

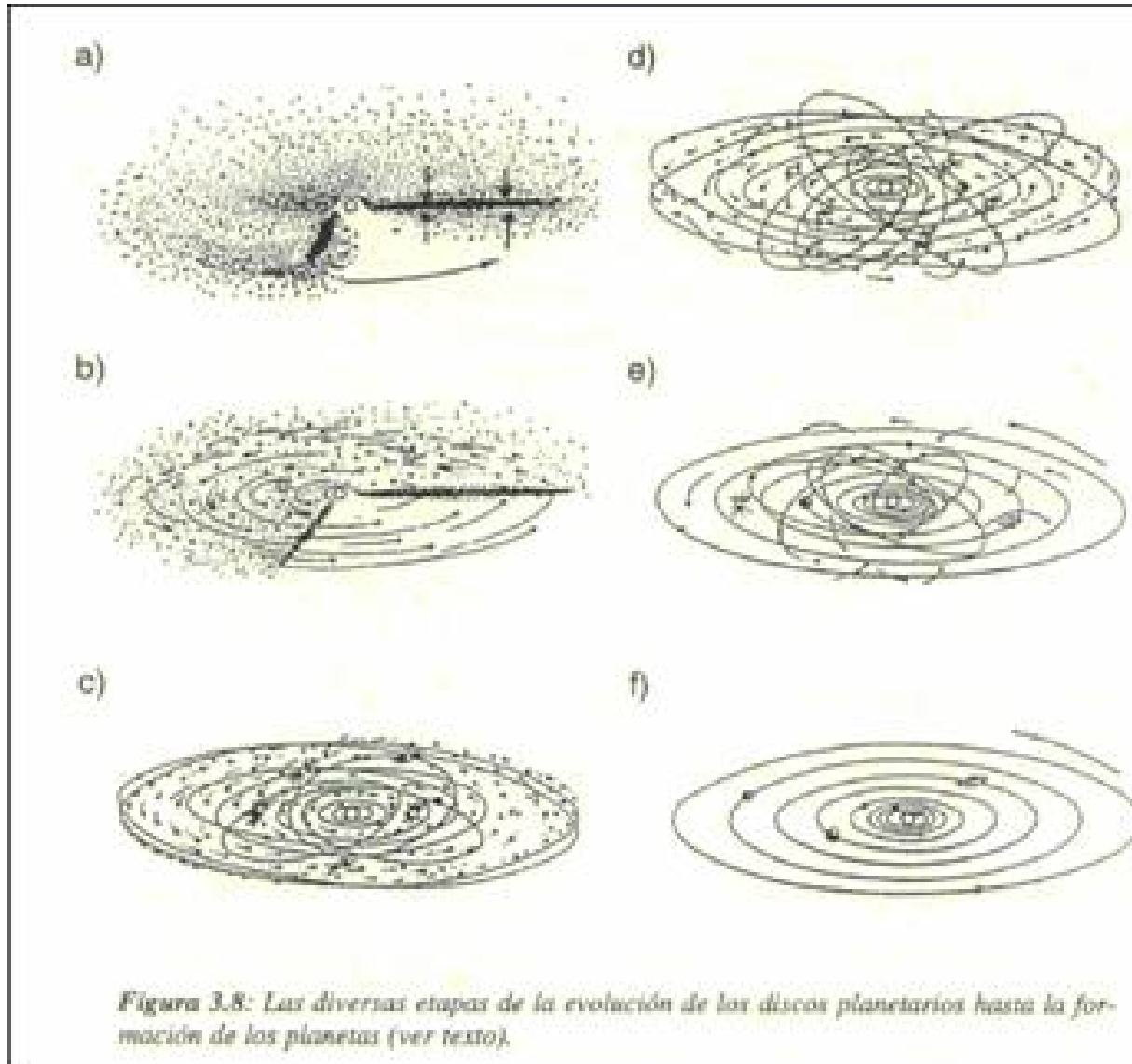
TEMA 9: Exoplanetas y formación planetaria

- * El disco protoplanetario.
- * La búsqueda de planetas más allá del sistema solar.
- * Observación de discos protoplanetarios.
- * El descubrimiento de planetas extrasolares.
- * Métodos de detección de planetas extrasolares.
- * Algunas estadísticas.
- * Desentrañando su naturaleza física.
- * Descubrimiento de exoplanetas desde el espacio.

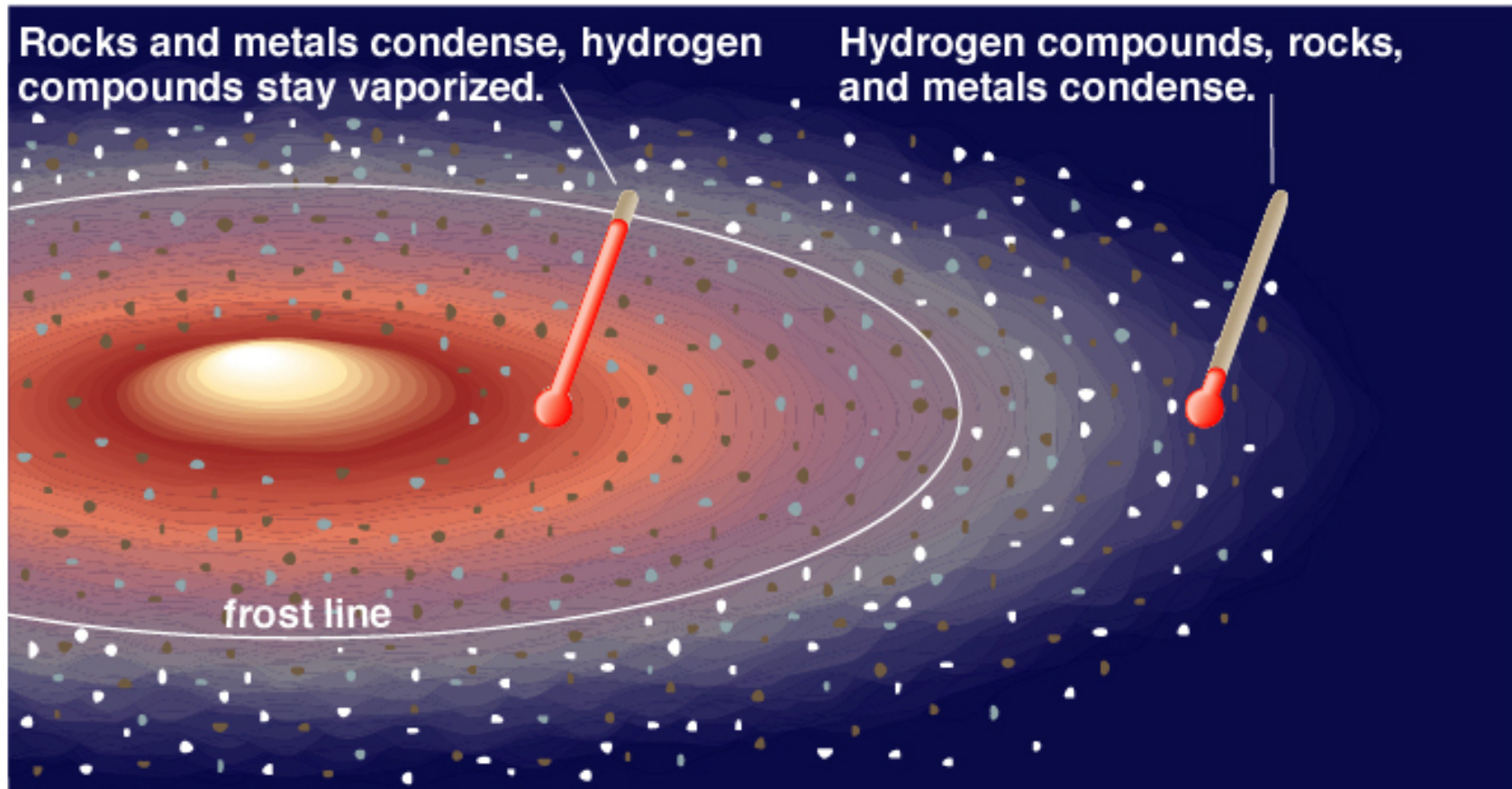
El disco protoplanetario de una estrella hipotética recién formada



Las diferentes etapas de la formación planetaria



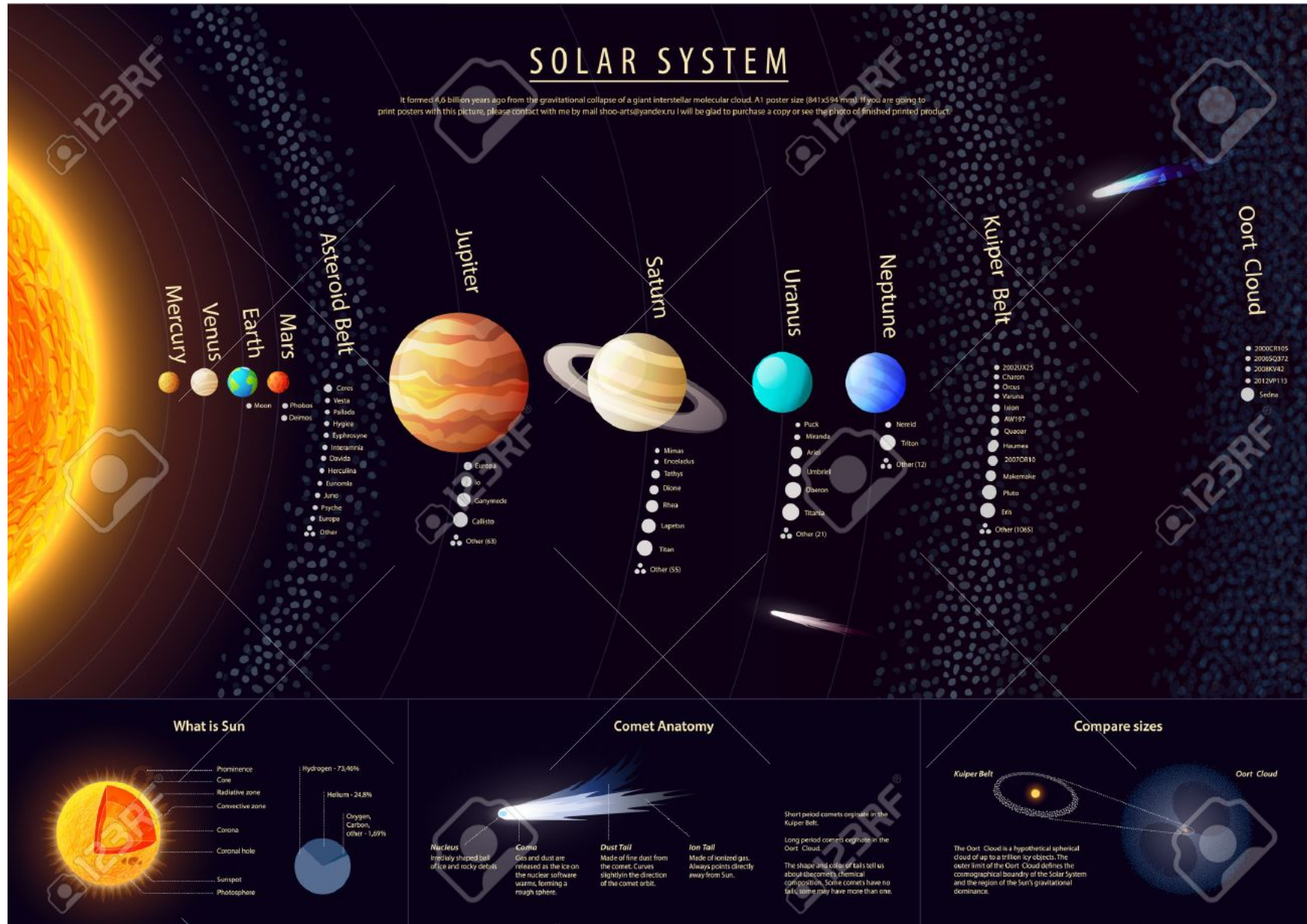
La “línea de nieve”



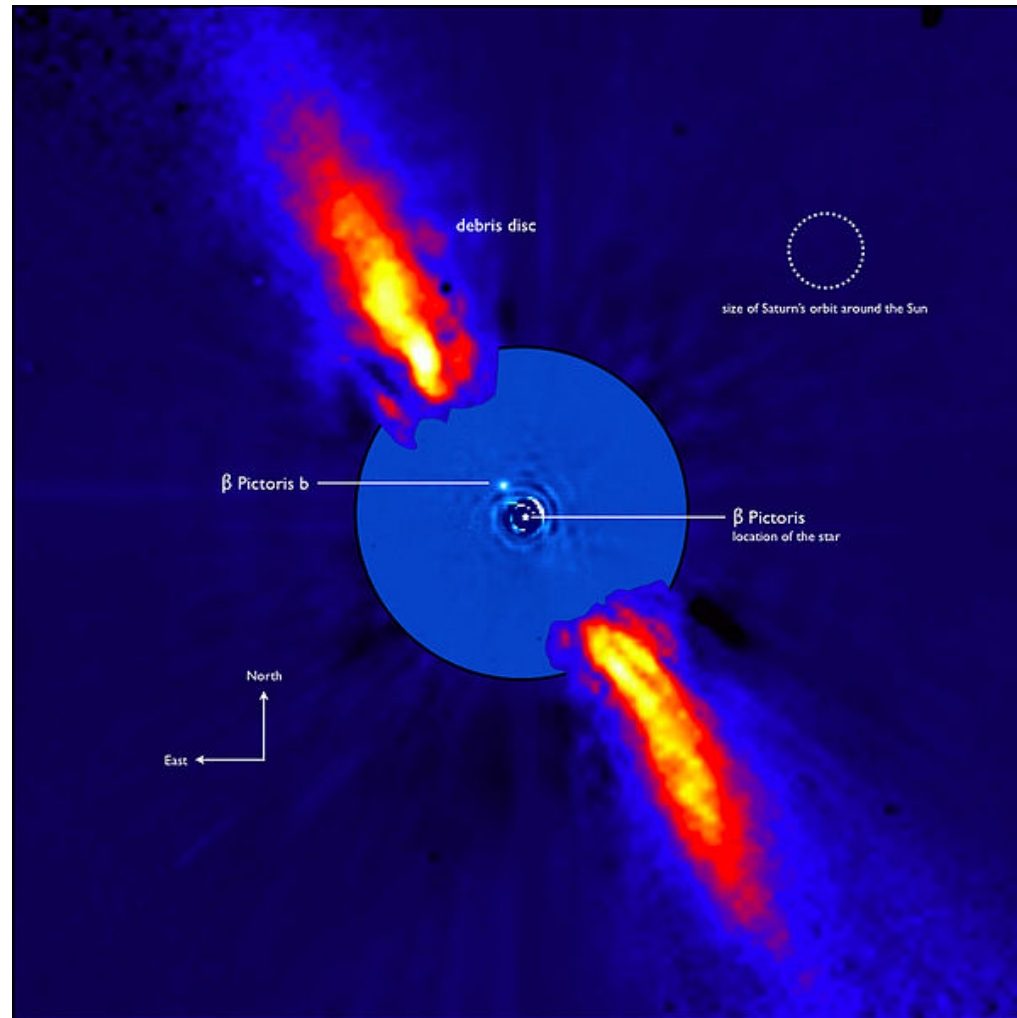
Copyright © Addison Wesley

La línea de nieve define la distancia al Sol a la cual la temperatura del disco protoplanetario cae por debajo de la temperatura crítica de condensación del vapor de agua.

