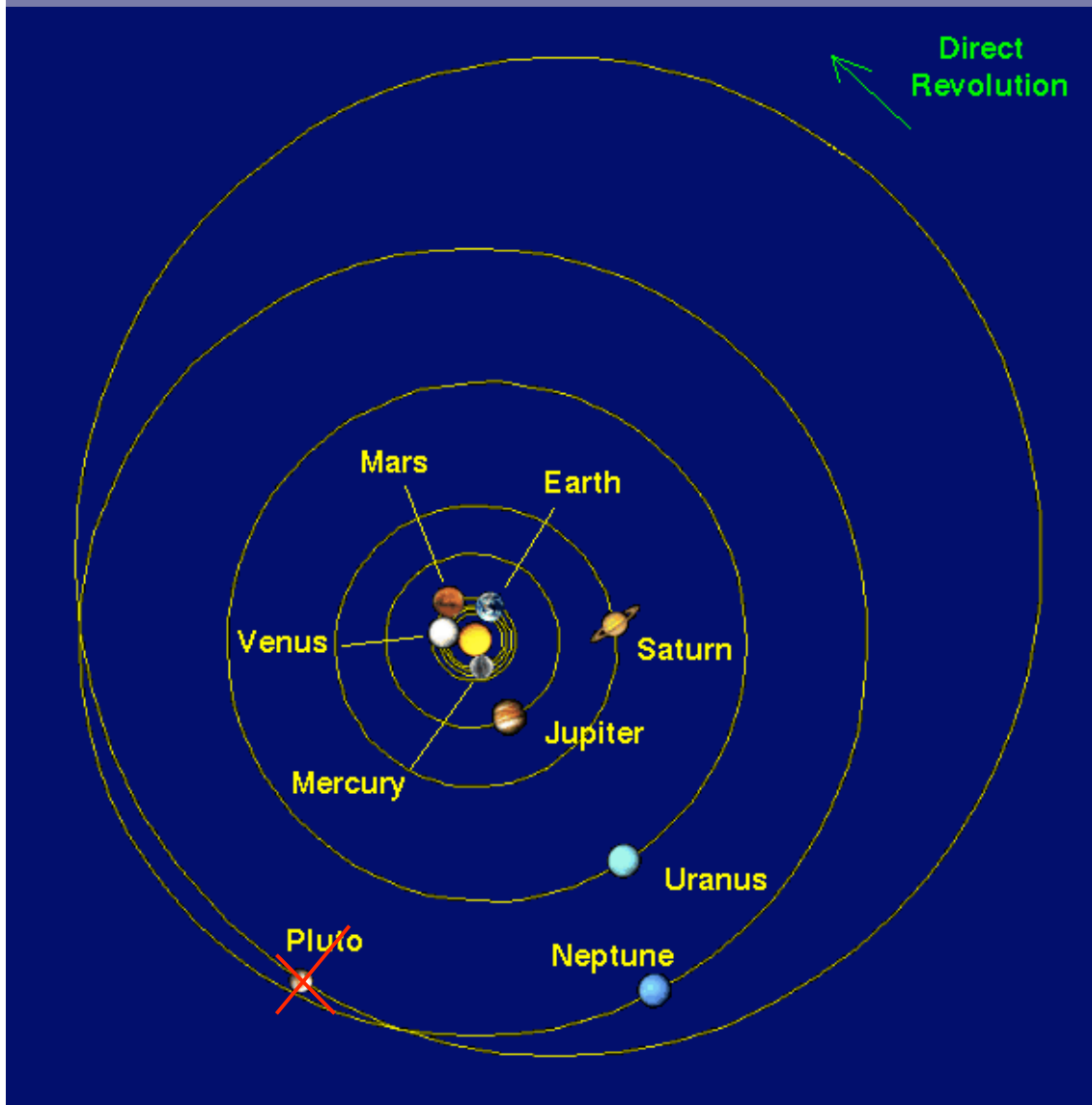


El sistema solar

1. Componentes del sistema solar
2. Formación del sistema solar
3. Planetas extraterrestres ("exoplanetas")

Componentes y distribución en el sistema solar



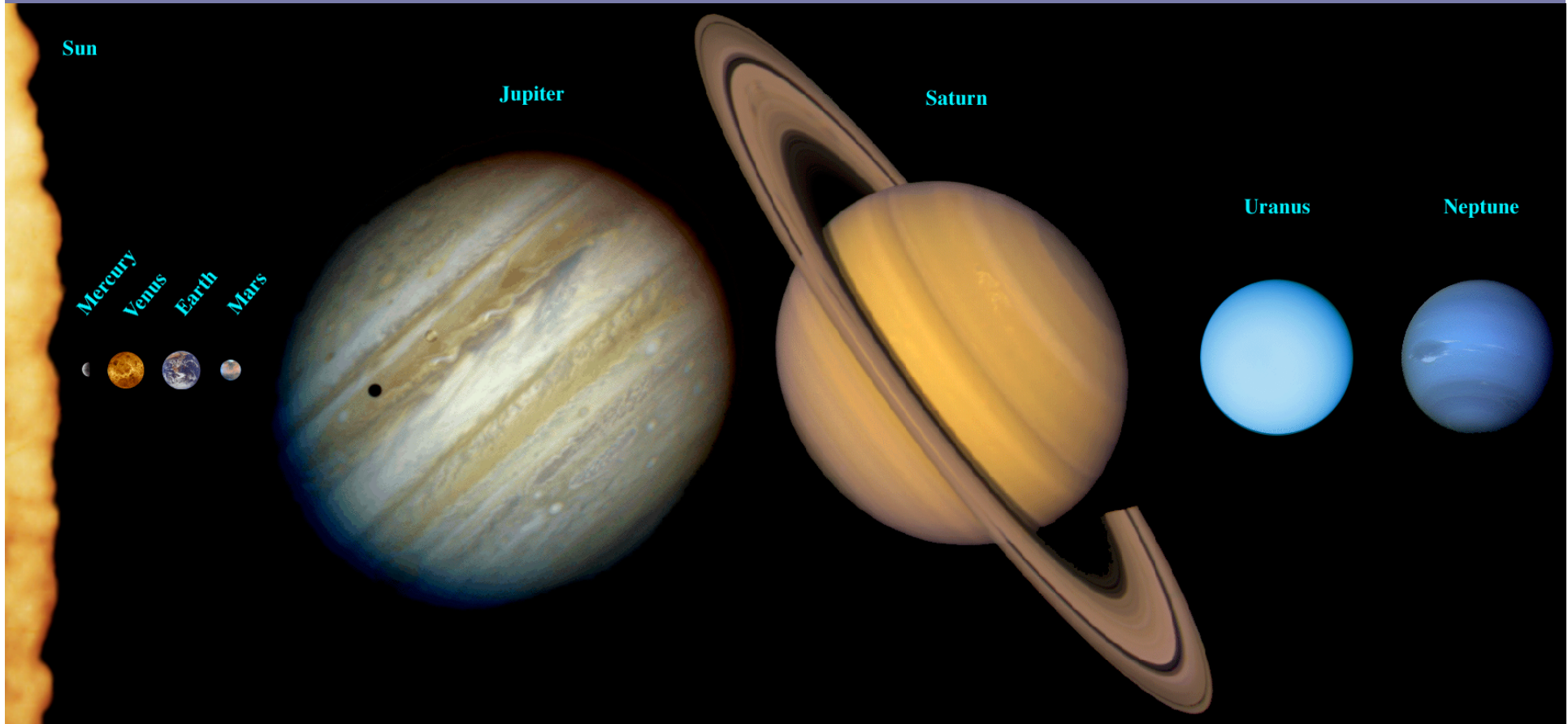
Consiste de:

- Sol
- 8 planetas y sus satélites
- Asteroides
- Cometas

Polvo interplanetario

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

Los planetas



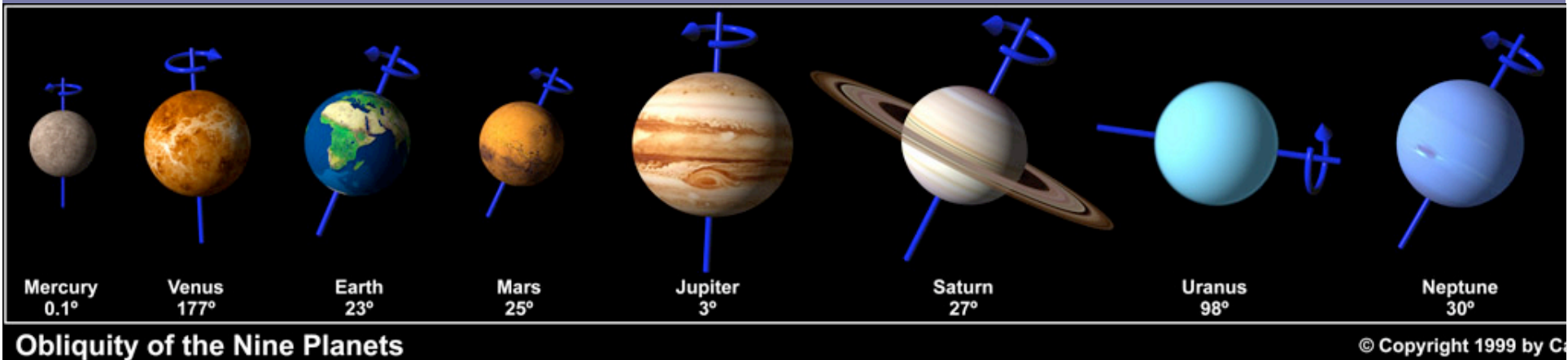
- Todos giran alrededor del sol en el mismo sentido y aproximadamente en el mismo plano (plano de la eclíptica)
- Todos (menos Mercurio y Venus) tienen satélites
- Contienen 98% del momentum angular

Planetas interiores y exteriores

- Planetas interiores (Planetas terrestres):
 - Mercurio, Venus, Tierra, Martes
 - pequeños
 - Alta densidad (4-5 g/cm³): Consisten en gran parte de rocas, metales
 - Pocos o ningún satélites, ningún anillo
- Planetas exteriores:
 - Jupiter, Saturno, Uranus, Neptuno
 - Grandes (Jupiter es el limite para la formación de un planeta)
 - Baja densidad (1-2g/cm³): Consisten en gran parte de gas y líquidos
 - Muchos satélites, anillos

Movimiento de los planetas

- Los planetas orbitan alrededor del sol en el mismo plano (la eclíptica)
- Eje de rotación está perpendicular a este plano (casi siempre)
- La rotación propia de (casi todos) los planetas y el sol está en la misma dirección y en el mismo sentido que movimiento alrededor del sol





