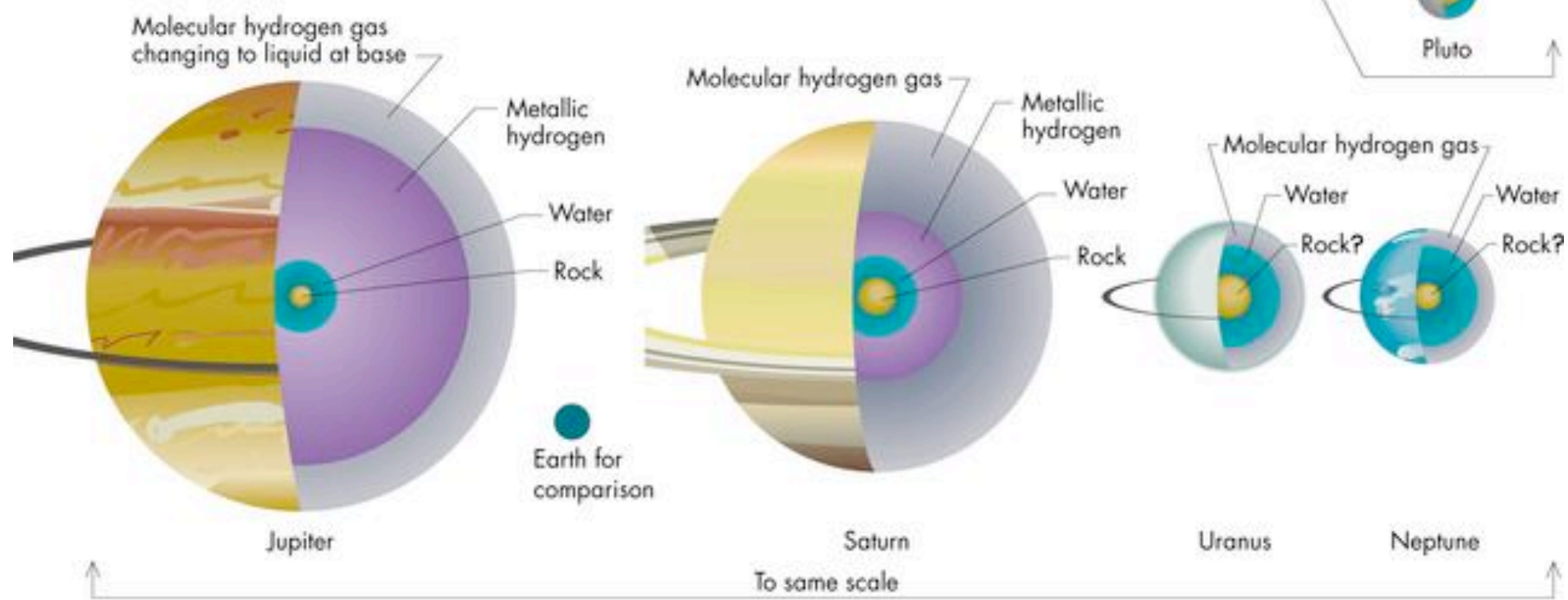
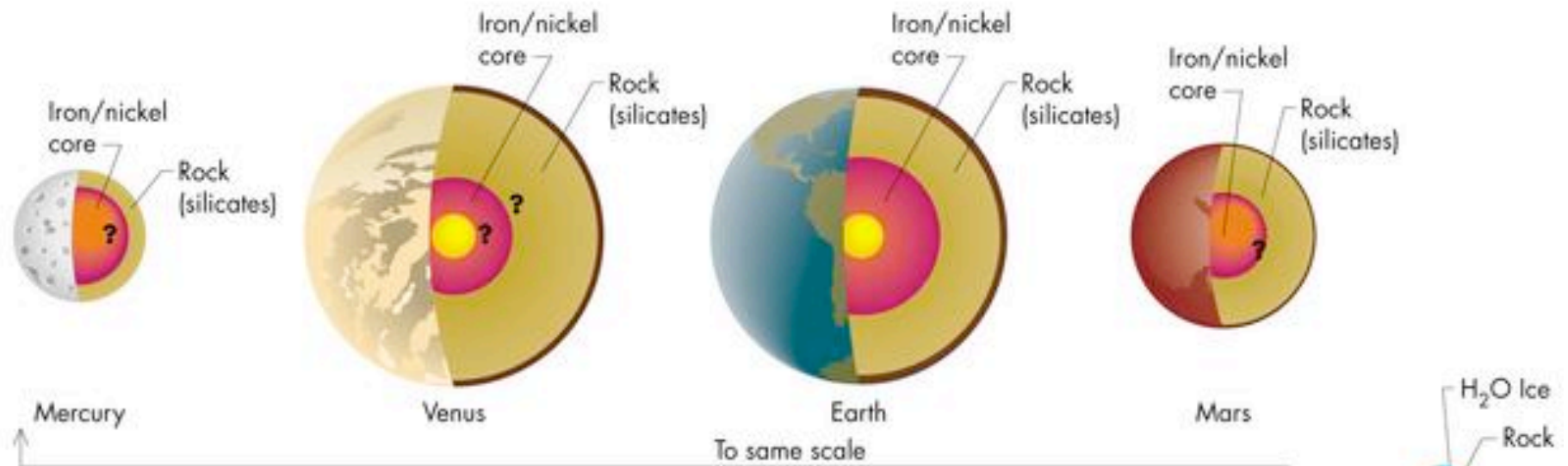
# Planetas interiores y exteriores

## Planetas interiores (Planetas terrestres):

- Mercurio, Venus, Tierra, Martes
- pequeños
- Alta densidad (4-5 g/cm<sup>3</sup>): Consisten en gran parte de rocas, metales
- Pocos o ningún satélites, ningún anillo

## Planetas exteriores (planetas jovianos):

- Jupiter, Saturno, Uranus, Neptuno
- Grandes (Jupiter es el límite para la formación de un planeta)
- Baja densidad (1-2g/cm<sup>3</sup>): Consisten en gran parte de gas y líquidos, sobre todo H y He
- Muchos satélites, anillos
- No tienen superficie sólida
- Tienen rotación rápida

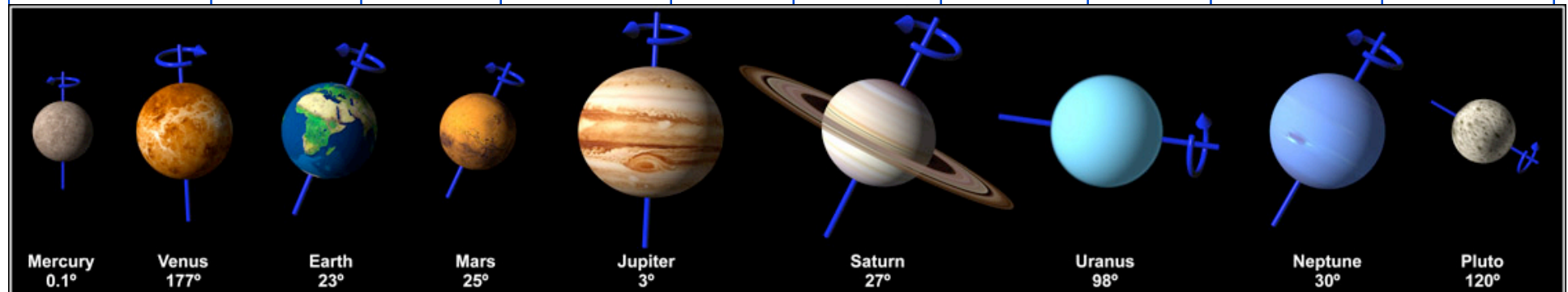


# Propiedades generales

|                            | Mercurio | Venus           | La Tierra                      | Marte           | Júpiter            | Saturno            | Urano              | Neptuno            | (Plutón)        |
|----------------------------|----------|-----------------|--------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| <b>diámetro</b>            | 0.382    | 0.949           | 1                              | 0.532           | 11.209             | 9.44               | 4.007              | 3.883              | 0.180           |
| <b>diámetro (Km)</b>       | 4.878    | 12.104          | 12.756                         | 6.787           | 142.800            | 120.000            | 51.118             | 49.528             | 2.300           |
| <b>Masa</b>                | 0.055    | 0.815           | 1                              | 0.107           | 318                | 95                 | 15                 | 17                 | 0.002           |
| <b>Distancia</b>           | 0.39     | 0.72            | 1                              | 1.52            | 5.20               | 9.54               | 19.18              | 30.06              | 39.44           |
| <b>Período orbital</b>     | 0.24     | 0.62            | 1                              | 1.88            | 11.86              | 29.46              | 84.01              | 164.8              | 247.7           |
| <b>Excentricidad</b>       | 0.2056   | 0.0068          | 0.0167                         | 0.0934          | 0.0483             | 0.0560             | 0.0461             | 0.0097             | 0.2482          |
| <b>Período de rotación</b> | 58.65    | -243*           | 1                              | 1.03            | 0.41               | 0.44               | -0.72*             | 0.72               | -6.38*          |
| <b>inclinación del eje</b> | 0.0      | 177.4           | 23.45                          | 23.98           | 3.08               | 26.73              | 97.92              | 28.8               | 122             |
| <b>Gravedad eq</b>         | 0.38     | 0.9             | 1                              | 0.38            | 2.64               | 0.93               | 0.89               | 1.12               | 0.06            |
| <b>velocidad de escape</b> | 4.25     | 10.36           | 11.18                          | 5.02            | 59.54              | 35.49              | 21.29              | 23.71              | 1.27            |
| <b>densidad</b>            | 5.43     | 5.25            | 5.52                           | 3.93            | 1.33               | 0.71               | 1.24               | 1.67               | 2.03            |
| <b>composición atm</b>     | Ninguna  | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> +He | H <sub>2</sub> +He | H <sub>2</sub> +He | H <sub>2</sub> +He | CH <sub>4</sub> |
| <b>número de Lunas</b>     | 0        | 0               | 1                              | 2               | 17                 | 28                 | 21                 | 8                  | 1               |

# Propiedades generales

|               | Mercurio | Venus  | La Tierra | Marte | Júpiter | Saturno | Urano  | Neptuno | Plutón |
|---------------|----------|--------|-----------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|
| diámetro      | 0.382    | 0.949  | 1         | 0.532 | 11.209  | 9.44    | 4.007  | 3.883   | 0.180  |
| diámetro (Km) | 4.878    | 12.104 | 12.756    | 6.787 | 142.800 | 120.000 | 51.118 | 49.528  | 2.300  |
| Masa          | 0.055    | 0.815  | 1         | 0.107 | 318     | 95      | 15     | 17      | 0.002  |



## Obliquity of the Nine Planets

© Copyright 1999 by Calvin J. Hamilton

|                     |         |                 |                                |                 |                    |                    |                    |                    |                 |
|---------------------|---------|-----------------|--------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| Gravedad eq         | 0.38    | 0.9             | 1                              | 0.38            | 2.64               | 0.93               | 0.89               | 1.12               | 0.06            |
| velocidad de escape | 4.25    | 10.36           | 11.18                          | 5.02            | 59.54              | 35.49              | 21.29              | 23.71              | 1.27            |
| densidad            | 5.43    | 5.25            | 5.52                           | 3.93            | 1.33               | 0.71               | 1.24               | 1.67               | 2.03            |
| composición atm     | Ninguna | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> +He | H <sub>2</sub> +He | H <sub>2</sub> +He | H <sub>2</sub> +He | CH <sub>4</sub> |
| número de Lunas     | 0       | 0               | 1                              | 2               | 17                 | 28                 | 21                 | 8                  | 1               |

# Radiación térmica de los planetas

**Albedo** define capacidad de reflejar. Es definido como cociente entre el flujo de radiación reflejada y el flujo recibido.

**Emisión térmica de los planetas:** Se calienta por la radiación del sol y emite como un cuerpo negro (es en equilibrio térmico)

¿Cómo se puede calcular la temperatura de un planeta?

¿Cómo se puede calcular su emisión?

# Temperaturas teóricas y reales

| Planeta  | Albedo | Distancia del Sol [UA] | Temp. teórica, rotación lenta [K] | Temp. teórica, rotación rápida [K] | Temp. Medida máxima [K] |
|----------|--------|------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| Mercurio | 0.06   | 0.39                   | 525                               | 440                                | 615*                    |
| Venus    | 0.76   | 0.72                   | 270                               | 230                                | 750                     |
| Tierra   | 0.36   | 1.00                   | 290                               | 250                                | 310                     |
| Marte    | 0.16   | 1.52                   | 260                               | 215                                | 290                     |
| Júpiter  | 0.73   | 5.20                   | 110                               | 90                                 | 130                     |

Temperatura medida > Temperatura teórica. Razones:

- Calor interno (planetas exteriores)
- Radiación térmico no puede salir de la atmósfera → efecto invernadero

\*Más alta que temperatura teórica por excentricidad de la órbita: La temperatura promedio en Mercurio es 440K.



# Campo magnético

Para que un planeta tenga un campo magnético se necesita **material conductor y fluido en su interior**.

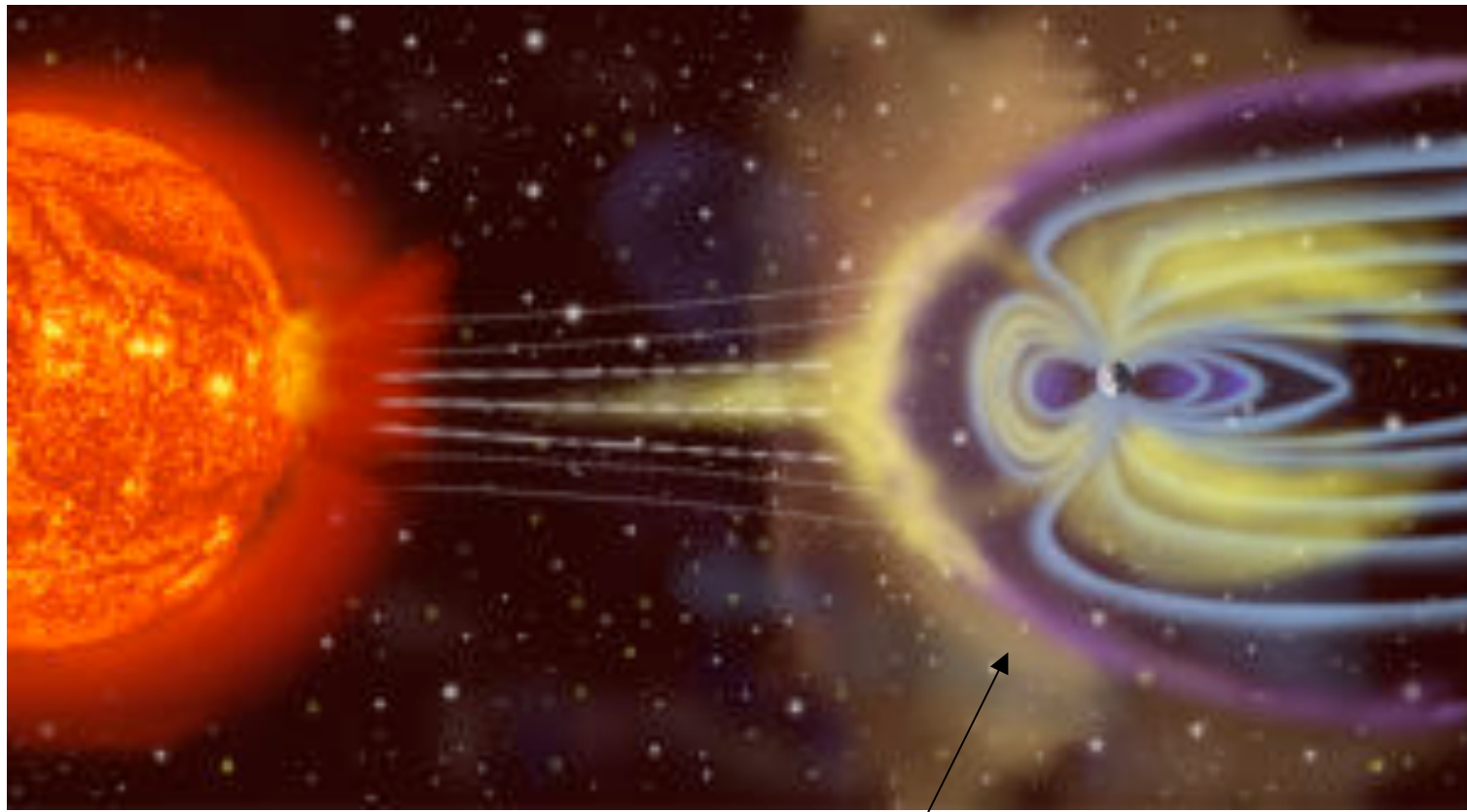
Campo magnético fuerte: Saturno, Jupiter, Tierra, Uranus, Neptuno

Campo magnético débil: Martes (núcleo frío y viscoso), Mercurio (rotación lenta)

No hay campo magnético: Venus (rotación lenta), Luna (frío y rotación lenta)

# Magnetosferas

- La Tierra (y algunos otros planetas) tienen un campo magnético.
- La magnetosfera nos protege del viento solar (partículas cargadas con alta energía emitidos del sol)



Magnetopausa

# Mercurio

Su órbita es bastante excéntrica ( $e = 0.21$ ). El perihelio está a 46 mill de km y el afelio a 70 mill → variaciones de temperatura muy grandes (100K) si está en perihelio o afelio.