El sistema solar estandar

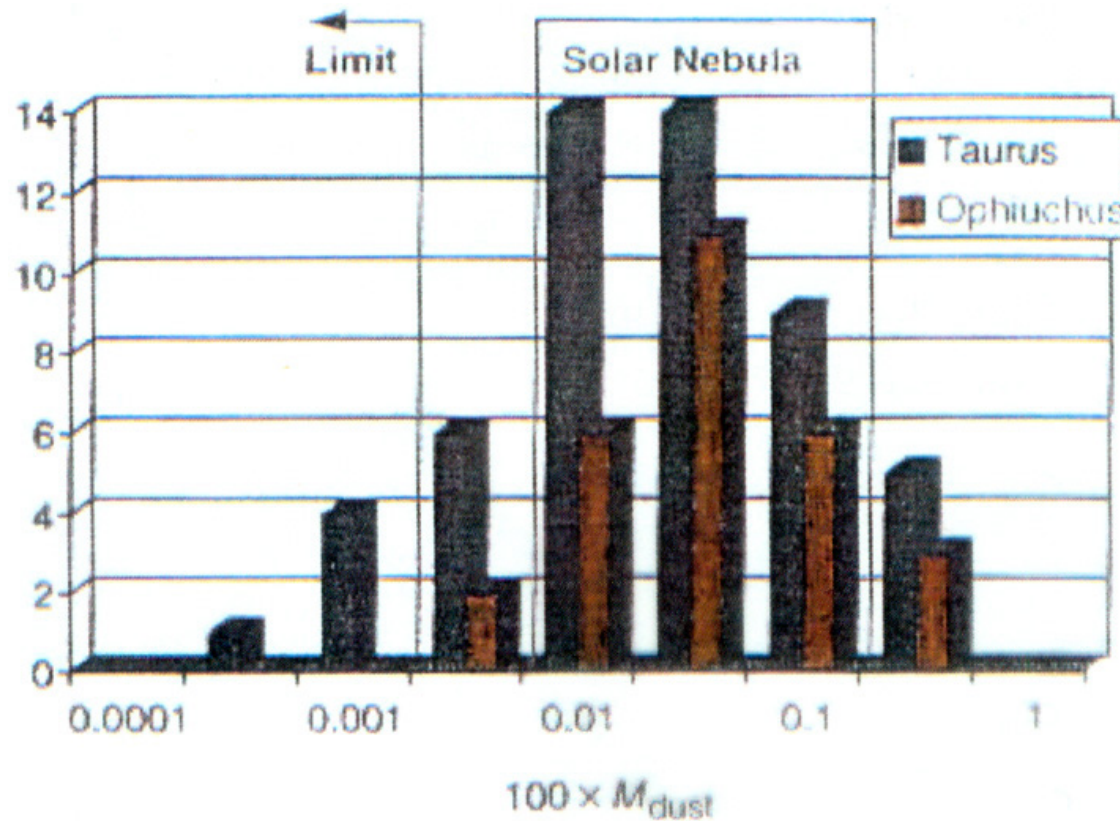


Los primeros discos protoplanetarios descubiertos



El descubrimiento -inesperado- de un disco de polvo y gas alrededor de una estrella (β Pictoris) fue desde el satélite IRAS (InfraRed Astronomical Satellite) en 1984. En 2003 se descubrió desde ESO un planeta por imagen directa.

Las masas de los discos



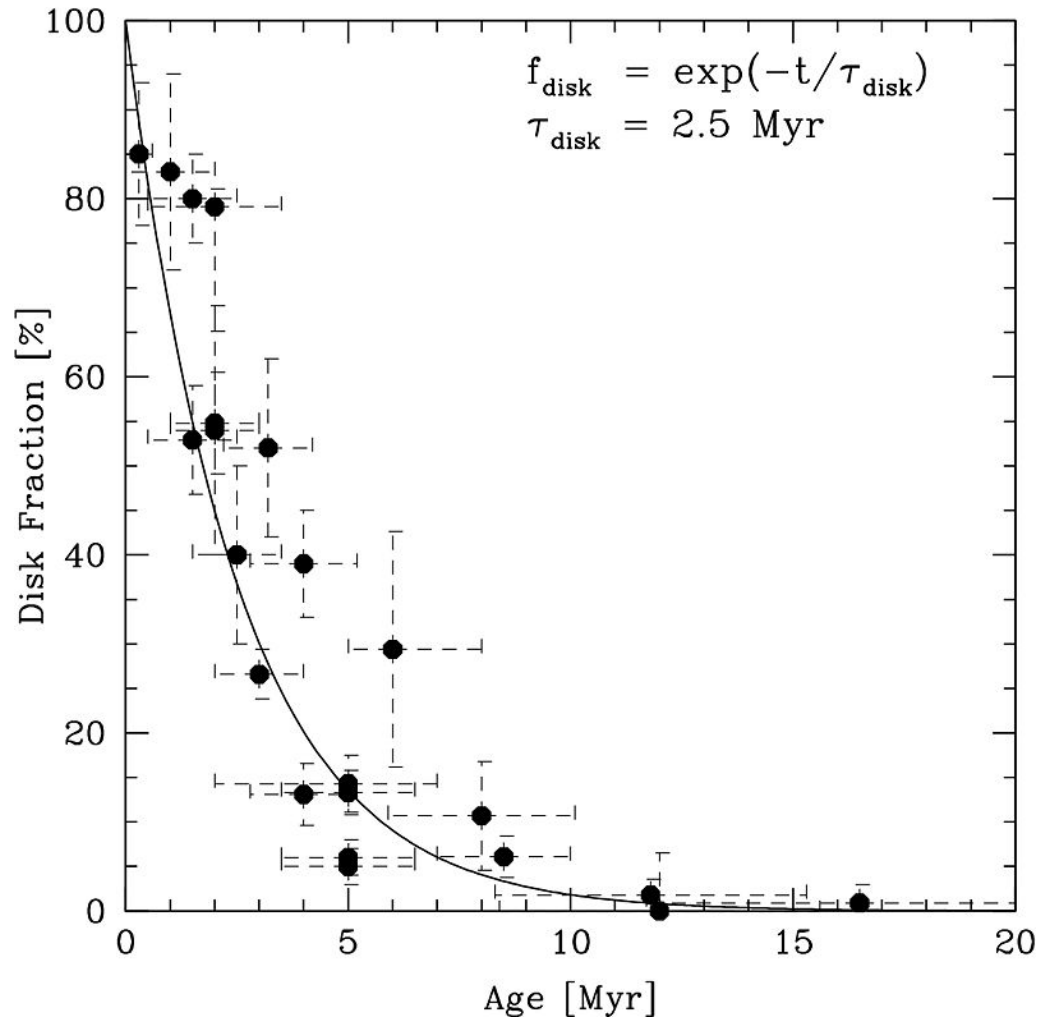
La abundancia de la molécula de monóxido de carbono (CO) se utiliza para determinar abundancias gaseosas, ya que tiene líneas muy intensas a 2,6 mm y 1,3 mm y la abundancia cósmica con la molécula más abundante (H_2) es más o menos constante ($\text{H}_2/\text{CO} \sim 10^5$ por masa). La abundancia de polvo en discos se puede determinar por la radiación IR que emiten los granos al ser calentados por las estrella central.

El tiempo de vida de un disco protoplanetario



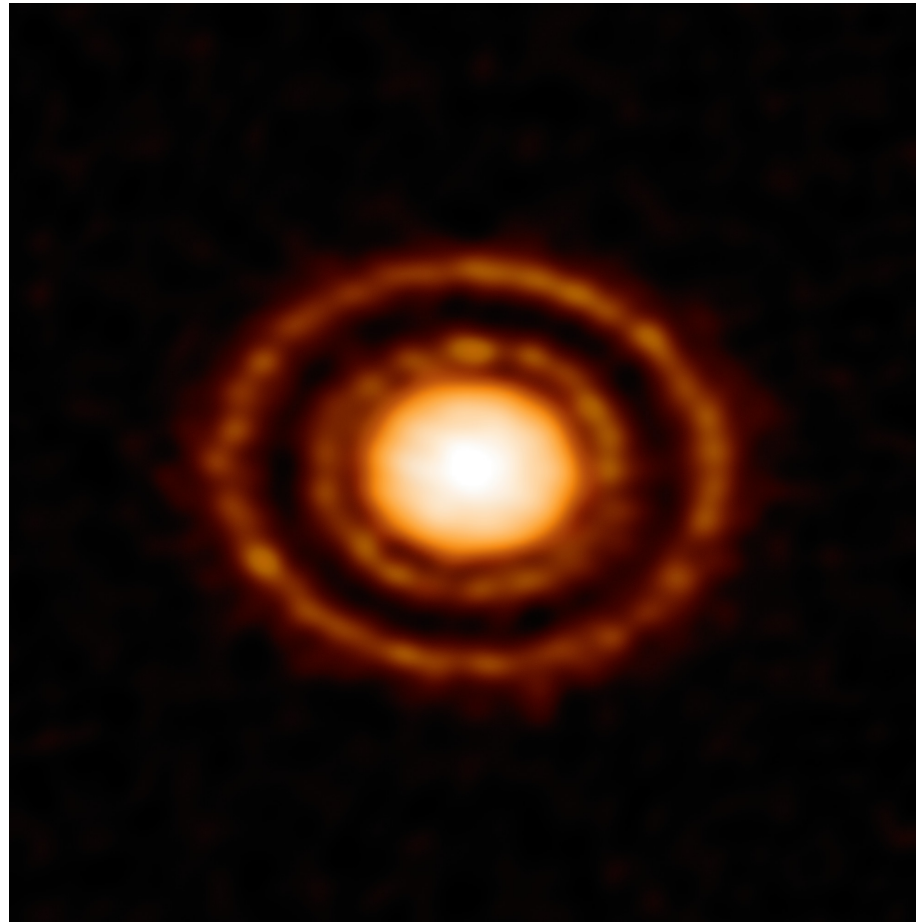
Tiempo de vida : $\sim 10^7$ años. El gas es expulsado por el fuerte flujo de radiación UV proveniente de estrellas O y B cercanas, y/o por fuertes vientos estelares de las propias estrellas centrales.

Estrellas con discos versus tiempo



Fracción de estrellas con alguna evidencia de tener un disco protoplanetario en función de la edad de la estrella (en millones de años). La muestra de estrellas se obtuvo de cúmulos jóvenes y asociaciones cercanas (Mamajek 2009).

Surcos en discos esculpidos por protoplanetas



Disco protoplanetario denominado AS 209 en la región de Ofiuco a 470 años-luz del Sol con una edad estimada de 1 millón de años. Tiene una brecha exterior que parece haber sido esculpida por un planeta gigante de la masa de Saturno. Hay otra brecha interior menos conspicua que puede albergar otro planeta. Imagen obtenida con ALMA.

Protoplanetas en discos protoplanetarios

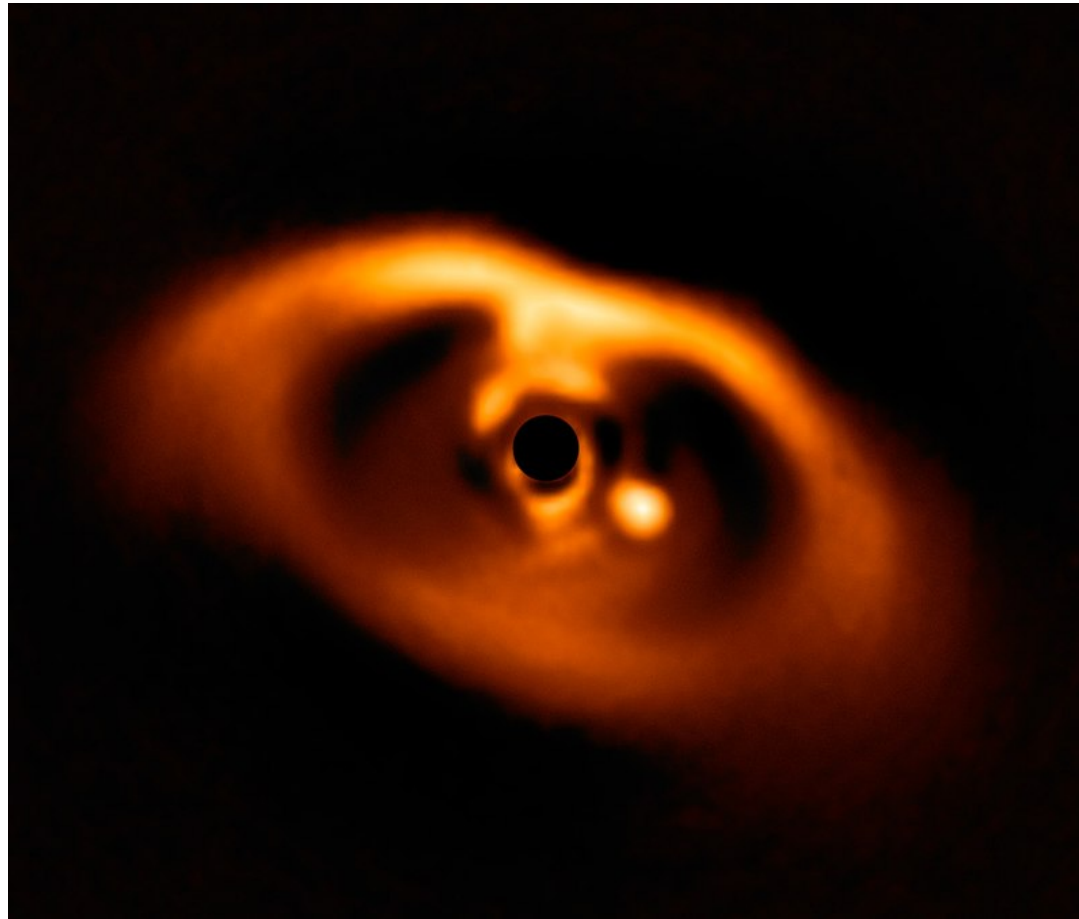


Imagen del primer protoplaneta alrededor de la estrella enana PDS 70 ($M = 0.82 M_{\odot}$) obtenida con el *Very Large Telescope* del ESO en Chile. La estrella tiene una antigüedad de unos 10 millones de años. En la imagen su luz está bloqueada por una máscara.