El sol - una estrella

Contiene 99.85% de
la masa

Cometas

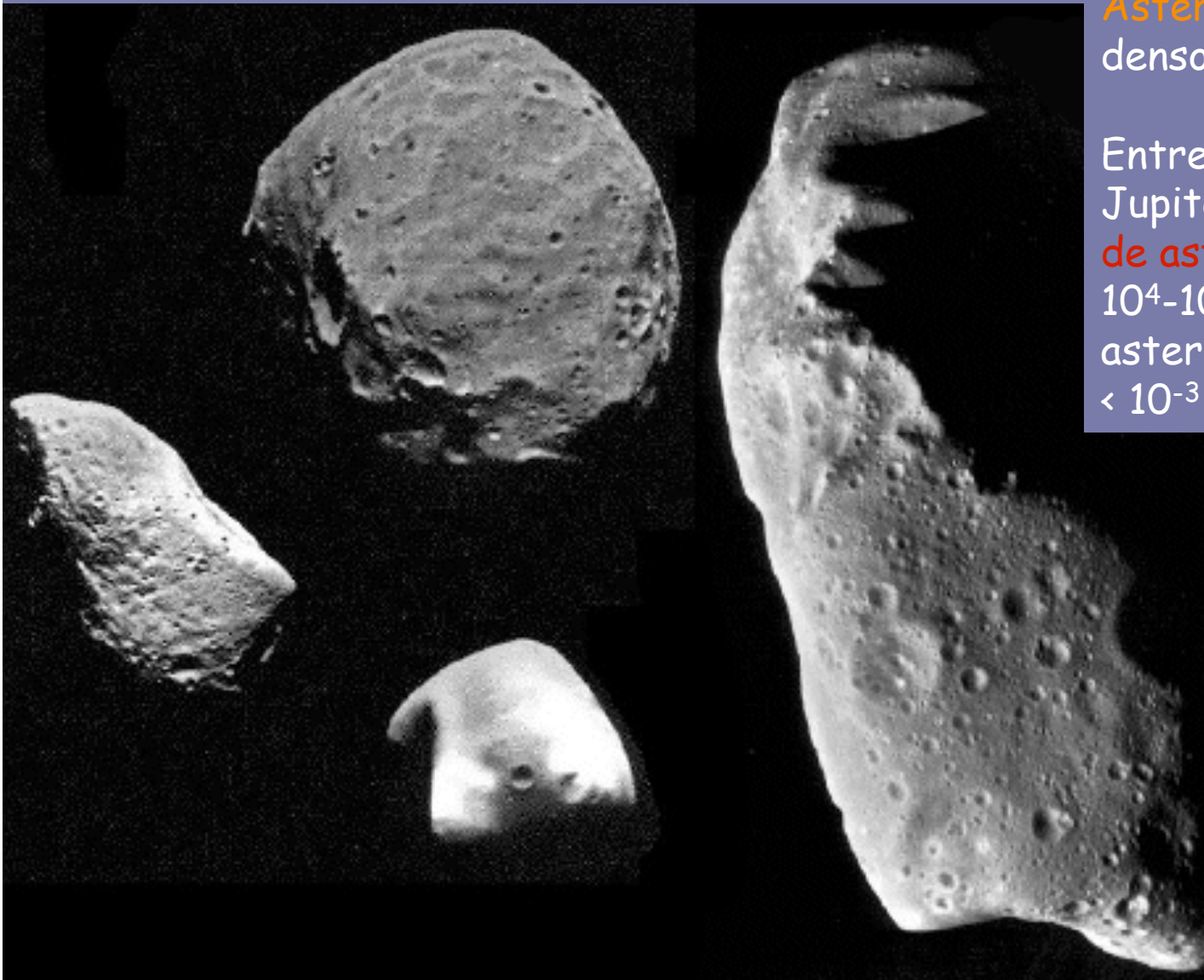
- Son "bolas de nieve sucia" con órbitas muy excéntricas.
- Son conocidos desde muy antiguo.
- Al acercarse al sol, su material se sublima y forma la cola que le hace visible.
- Hay dos colas:
 - Plasma (gas ionizado):
 - afectado por el campo magnético llevado por el viento solar
 - dirigido en dirección opuesta del sol
 - Polvo:
 - afectado por pres. de rad.
 - Puede estar curvado, con dirección a la trayectoria del cometa



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 choquan → 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 de larga duración y la nube de Oort

- 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

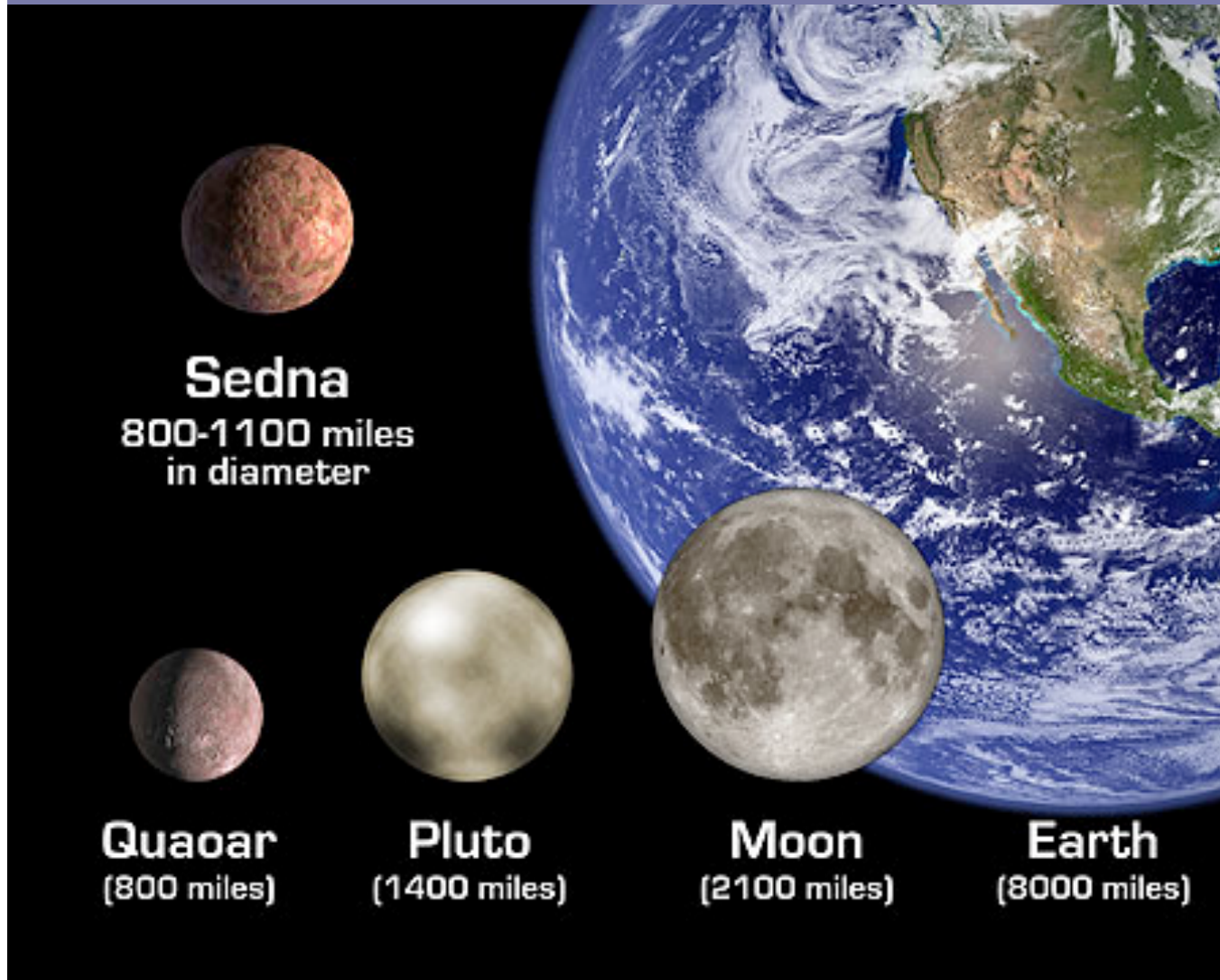
- En 1950 Oort se dio cuenta de que:
 - Los **cometas de larga** duración no vienen del espacio interestelar.
 - Sus afelios llegan hasta aprox. 50 000 UA (0.4 pc)
 - No tienen direcciones privilegiadas (no se mueven solamente en el plano de la eclíptica)

- 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"

