

# TEMA 1: Introducción:

## Formación planetaria.

### Sistemas extrasolares

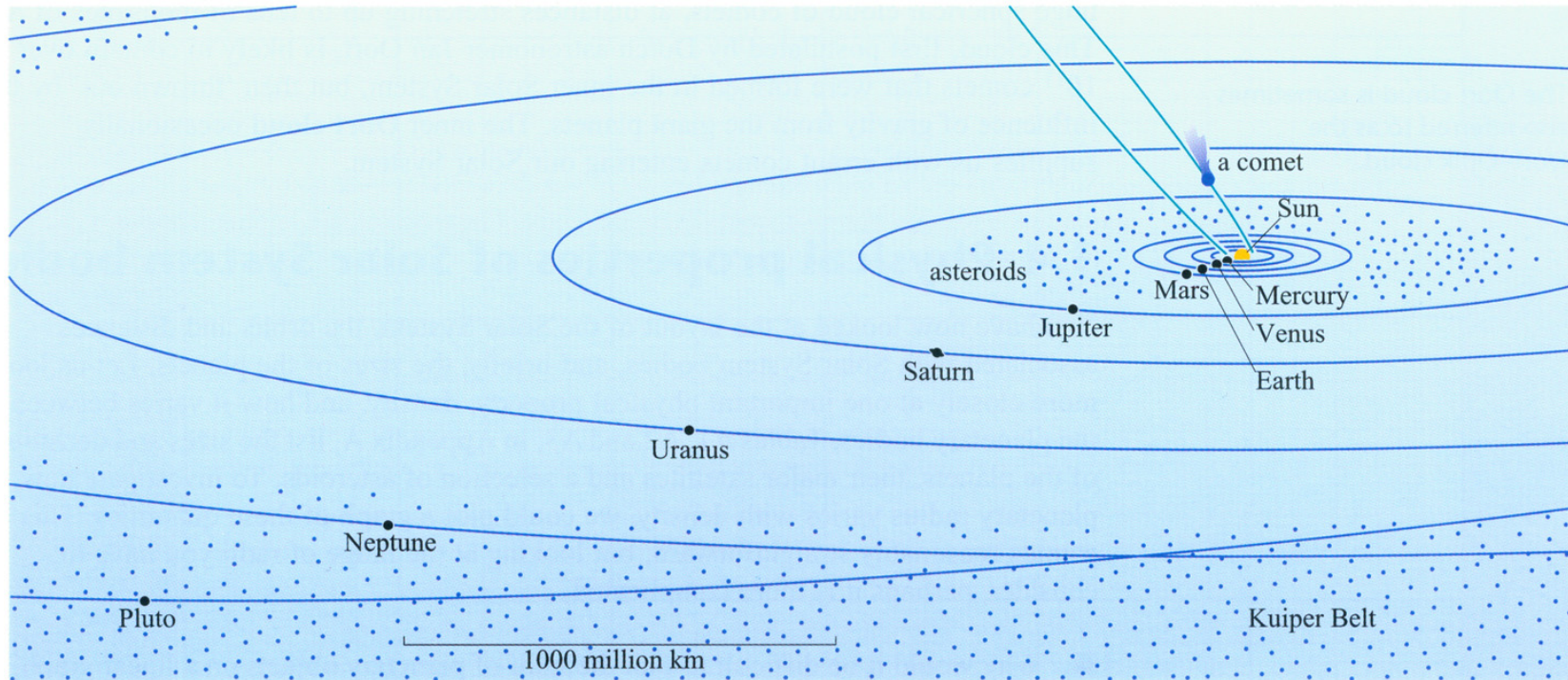
- \* ¿Qué son las ciencias planetarias?.
- \* Propiedades físicas y orbitales del sistema solar.
- \* Planetas gigantes y terrestres.
- \* Formación del sistema solar. Hipótesis nebular de Laplace
- \* Contracción en cuasi-equilibrio hidrostático y formación de un disco.
- \* Discos protoplanetarios. Observación y estructura.
- \* Formación y migración planetaria.
- \* Exoplanetas y sistemas exoplanetarios.

# Definiciones

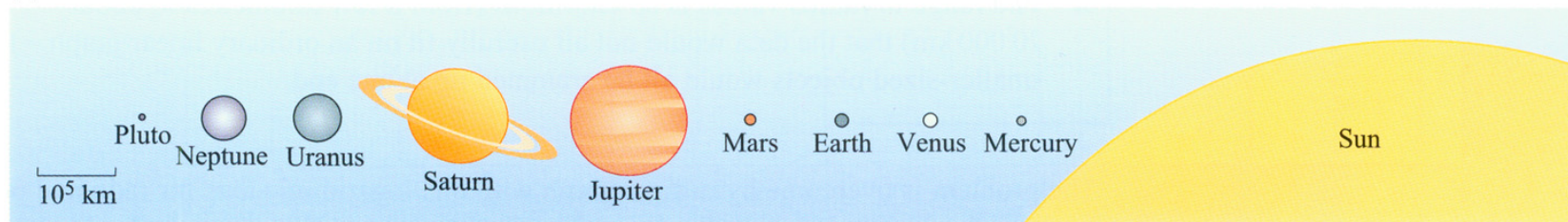
Las ciencias planetarias tienen como objetivo el estudio de los planetas del sistemas solar, sus satélites, y los cuerpos menores (asteroides, cometas, objetos trans-neptunianos, meteoroides) tanto desde el punto de vista físico como dinámico. Las ciencias planetarias también comprenden el estudio del origen de estos objetos.

Las ciencias planetarias se han extendido al estudio de los exoplanetas, es decir los planetas que orbitan otras estrellas.

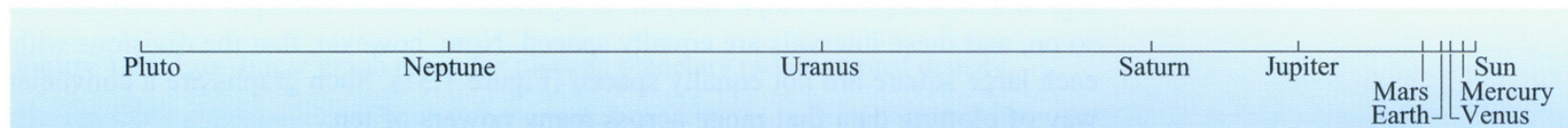
# El sistema solar en perspectiva



(a)



(b)