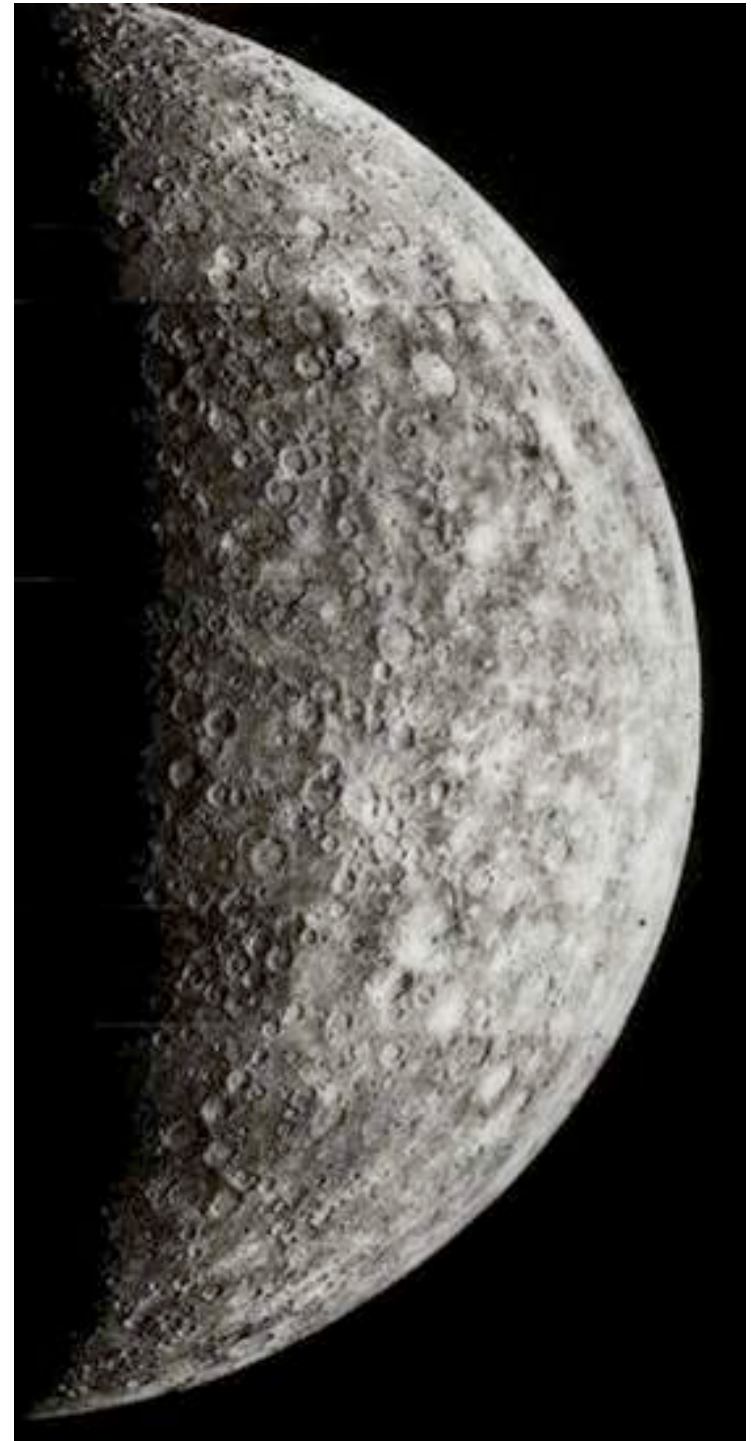
Su periodo de rotación es de 59 días y el de la rotación alrededor del Sol es de 88 días (relación 2:3) → El día en Mercurio dura 176 días terrestres. La razón para esta sincronización es debido a mareas en la fase temprana (parecido a lo que pasó en la Luna).

Su temperatura varía de los 700 grados a mediodía hasta los 100 bajo cero por la noche.

Tiene un campo magnético débil (1% del de la Tierra).

Es pequeño y no tiene atmósfera. Por eso su superficie está cubierta de cráteres de forma similar a la Luna.

Es el planeta menos conocido. Se visitó por el Mariner 10 en los años 70. Volverá a visitarse por la sonda Messenger en el 2011.



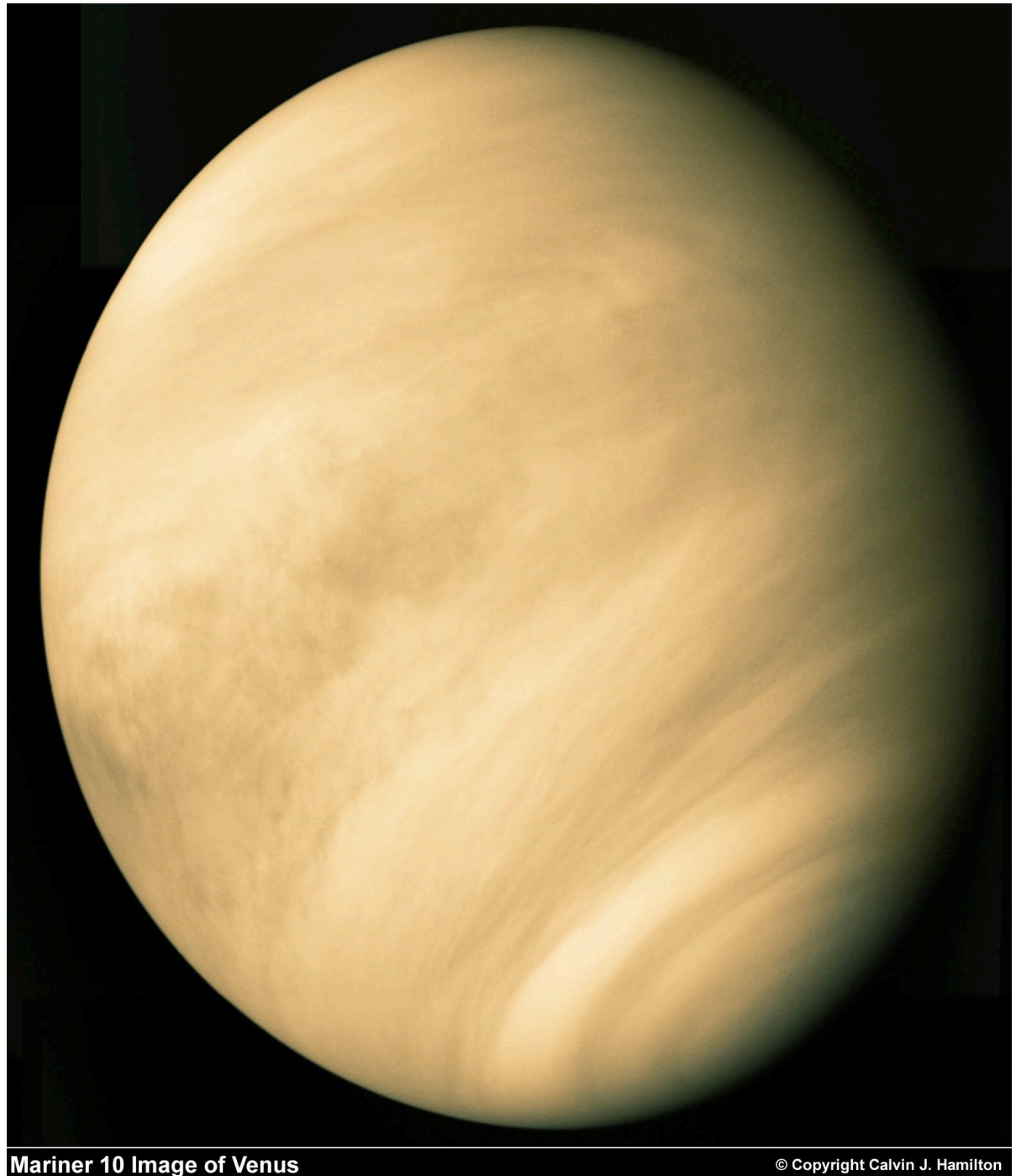
# Venus

Es el más parecido a la tierra en tamaño, pero muy diferente.

No tiene satélite, ni campo magnético.

Atmósfera:  $\text{CO}_2$  (96.5%),  $\text{N}_2$  (3.5%). La presión atmosférica es 92 veces mayor que en la tierra

Solo un 3% de la radiación solar penetra la superficie. La radiación en el infrarrojo no puede salir debido a la absorción del  $\text{CO}_2$  → efecto invernadero, temperatura superficial de 750 K!!

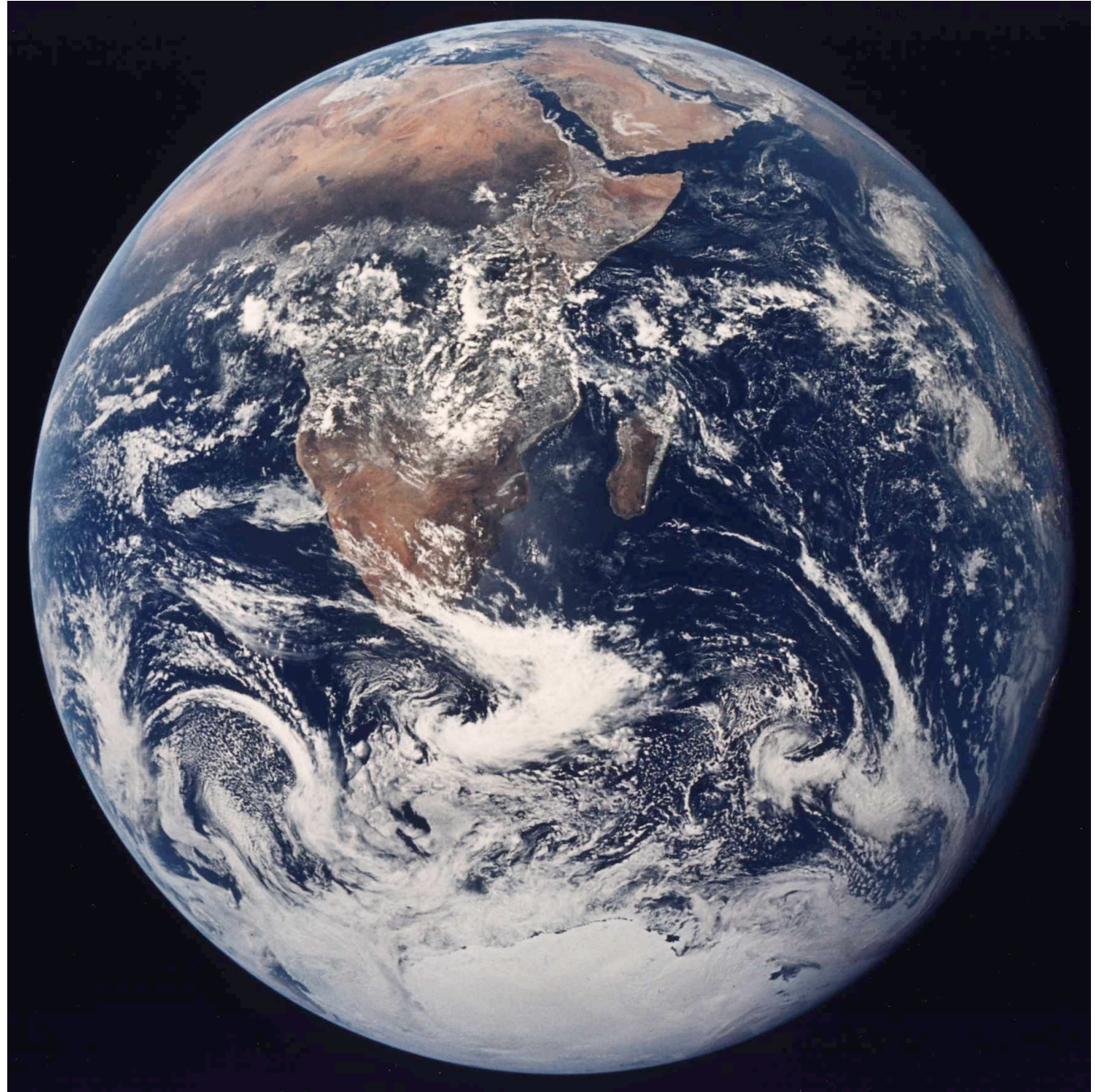


Mariner 10 Image of Venus



# La tierra

- Es el planeta más denso del sistema solar con  $5.52 \text{ gr/cm}^3$ .
- Cuenta con una atmósfera compuesta por un 78% de N y un 21% de O.
- El sistema Luna-Sol es especial: La Luna es grande en comparación con la Tierra.
- El núcleo externo y el manto son fluidos.
- El núcleo externo es el responsable del campo magnético terrestre.



# Marte

Su excentricidad orbital 0.093 (> 5 veces más que de la Tierra) produce una variación de temperaturas muy fuerte, variando de -170° C al amanecer de un día invernal hasta 20° C a mediodía de un día de verano. La temperatura media es de unos -60° C.

Su color rojo se debe a polvo levantado por viento a gran alturas en la atmósfera.