Objetos transneptunianos



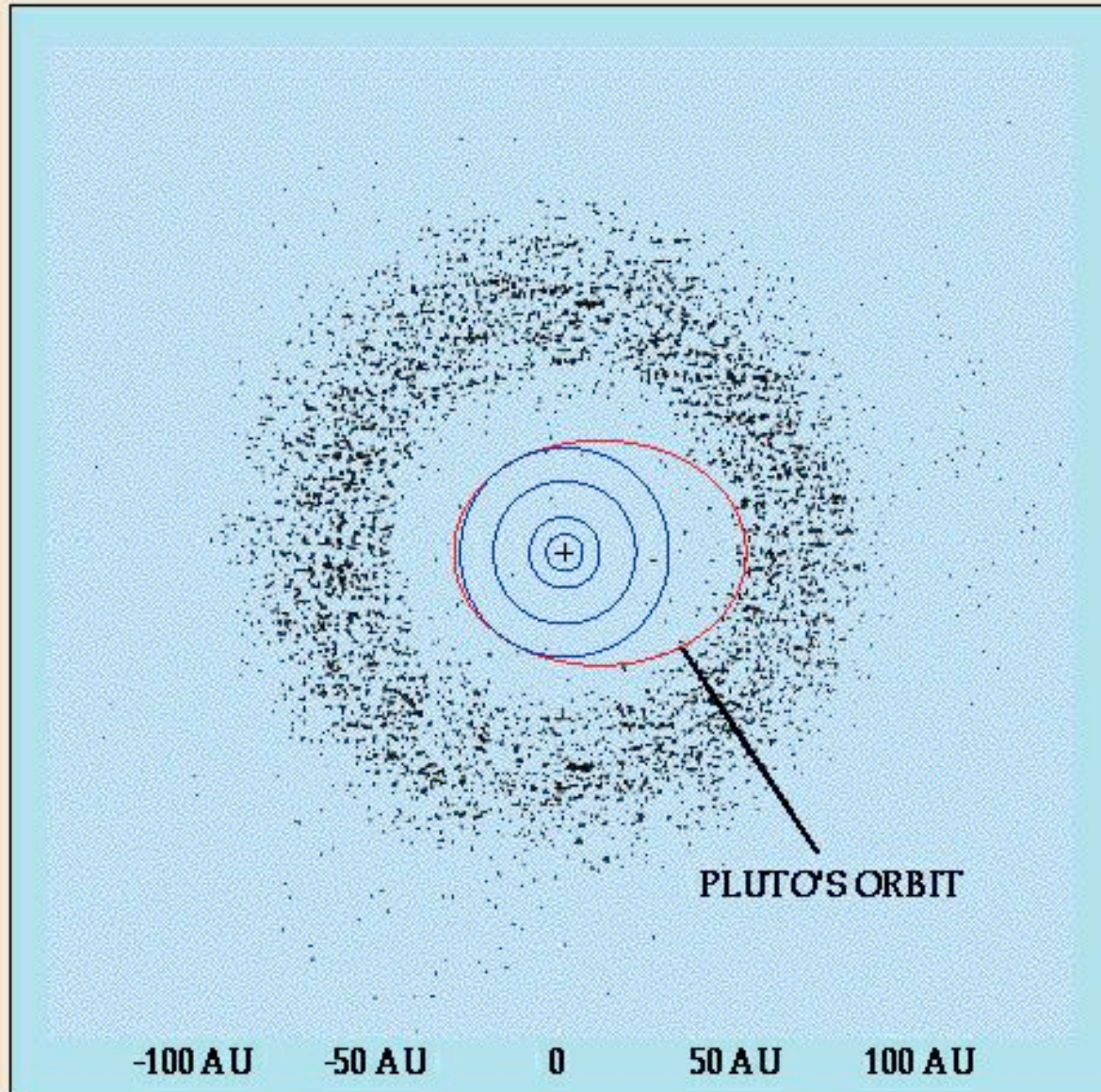
Quaoar:
• Objeto del cinturón de Kuiper

Sedna:
• 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

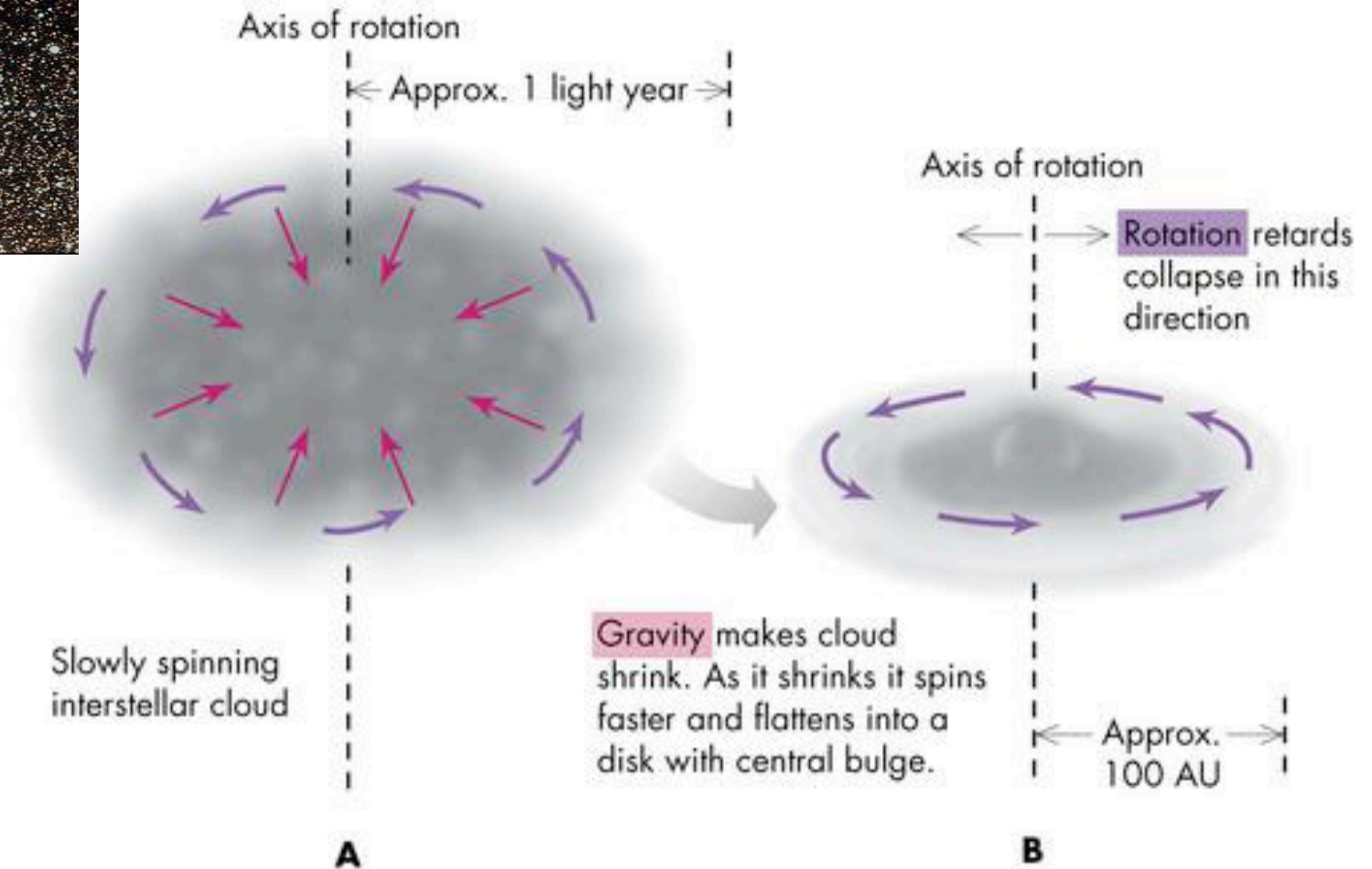
- 4) Diferencia entre planetas interiores y exteriores
 - Interiores: rotación lenta, pequeños, alta densidad (contienen muchos metales)
 - Exteriores: rotación rápida, grandes, baja densidad (contiene gran fracción de H)
- 5) Sistemas de satélites y planetas es similar al sistema de planetas y el sol
 - 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

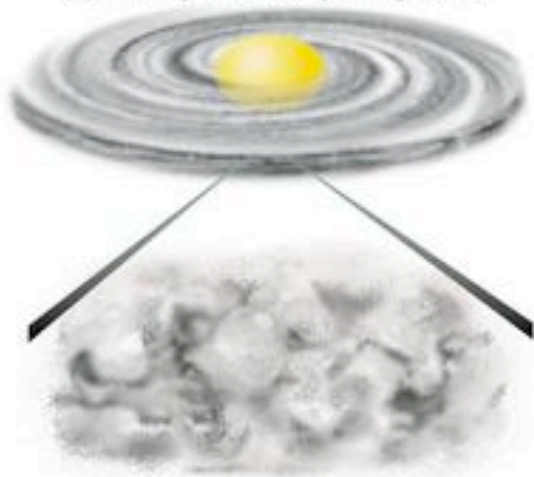


Nube interestelar:

Compu
•H, He (el
primordial
•Elemento
pesados (e
estrellas d
generacio
anteriores