Planetas extrasolares

* Su búsqueda significaba vencer dificultades tecnológicas formidables!

Modelo estándar Sol-Júpiter:

* distancia = 10 pc

* separación angular = 0.5''

* $L_J/L_{\odot} = 10^{-9}$ (visible)

* desplazamiento de la posición del Sol con respecto al centro de masas
= 5×10^{-4} ''

* velocidad radial = 12 m/s

Métodos de búsqueda

* Directo

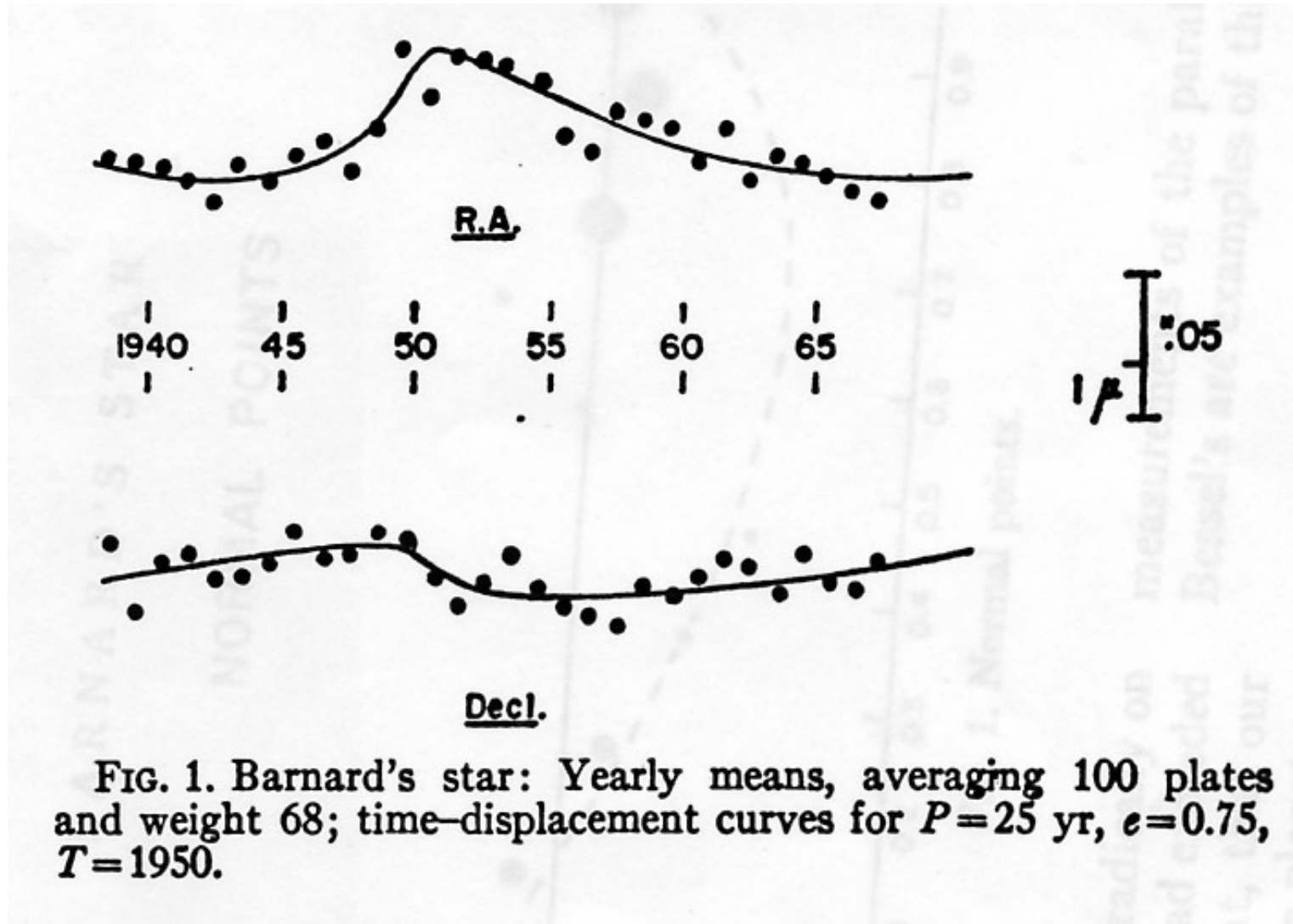
* Astrométrico

* Espectroscópico

* Fotométrico

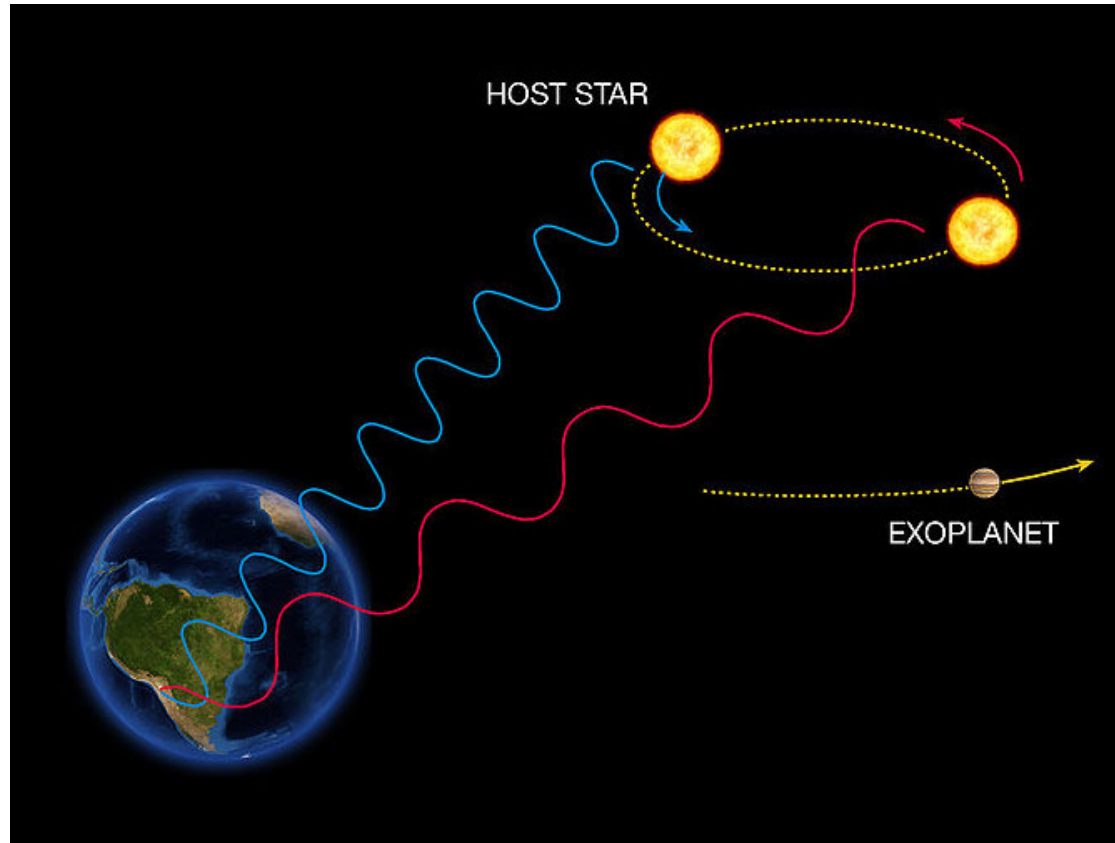
* Otros (púlsares, microlenticado)

Método astrométrico



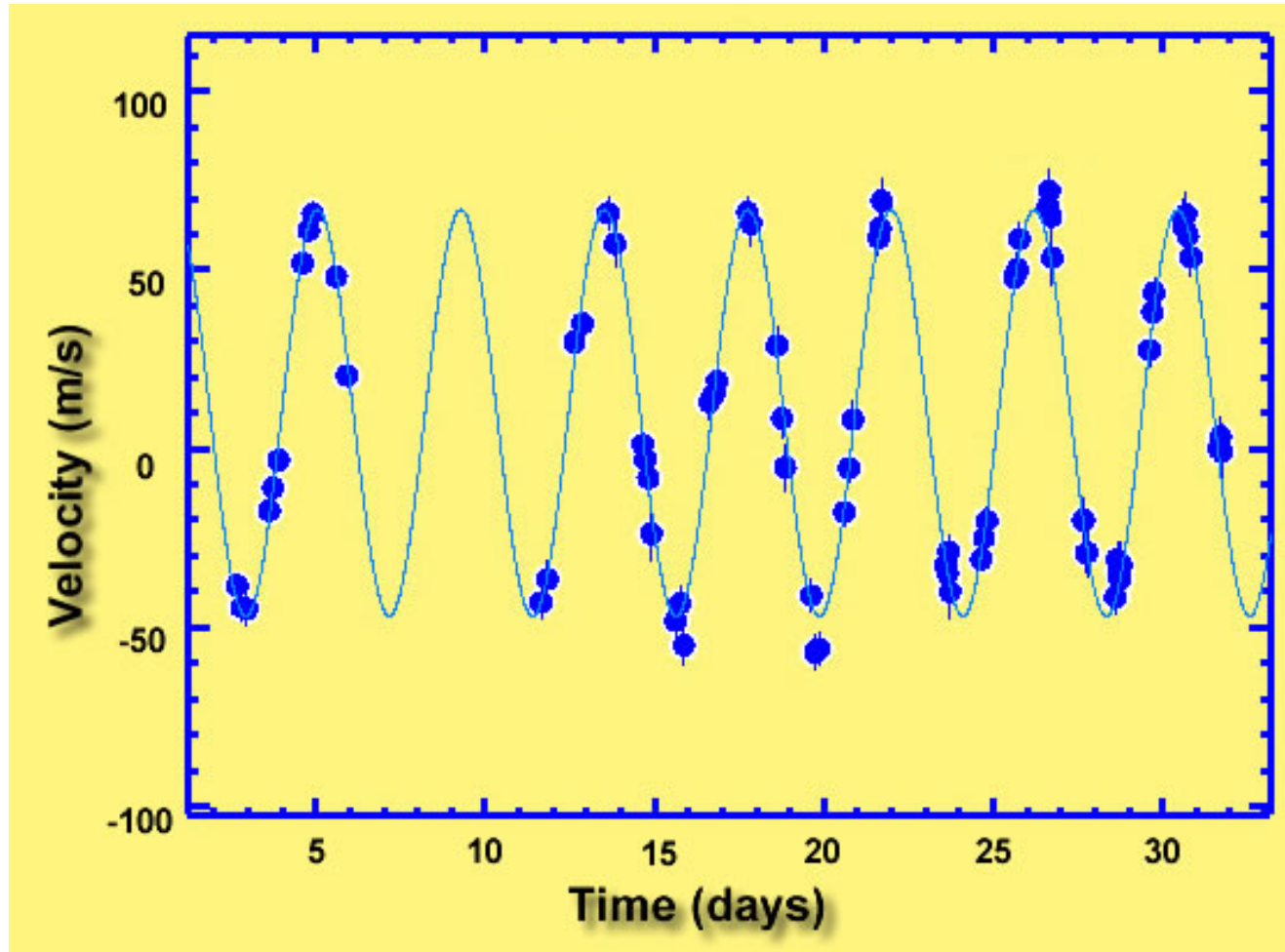
Método espectroscópico

Fue el primero utilizado para el descubrimiento de un número importante de exoplanetas.



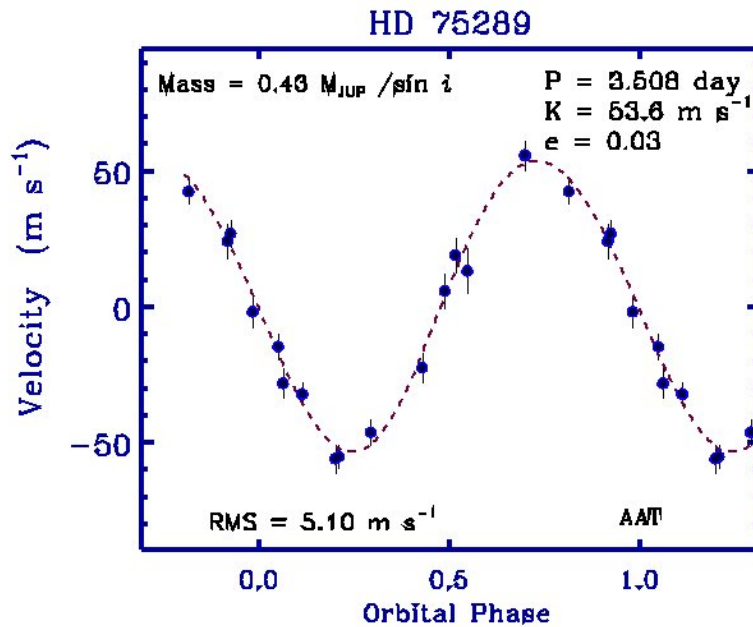
Mide el corrimiento hacia el rojo o hacia el azul de las líneas espectrales de la estrella por efecto Doppler, producido por las oscilaciones hacia adelante y hacia atrás por el “tironeo” gravitacional del planeta.