En la imagen se ve el Valle Marineria, un cañon de 5000 km de largo

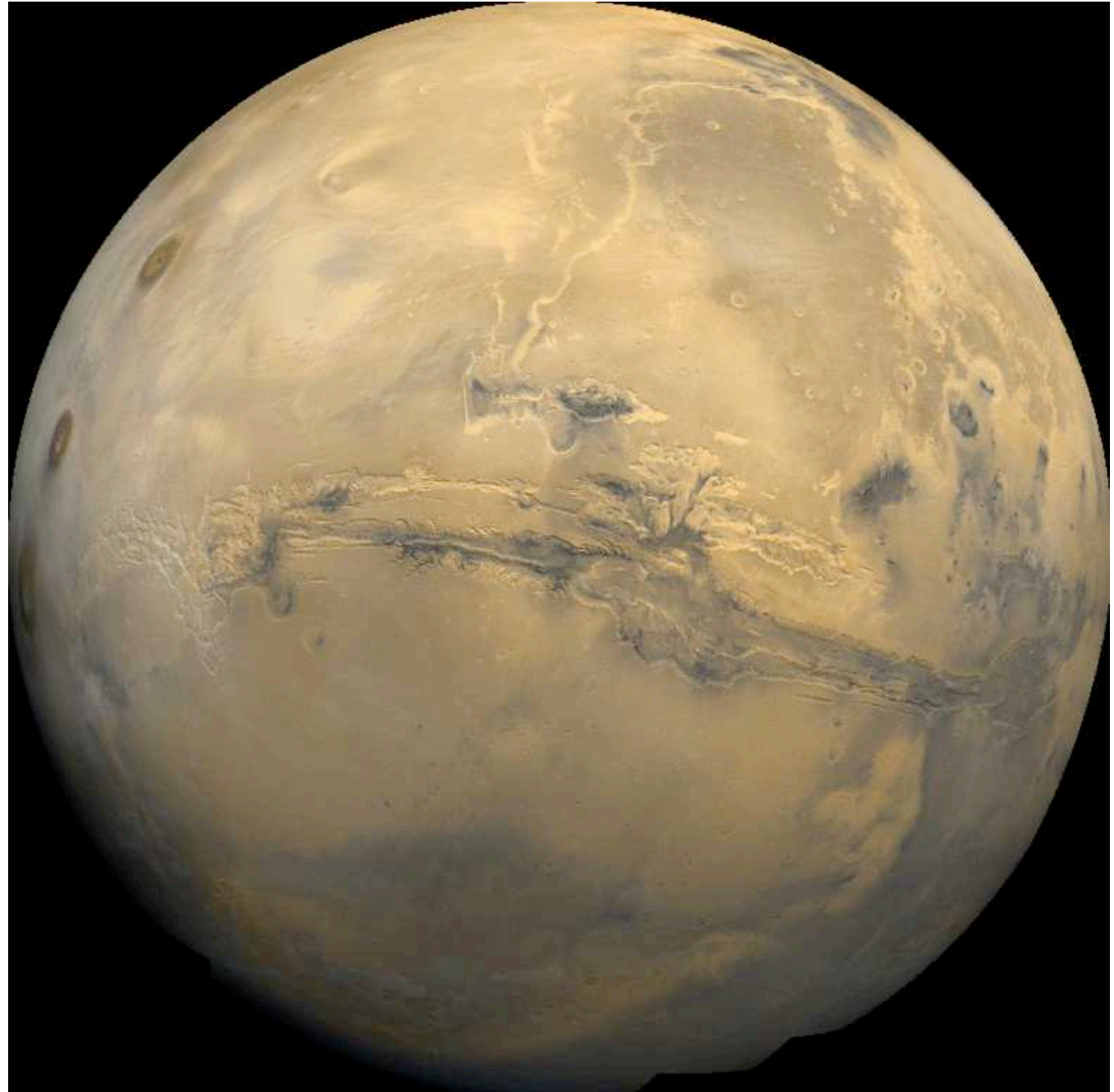




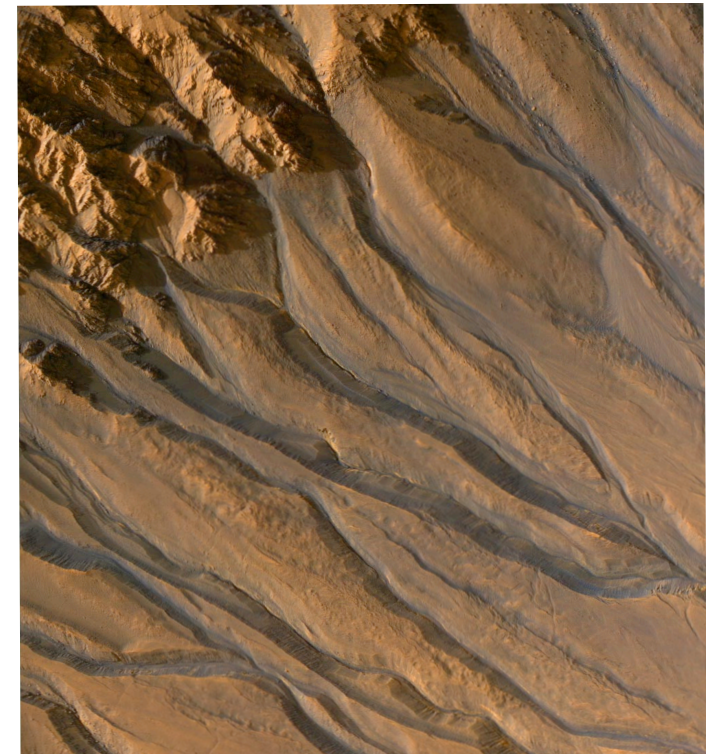


Imagen de Marte tomado con el Hubble Space Telescope en 1995 (opocisión de Marte). Se ven las capas polares.

Marte tiene una atmósfera tenue (comparada con la tierra) compuesta en un 95 % por  $\text{CO}_2$ , 2% de  $\text{N}_2$  y 0.1-0.4% de  $\text{O}_2$ .

Debido a cambios estacionales una cuarta parte de la atmósfera se congela en invierno en los casquetes polares (hielo de agua y  $\text{CO}_2$ )

Hay indicaciones de que existía agua fluido antes.



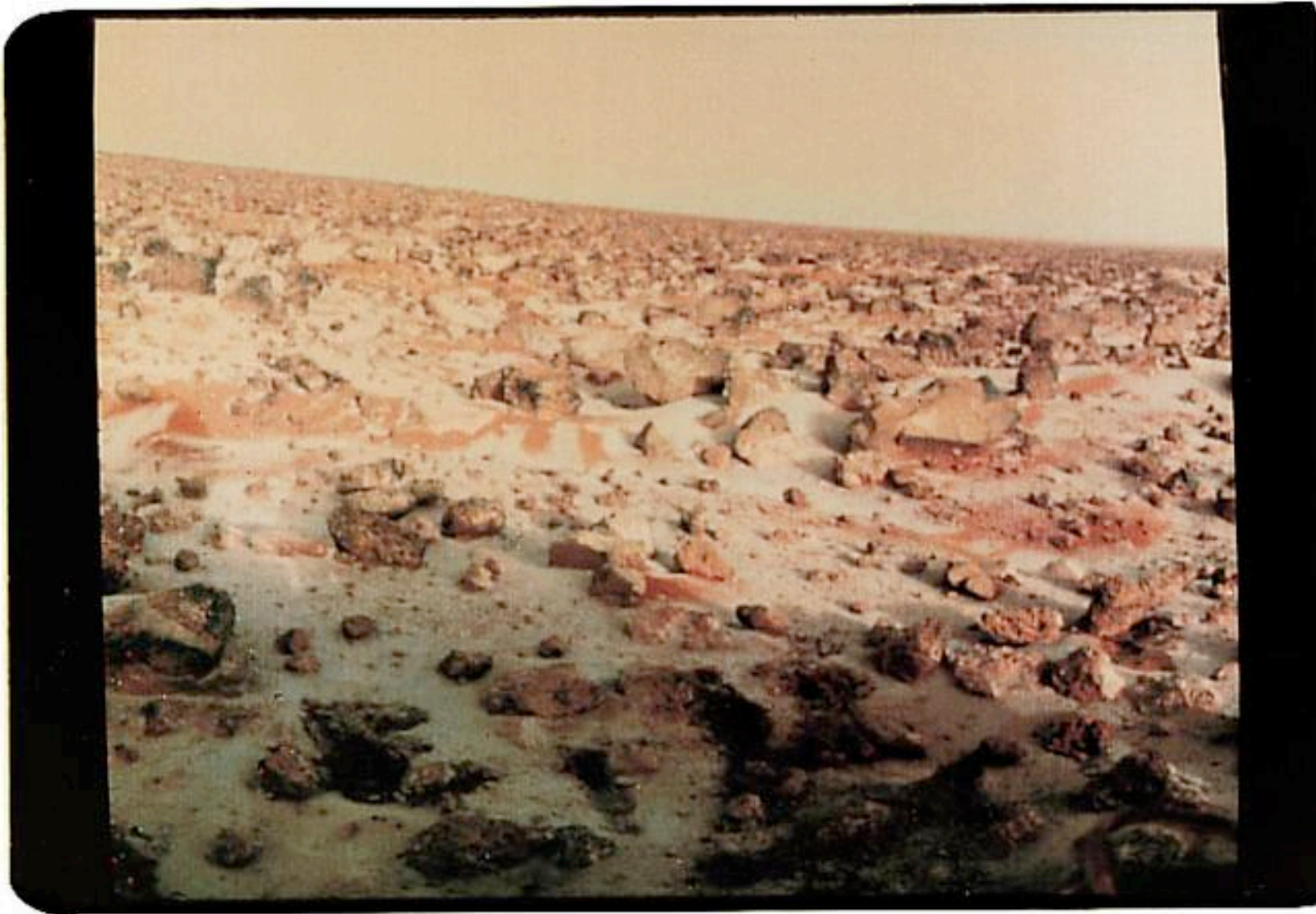


Imagen de la superficie de Marte hecho por la sonda Viking Lander (EEUU, 1976)





Los satélites de Marte: Phobos (grande) y Deimos (pequeño).  
Periodo orbital alrededor de Marte de Phobos: 7h39m.

# Júpiter

Júpiter es el mayor planeta del sistema solar. Su masa es más que el doble de todos los demás planetas juntos.

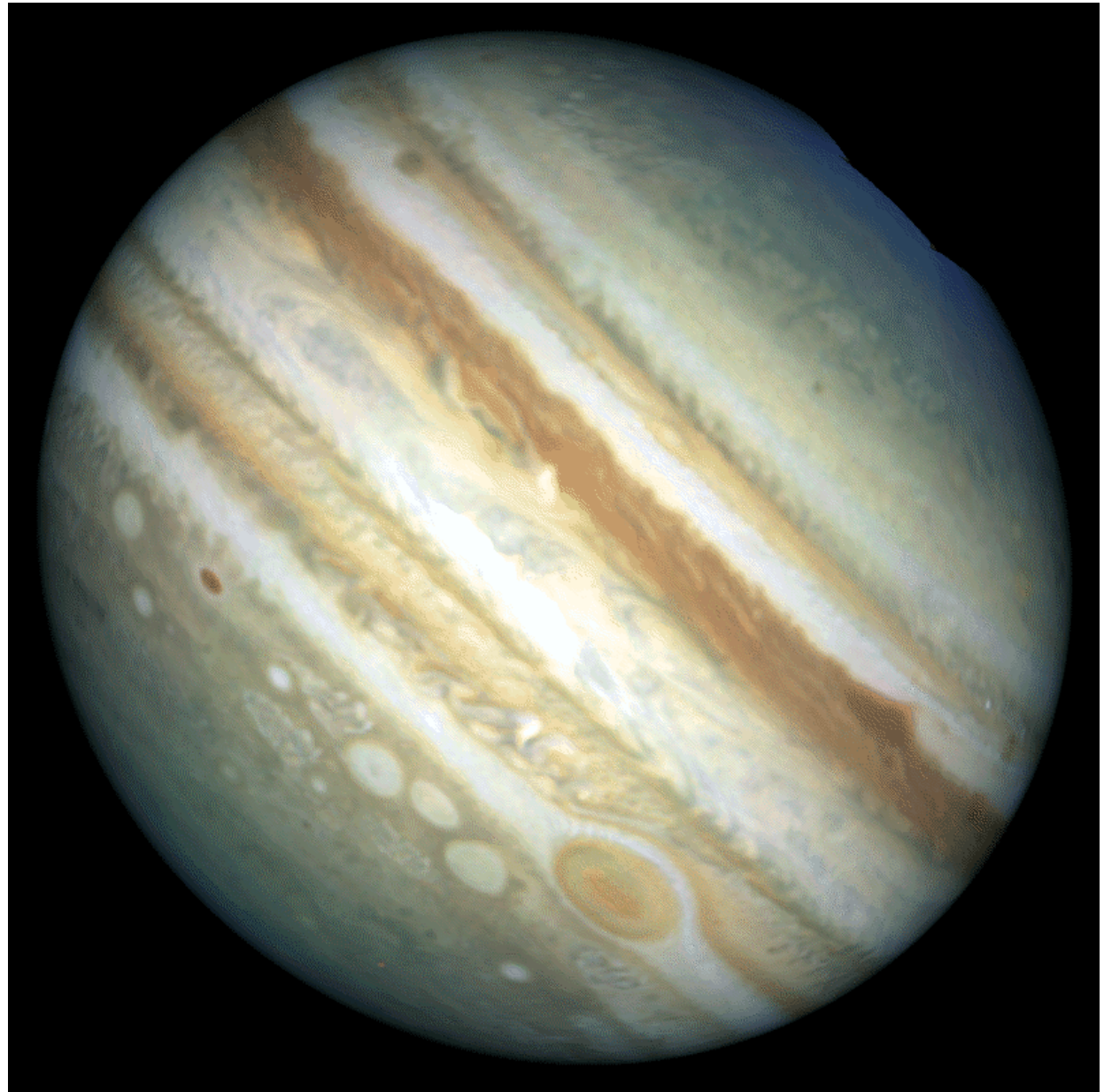
Si Júpiter estuviera ~70-80 veces más masivo, sería una estrella.

Es el cuarto objeto más brillante del cielo (después del sol, la luna y Venus) y es conocido desde la prehistoria.

Emite 2 veces más energía que la que recibe del sol (provinendo sobre todo de energía interna).

Júpiter posee un importante campo magnético.