Disk of gas and dust
spinning around young Sun

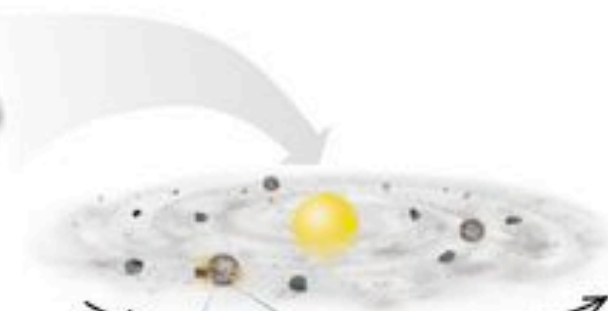


Dust grains

A

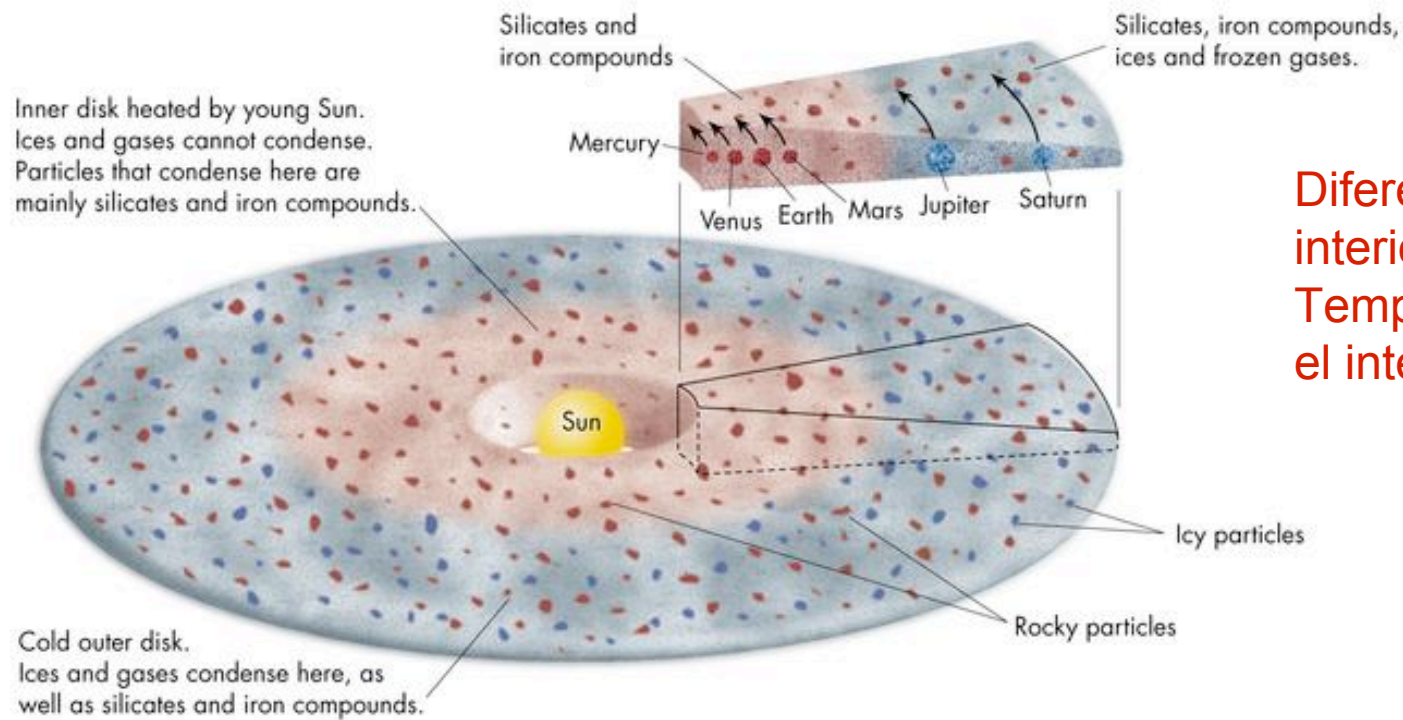


Dust grains clump
into planetesimals



Planetesimals collide
and collect into planets

B



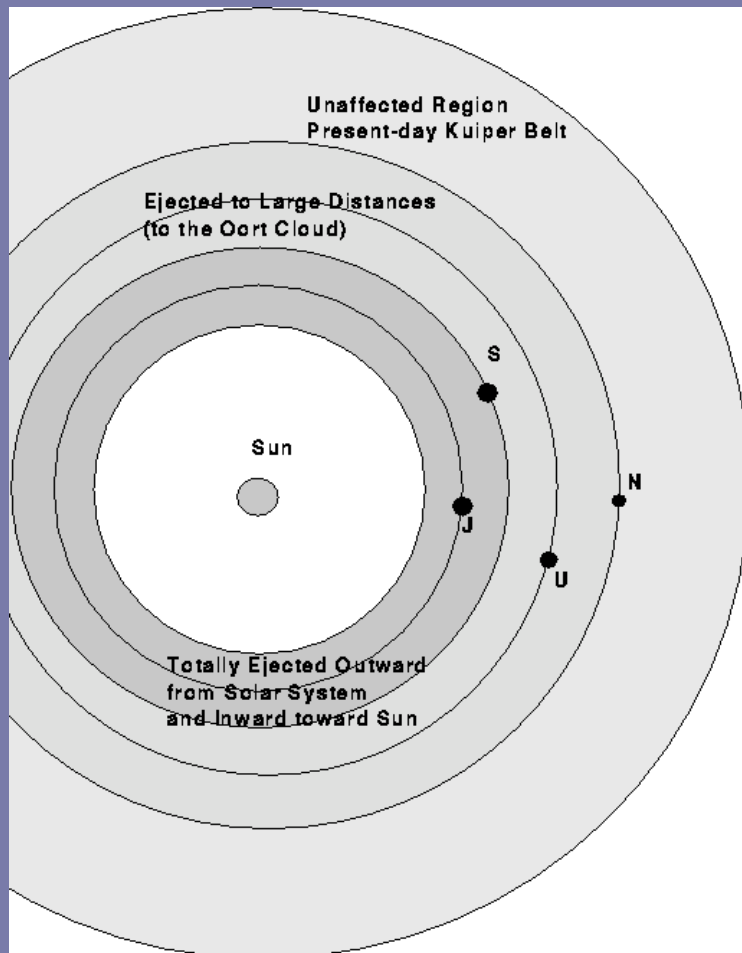
Diferencia entre planetas interiores y exteriores: Temperatura más baja en el interior que en el exterior

"línea de nieve" a ~5 AU

En las etapas:

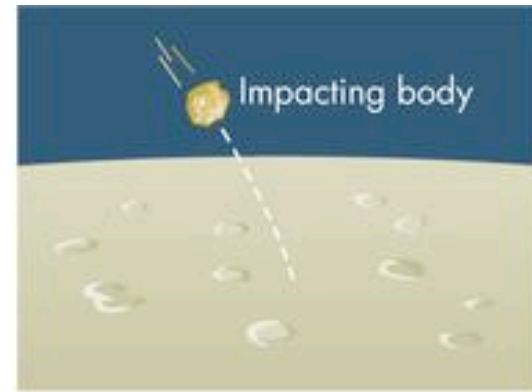
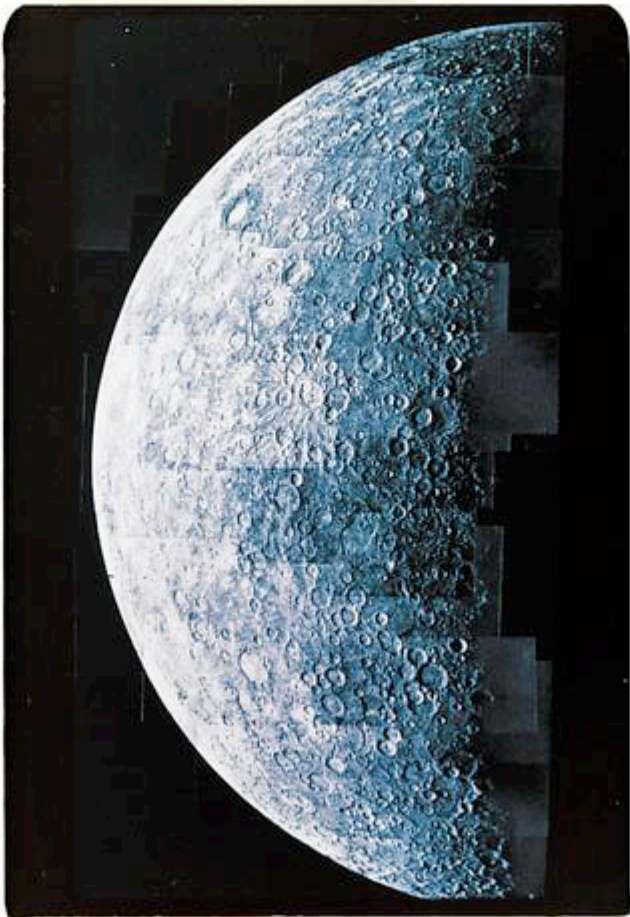
1. Temperaturas más bajas → materiales con temperatura de evaporación más baja pueden condensar (gases)
 2. Condensación empieza antes → cuerpos se pueden hacer más grandes
- Después de su formación: Planetas atraen más material debido a su gravitación. "Limpian" un anillo alrededor de ellos. Jupiter 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



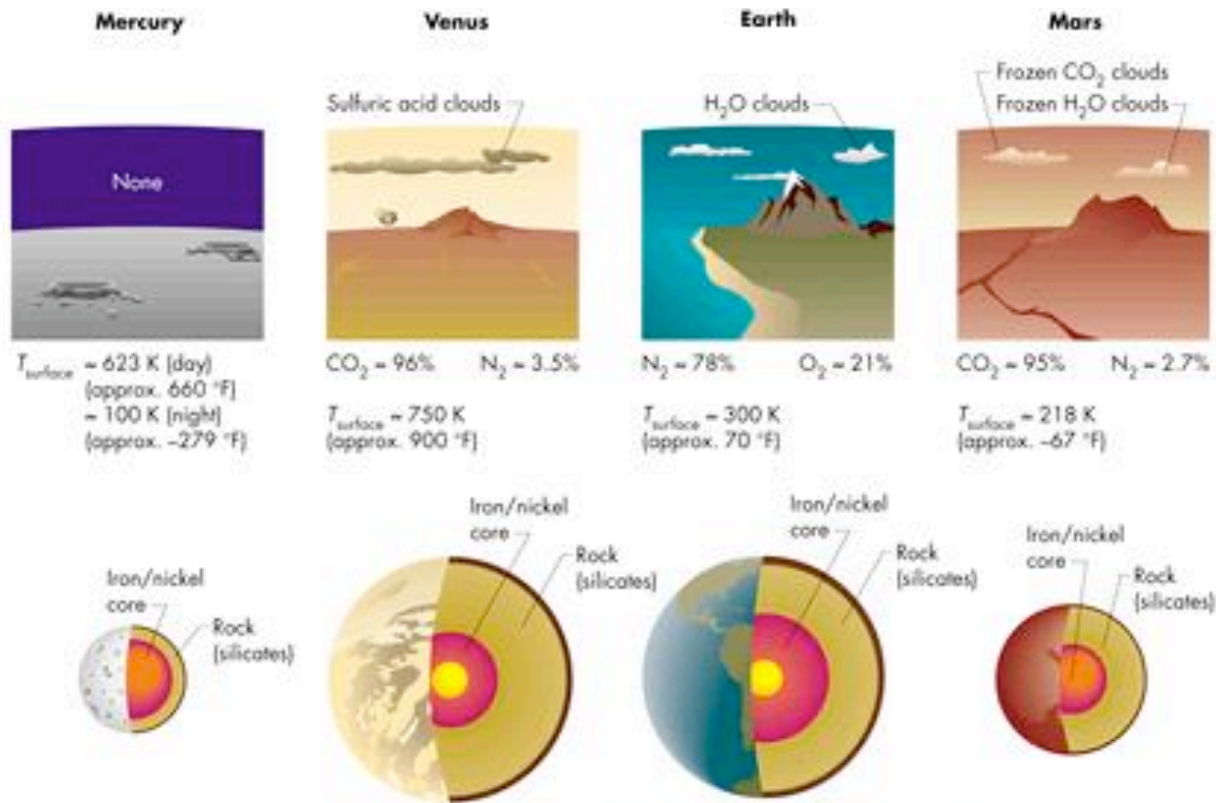
- **Nube de Oort:**
 - Objetos eyectado debido a interacciones con planetas gigantes
- **Cinturón de Kuiper:**
 - Remanente del disco de acreción
 - Planetesimales y asteroides que no han acretrado suficiente material para hacerse objetos más grandes
- **Asteroides:** Aglomeraciones de planetisimales
- **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