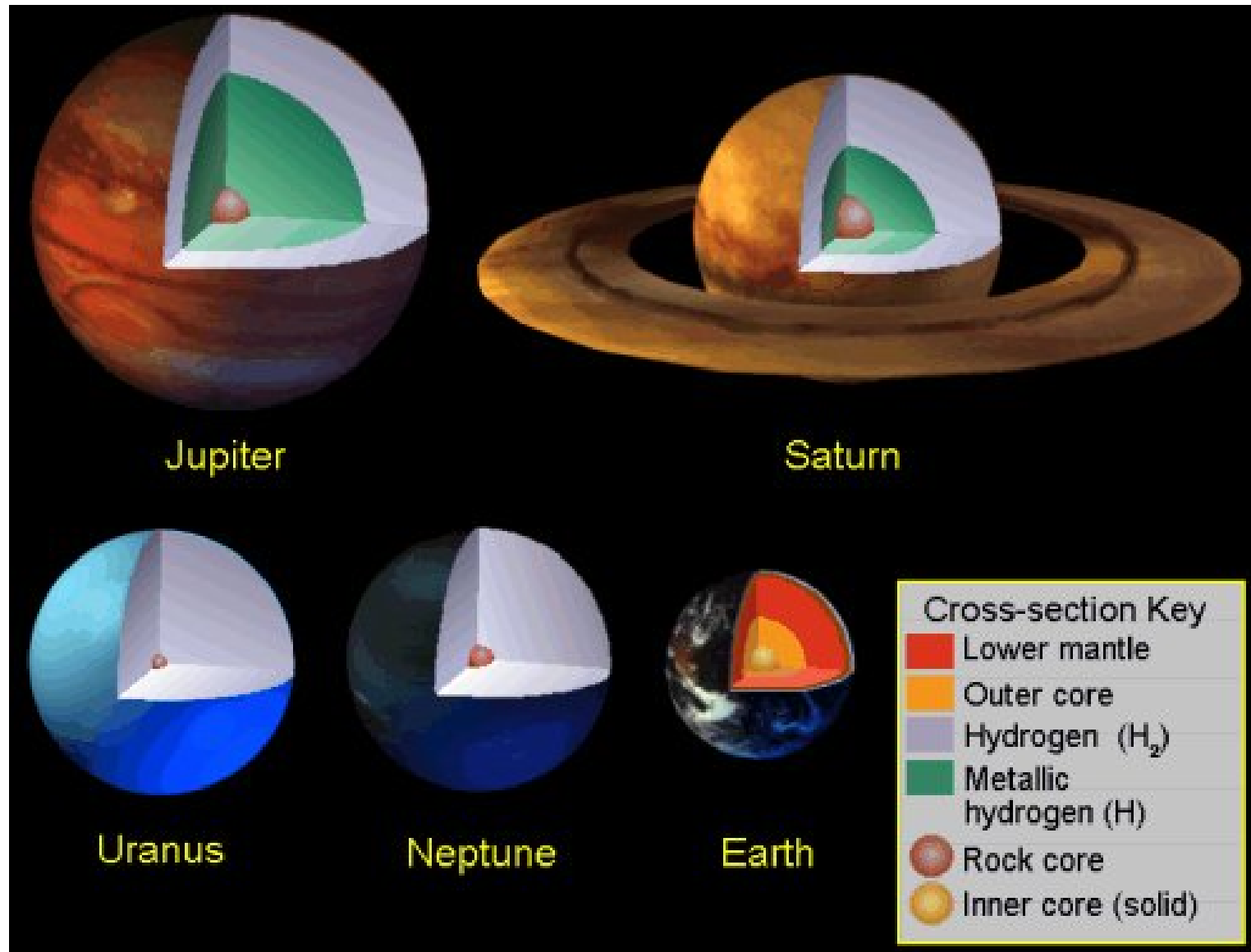
(c)

## Propiedades básicas de los planetas

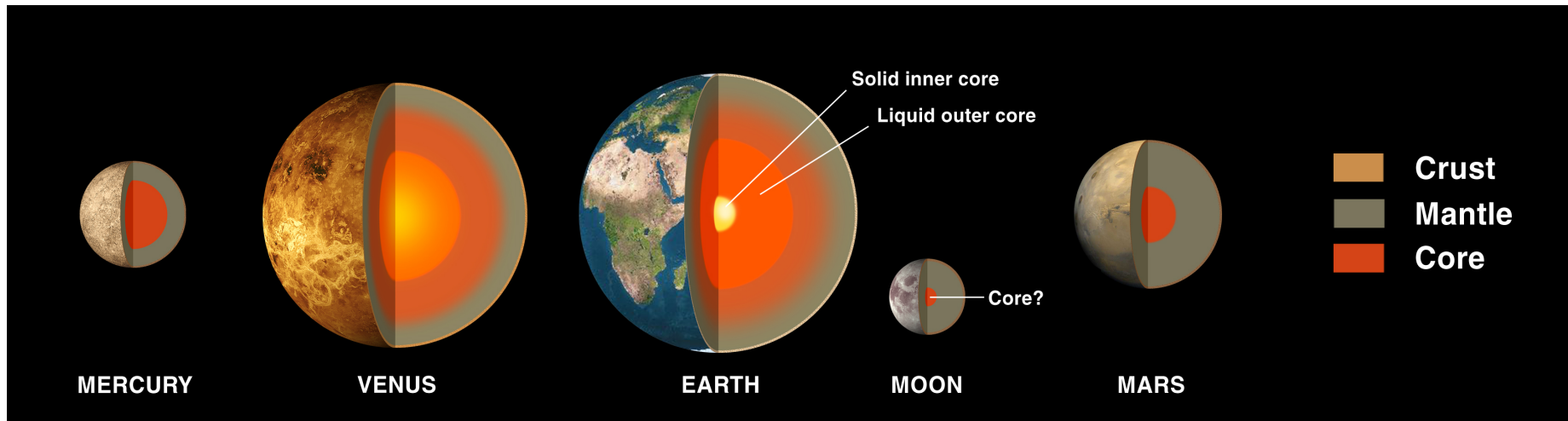
Planeta	$a$ (UA)	$T$ (años)	Radio (km)	Masa (kg)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Per. Rotación	No.sat.
Mercurio	0,387	0,241	2439	$3,30 \times 10^{23}$	5,4	58,6 d	0
Venus	0,723	0,615	6052	$4,87 \times 10^{24}$	5,2	243,0	0
Tierra	1,000	1,000	6378	$5,97 \times 10^{24}$	5,5	23 h 56 m 4,1 s	1
Marte	1,524	1,881	3397	$6,42 \times 10^{23}$	3,9	24 h 37 m 22.7 s	2
Júpiter	5,203	11,86	71398	$1,9 \times 10^{27}$	1,3	9 h 55 m 30 s	67
Saturno	9,530	29,42	60000	$5,69 \times 10^{26}$	0,7	10 h 30 m	~ 200
Urano	19,24	84,36	26320	$8,70 \times 10^{25}$	1,1	17 h 14 m	27
Neptuno	30,14	165,5	24300	$1,03 \times 10^{26}$	1,7	16 h 07 m	14

- \* El Sol concentra el 99,9% de toda la masa del sistema solar.
- \* Los 8 planetas se pueden clasificar en 2 grandes grupos: terrestres y jovianos o gigantes.
- \* Tenemos además otras poblaciones de cuerpos menores: cometas, asteroides, objetos transneptunianos.