Está rotando rápidamente -> achatado

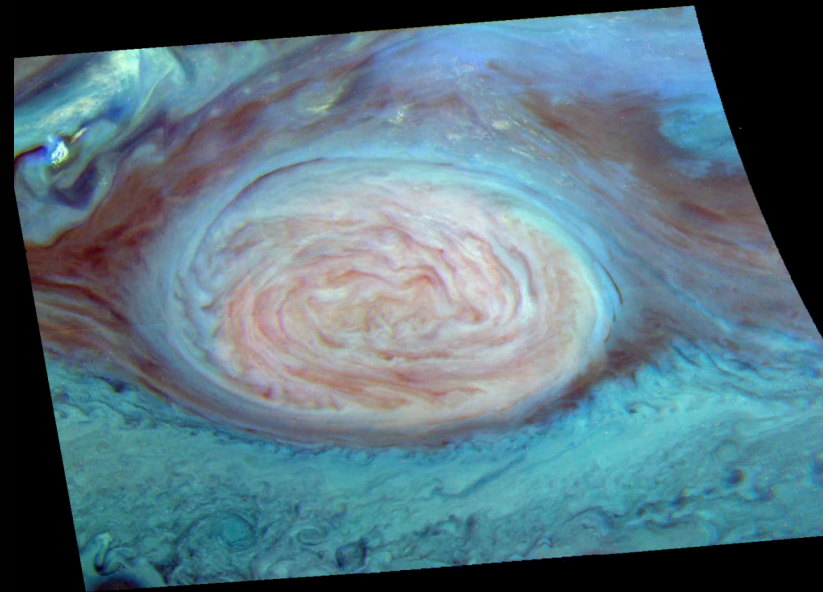
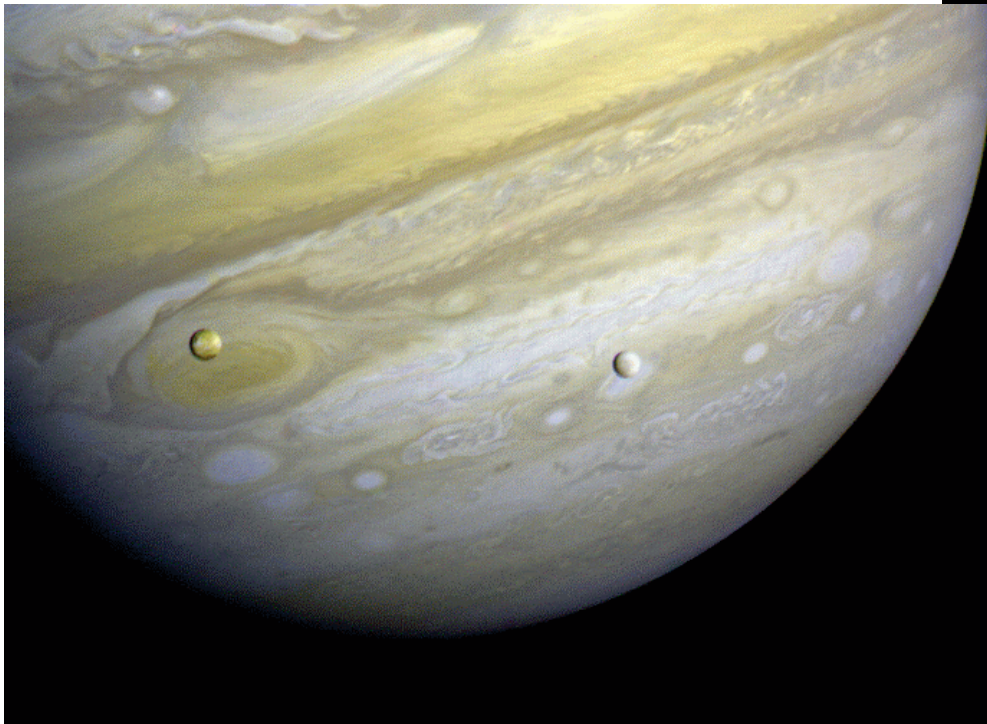




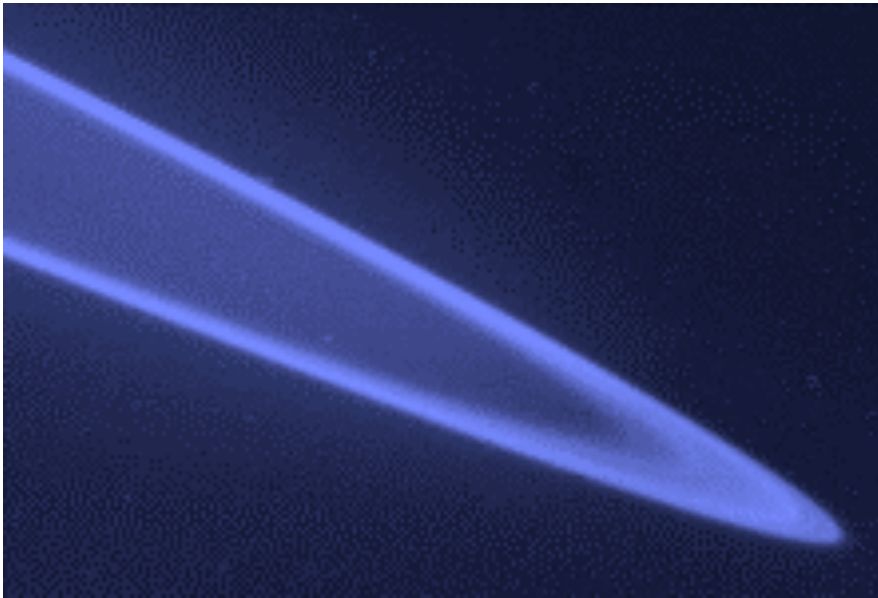
# Júpiter

Júpiter presenta en su superficie bandas claras (zonas) y oscuras (cinturones) debido a diferencias de temperatura y composición. En ellos hay vientos de más de 600 km/h.

El rasgo más distintivo de su apariencia es la Gran Mancha Roja. Un anticiclón de 12000x25000 km que lleva activo más de 300 años !!.



# El anillo y los satélites de Júpiter



Aunque no tan aparente como el de Saturno, Júpiter también presenta un anillo, compuesto fundamentalmente por pequeñas partículas de polvo.

Jupiter tiene por lo menos 63 satélites. Los más grandes se ven aquí (junto con la Luna)



Io

Europa

Earth's Moon

Ganymede

Callisto

# Saturno

Saturno es el segundo mayor planeta del sistema solar.

Galileo ya se dio cuenta de que era "extraño", pero no fue hasta 1659 cuando Huygens dedujo correctamente la geometría de los anillos.

Es un planeta gaseoso como Júpiter, compuesto fundamentalmente de hidrógeno y helio.

Es el cuerpo menos denso del sistema solar ( $d=0.7\text{g/cm}^3$ ). Menos denso que el agua !!!



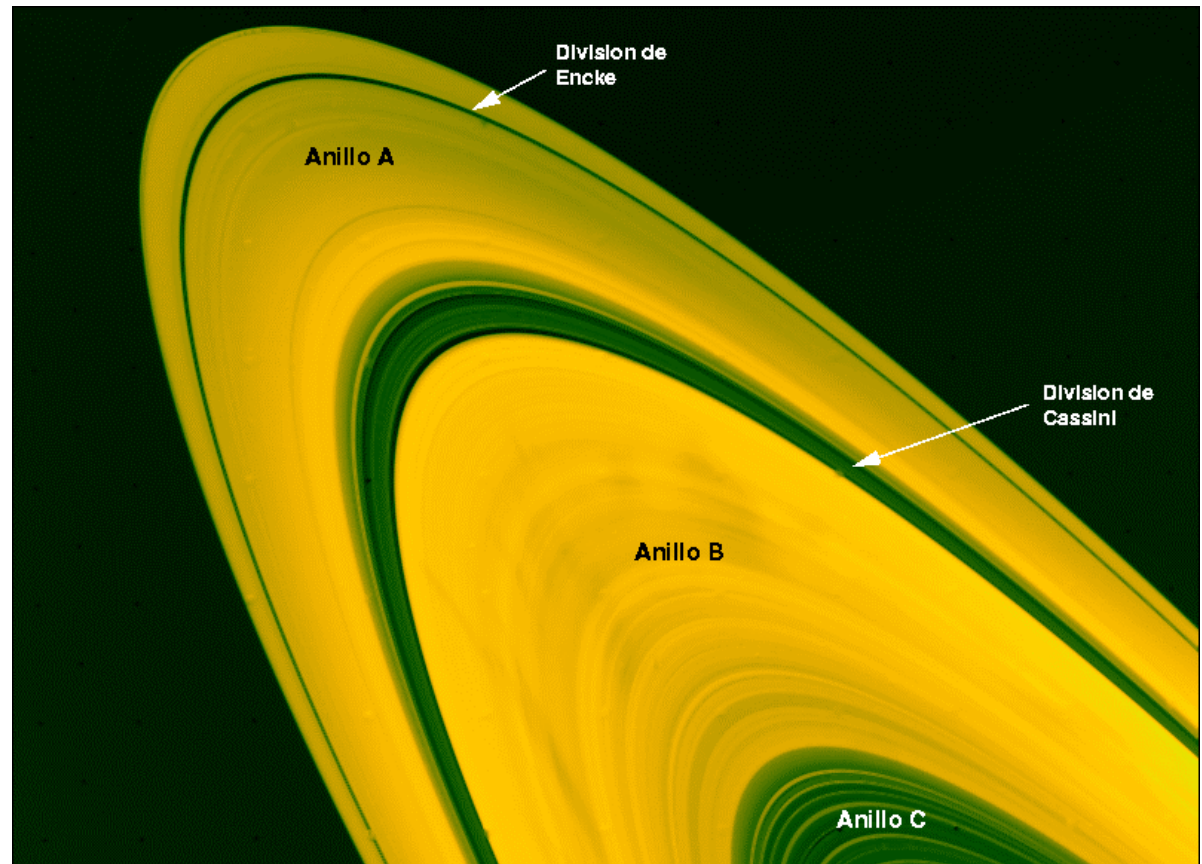


# Saturno

Saturno es un planeta muy achatado (la diferencia entre diámetro polar y ecuatorial es del 10%) debido a la rotación rápida.

Los anillos están formados por rocas de diversos tamaños (desde cm hasta varios m).

Son extremadamente delgados (<1.5km de grosor) a pesar de su descomunal tamaño (250000 km de diámetro)





# Satélites de Saturno



Saturno tiene 47 satélites conocidos. Solo 7 son suficientemente grande para ser esférico

# Urano

Urano fue descubierto en 1781 por Herschel. Había sido visto antes, pero confundido con una estrella.

Urano es muy peculiar porque su eje tiene una inclinación de 98 grados con respecto a la eclíptica.

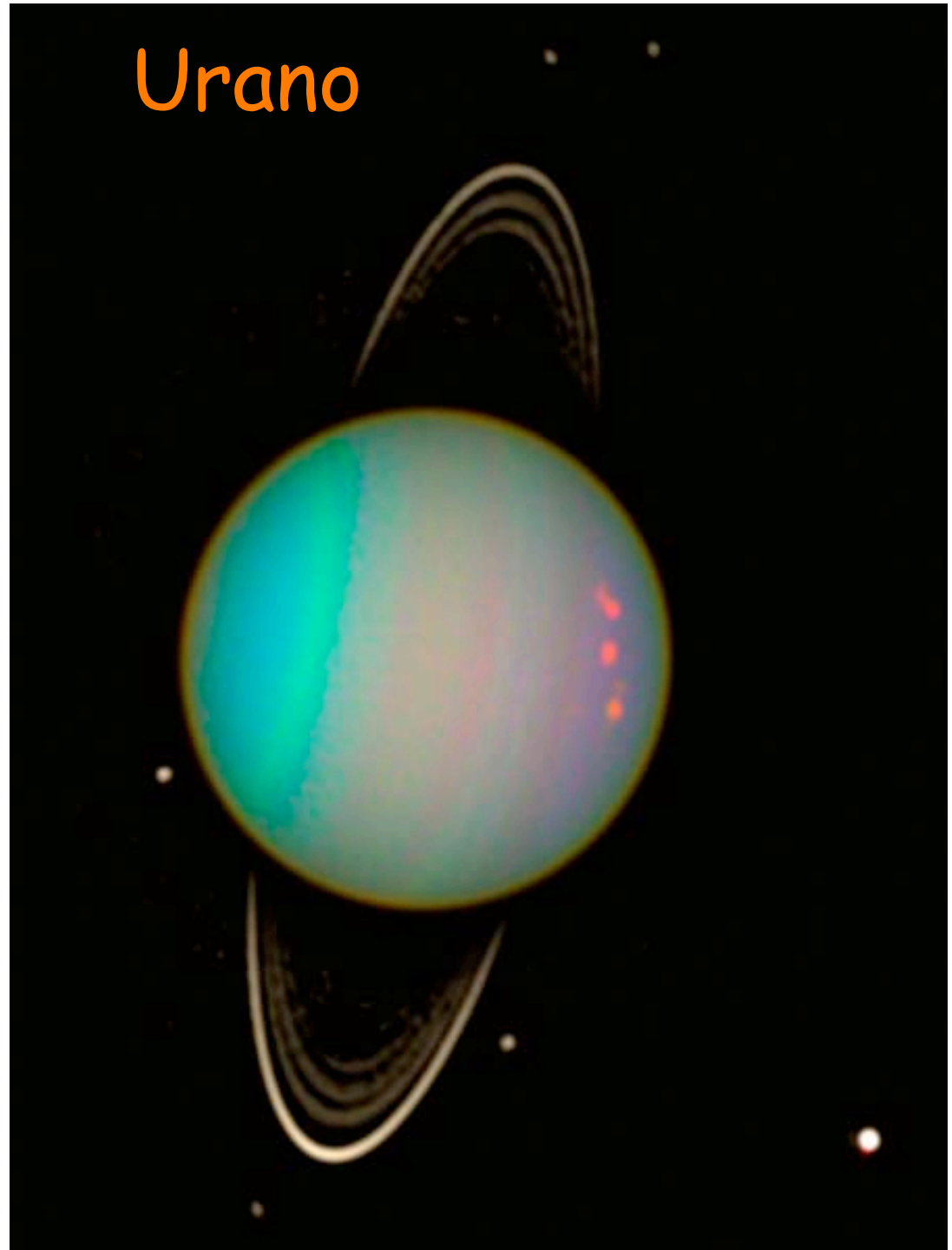
La atmósfera de Urano está compuesta por H (83%), He (15%), metano (2%), con restos de acetileno e hidrocarburos.

La absorción producida por el metano le da su característico color azulado.

Tiene anillos más tenues que los de Saturno y más importantes que los de Júpiter y conocemos 27 satélites.

Su campo magnético está inclinado 60% respecto a su eje y descentrado

Tiene más de 15 satélites.



# Neptuno

Su existencia fue predicha en 1845/46 por John Adams y Urbain Le Verrier como causante de la perturbación en la órbita de Urano.