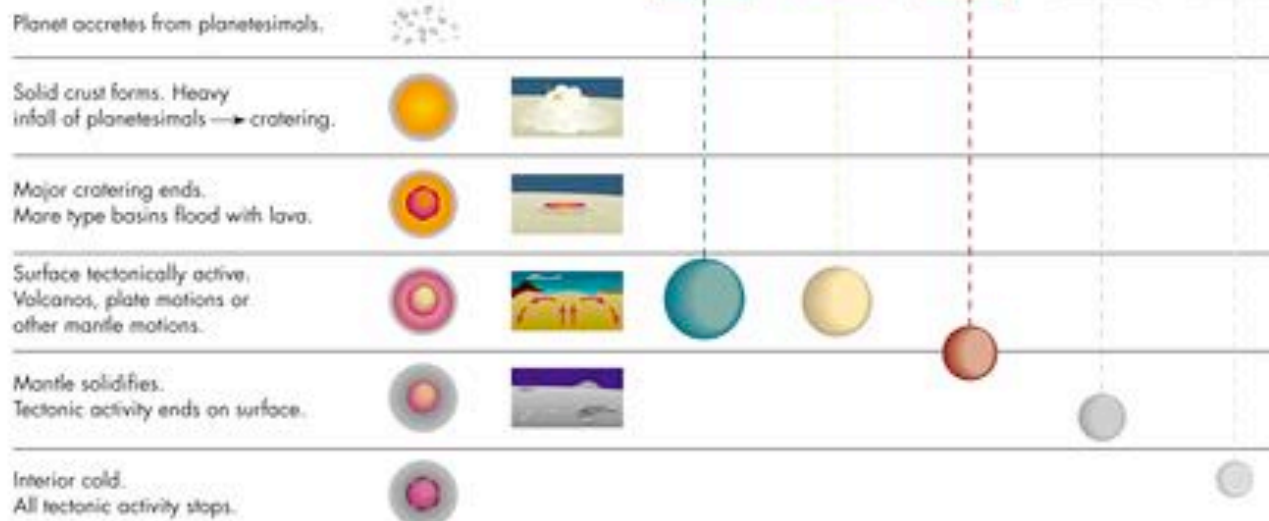


Superficies de planetas terrestres (y algunos satélites)

- Diversos procesos geológicos determinan la morfología de la superficie:
 - - Impactos de meteoritos:
 - Sobre todo visible en objetos pequeños (sin atmósfera, poca actividad geológica) como Mercurio o la Luna
 - Se ven impactos de meteoritos muy pequeños que en la Tierra se quemarían en la atmósfera
 - - Volcanismo:
 - Importante en Io (satélite de Jupiter), menos en la Tierra (ahora), nada en la Luna
 - - Movimientos de placas:
 - Observado en la Tierra, Marte y Venus.
 - No en Mercurio y la Luna.
 - - Clima: Solo si hay atmósfera.
 - Vegetación: Solo en la Tierra

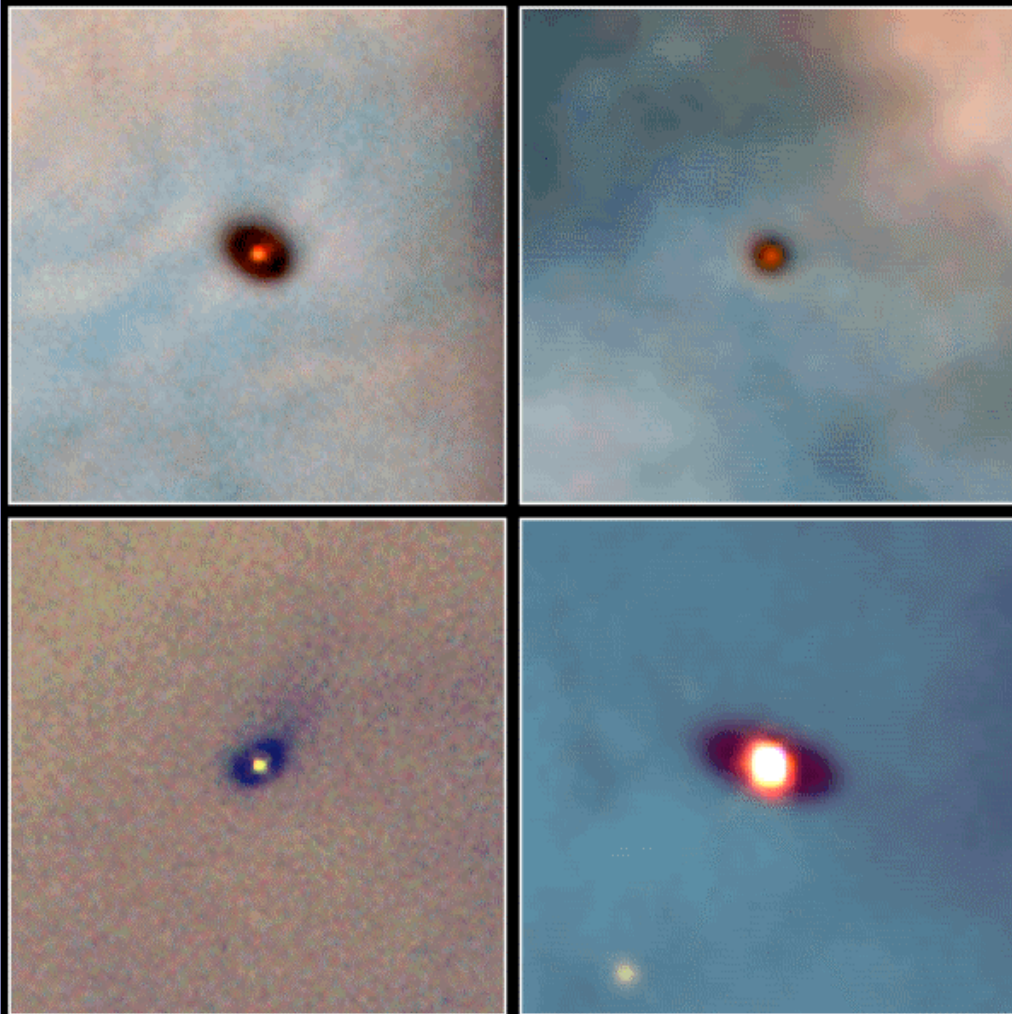


Evolutionary Stage of Terrestrial Planets



Otros sistemas solares solares

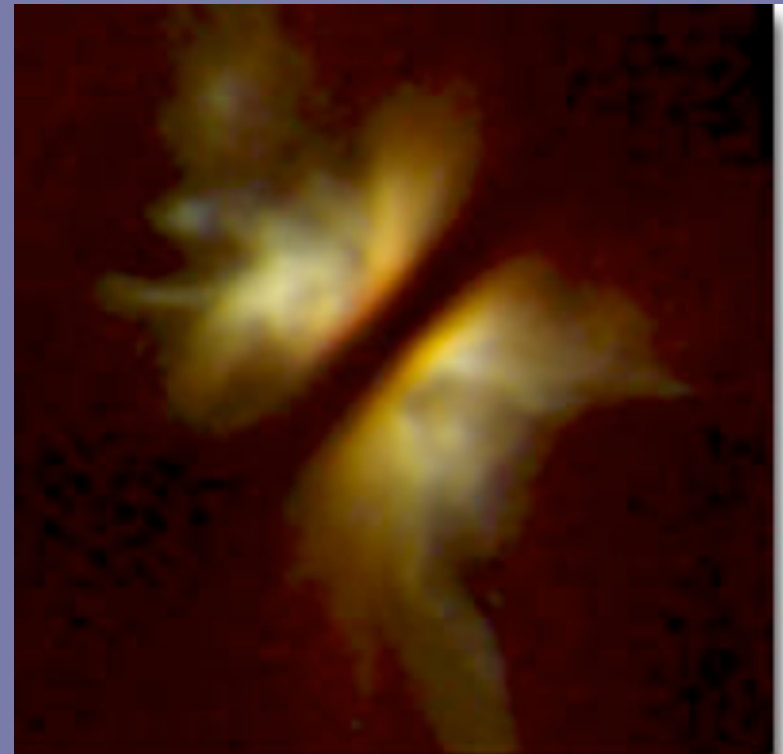
- Se han detectado lo que parecen discos protoplanetarios en otras zonas del universo donde se están formando estrellas actualmente.



**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



Disco presolar



Infant Solar System in Ophiuchus
(VLT ANTU + ISAAC)

ESO PR Photo 12c/02 (7 May 2002)

© European Southern Observatory



Visión artística de disco presolar

- Métodos principales de detección de "exoplanetas":

- Ø 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

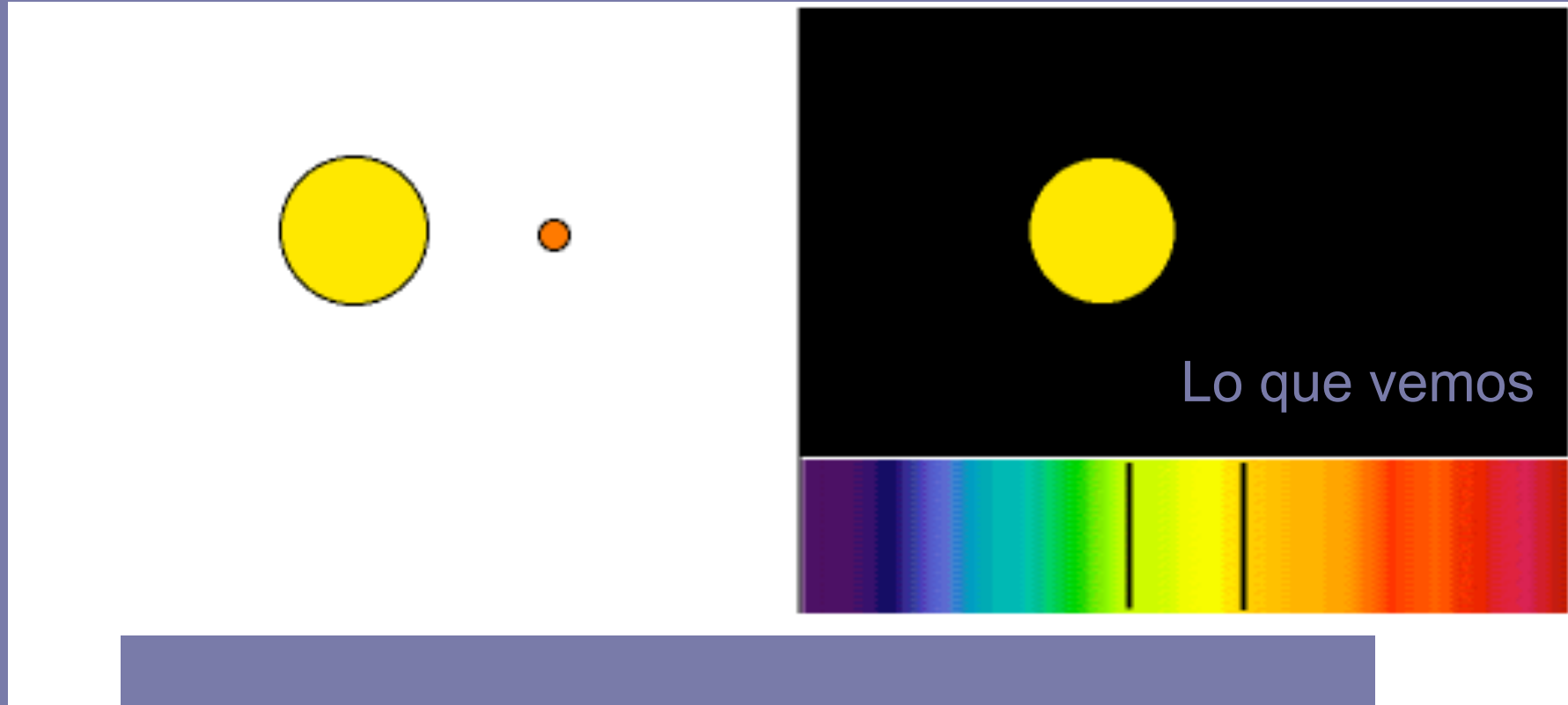
- Ø Cambio de la luminosidad debido a ocultaciones: método de tránsito.