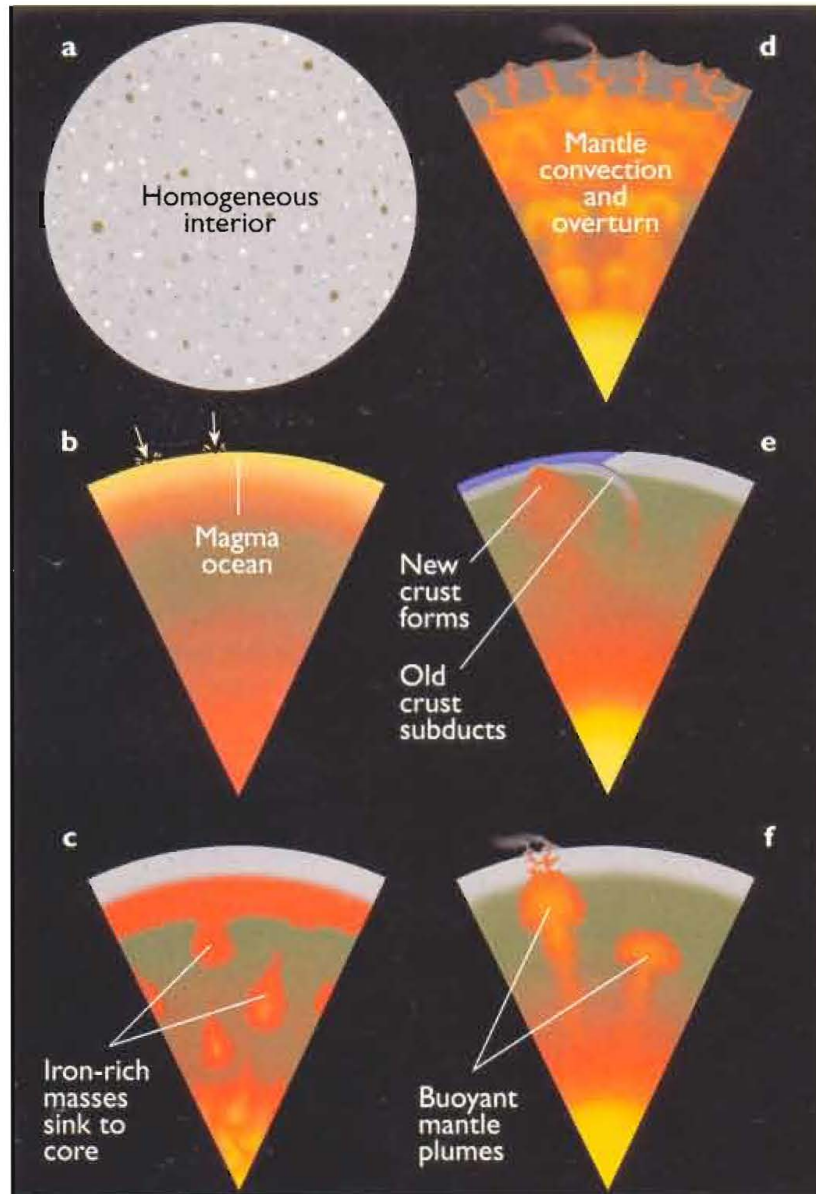
# Interiores de los planetas gigantes



# Interiores de los planetas terrestres

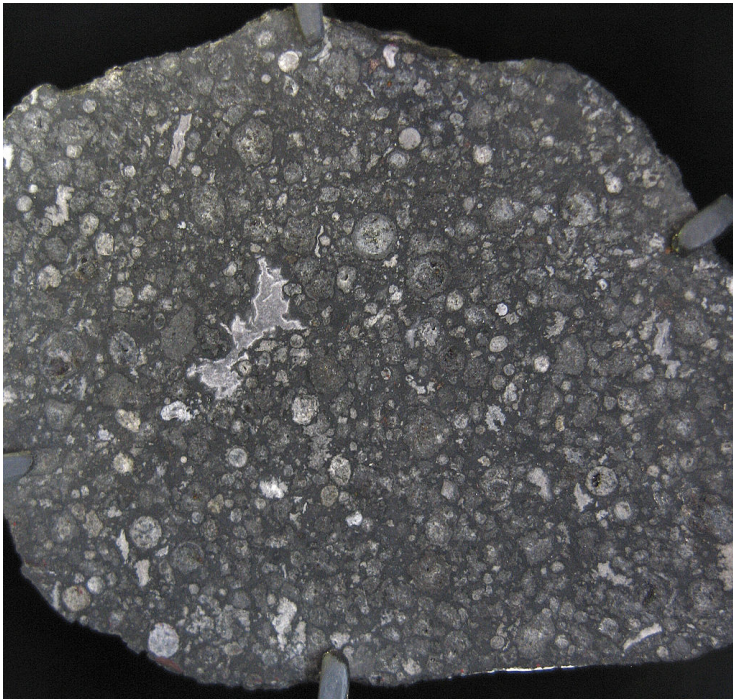


# Proceso de diferenciación interior de un planeta

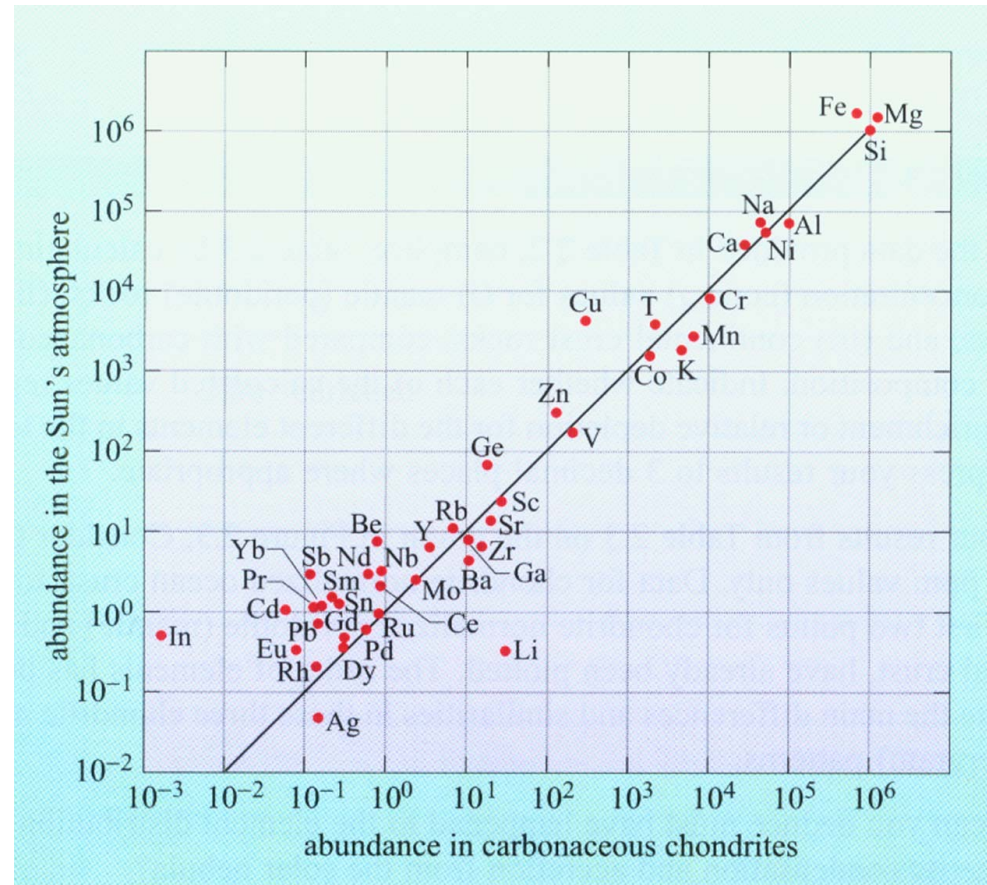


a) Interior inicial homogéneo.  
b) La energía cinética impartida por los impactos derrite el material y provoca la segregación del más denso hacia el núcleo. La corteza es el material más liviano que, como una escoria, queda flotando sobre el manto. c) El decaimiento de isótopos radioactivos mantiene el manto parcialmente derretido (magma): el material más liviano asciende hacia la superficie provocando derrames de lava y volcanes.