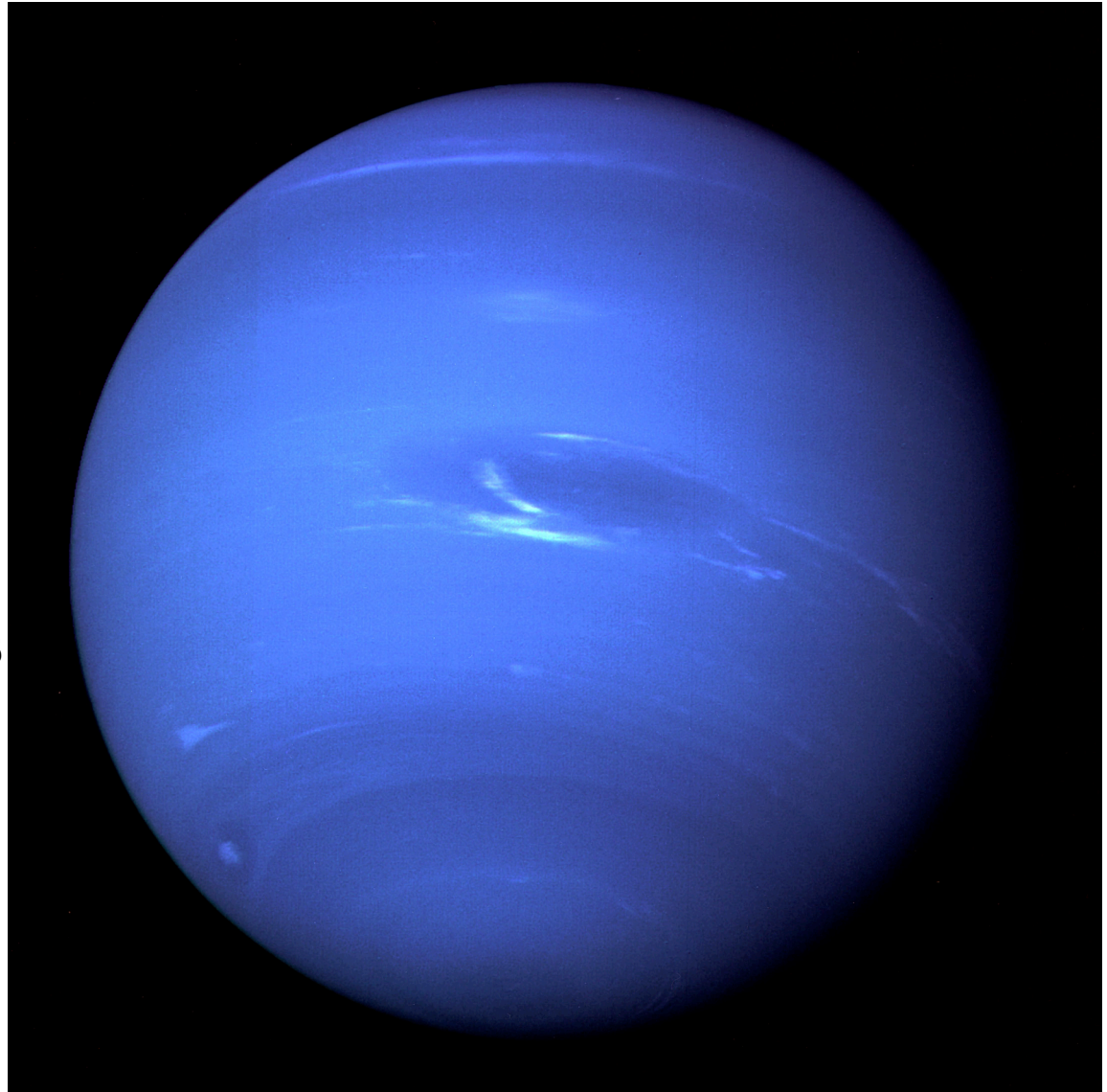
Fue visto por primera vez por Galle y D'Arrest el 23 de septiembre de 1846.

La atmósfera de Neptuno está compuesta por hidrógeno, helio y metano.

Es el más externo de los gigantes gaseosos.

Tiene anillos debiles y se conocen 8 satélites

Su campo magnético también está inclinado respecto a su eje de rotación y descentrado



# Cometas de larga duración y la nube do

Los **cometas se pueden clasificar** según la duración de su órbita:

- Cometas de corta duración (T entre 20 y 200 años)
- Cometas de larga duración (T entre 200 y millones de años)
- Cometas de apariencia única

En 1950 Oort se dio cuenta de que:

- Los **cometas de larga** duración no vienen del espacio interestelar.
- Sus afelios llegan hasta aprox. 50 000 UA (0.4 pc)
- No tienen direcciones privilegiadas (no se mueven solamente en el plano de la eclíptica)

Propuso la existencia de la "**nube de Oort**"

- Es una nube esférica que contiene los cometas
- Debido a interacciones gravitatorias (entre ellos o con estrellas) cambian su órbita y se van a la zona central del sistema solar en órbitas elípticas
- No se sabe con seguridad si existe de verdad, porque es demasiado lejos (hasta ahora) para observar objetos de ahí directamente

# El cinturón de Kuiper y objetos "transneptunianos"

- En 1951 Kuiper propuso la existencia de un disco en las afueras de las órbitas de los planetas con un gran número de objetos pequeños (otras personas habían propuesto algo parecido antes)
  - En 1992 se encontró el primer objetos de este "cinturón de Kuiper"
  - Ahora se conocen más de 1000 objetos
  - Se estiman que hay > 70 000 con diametro >100km
  - El cinturón de Kuiper se extiende en forma de torus entre ~ 30 y 50 UA
- 
- Primero se pensó que el cinturón de Kuiper es el origen de los cometas de corta duración, pero se notó que en el cinturón las órbitas son estables.
  - Ahora se piensa que en las afueras del cinturón de Kuiper hay otra zona: el disco disperso
    - Ahí hay objetos en órbitas más inestable
    - Puede ser el origen de cometas de corta duración

Todos los objetos con órbita más allá que Neptuno se llaman objetos "transneptunianos"



## Largest known Kuiper Belt objects



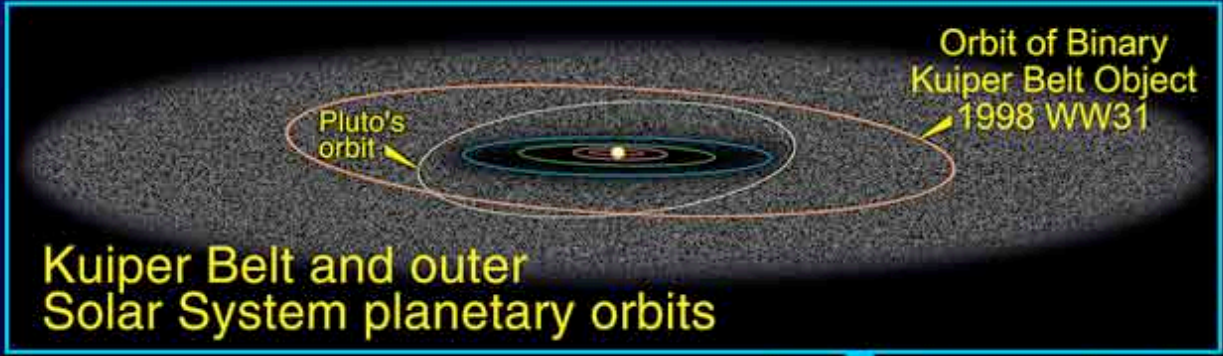
Algunos objetos transneptunianos



### Sedna, un caso interesante:

- Órbita muy extensa. Pertenece al disco disperso?
- Llega a la nube de Oort?

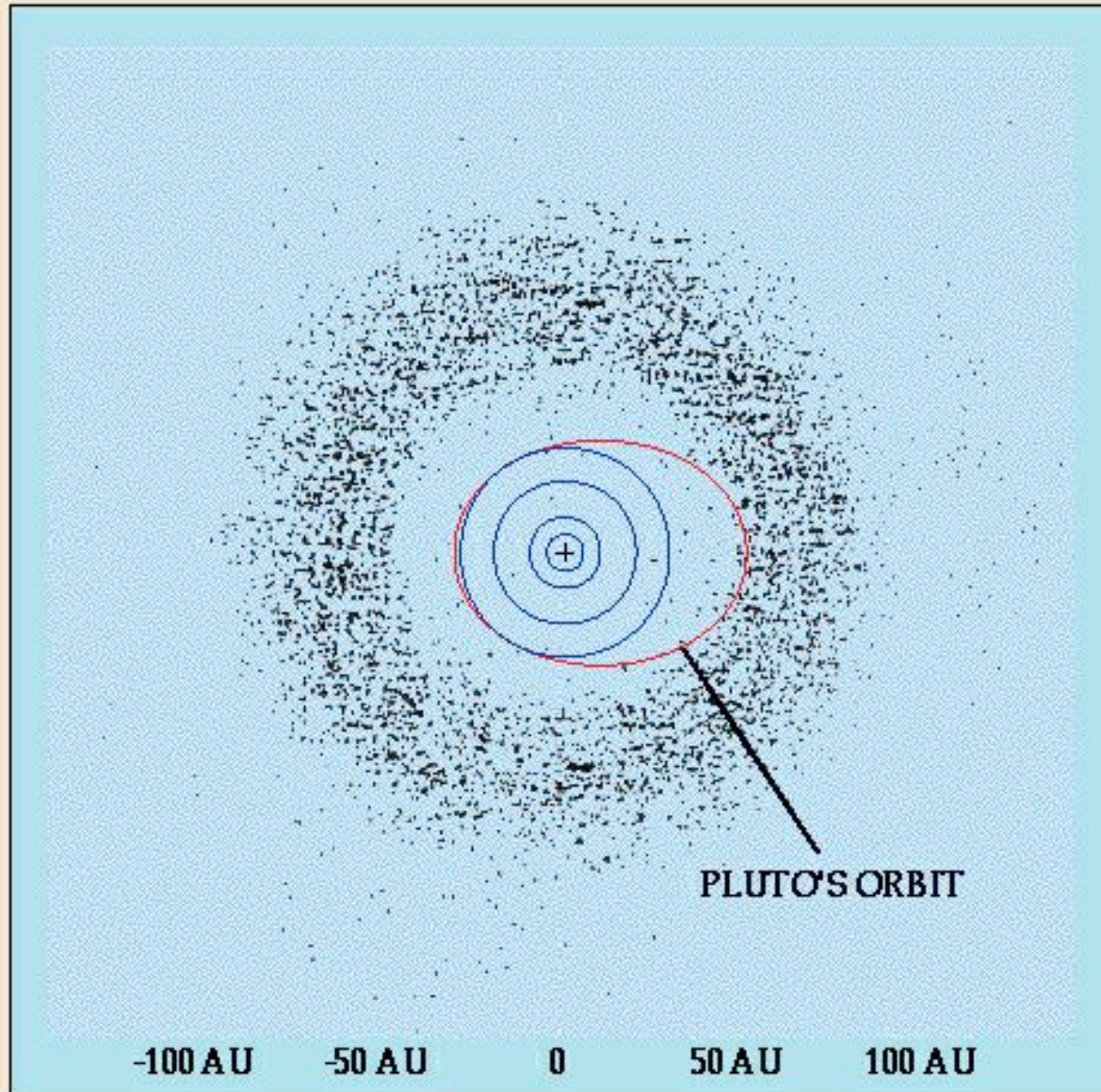




*Oort Cloud cutaway drawing adapted from Donald K. Yeoman's illustration (NASA, JPL)*



## THE OUTER PLANETS AND THE KUIPER DISK



Y Pluto?  
Planeta o objeto del  
cinturón de Kuiper?

# Definición de planetas y otros cuerpos

- Un planeta es (→ los 8):
  - Un cuerpo con órbita alrededor del sol
  - Con suficiente masa para estar en equilibrio hidrostático (→ forma redonda)
  - Ha limpiado su alrededor de otros cuerpos
- Un planeta enano es (→ Prototipo es Pluto):
  - Un cuerpo con órbita alrededor del sol
  - Con suficiente masa para estar en equilibrio hidrostático (→ forma redonda)
  - No limpiado su alrededor de otros cuerpos
  - No es un satélite
- Los otros cuerpos se llaman "pequeños cuerpos del sistema solar"

# Formación del sistema solar

Entre las primeras teorías había algunas que lo explicaban con un **evento catastrófico**:

Cometa pasa al lado del sol y produce pérdida de materia

- No puede ser por pequeña masa del cometa

Pérdida de materia del sol debido a pasaje próximo de otra estrella

- Colisión o pasaje próximo de dos estrellas es extremadamente improbable

**Alternativa:** Formación a partir de nube de gas

1755: Kant propone en "Historia general de la materia y teoría del cielo" la formación a partir de una nebulosa inicial, aplanada y en rotación

1796: Laplace sale independientemente a la misma conclusión

→ Casi correcta, pero no puede explicar distribución de momentum angular

# Hechos observacionales que hay que explicar

1. Orbitas de los planetas:
  1. Casi circulares
  2. En el mismo plano
  3. Dirección de rotación igual a rotación del sol
2. Rotación propia de los planetas:
  1. Eje de rotación perpendicular al plano del sistema solar (menos Uranus)
  2. Rotación directa (es decir en la misma dirección que órbita) (excepción Venus)
3. Distribución del momentum angular:

Sol tiene el 99.87% de la masa total, pero solo el 0.54% del momentum angular

Planetas tienen 0.1355 % de la masa (casi toda en Jupiter y Saturno), pero 99.46% del momentum angular



# Hechos observacionales que hay que explicar

## 4) Diferencia entre planetas interiores y exteriores

- Interiores: rotación lenta, pequeños, alta densidad (contienen muchos metales)
- Exteriores: rotación rápida, grandes, baja densidad (contiene gran fracción de H)