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

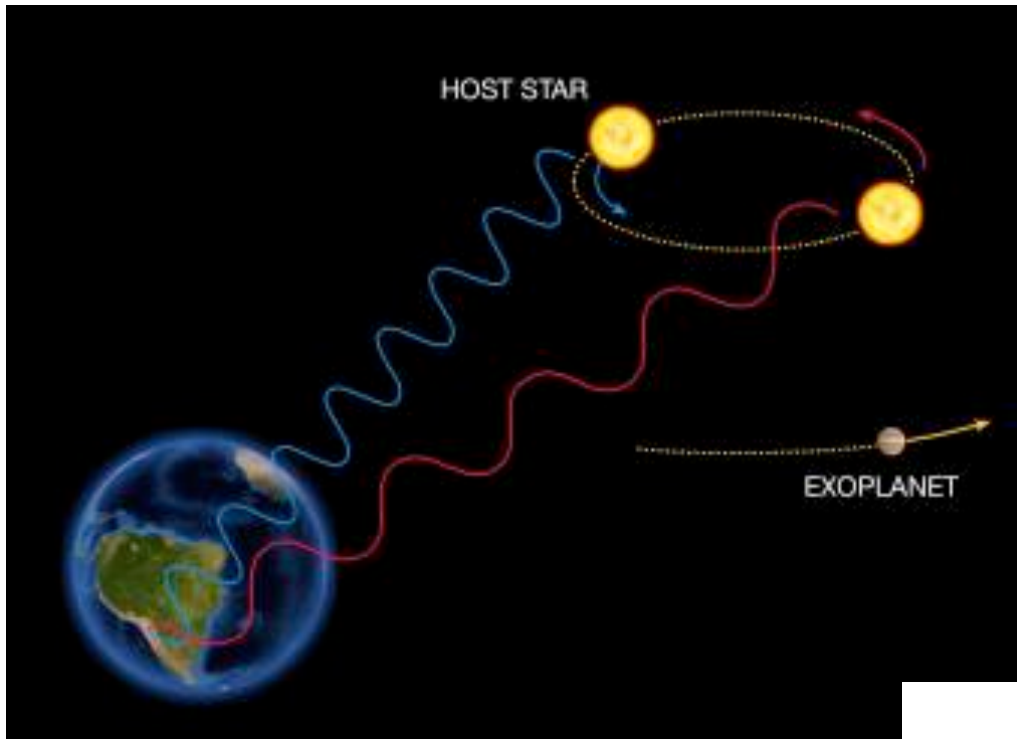
- Ø Detección directa: difícil porque la estrella es mucho más brillante que el planeta.

1. Efecto gravitatorio

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



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

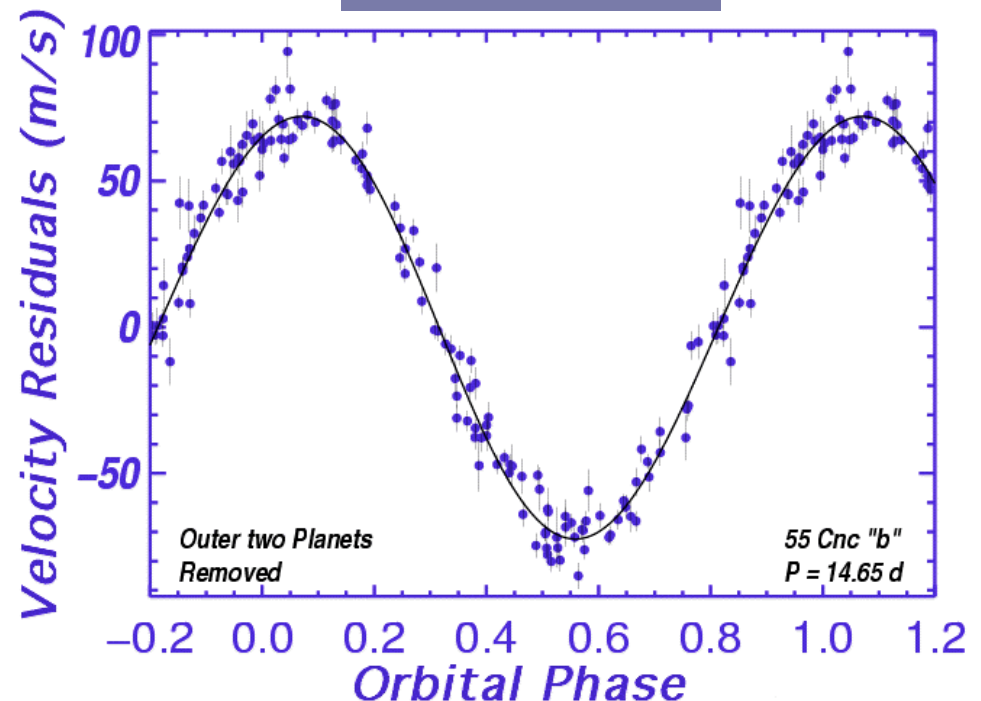


Método de velocidad radial

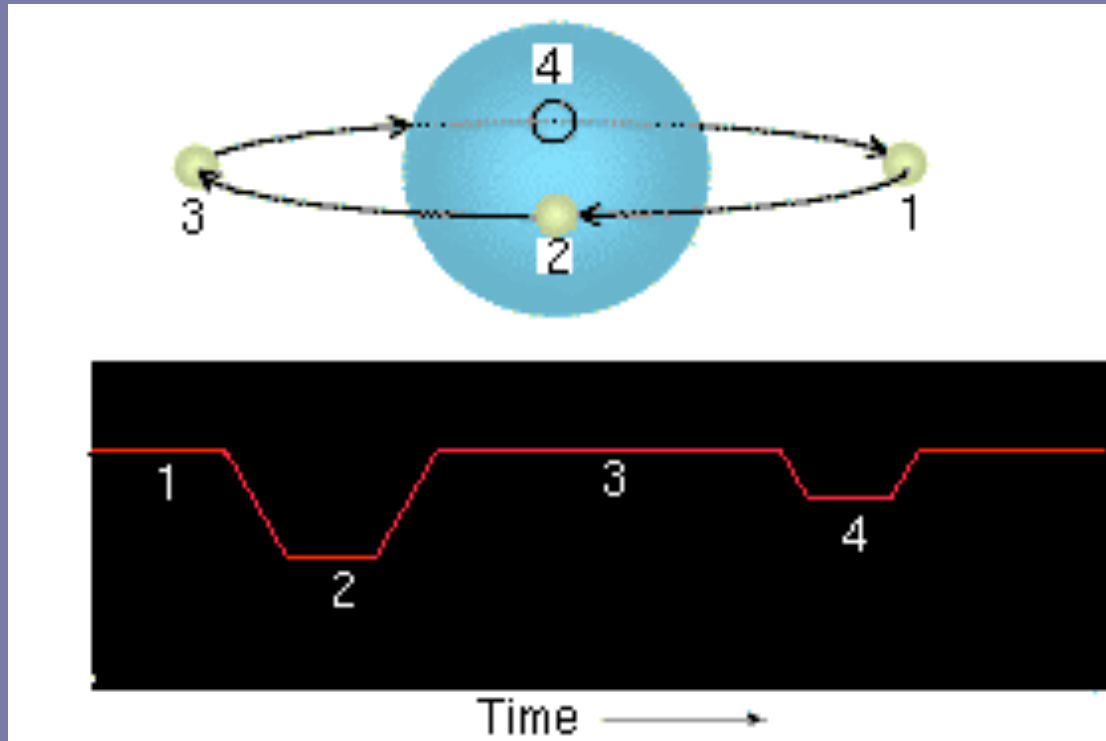
Efecto Doppler hace que la luz de la estrella está corrido la azul cuando se acerca y al rojo cuando se aleja.

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 orientan de la orbita 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

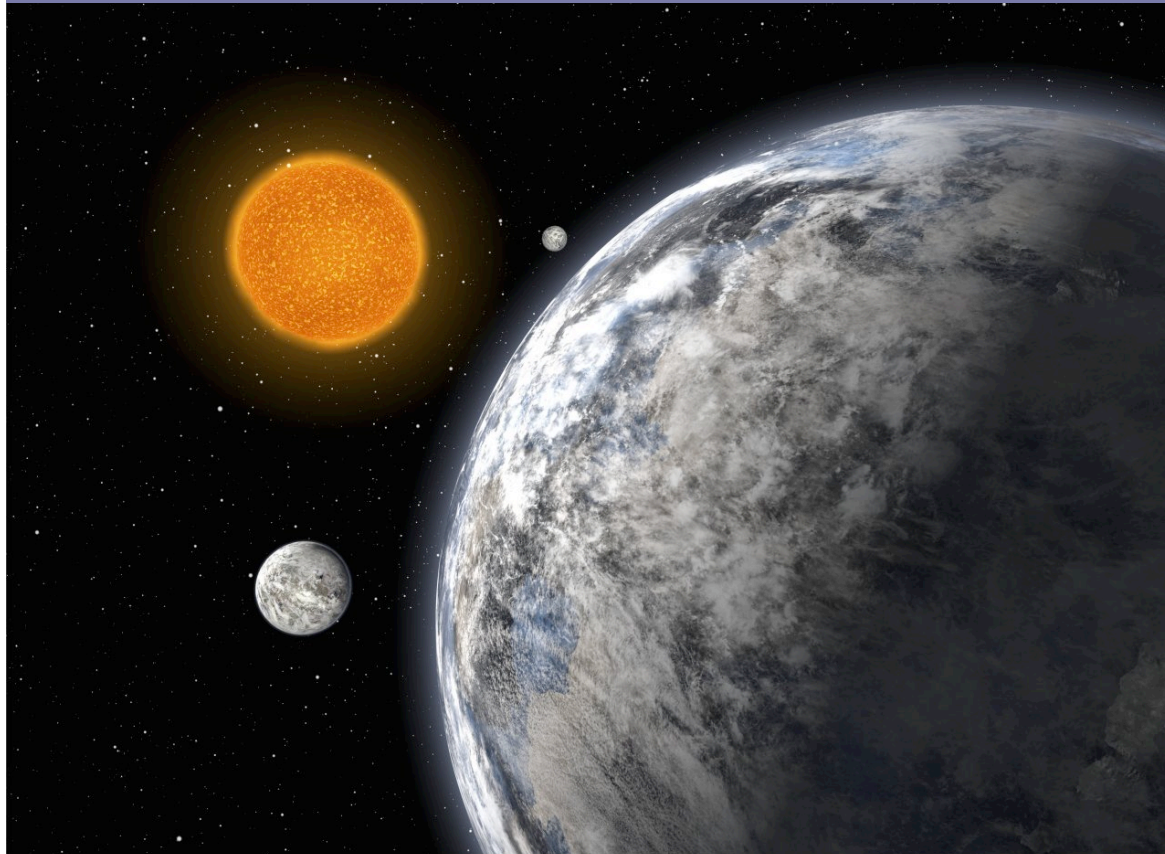
Primera detección de exoplaneta alrededor de estrella de secuencia mayor en 1995