La curva de velocidades radiales

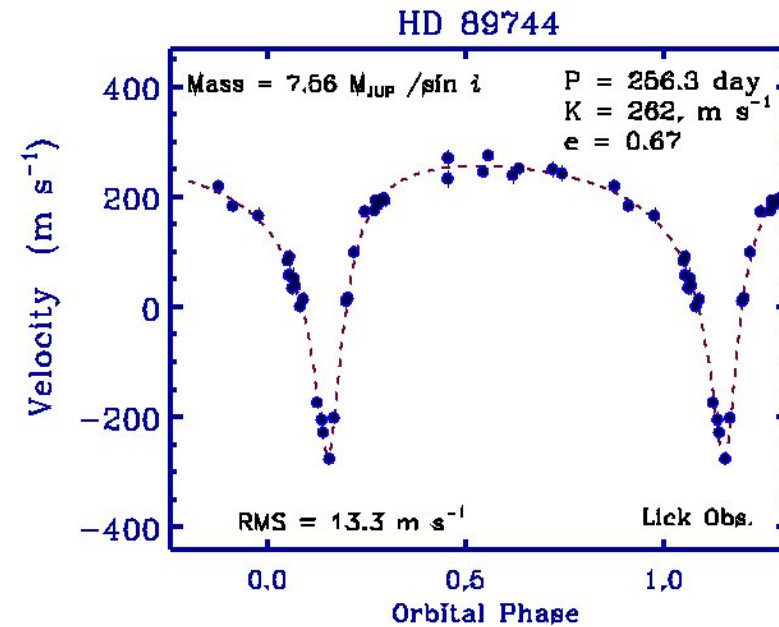


Curva de velocidades radiales que permitió la detección de un planeta alrededor de la estrella 51 Pegasi (Mayor & Queloz 1995).

Determinación de la órbita a partir de la curva de velocidades radiales



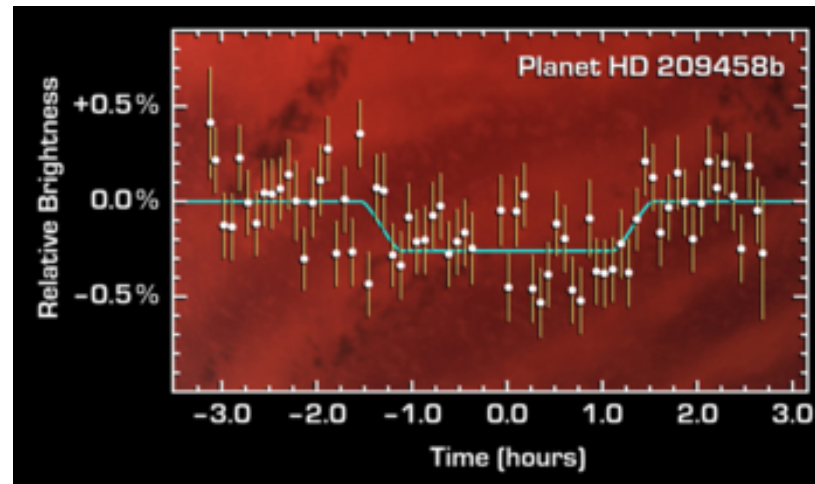
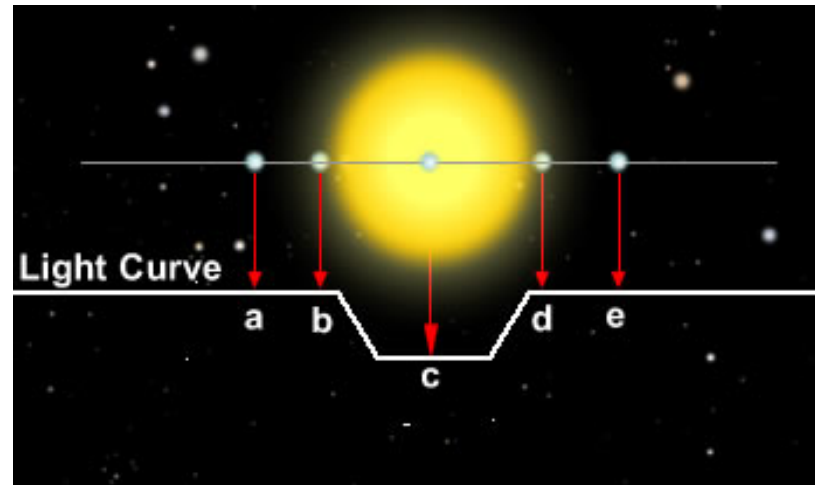
Curva de velocidad de la estrella HD 75289 que es sinusoidal, lo que indica que la órbita es casi circular.



Curva de velocidad de la estrella HD 89744 con extensos máximos y picos de caída, lo que indica que la órbita es muy excéntrica.

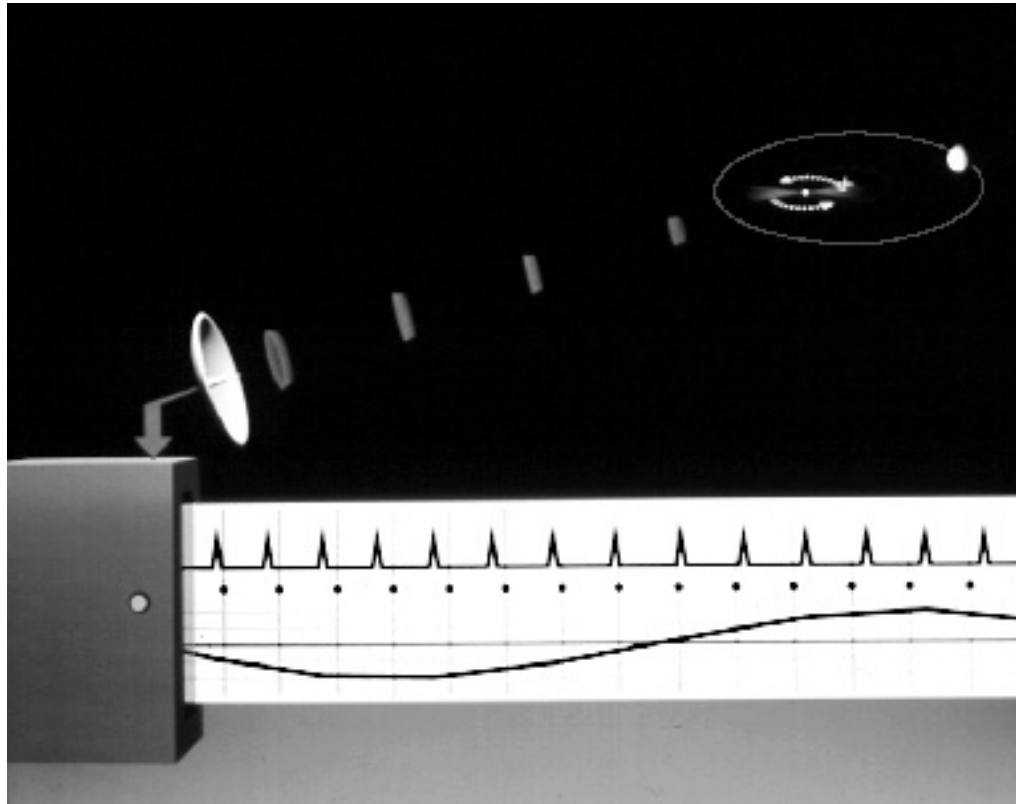
Método fotométrico

Trata de medir la caída de brillo provocada por el tránsito de un planeta por delante del disco de la estrella.

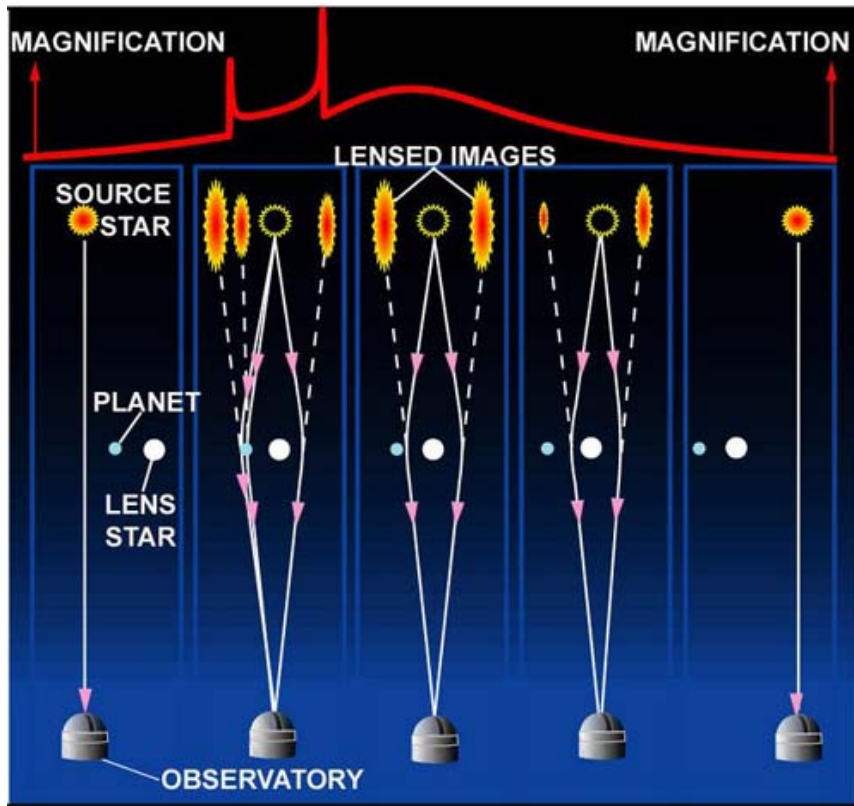


Planetas alrededor de púlsares

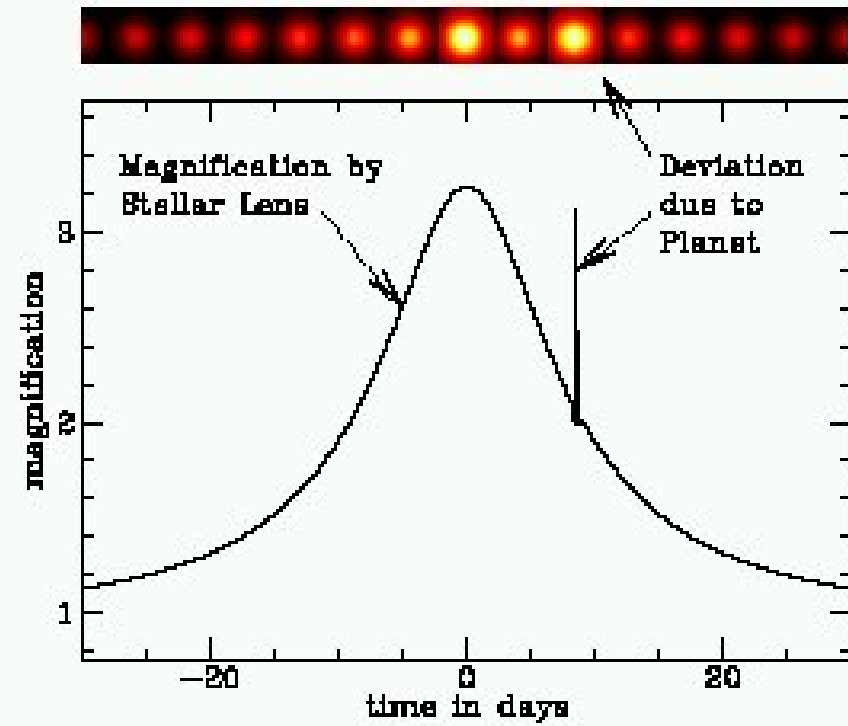
* Un púlsar emite ondas de radio que pueden ser detectadas cuando el haz apunta al observador en el transcurso de la rotación del objeto. El período de los pulsos debería ser constante, a menos que el pulsar fuera perturbado por planetas a su alrededor. Descubrimiento del primer sistema planetario en torno al púlsar PSR 1257+12 (1992).