# El material más primitivo es el menos diferenciado en términos de las abundancias relativas de los elementos



Ejemplo: Meteorito de Allende  
Condrita carbonosa

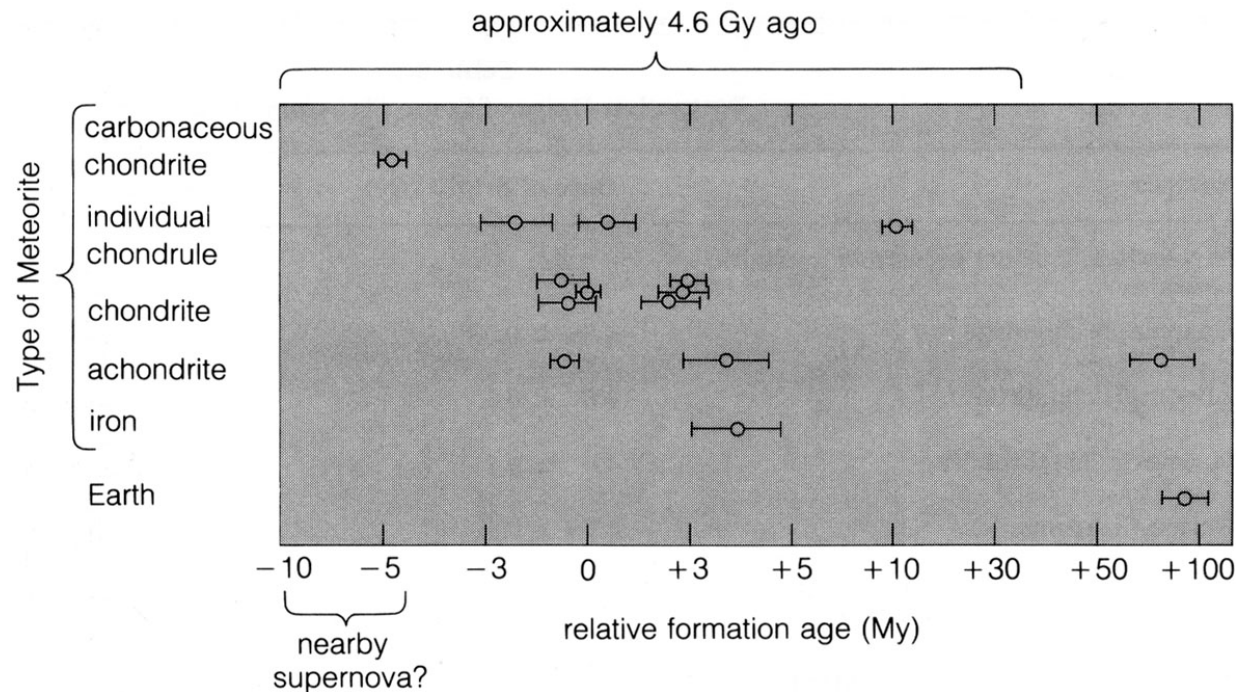




# Determinación de edades por decaimiento radioactivo

Vidas medias de isótopos seleccionados usados comúnmente en geocronología

Padre	Stable Hijo(s) estable	Vida media $t_{1/2}$ ( $10^9$ años)
$^{40}\text{K}$	$^{40}\text{Ar}$ , $^{40}\text{Ca}$	1.25
$^{87}\text{Rb}$	$^{87}\text{Sr}$	48.8
$^{232}\text{Th}$	$^{208}\text{Pb}$ , $^4\text{He}$	14
$^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}$ , $^4\text{He}$	0.704
$^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}$ , $^4\text{He}$	4.47



## Ejemplo: El decaimiento de $^{87}\text{Rb}$ en $^{87}\text{Sr}$

El decaimiento de Rubidio en Estroncio ocurre a través de la reacción:



Por lo tanto la población de Rb decaerá de acuerdo:

$$\Delta N_{R87} = -N_{R87}\Delta t/\tau_{R87}$$

donde  $\tau_{R87}$  es la vida media del Rb, es decir el tiempo en que el número de átomos cae a la mitad:  $t_{1/2} = \tau_{R87} \ln 2$ . Entonces podemos escribir:

$$N_{R87}(\Delta t) = N_{R87}(0)e^{(-\Delta t/\tau_{R87})}$$

Al disminuir el Rb aumenta el Sr de acuerdo:

$$N_{S87}(\Delta t) = N_{S87}(0) + [N_{R87}(0) - N_{R87}(\Delta t)] = N_{S87}(0) + N_{R87}(0)[1 - e^{(-\Delta t/\tau_{R87})}]$$

Ahora el  $^{87}\text{Sr}$  no generado por decaimiento radioactivo tiene una proporción constante con el  $^{86}\text{Sr}$ , o sea  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = b$ , donde  $b$  es constante. Dividiendo la ecuacion anterior por la abundancia de  $^{86}\text{Sr}$ ,  $N_{S86}$ , nos queda:

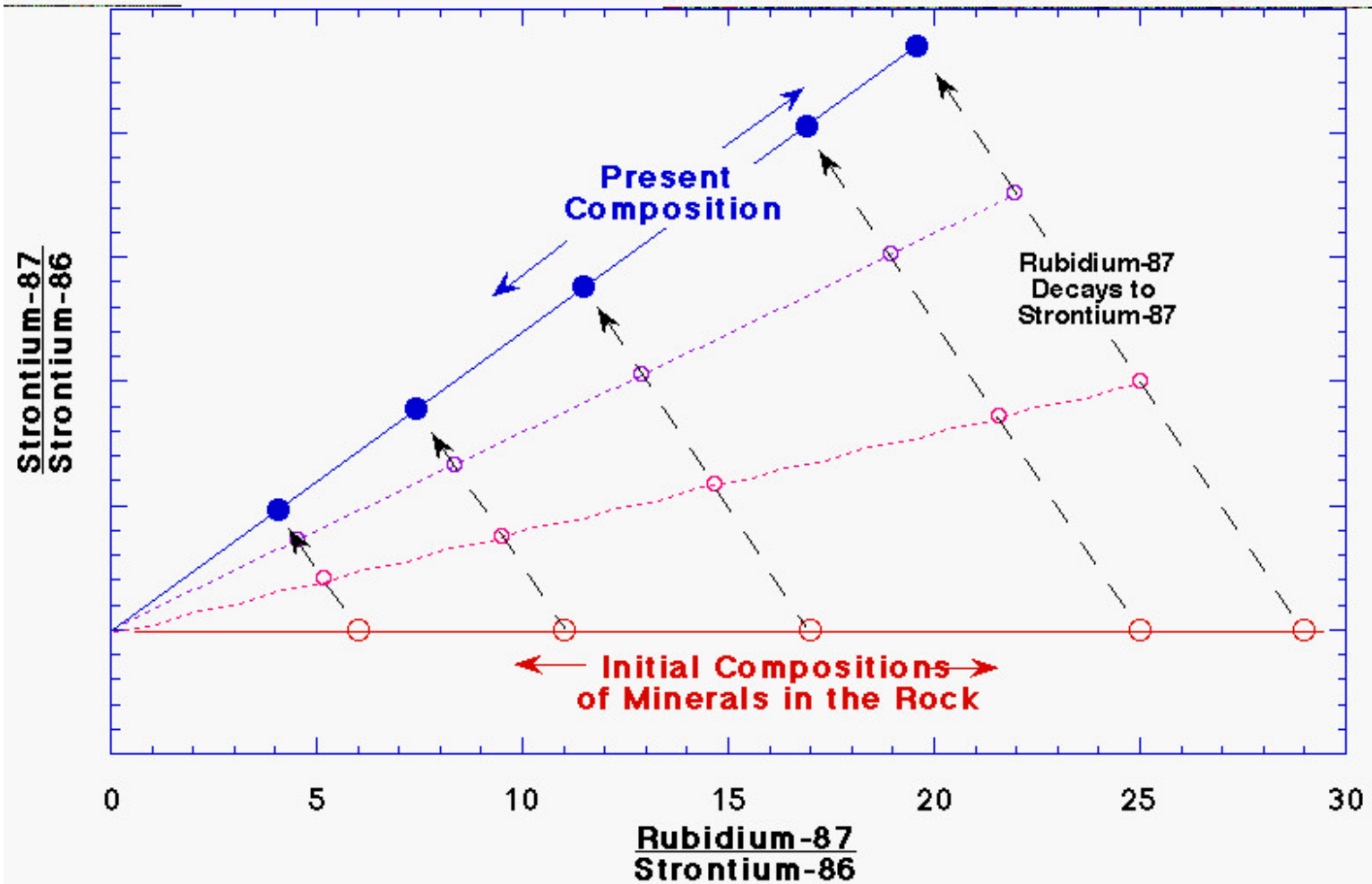
$$\frac{N_{S87}(\Delta t)}{N_{S86}} = \frac{N_{S87}(0)}{N_{S86}} + \frac{N_{R87}(0)}{N_{S86}} \left[ 1 - e^{(-\Delta t/\tau_{R87})} \right] = b + \frac{N_{R87}(0)}{N_{S86}} \left[ 1 - e^{(-\Delta t/\tau_{R87})} \right]$$