- 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

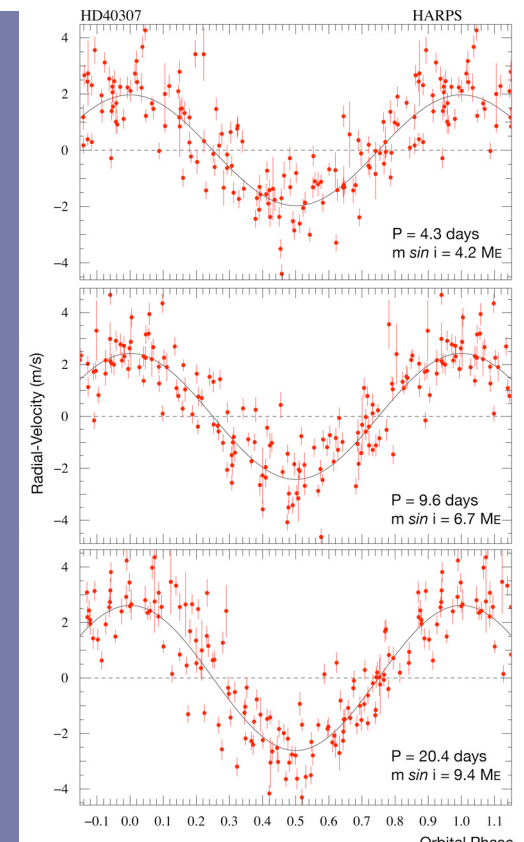


Visión artística del sistema

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



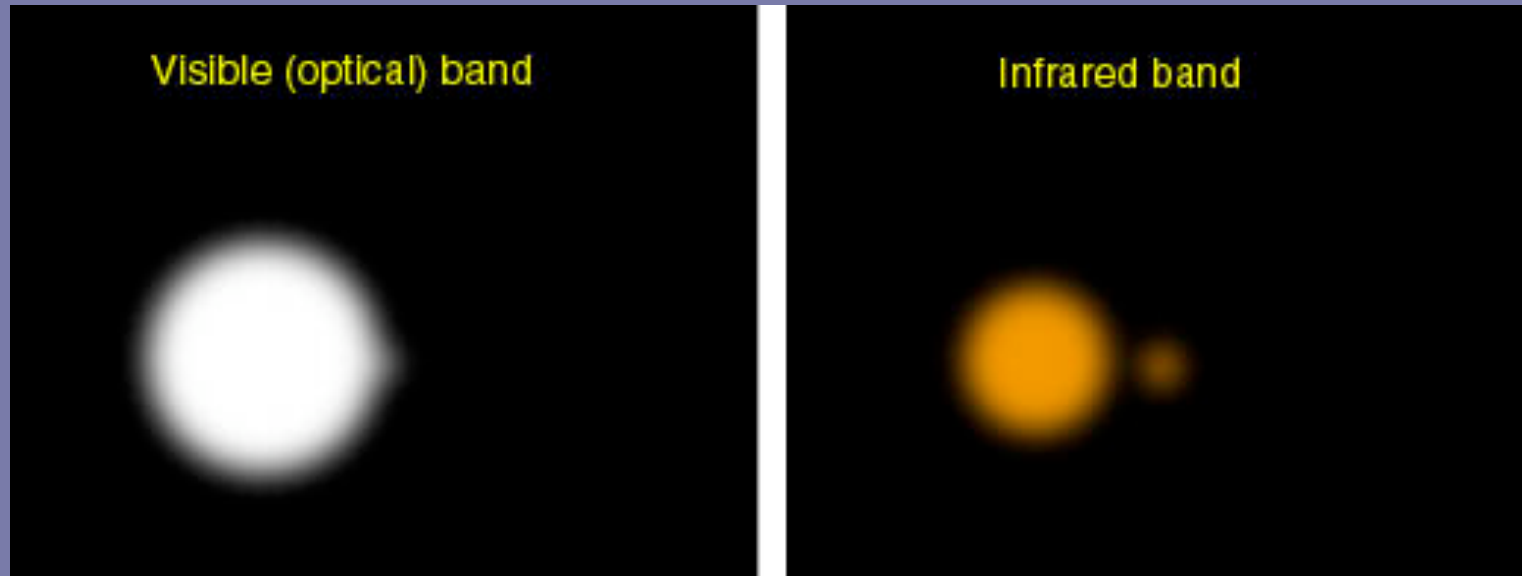
A Trio of Super-Earths
(Artist's Impression)



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)

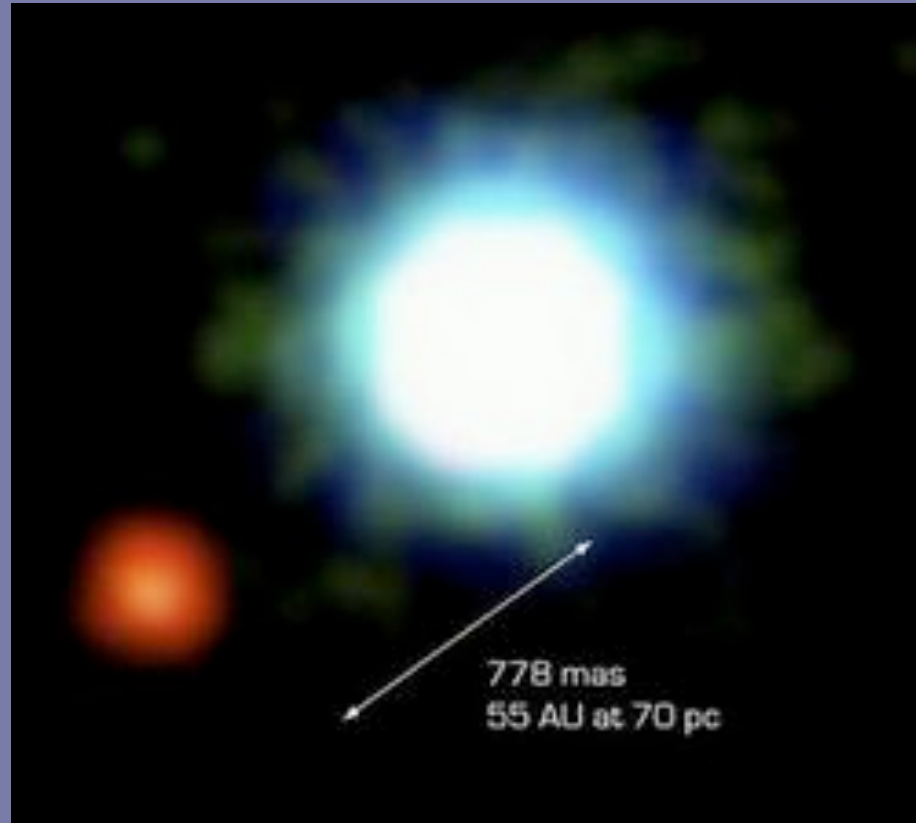


Imagen en infrarrojo del Very Large Telescope (VLT, Chile) de un sistema de una enana marrón (azúl) y un planeta (rojo) de unos 5 veces la masa de Jupiter. Separación entre estrella y planeta: 55 veces la distancia entre Tierra y Sol. Distancias del sistema: unos 200 años luz

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).

¿Cuáles son las condiciones necesarias para la vida?

Vamos a usar una **selección conservador**, pero **justificado**.

1. **Agua líquido** es importante para
 - Disolvente para los nutrientes y los desperdicios
 - Medio para transportar sustancias químicas,
 - Importante sustancia para reacciones químicas
 - Propiedades particulares del agua:
 - Es líquido en un rango amplio de temperaturas
 - El hielo tiene la densidad más baja que el agua líquido → no se hielan todos los lagos/mares, sino pueden coexistir las tres fases del agua en un amplio rango de temperaturas
 - Agua podría estar en la superficie, o subterráneo, calentado por ej. or volcanismo

¿Cuales son las condiciones necesarias para la vida?

2. Elementos mas importantes para vida en la tierra: carbono (C), oxígeno (O), hidrogeno (H)
 - Son parecido a los elementos mas abundantes en el universo (H, He, O, C,N), pero no en la superficie de la tierra (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K)
 - Razón para su importancia: capacidad de formar enlaces muy estables
3. Disponibilidad de energía. Ésta podría tener diferentes formas:
 - Radiación solar,
 - Energía hidrotérmica
 - Energía geotérmica: planeta tiene que ser como mínimo tan grande como Marte para retener energía geotérmica durante mucho tiempo (edad del sistema solar, 4500 millones años)
4. Presencia de una atmósfera
 1. Protección de la luz UV, rayos cósmicos
 2. Estabilidad geológica y del clima, falta de impactos de meteoritos.

Gliese 581c: planeta similar a la tierra ?