## 5) Sistemas de satélites y planetas es similar al sistema de planetas y el sol

Cráteres de impactos en algunos planetas y satélites

Asteroides, cometas - nube de Oort, cinturón de Kuiper

Composición de meteoritos es diferentes a planetas y satélites

Edad del sistema solar, formación en poco tiempo

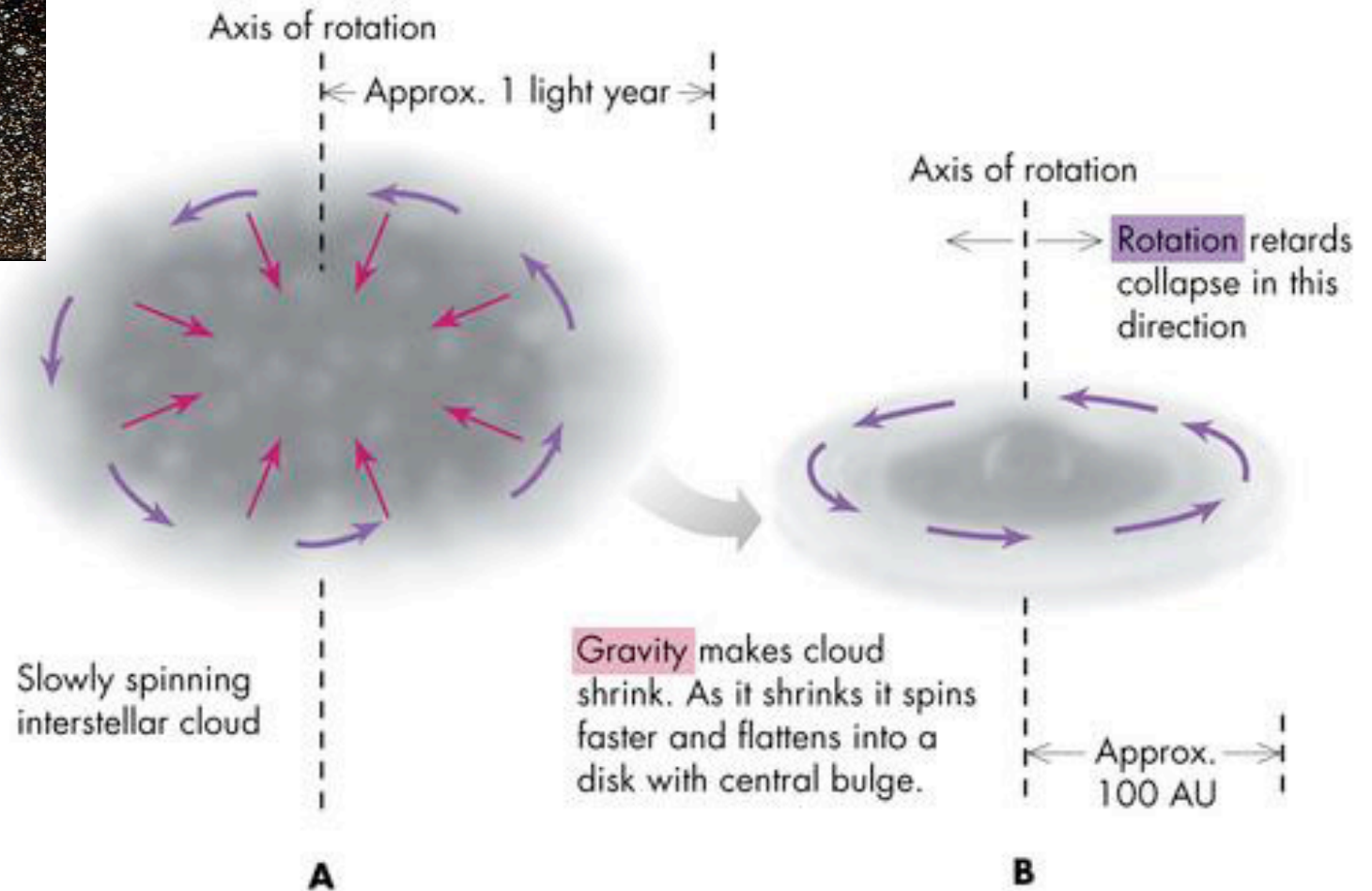


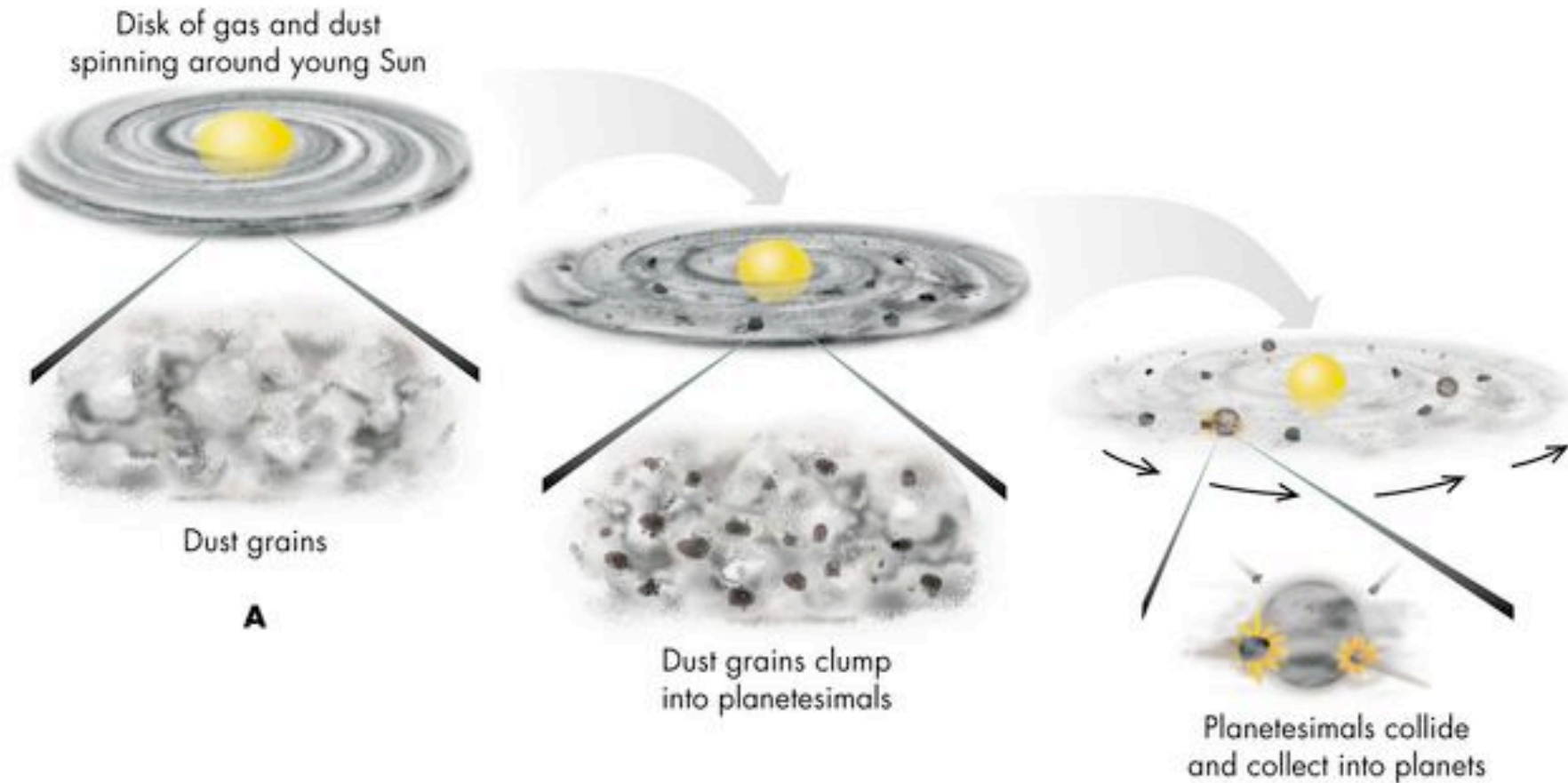
# Formación de una estrella

## Nube interestelar:

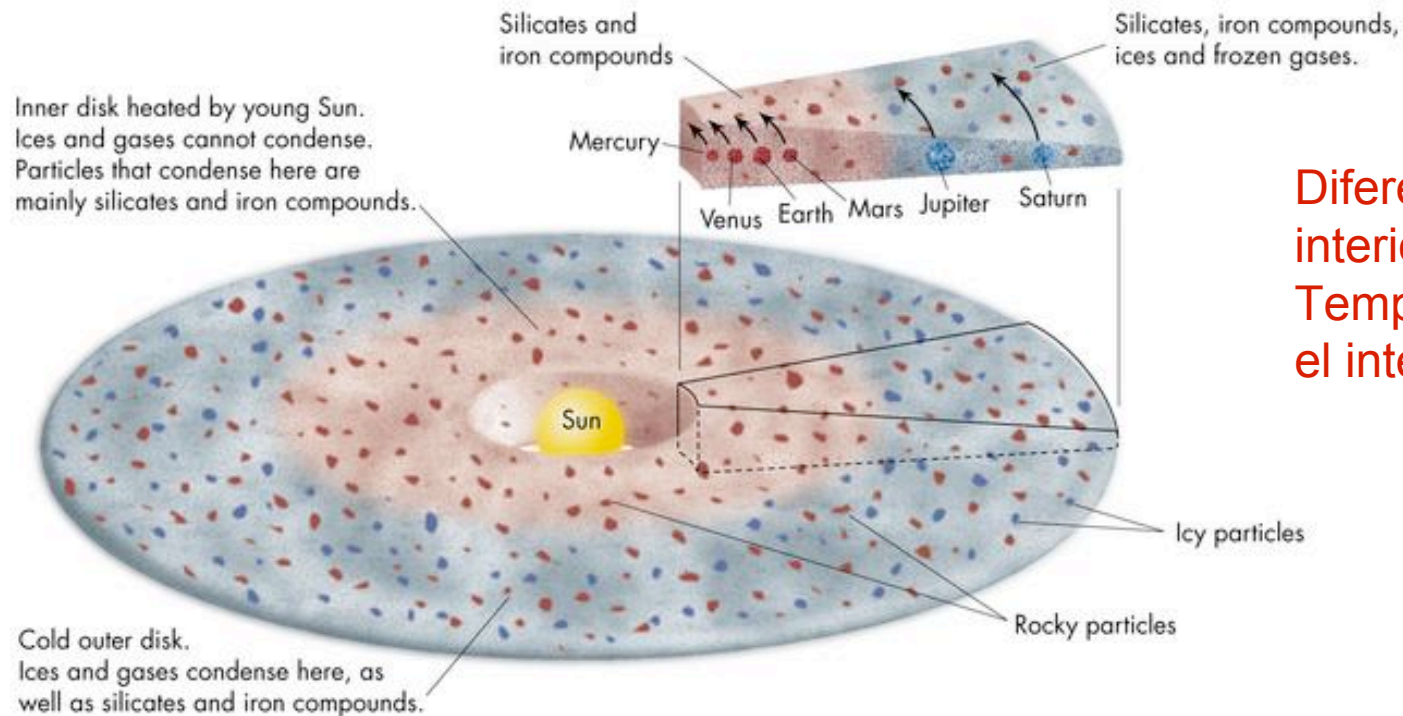
Compuesto por:

- H, He (elementos primordiales)
- Elementos más pesados (creado en estrellas de generaciones anteriores)





Los granos de polvo se pegaron y formaron objetos más grande  
 Se formaron “planetisimales” (objetos de diámetros de unos km)  
 Planetisimales colisionan y forman planetas

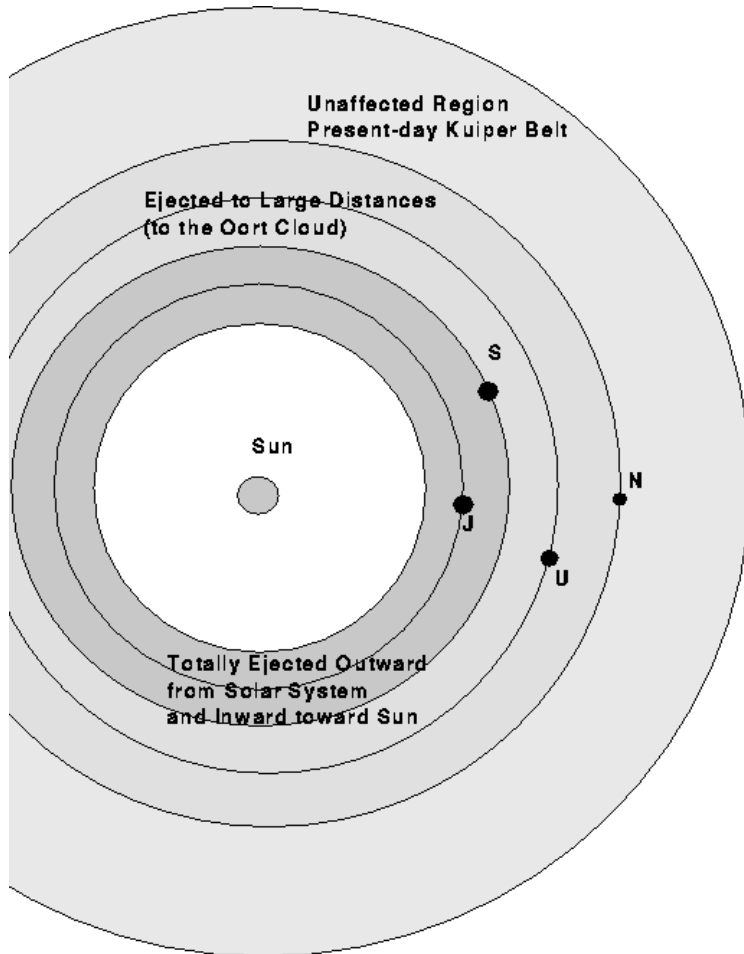


Diferencia entre planetas interiores y exteriores:  
Temperatura más baja en el interior que en el exterior

- Diferencia entre planetas interiores y exteriores: congelación de agua → "línea de nieve" a ~5 AU
- En las afueras:
  1. Temperaturas más bajas → materiales con temperatura de evaporación más baja pueden condensar (gases)
  2. Condensación empieza antes → cuerpos se pueden hacer más grandes
- Después de su formación: Planetas atraen más material debido a su gravitación. "Limpian" un anillo alrededor de ellos. Jupiter y Saturno pueden atraer mucha materia, incluso gas, debido a sus masas grandes y el "adelanto" en su formación con respecto a los planetas interiores
- Cuando en el sol empieza fusión nuclear empieza viento solar y se limpia sistema solar de planetisimales → final de la formación de planetas

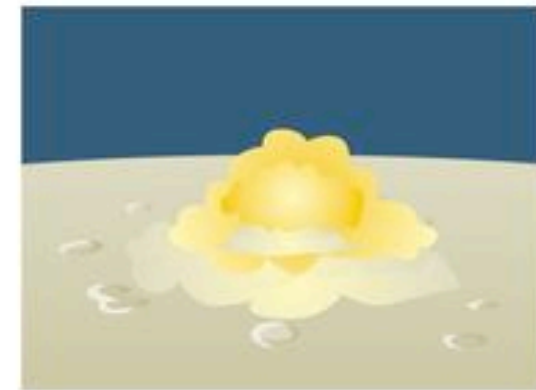
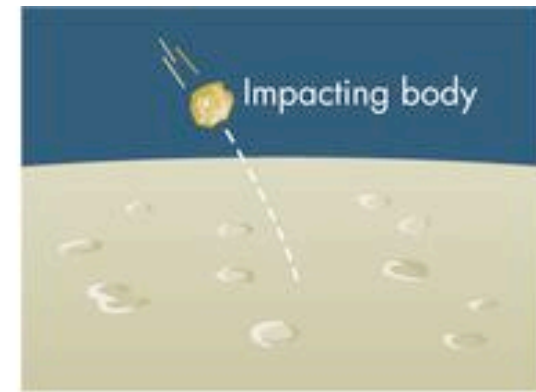
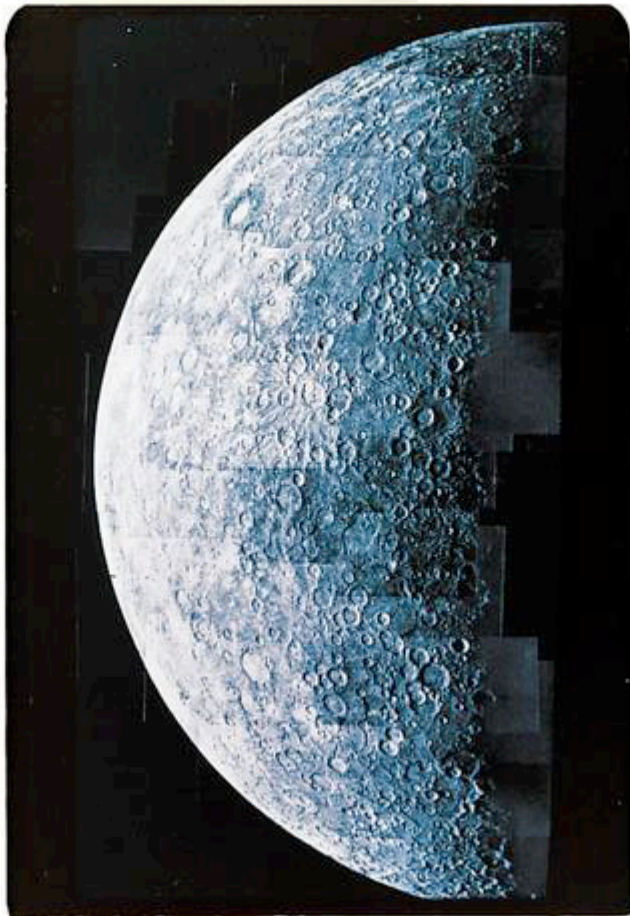