Si sustituimos  $N_{R87}(0)$  por  $N_{R87}(\Delta t)$ , que junto a  $N_{S87}(\Delta t)$  pueden ser medidos en los distintos minerales de la roca, nos queda la relación lineal:

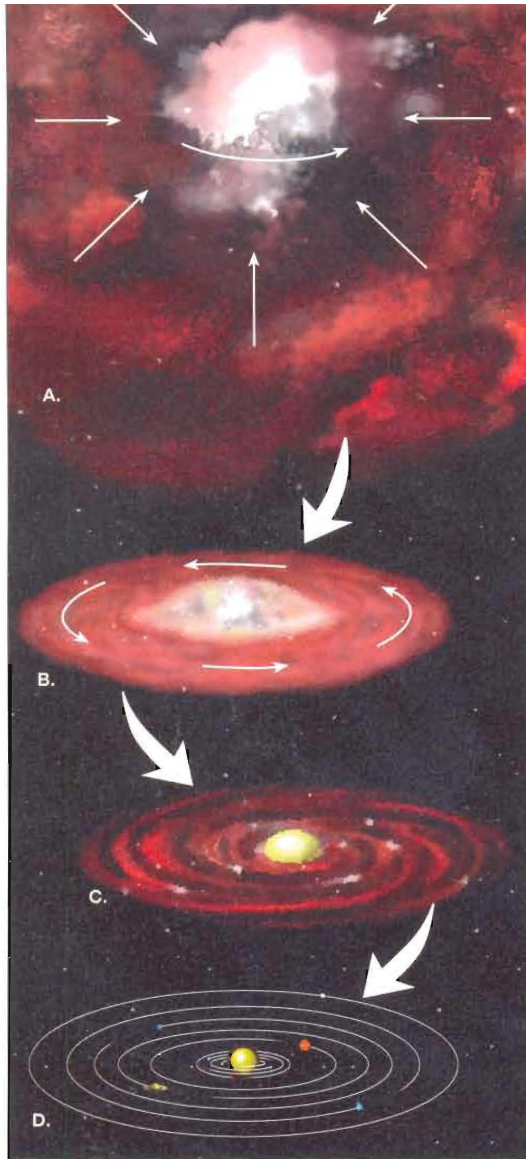
$$\frac{N_{S87}(\Delta t)}{N_{S86}} = b + \frac{N_{R87}(\Delta t)}{N_{S86}} e^{(\Delta t/\tau_{R87})} \left[ 1 - e^{(-\Delta t/\tau_{R87})} \right] = b + \frac{N_{R87}(\Delta t)}{N_{S86}} \left[ e^{(\Delta t/\tau_{R87})} - 1 \right]$$

De esta ecuación podemos obtener el tiempo transcurrido desde que se formó la roca  $\Delta t$ .

# The Rubidium - Strontium System

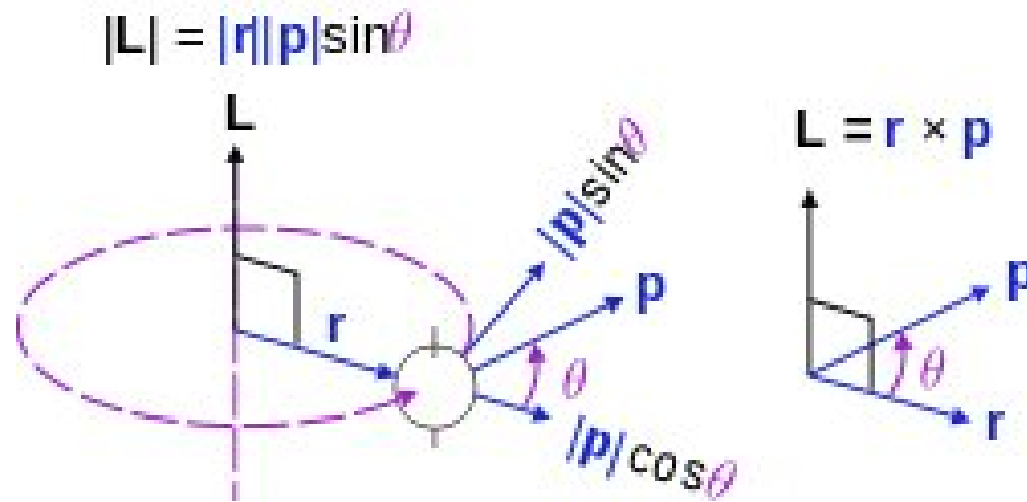


# Las etapas en la formación del sistema solar. La hipótesis nebular de Laplace



- 1) Comienza el colapso gravitacional de una nube interestelar de polvo y gas.
- 2) Las partículas de polvo se asientan en un disco fino en el plano ecuatorial.
- 3) El disco fino será inestable a perturbaciones y se fragmentará en multitud de pequeños objetos denominados *planetesimales*.
- 4) Los planetesimales continuarán creciendo por colisiones mutuas hasta formar un grupo de planetas embrionarios.
- 5) Al final del proceso quedarán unos pocos planetas en órbitas estables, mientras que los objetos residuales serán dispersados por las perturbaciones gravitacionales de los planetas formados.

# La formación de un disco ecuatorial es el resultado de la conservación del momento angular



Ley de conservación del momento angular  $\vec{L}$ . Cuando la nube primordial se contrae disminuye su radio  $r$ , lo cual lleva a un incremento de la velocidad de rotación  $V$  y su achatamiento. En la figura  $p$  es la cantidad de movimiento:  $p = mV$ , donde  $m$  es la masa del objeto que gira en torno al eje.