Microdentificado



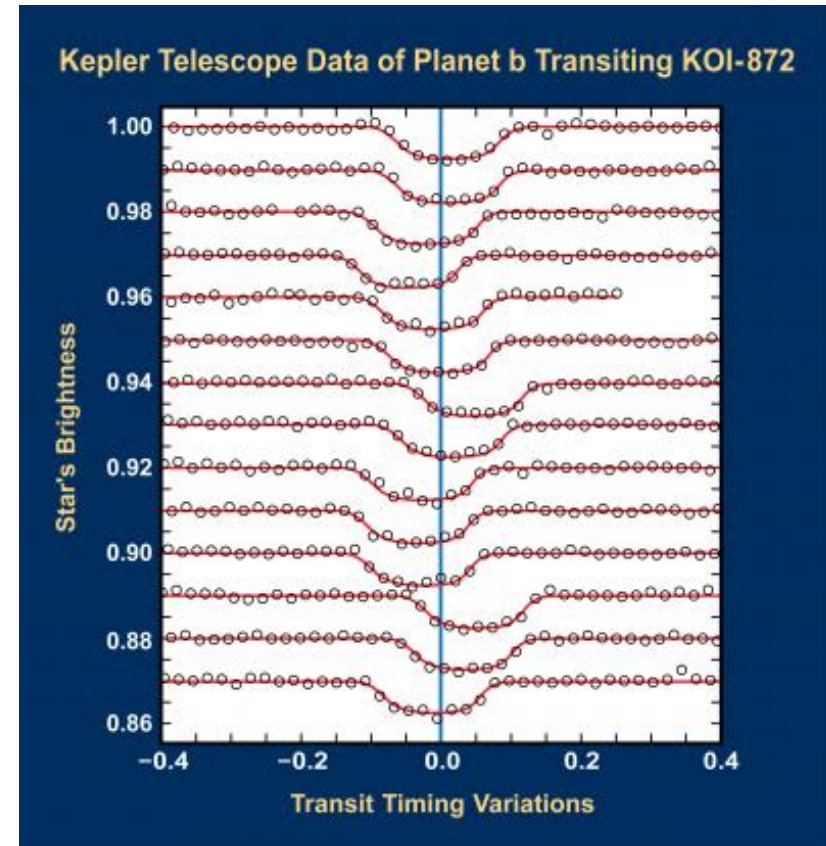
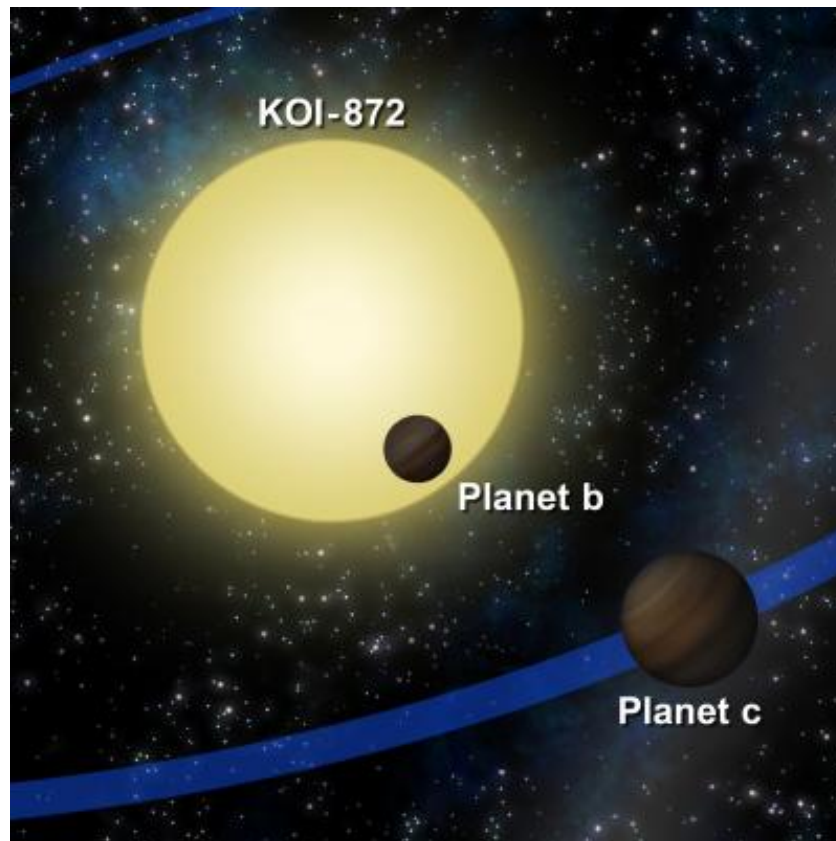
Los rayos luminosos provenientes de una fuente distante se desvian al pasar cerca de un objeto masivo.



Ejemplo de microlentificado por una estrella que tiene un planeta masivo. El planeta produce una señal adicional.

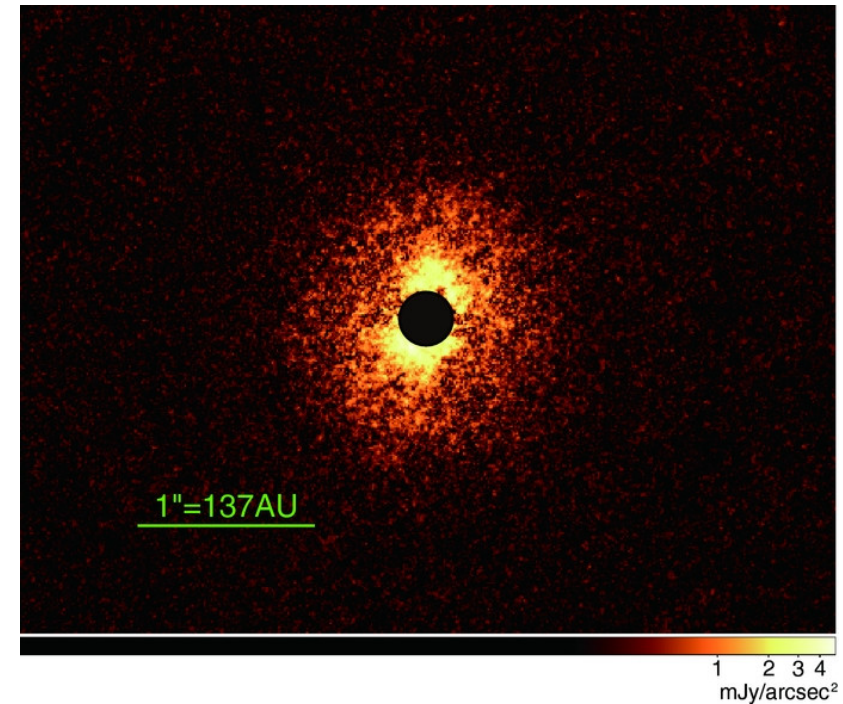
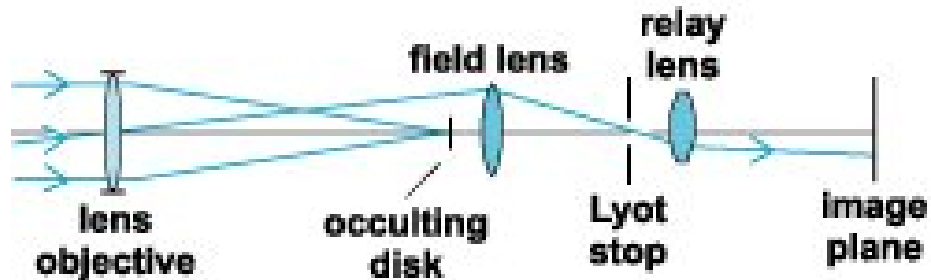
Transit Time Variation (TTV)

Es una variación del método de tránsito que permite el descubrimiento de más de un planeta orbitando una estrella en sistemas muy cerrados. Las perturbaciones de planetas extras van a causar pequeños cambios en los tiempos de tránsito que pueden ser medidos.



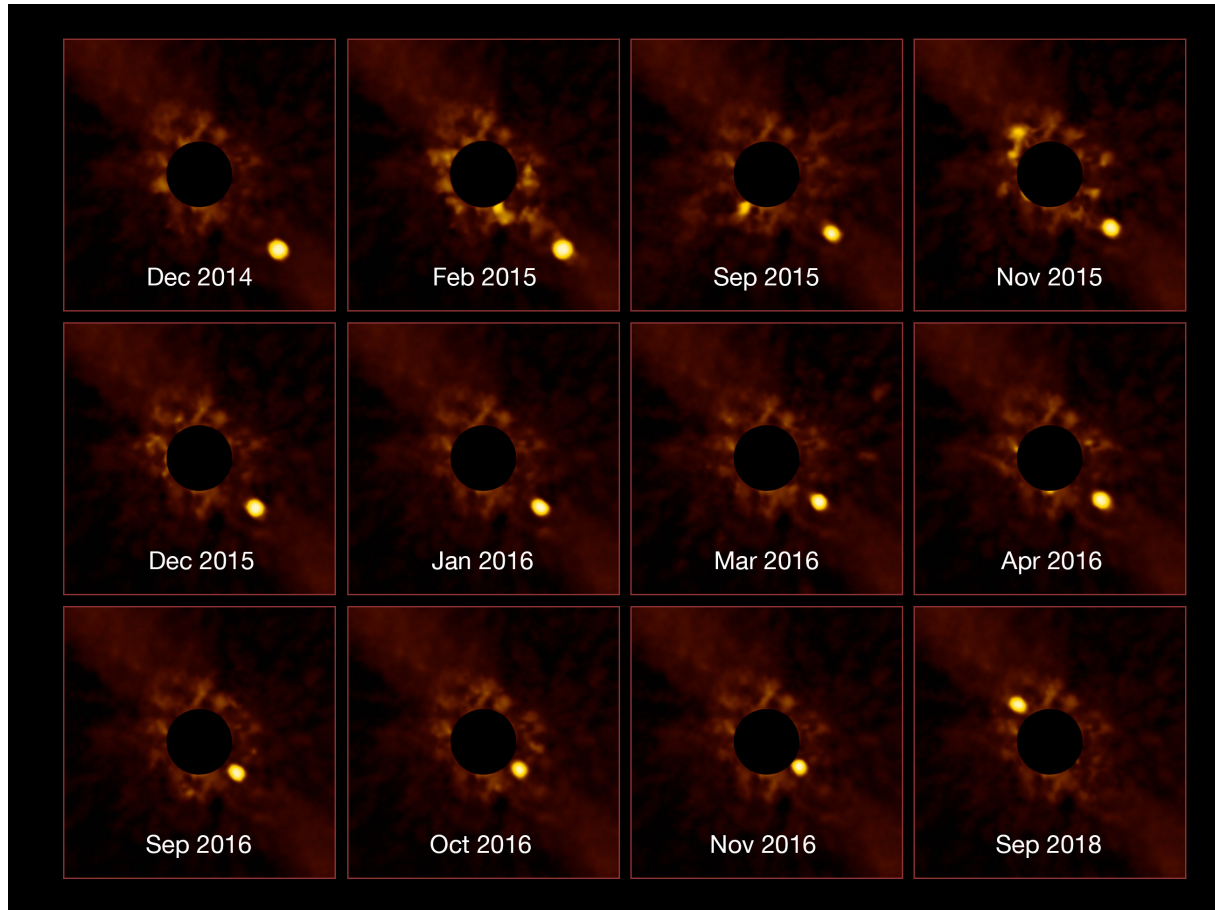
Los dos planetas están próximos a la resonancia 5:3 de movimiento medio.

Imagen directa de exoplanetas usando un coronógrafo



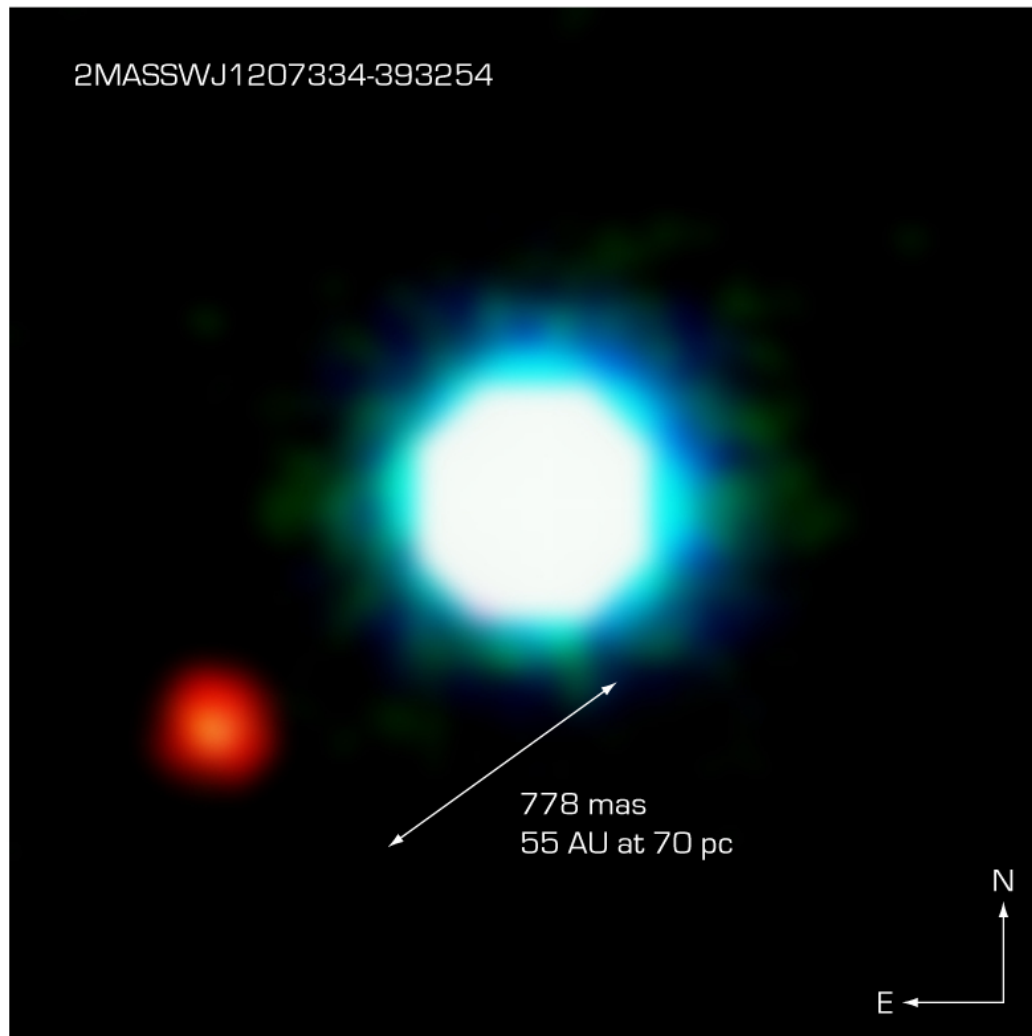
El coronógrafo permite bloquear la intensa luz de la estrella central para observar la tenue luz de objetos cercanos, como planetas o discos de materia. La estrella de la derecha, MWC480, tapada con una máscara, deja visible su disco de polvo. Observación en la banda H ($1.6 \mu\text{m}$).

Imagen directa de β Pictoris b con coronógrafo



Descubrimiento de β Pictoris b desde el Very Large Telescope de ESO en 2008. La superficie de este joven planeta es aun bastante elevada de unos 1800 K. El planeta orbita la estrella central a una distancia de 9.2 ua con un período orbital de 21 años. La estrella central β Pictoris es tipo A y tiene una antigüedad estimada de 12 millones de años.