# Origen de los otros objetos



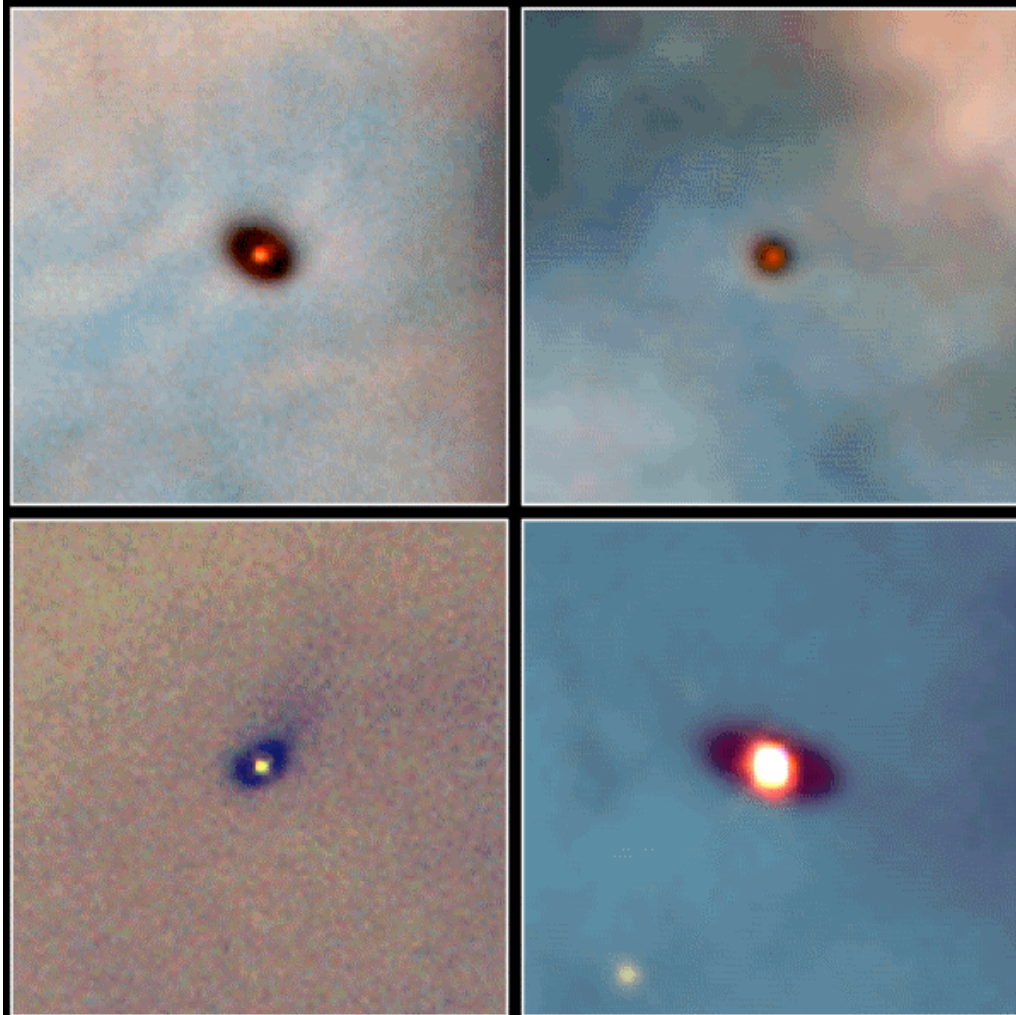
- **Nube de Oort:**
  - Objetos eyectado debido a interacciones con planetas gigantes
- **Cinturón de Kuiper:**
  - Remanente del disco de acreción
  - Planetesimales y asteroides que no han acretrado suficiente material para hacerse objetos más grandes
- **Asteroides:** Aglomeraciones de planetisimales
- **Satélites de planetas:** Diferentes escenarios de formación:
  - Formación en un disco alrededor del planeta similar a la formación de los planetas
    - o Podría ser el caso de algunos satélites alrededor de los planetas exteriores
  - Capturación de un asteroide (→ Marte)
  - Debido a impacto de un asteroide (→ Tierra)

Sistema solar temprano: Bombardeo intenso con meteoritos debido a la abundante materia interplanetaria



## Otros sistemas solares solares

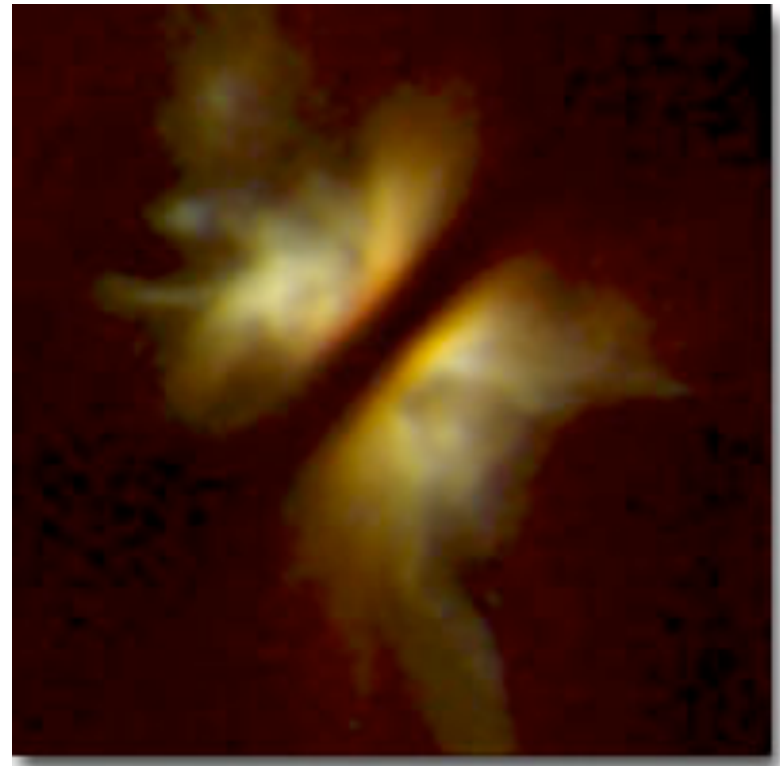
Se han detectado lo que parecen  
discos protoplanetarios en  
otras zonas del universo  
donde se están formando  
estrellas actualmente.



**Protoplanetary Disks  
Orion Nebula**

HST · WFPC2

PRC95-45b · ST ScI OPO · November 20, 1995  
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA



# Métodos principales de detección de "exoplanetas":

## Efecto gravitatorio del planeta

- a) Astrometría de alta precisión para medir pequeñas oscilaciones de la órbita
- b) Variaciones en la velocidad radial de la estrella

Cambio de la luminosidad debido a ocultaciones: método de tránsito.

- El cambio de luminosidad que se resultaría de Jupiter delante del sol es de 1%, la de la tierra de 0.01 %

Detección directa: difícil porque la estrella es mucho más brillante que el planeta.



# 1. Efecto gravitatorio

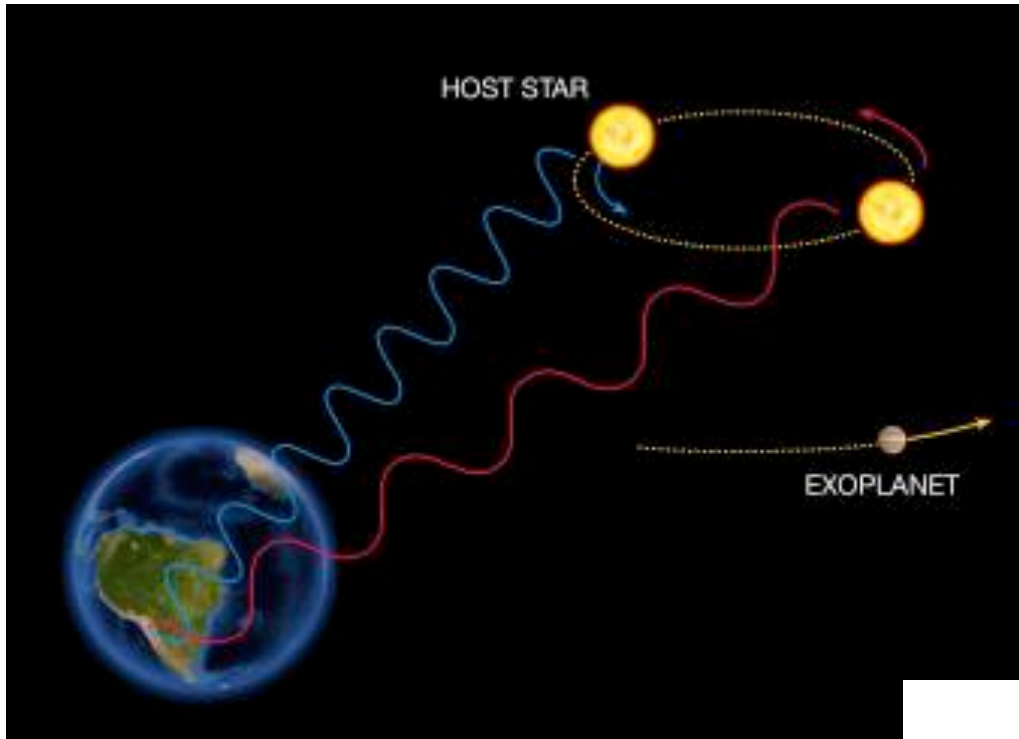
a) Desplazamiento de la estrella debido al efecto del planeta --> hace falta “astrometría” muy precisa



Lo que está pasando



b) Variaciones en la frecuencia de las líneas de emisión en la estrella debido al efecto Doppler

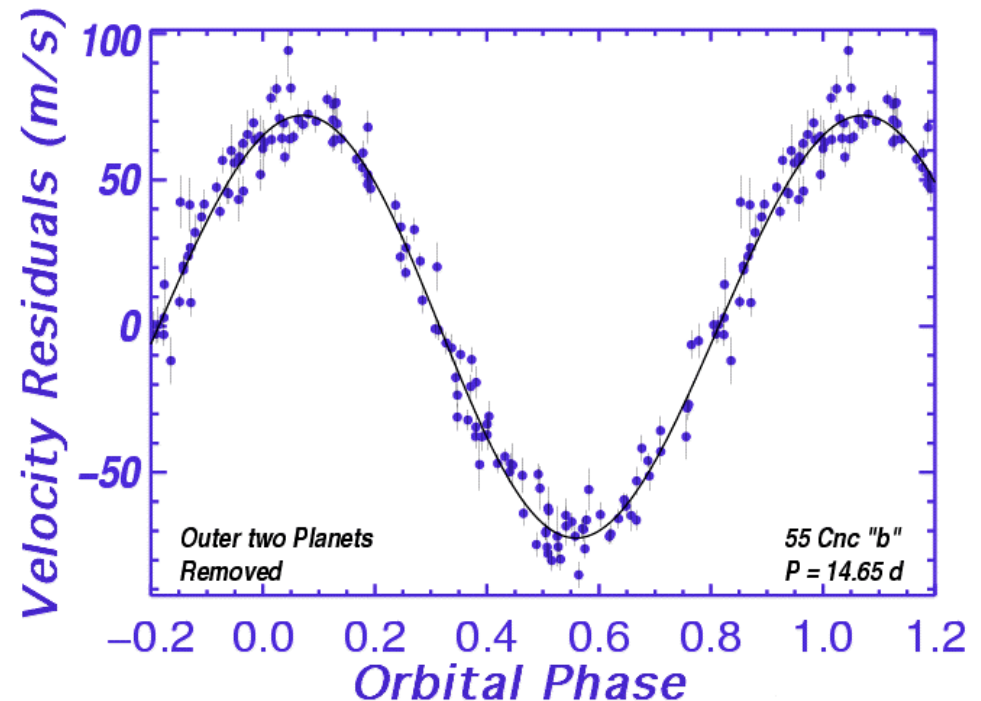


## Método de velocidad radial

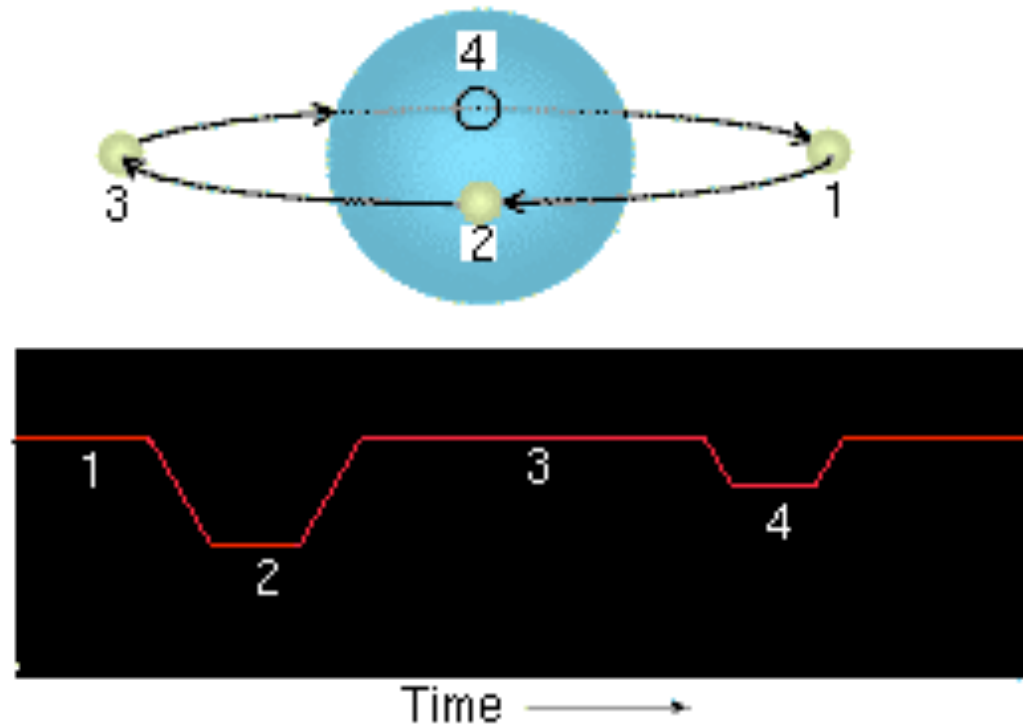
Efecto Doppler hace que la luz de la estrella está corrido la azul cuando se acerca y al rojo cuando se aleja.

El resultado es un oscilación periódica en la frecuencia de las líneas. →

- Este método favorece la detección de planeta masivas a poca distancia de la estrella (→ efecto más notable)
- Da solamente masa mínima del planeta porque movimiento tangencial no se puede medir.



## 2. Método del tránsito



Desventaja: hay solamente una pequeña probabilidad que los tránsitos se produzcan, i.e. que la orientación de la órbita sea adecuada.

Para un planeta a 1UA: probabilidad de 0.5% → si cada estrella tiene un planeta a esta distancia hay que observar 200 para detectar uno.