Conservación del momento angular:

$$L = I\omega, \quad I : \text{momento de inercia} = \alpha MR^2, \quad \omega : \text{velocidad angular}$$

# La formación de las estrellas y de sistemas planetarios



\* **Masa de Jeans:** El criterio para el colapso gravitacional de una nube de gas y polvo es que la fuerza gravitacional de la propia nube supere a la presión del gas. Esta condición se traduce en el criterio desarrollado por James Jeans (1902) para la mínima masa  $M_J$  requerida para el colapso:

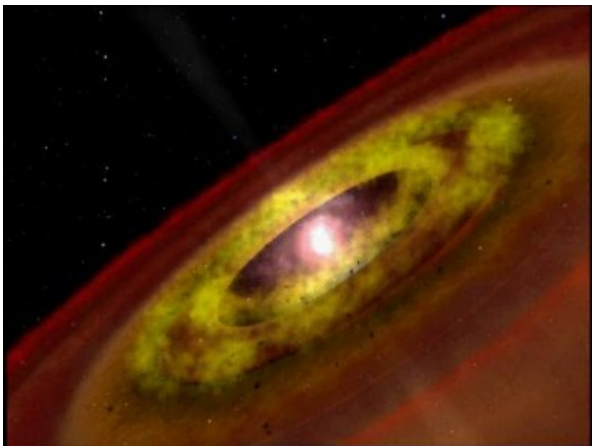
$$M_J = \left( \frac{kT}{\bar{\mu}m_H G} \right)^{3/2} \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$

donde  $T$  y  $\rho$  son la temperatura y la densidad media de la nube.

Si sustituimos por valores típicos de las nubes moleculares interestelares :  $T = 10$  K,  $\rho = 10^4$  moléculas de  $H_2$  /  $cm^3$ , nos queda:  $M \sim 1 M_\odot$ . Si el colapso comienza en una zona menos densa a mayor temperatura, la región colapsante involucrará más masa lo que dará lugar a la formación de un cúmulo de estrellas.

\* **Tiempo de contracción en cuasi-equilibrio hidrostático:** Cuando el material se contrae, aumenta su opacidad lo que dificulta la salida de la radiación. La temperatura y la presión aumentan hasta llegar a un punto en que obstaculiza su contracción ulterior. En ese momento la futura estrella adquiere forma y se la denomina *protoestrella*. Las temperaturas centrales son todavía demasiado bajas para la producción de reacciones termonucleares. La fuente de energía es la conversión de la energía potencial gravitacional en energía cinética y calor. Si  $R$  es el radio de la protoestrella cuando llega a la SP y durante este fase tiene una luminosidad  $L$ , la escala de tiempo en esta fase está dada por:

$$t_{grav} = \frac{GM^2/R}{L} = 4,5 \times 10^7 \times \frac{(M/M_{\odot})^2}{(R/R_{\odot})(L/L_{\odot})} \text{ años}$$



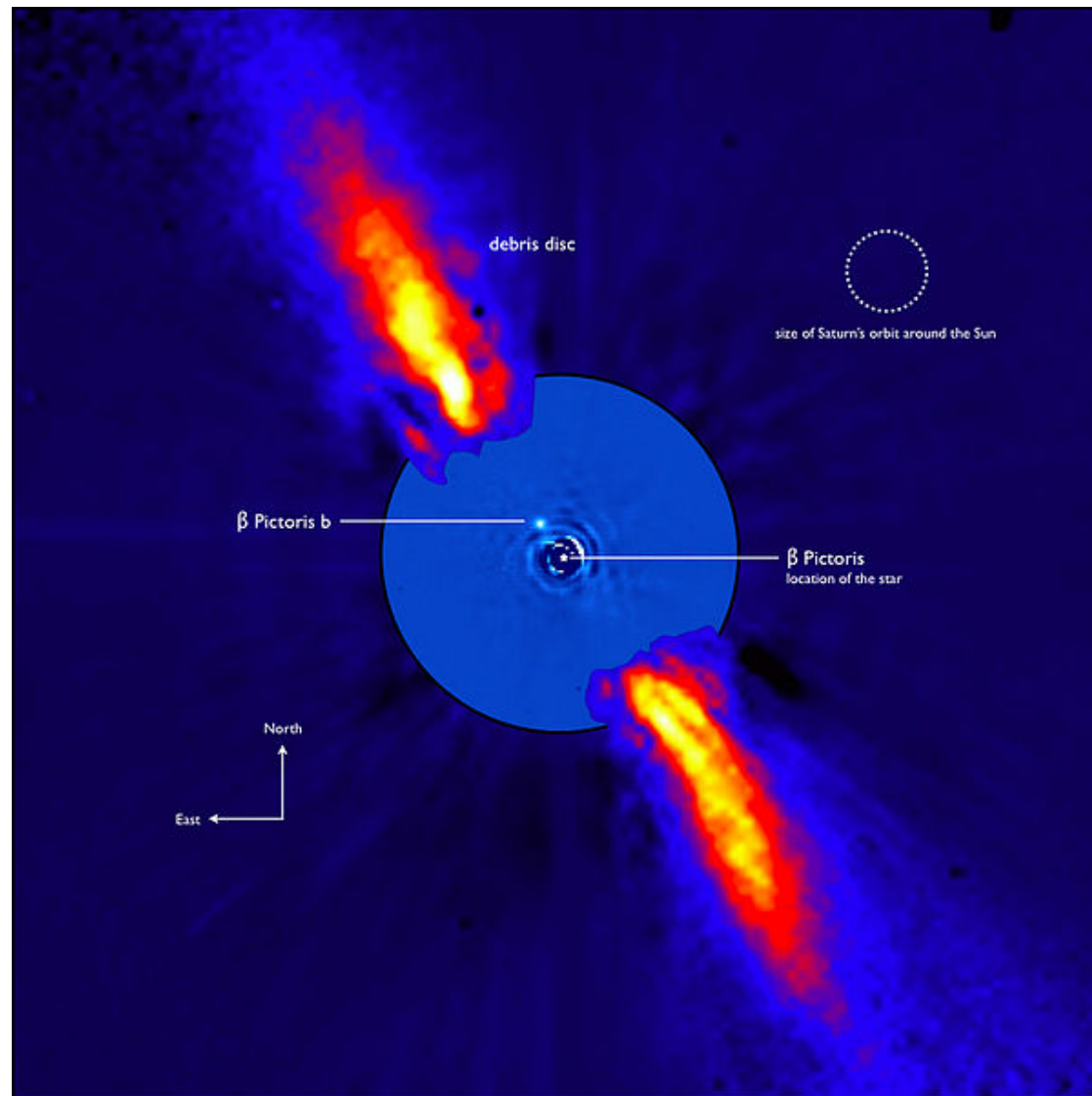
Al final de la fase de cuasi-equilibrio hidrostático tendremos a la protoestrella rodeada de un disco de gas y polvo, aun acretando material y muy activa. Tendrá un brillo variable y un exceso de emisión de radiación en el infrarrojo. Es lo que denominamos una estrella *T Tauri*.