Imagen directa de un exoplaneta orbitando una enana marrón



La imagen se obtuvo con el Very Large Telescope de ESO. El planeta es un gigante gaseoso de unas 4 masas de Júpiter con una temperatura superficial de 1600 K debida fundamentalmente a la contracción gravitacional. La enana marrón 2M1207 tiene una masa de $0.025 M_{\odot}$ y una temperatura de 2550 K. Su edad es estimada en $0.5-1.0 \times 10^7$ años.

NACO Image of the Brown Dwarf Object 2M1207 and GPC

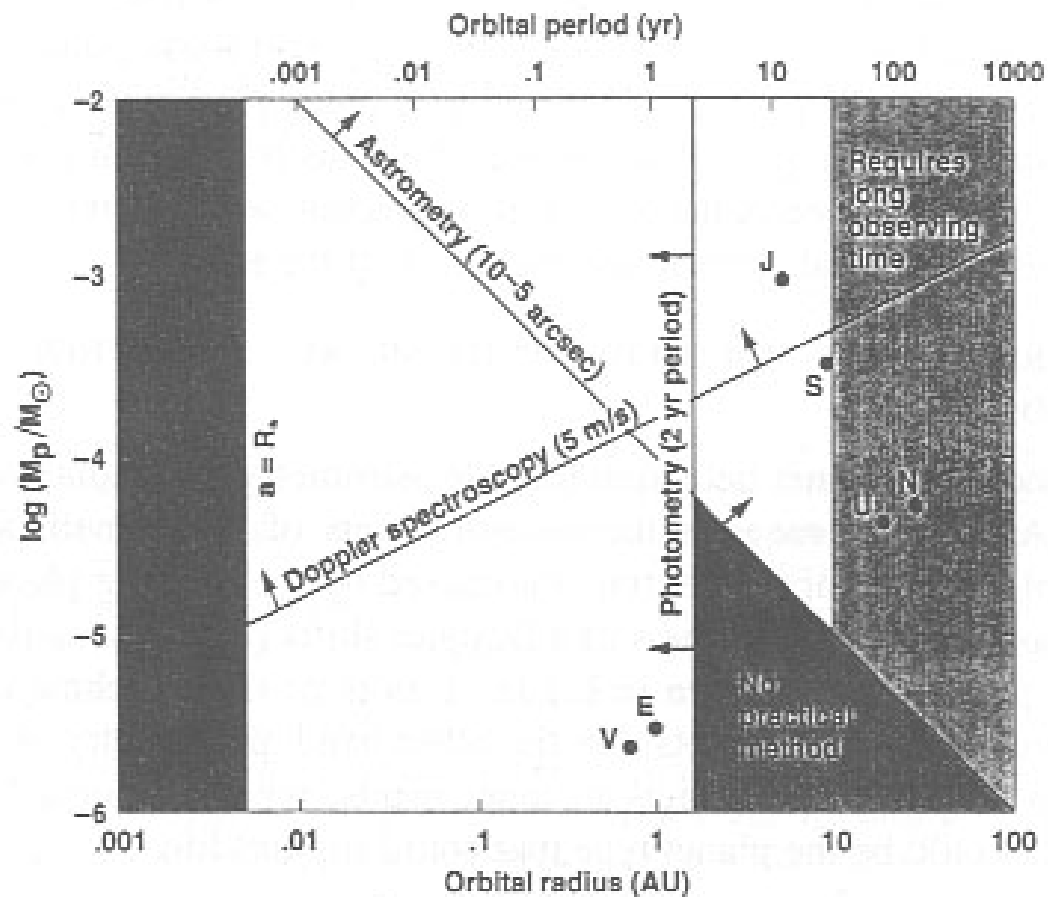
ESO PR Photo 26a/04 (10 September 2004)

© European Southern Observatory



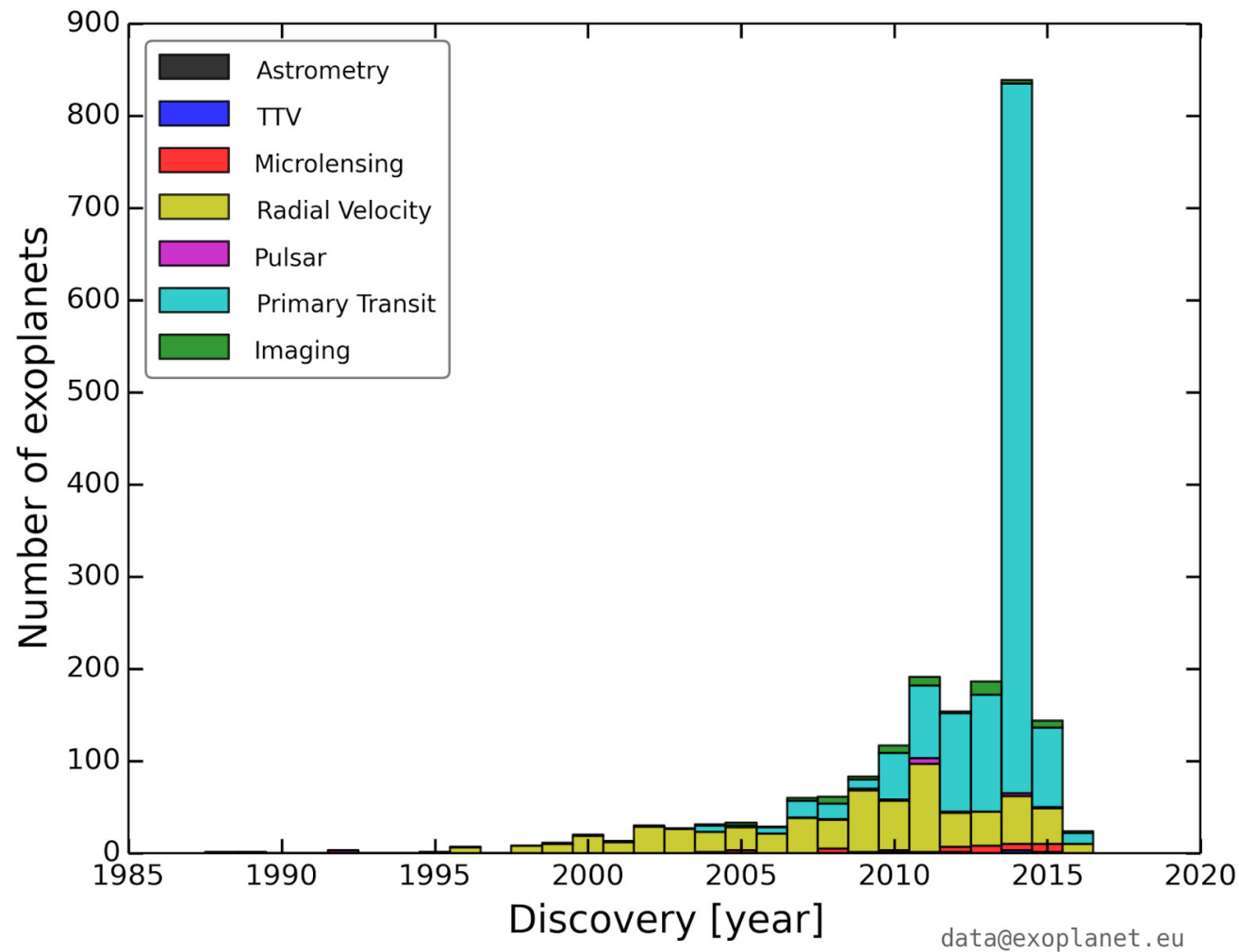
Cada método de detección favorece el descubrimiento de cierto tipo de planetas

DISCOVERY SPACE FOR ASTROMETRIC, RADIAL VELOCITY AND PHOTOMETRIC METHODS

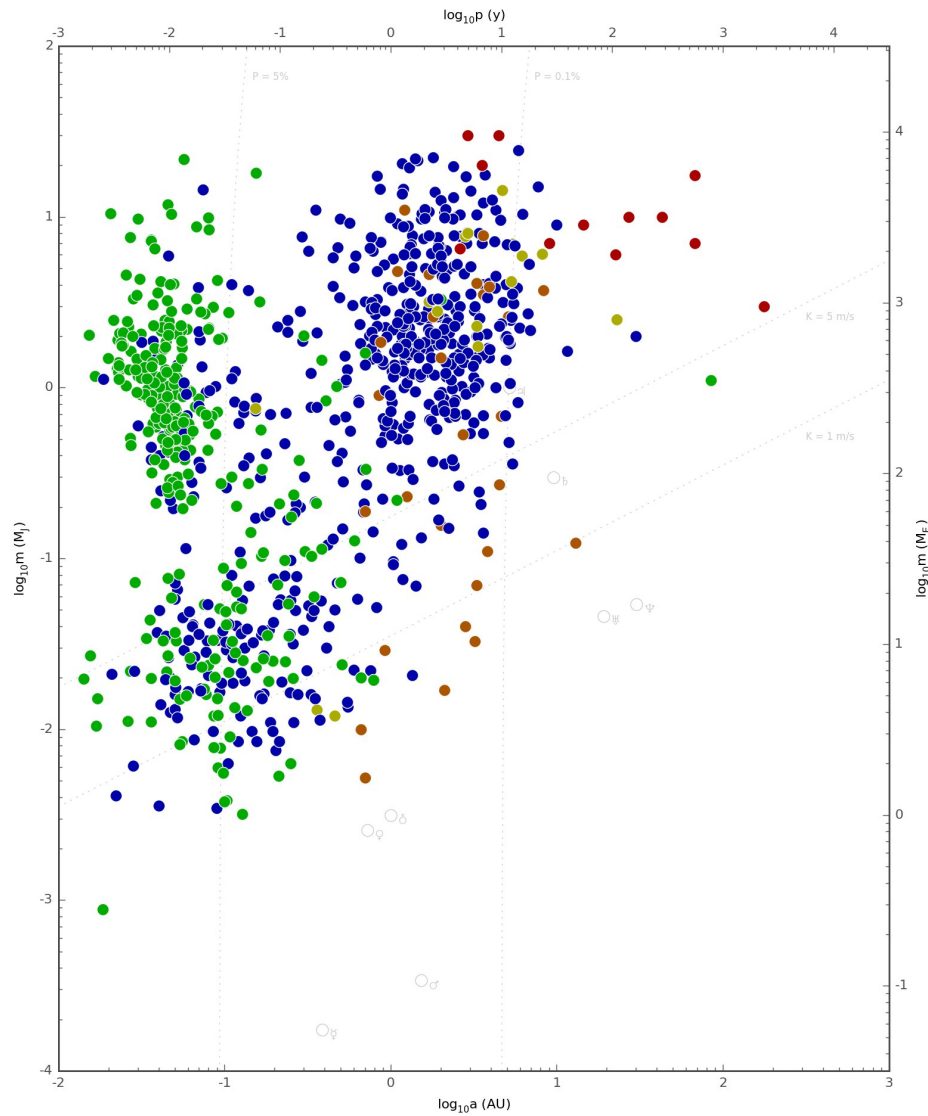


Algunas estadísticas: Tasa de descubrimientos

* Número de exoplanetas descubiertos hasta ahora (junio/2019): 4071 confirmados en 3043 sistemas planetarios, incluyendo 659 sistemas múltiples.