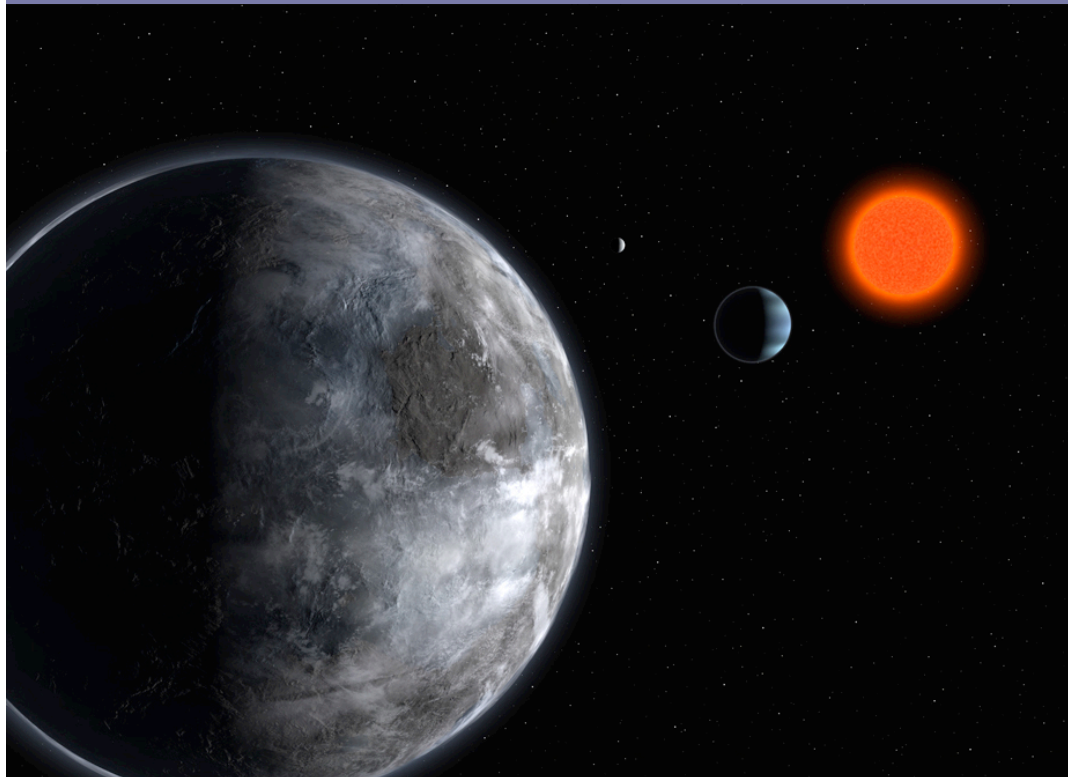
- Masa: 5x masa de la Tierra
- Periodo: 13 día
- Distancia a la estrella: 0.07 UA
- Estrella (Gliese 581) enana roja
- Distancia a nosotros: 20 años luz

Temperatura estimada en Gliese 581c podría ser entre 0-40°C

Pero: no se sabe si hay agua, más bien no.

Planeta demuestra siempre la misma cara a la estrella (similar a Mercurio) → una cara es caliente, otra fría

Otra especulación: Gliese 581d con temperatura de equilibrio de -20°C podría tener temperaturas más altas debido a un efecto invernadero



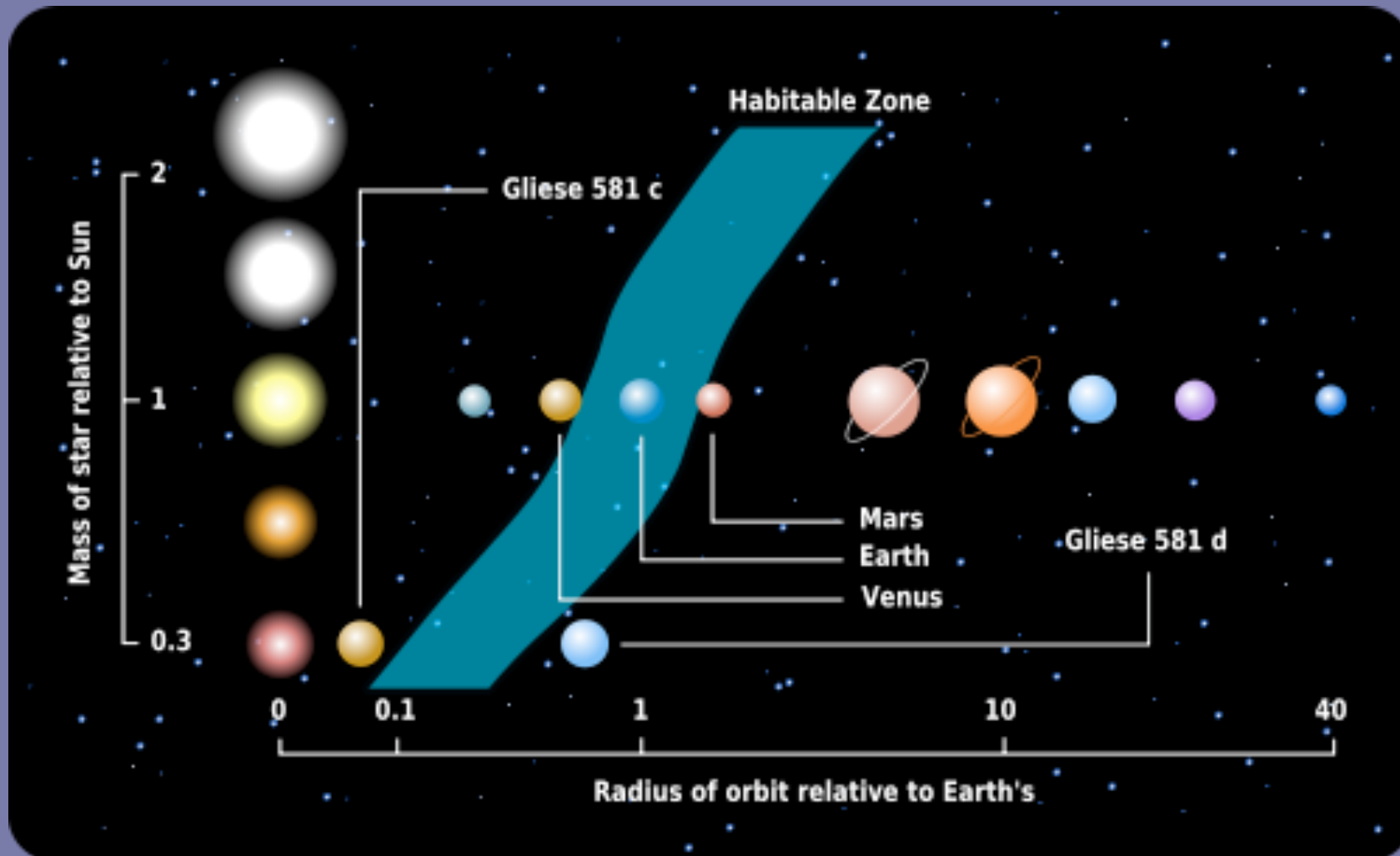
The Planetary System in Gliese 581
(Artist's Impression)

ESO Press Photo 22a/07 (25 April 2007)

This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.



Posición de Gliese c y d en la zona de habitabilidad



¿Qué probable es ponernos en contacto con extraterrestres?

En 1960 Frank Drake propuso la siguiente formula para el **número de civilizaciones, N**, con las que podríamos ponernos en contacto en nuestra galaxias:

$$N = p R^* L$$

- **R***: tasa de formación de estrellas similares al sol en nuestra galaxia
- **L**: duración promedio de una civilización
- **p**: probabilidad de que una estrella tenga un planeta con vida

Para p, propuso la siguiente descripción: $p = f_p n_e f_l f_i f_c$

- f_p : fracción de estrellas que tienen planetas
- n_e : numero promedio de planetas similares a la tierra por sistema solar
- f_l : promedio de planetas similares a la tierra de haber desarrollado vida
- f_i : promedio de planeta que han desarrollado vida inteligente por lo menos una vez
- f_c : promedio de planetas con vida inteligente que son capaces de la comunicación interestelar

$$N = p R^* L$$

- R^* : tasa de formación de estrellas similares al sol en nuestra galaxia
 - conocemos bien: unos 10^* por año
- L : duración promedio de una civilización
 - **incógnita** : 100 años - 1000 millones de años
- P : probabilidad de que una estrella tenga un planeta con vida

$$P = f_p n_e f_l f_i f_c$$

- f_p : fracción de estrellas que tienen planetas
 - Observaciones: 7% para planetas masivas
 - Para planetas de masa más bajas posiblemente más alto
 - Estimación: entre 10 y 100%
- n_e : numero promedio de planetas similares a la tierra por sistema solar
 - Pronto lo sabremos mejor (todavía no debido a limitaciones observacionales)
 - Hasta ahora: 2 planetas similares a la Tierra en 300 exoplanetas $\rightarrow \approx 1\%$ (seguramente demasiado bajo)
 - Estimación optimista (pero no irrealista): 100%
- f_l : promedio de planetas similares a la tierra de haber desarrollado vida
 - No se sabe, posiblemente 100%
- f_i : promedio de planeta que han desarrollado vida inteligente por lo menos una vez
 - No se sabe, posiblemente 100%
- f_c : promedio de planetas con vida inteligente que son capaces de la comunicación interestelar
 - No se sabe, posiblemente 100%

$$N = p R^* L$$

- **R***: tasa de formación de estrellas similares al sol en nuestra galaxia
 - conocemos bien: unos 10* por año
- **L**: duración promedio de una civilización
 - incógnita : 100 años - 1000 millones de años
- **P**: probabilidad de que una estrella tenga un planeta con vida

$$P = f_p n_e f_l f_i f_c$$

- **f_p**: fracción de estrellas que tienen planetas
 - Observaciones: 7% para planetas masivas
 - Para planetas de masa más bajas posiblemente más alto
 - Estimación: entre 10 y 100%
- **n_e**: numero promedio de planetas similares a la tierra por sistema solar
 - Pronto lo sabremos mejor (todavía no debido a limitaciones observacionales)
 - Hay al menos 2 planetas similares a la Tierra en 200 sistemas solares (1% (aunque puede ser demasiado bajo))
 -
 -
- **f_l**: probabilidad de que un planeta similar a la tierra tenga vida
 -
- **f_i**: probabilidad de que un planeta con vida tenga una civilización
 -
- **f_c**: promedio de planetas con vida inteligentes que son capaces de la comunicación inter estelar
 - No se sabe, posiblemente 100%

→ Nuestra estimación optimista: $P = 0.01 - 1$

El estimado número de civilizaciones extraterrestres y su distancia

Usamos: $N = L p R^*$,
con $P = 0.1$ y $R^* = 10$ por año

L (duración de la civilización) es la mayor incógnita

La distancia se estima suponiendo una distribución aleatoria siguiendo la distribución real de las estrellas en la Vía Láctea

L [años]	N	Distancia[años luz]
100	100	10000
1000	1000	5000
10^4	10^4	2000
10^5	10^5	1000
10^9	10^9	35

Con $L = 100 - 1000$ años: contacto vía radioemisión no es posible, por que luz viaja más tiempo de lo que dura la civilización.