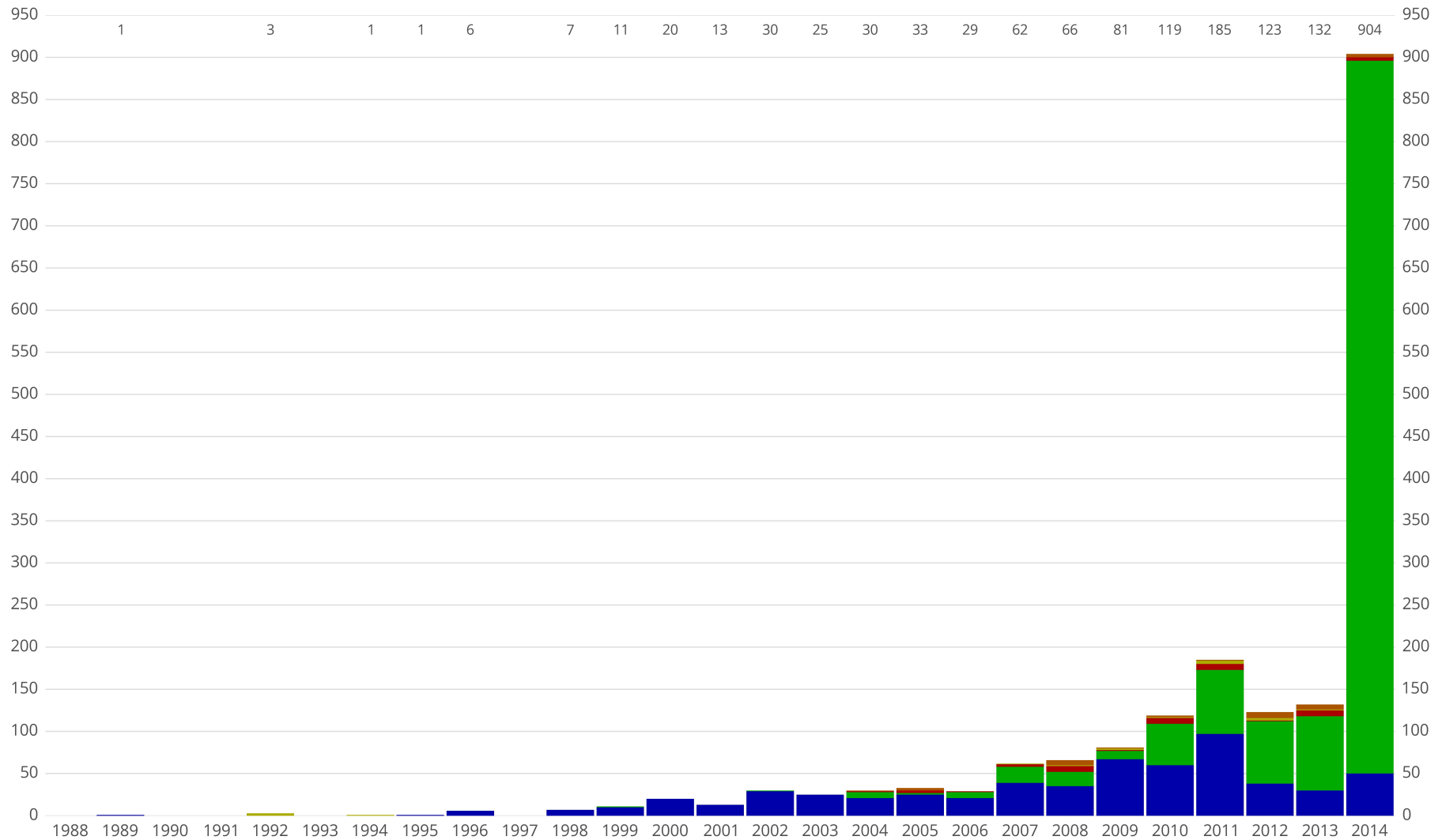
# Visión del disco protoplanetario de una estrella hipotética recién formada



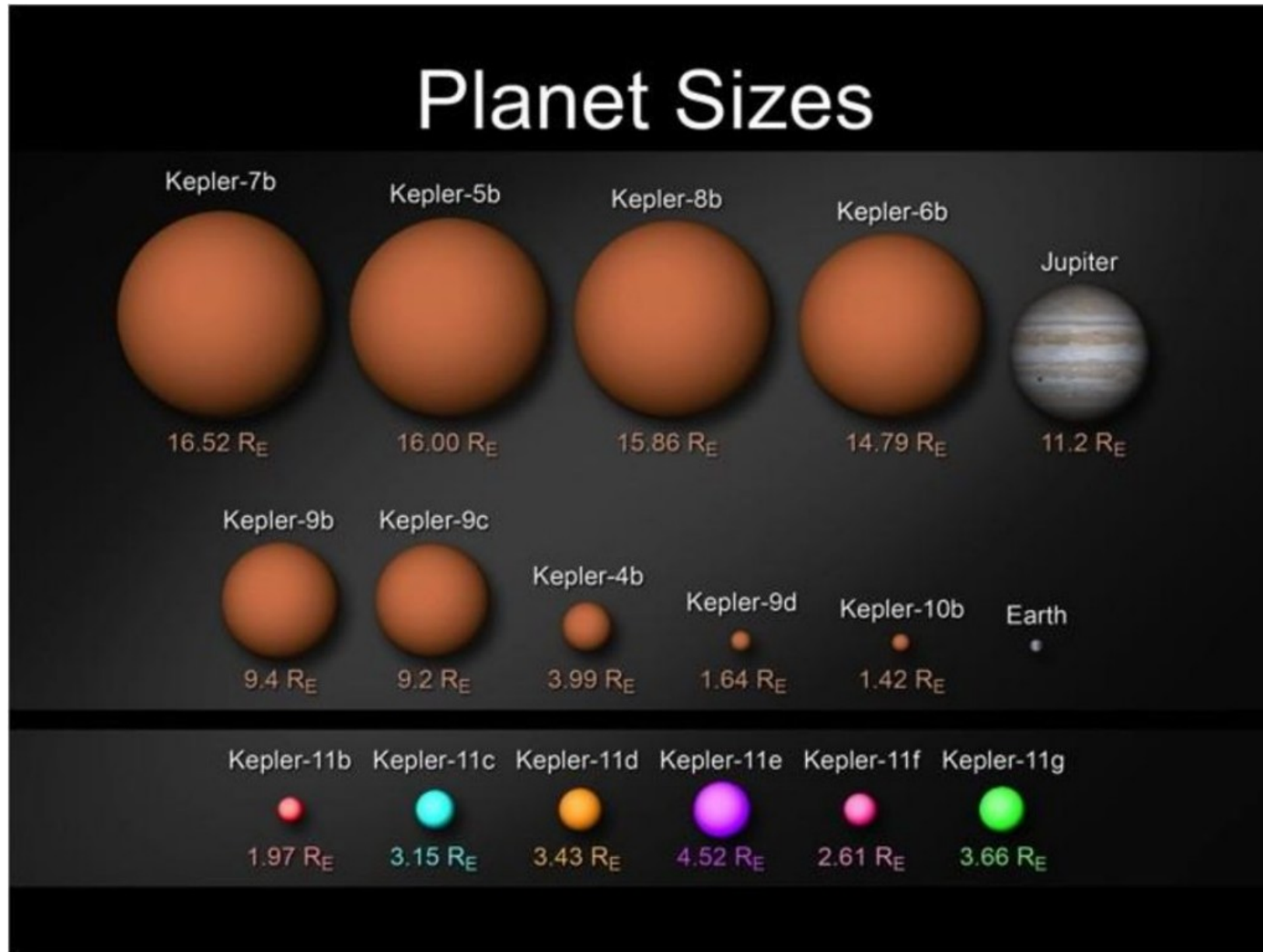
# Confirmación observacional de la existencia de discos protoplanetarios