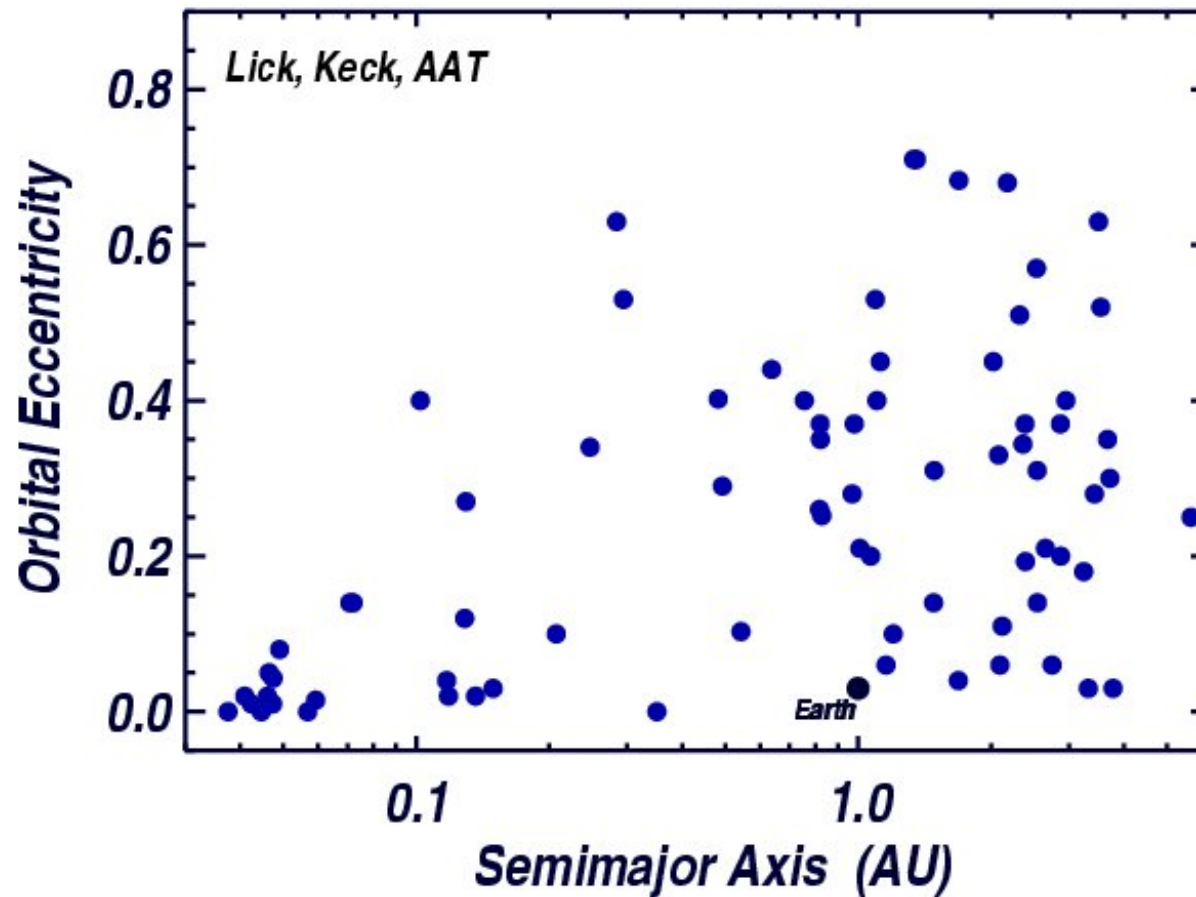


Masas y períodos



verde: método de tránsito
azul: método espectroscópico
marrón: microlenticado

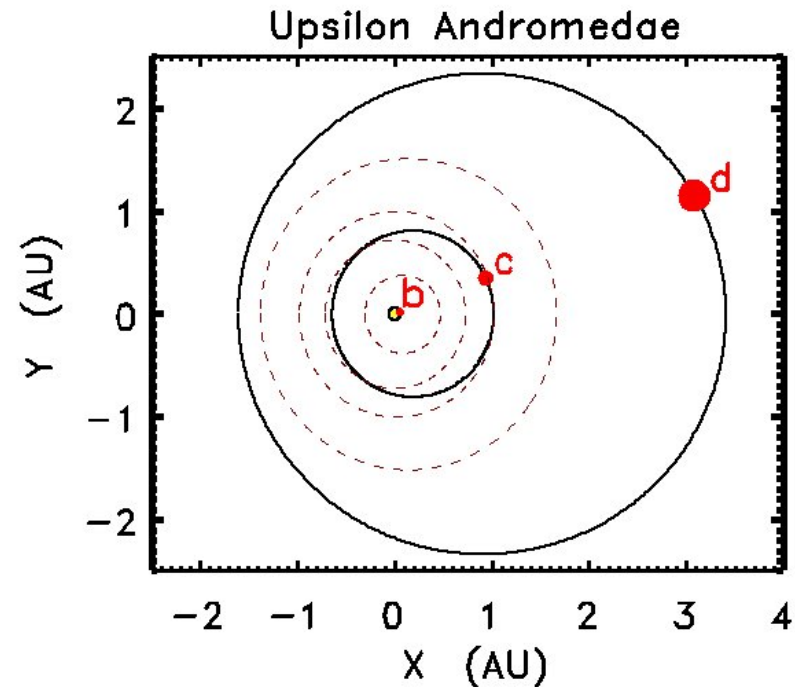
Excentricidades versus semiejes mayores de las órbitas



Los planetas con períodos $\lesssim 20$ días tienen órbitas casi circulares: esto es probablemente debido al efecto de mareas entre el exoplaneta y la estrella central.

Sistemas exoplanetarios

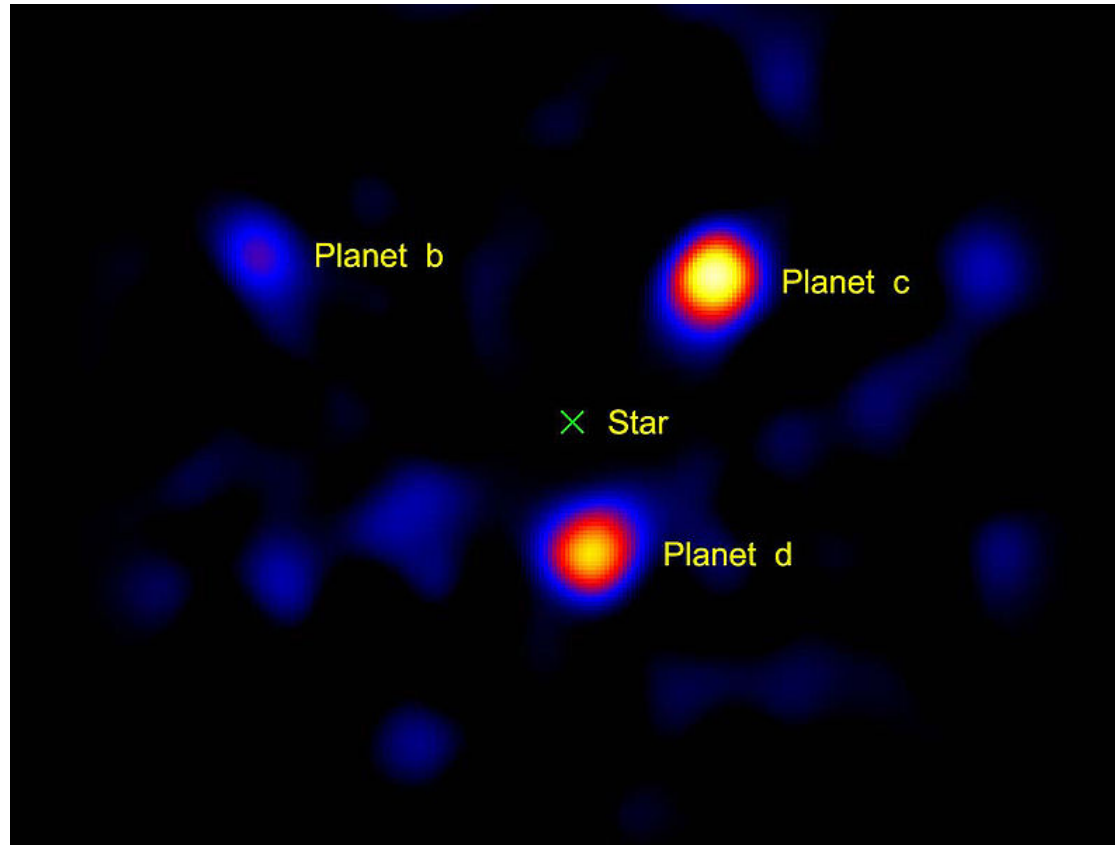
* Muestran una gran diversidad de masas y de órbitas, en general bien diferentes de nuestro sistema solar



El sistema triple de ν Andrómeda.

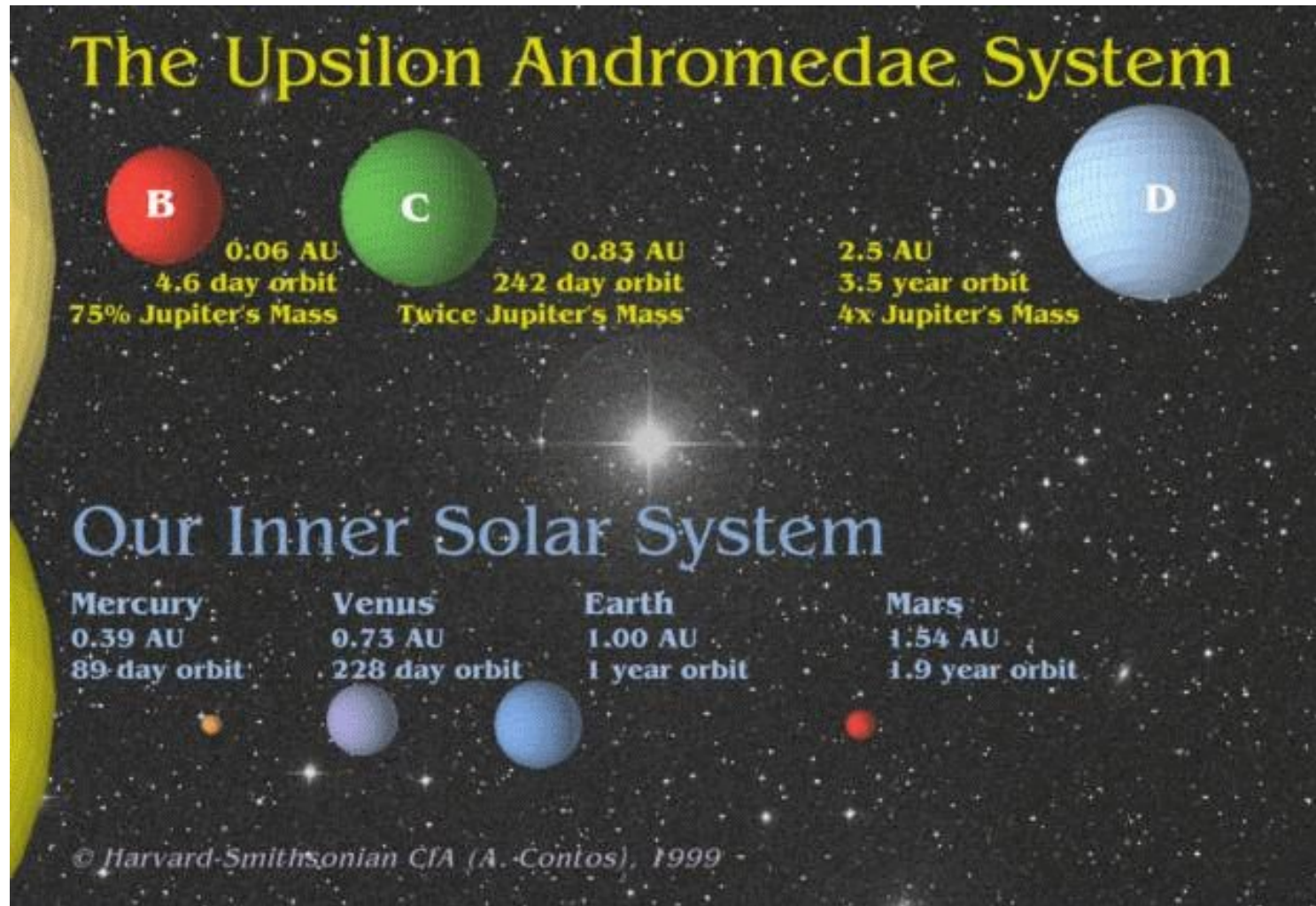
- * Muchos de los planetas se encuentran en resonancias de movimiento medio.
- * Las órbitas muy excéntricas sugieren encuentros próximos entre planetas masivos.

El sistema de exoplanetas HR 8799



Esta es una estrella más masiva que el Sol (tipo espectral F0 V) que muestra 3 planetas gigantes de masas aproximadas 10, 10 y 7 veces la de Júpiter que se extienden hasta una distancia aproximada de ~ 70 ua. Aparte de estos 3 planetas, se ha descubierto un 4to. planeta interior a una distancia unas 14,5 ua de la estrella central. Las observaciones con el coronógrafo fueron hechas en el IR.

Algunas características de los exoplanetas

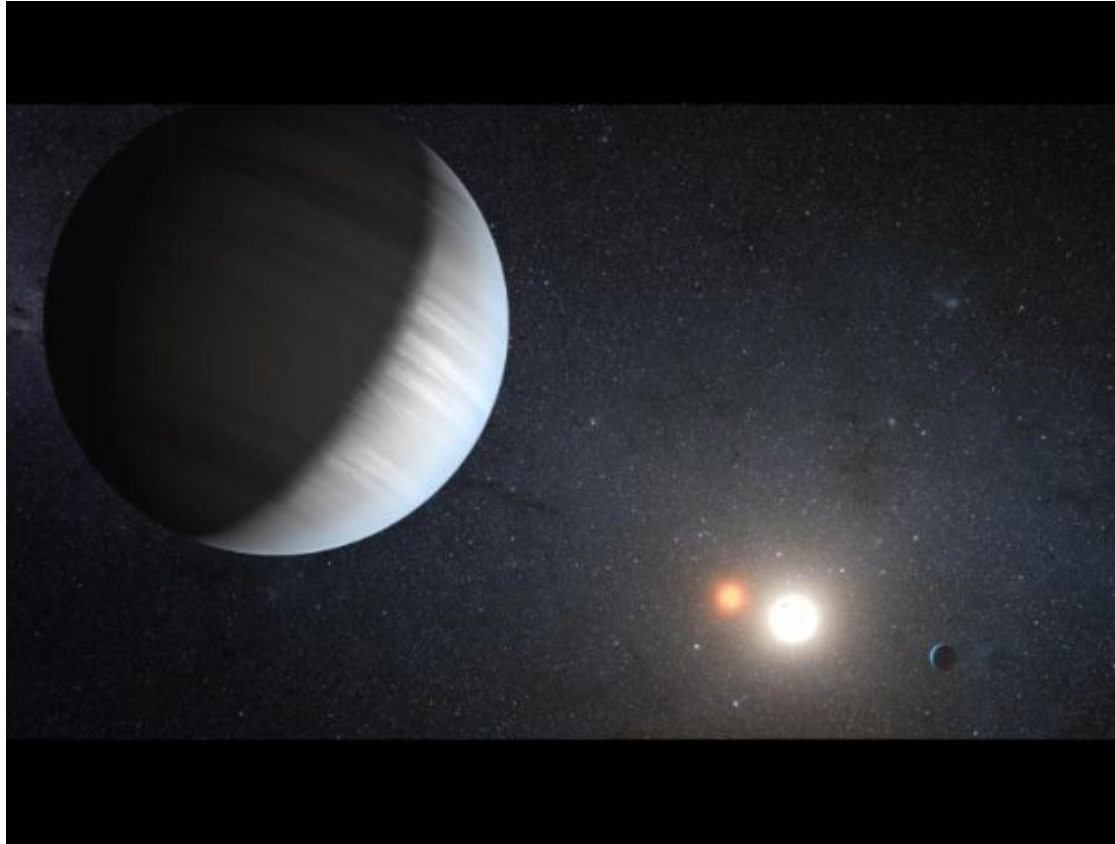


El sistema triple de υ Andrómeda: comparación con nuestro sistema solar.