Este método requiere la observación de muchas estrellas

# Primera detección de exoplaneta alrededor de estrella de secuencia mayor en 1995

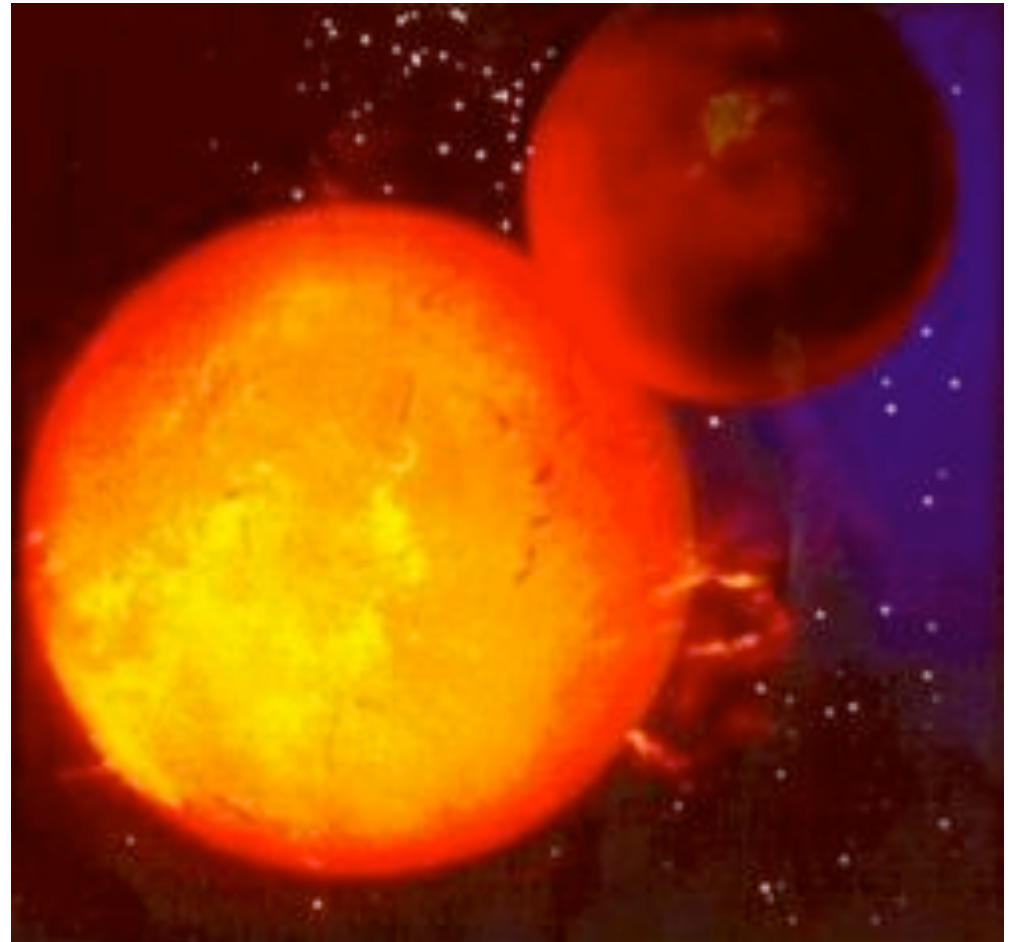
Pegasi b, con método de velocidad radial

Masa: 0.5 x masa de Jupiter

La Estrella es parecida al sol

Distancia del planeta a la estrella: 0.052  
UA

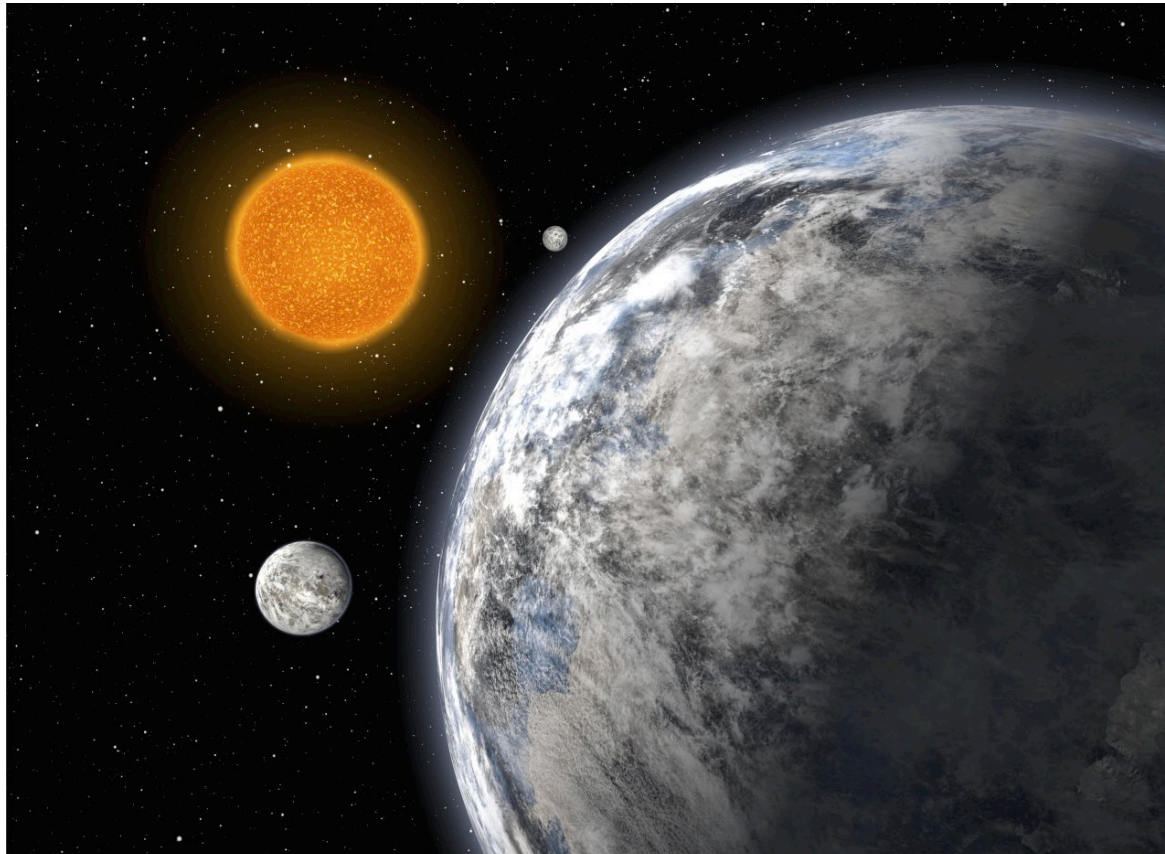
Temperatura superficial: > 1000 grados



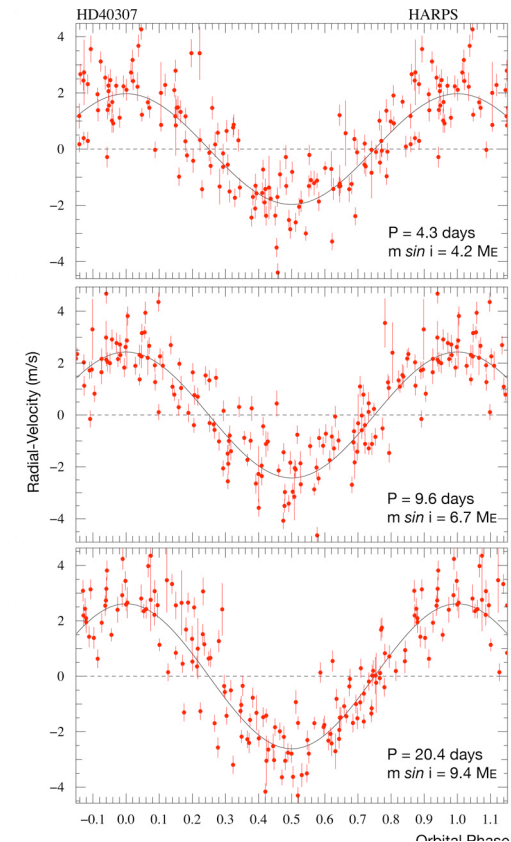
Visión artística del sistema



Con el método de la velocidad se detectan planetas cada vez menos masivas y más alejado de su estrella



A Trio of Super-Earths  
(Artist's Impression)

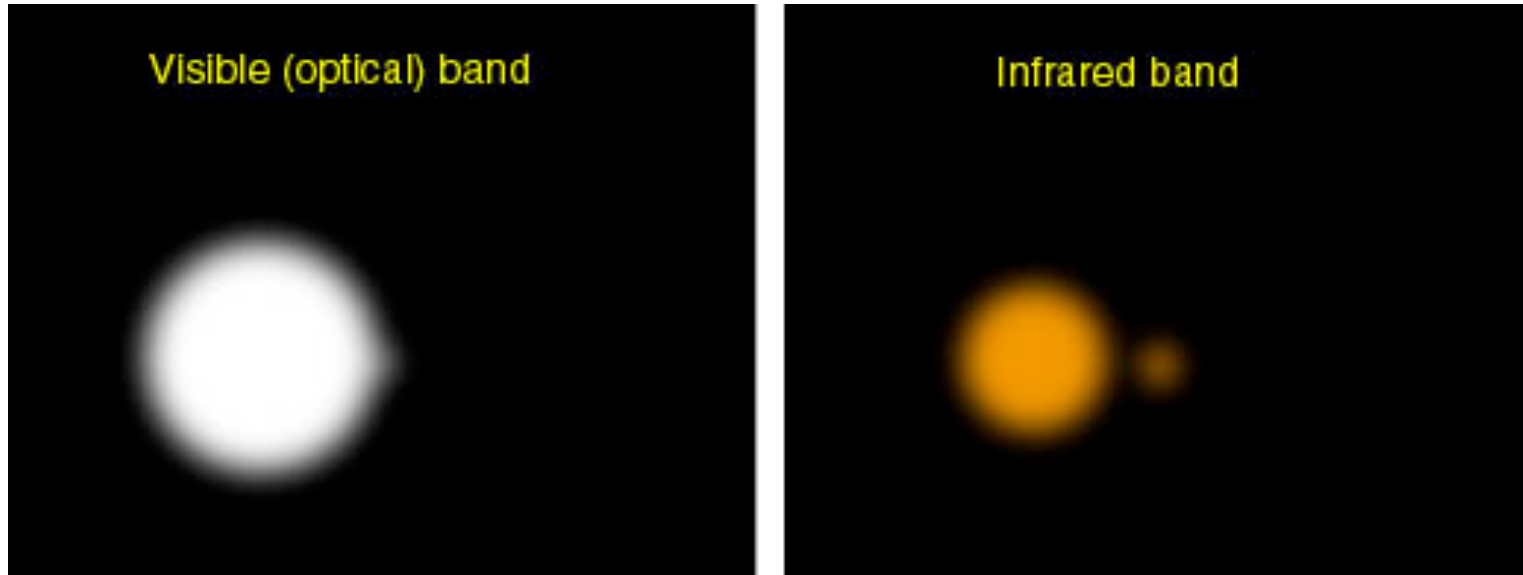


Ejemplo de uno de los últimos  
detecciones: Tres planeta  
alrededor de la estrella HD  
40307

- Masa: 4.2, 6.7 y 9.4 veces la masa terrestre (“Super-Tierras”)
- Periodos de 4.3, 9.6 y 20.4 días → órbitas muy cercanas a la estrella (<0.15 x unidad astronómica, más pequeño que la órbita de Mercurio)

**Detección directa:** Planetas extrasolares son difíciles a detectar directamente debido a la fuerte luz de la estrella.

Es más fácil en el infrarrojo



Esquema: En el visible el planeta está perdido en el brillo de la estrella. En el infrarrojo, el planeta aumenta en brillo relativo

En 2005 el satélite infrarrojo SPITZER midió directamente el flujo de un planeta extrasolar.

# Observación directa de planetas

Primer imagen de un planeta  
extrasolar en 2005 con el Very Large  
Telescope (Chile)

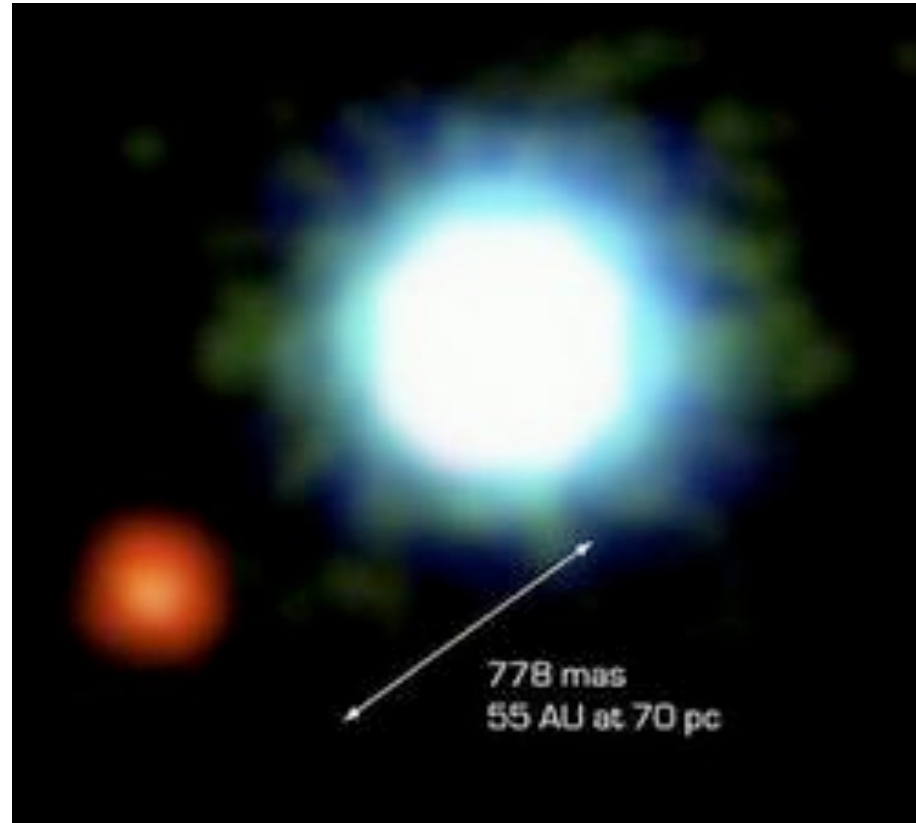


Imagen en infrarrojo del Very Large Telescope (VLT, Chile) de un sistema de una enana marrón (azúl) y un planeta (rojo) de unos 5 veces la masa de Jupiter. Separación entre estrella y planeta: 55 veces la distancia entre Tierra y Sol. Distancias del sistema: unos 200 años luz

# Propiedades generales de los exoplanetas

- Hasta hoy (2009) **más de 300 planetas extrasolares** han sido detectados
- La mayoría de estos exoplanetas tienen **una alta masa y pequeña distancia** a la estrella.
- Eso es un **efecto de selección**, porque planetas masivas y con una pequeña órbita se detectan con más facilidad.
- El hecho que se han detectado ya planetas con masas parecidas a la Tierra indica que podrían ser frecuentes.

## **Resultados:**

- 7% de las estrellas tienen planetas gigantes
- Primeros análisis de resultados recientes de ESO: unos 30% de estrellas parecidos al sol tienen planetas con masas entre la Tierra y la de Neptuno (17x masa de la Tierra) y periodos por debajo de 50 días (con periodos mas largos posiblemente incluso más planetas).