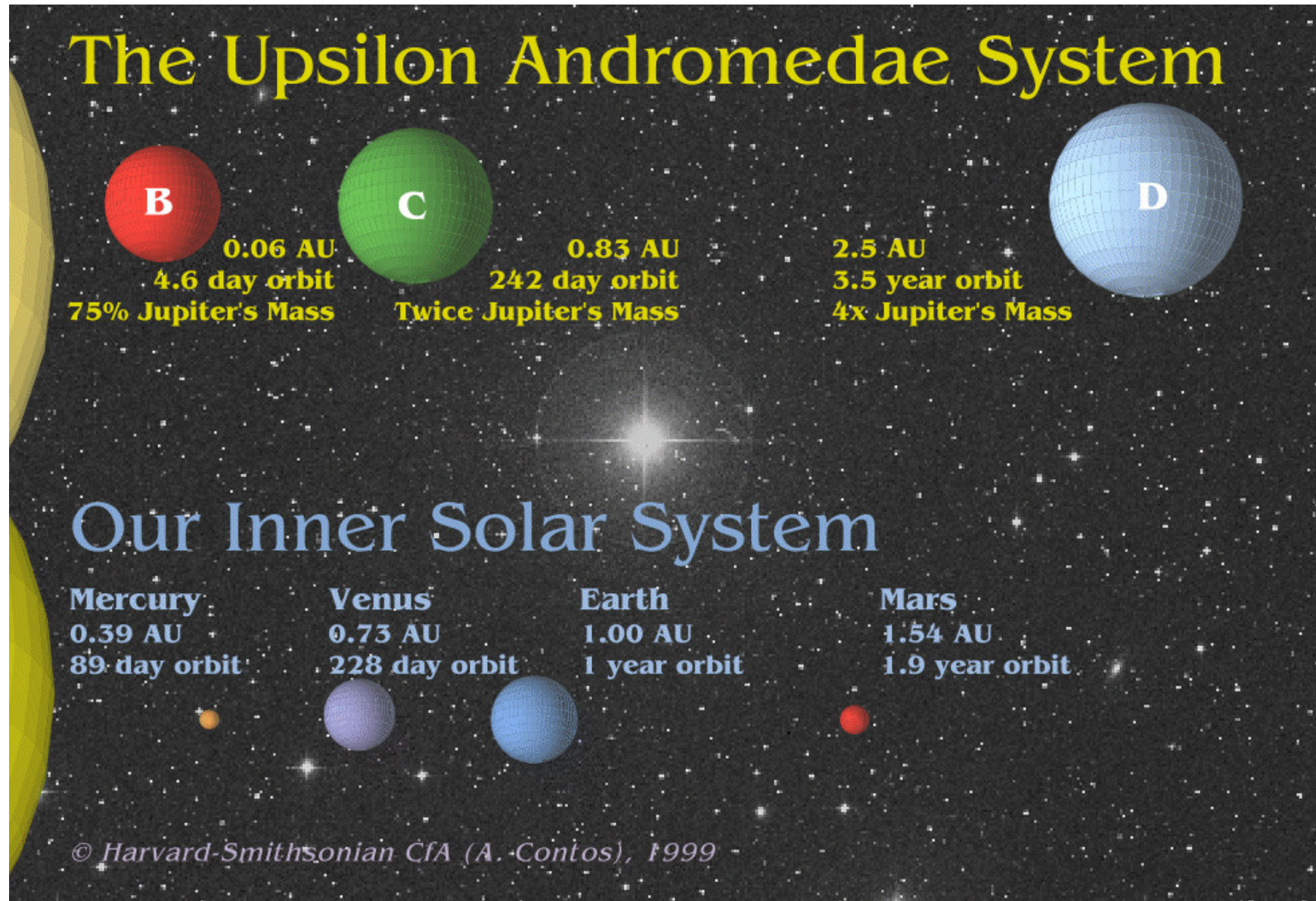
# Descubrimiento de exoplanetas



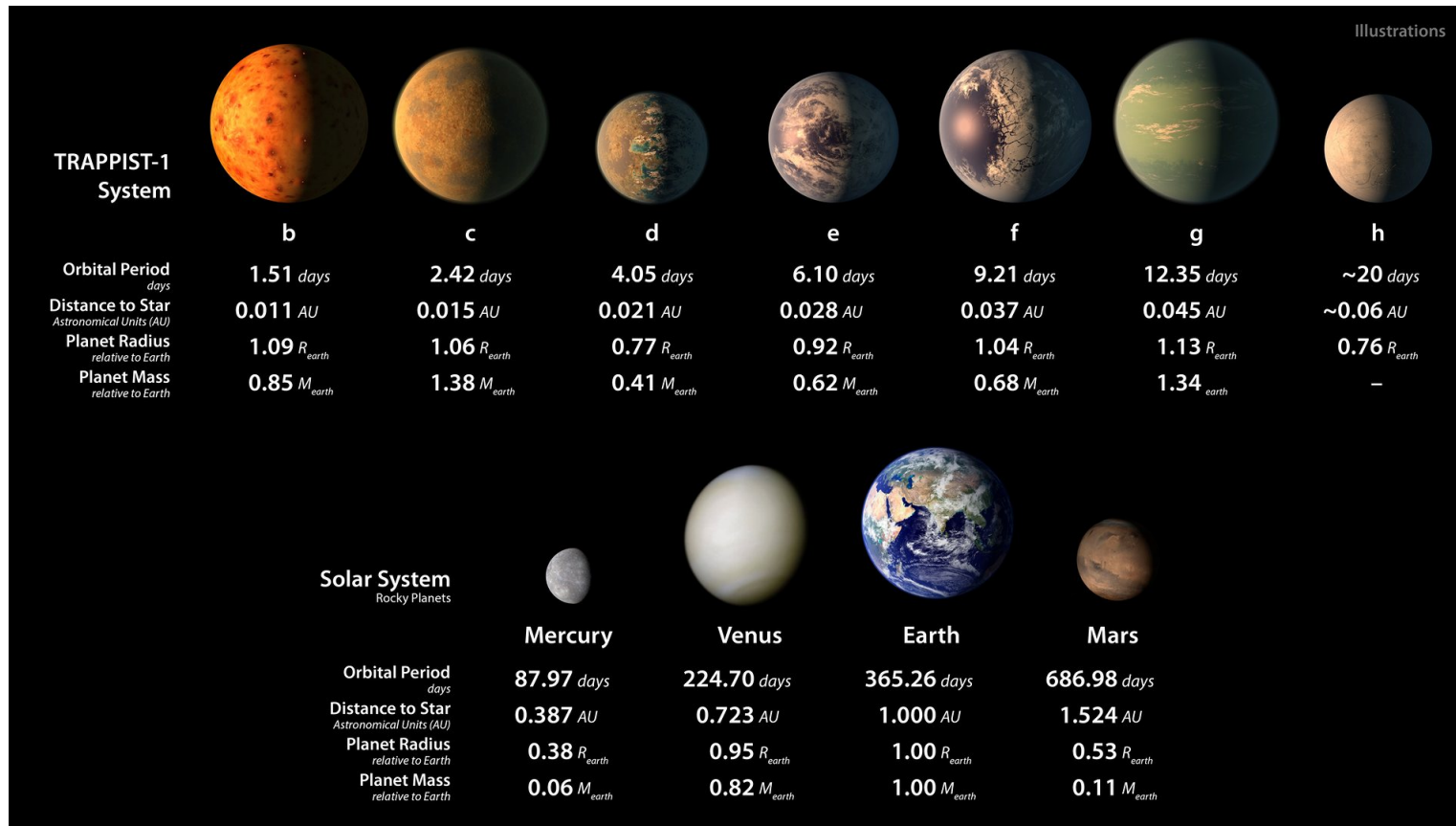
# Tamaños de los exoplanetas



# La existencia de sistemas extrasolares



# Sistemas planetarios con muchas Tierras



Sistema planetario compuesto por 7 planetas similares a la Tierra hallado en torno a la estrella Trappist-1, una pequeña enana roja ligeramente más grande que Júpiter (masa =  $0.08 M_{\odot}$ ), localizada a 39.5 años-luz del sistema solar.

# El sistema TRAPPIST-1 se descubrió por el método de tránsito