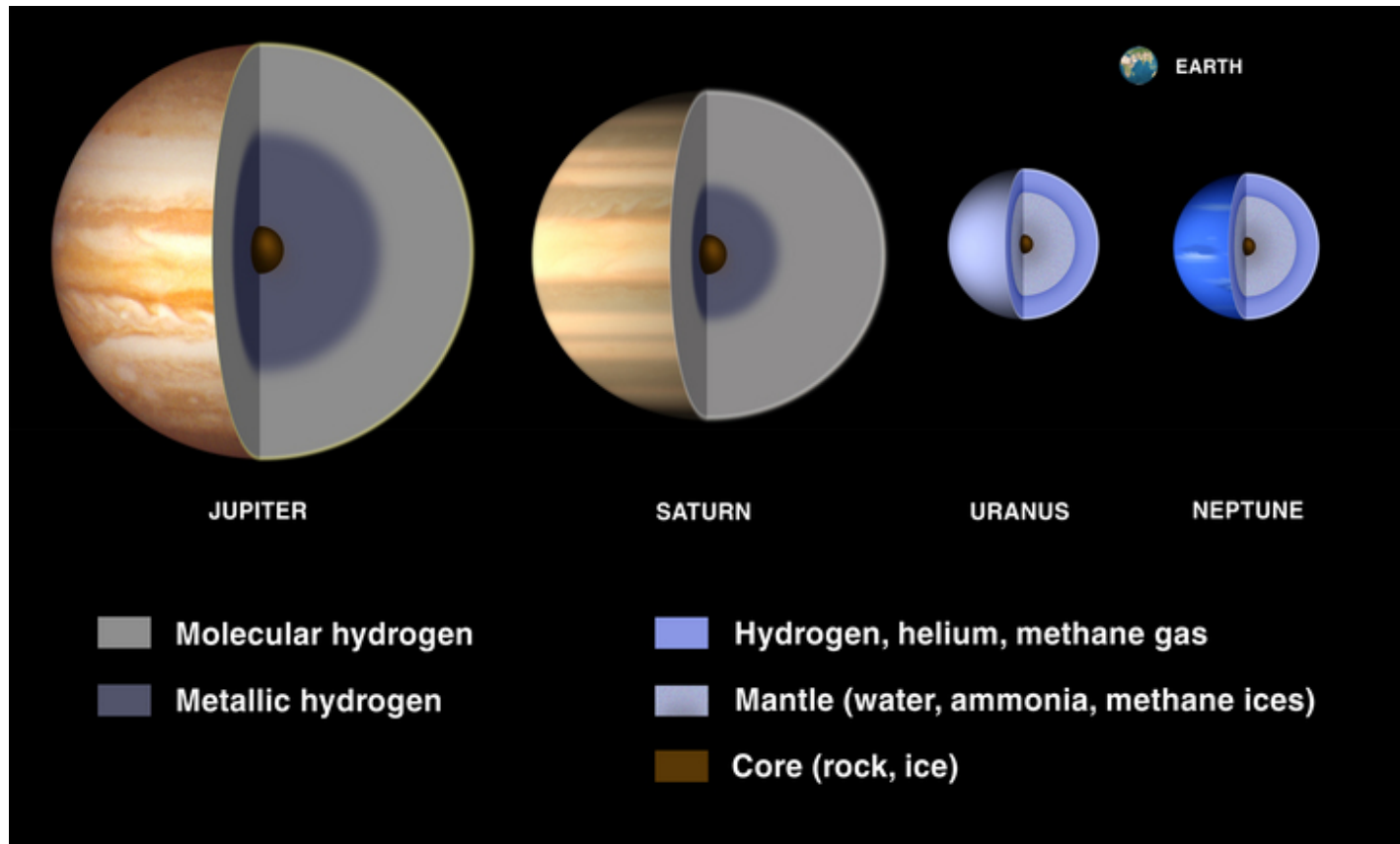
Algunos exoplanetas gigantes giran tan cerca del Sol que sus atmósfera están infladas por las altas temperaturas, e incluso en proceso de disipación de gas. Estos exoplanetas se denominan *Jupiteres calientes* (o *hot Jupiters*) y sus propiedades han sido analizadas a través de tránsitos.

Planetas orbitando alrededor de una estrella doble



Algunas estrellas binarias podrían poseer planetas mucho más distantes que "ven" a las estrellas como una sola masa en el centro de gravedad común. Este es el caso de los 2 exoplanetas: Kepler- 47b y 47c, descubiertos por el método de tránsito, que orbitan una binaria en la cual una de las estrellas es similar al Sol y la otra es aproximadamente 1/3 de su tamaño. Kepler-47b tiene un diámetro ~ 3 el de la Tierra y tiene un período de 49 días, mientras que el más lejano es del tamaño de Urano y un período de 303 días.

Formación y evolución de los planetas gigantes gaseosos



* Hay 2 teorías:

- 1) Primero se forma un núcleo sólido que, una vez que adquiere suficiente masa, acreta una extensa envoltura gaseosa (similar a los planetas jovianos).
- 2) Inestabilidad gravitacional de una porción del disco protoplanetario que colapsa en un objeto masivo. Formación de tipo “estelar” (p. ej. Boss 1997).

spectral types



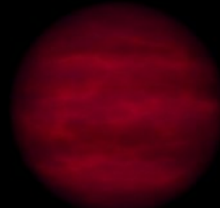
M dwarfs (3500-2100 K)

magnetically active, only the youngest brown dwarfs are classified M-type



L dwarfs (2100-1300 K)

molecule-rich atmospheres contain clouds of “hot dirt” and other condensates



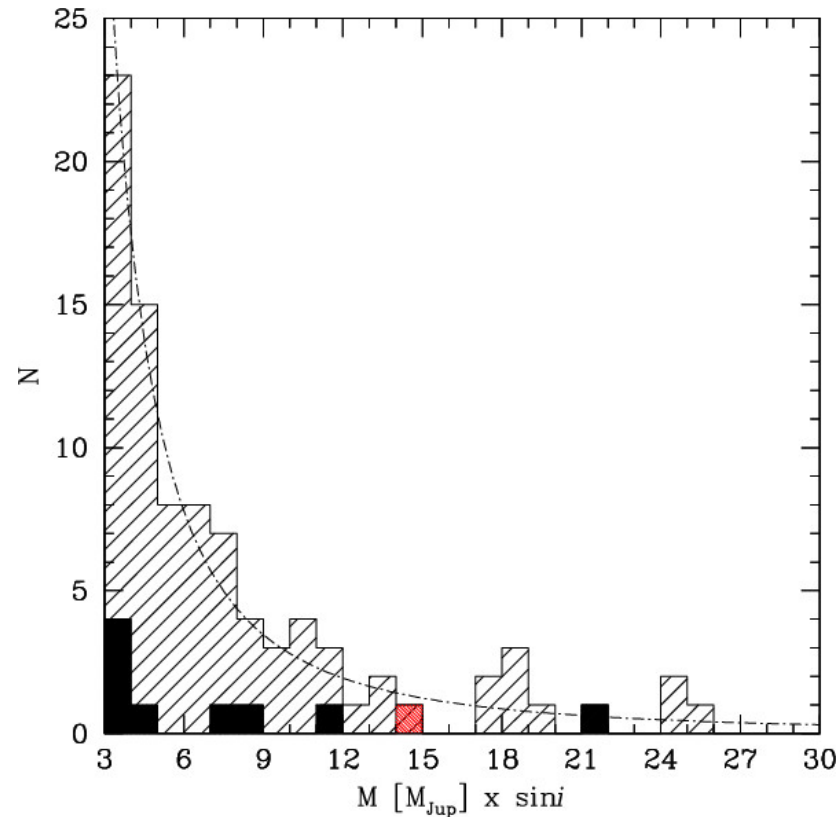
T dwarfs (1300-600? K)

coldest known brown dwarfs, atmospheres contain CH_4 and NH_3 gases

© 2009 Adam J. Burgasser

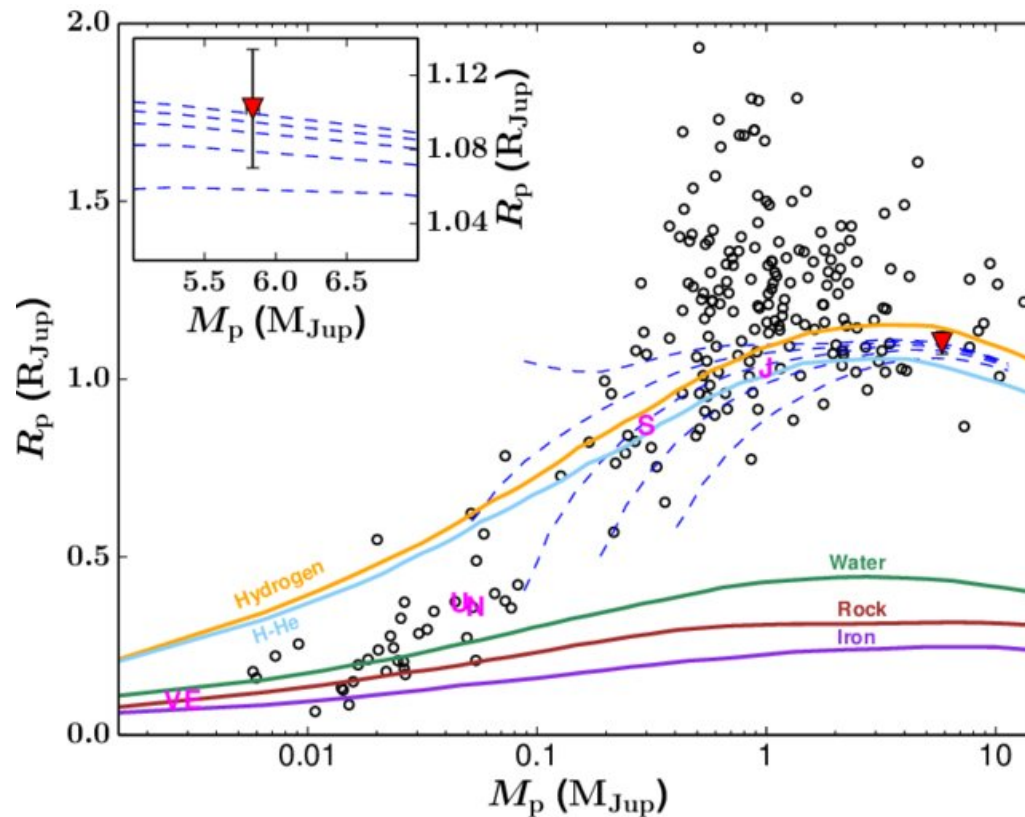
Las estrellas y las enanas marrones tenderían a formarse en forma independiente en nubes de gas y polvo. Los planetas se formarían en discos protoplanetarios.

Masas de exoplanetas: Límite entre planetas y enanas marrones



Entre los más masivos exoplanetas y las enanas marrones más pequeñas parece existir una brecha: ¿será debida a distintos modos de formación?. En rojo aparece el exoplaneta más masivo reportado, con una masa de $14,3 M_J$, que se mueve en una órbita casi circular en torno a una estrella G5V. Su órbita casi circular sugiere una formación en un disco protoplanetario como los planetas (descubrimiento con el espectrógrafo SOPHIE, Bouchy y col. (2009)).

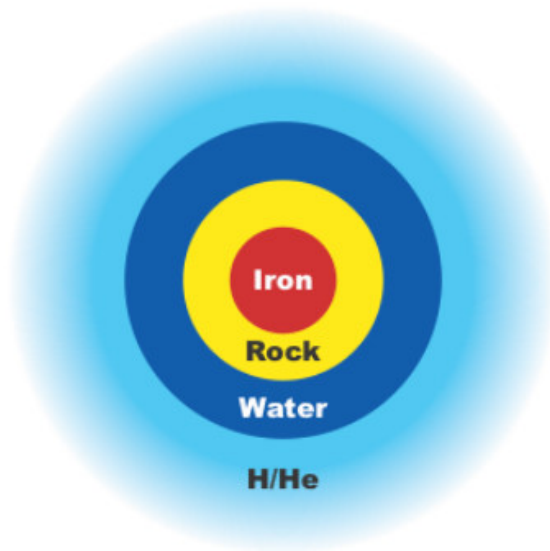
Composición de exoplanetas



Radio vs. masa para los exoplanetas descubiertos por el método de tránsito (círculos negros). El planeta Kepler-432 b está marcado con un triángulo rojo y hay un zoom del mismo en el margen superior izquierdo. Este planeta está en un "desierto" entre 4.5 y 7 masas de Júpiter. Las curvas representan modelos para planetas de diferentes composiciones desarrollados por Seager et al. (2007). Los planetas del sistema solar están indicados con letras en lila.

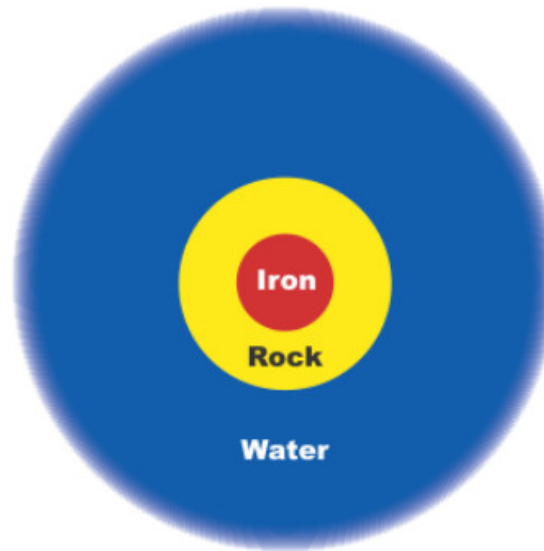
Possible Compositions for super-Earth Planets

Mini-Neptune



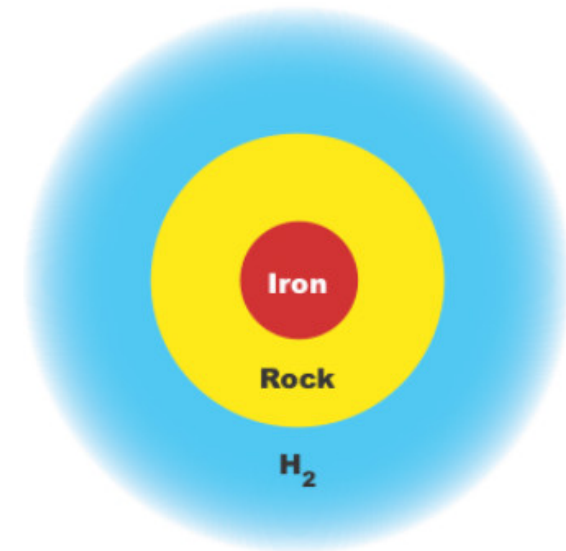
H/He mass fraction
= 10^{-4} to 6.8%

Water World



H₂O mass fraction
≥ 47%

Super-Earth

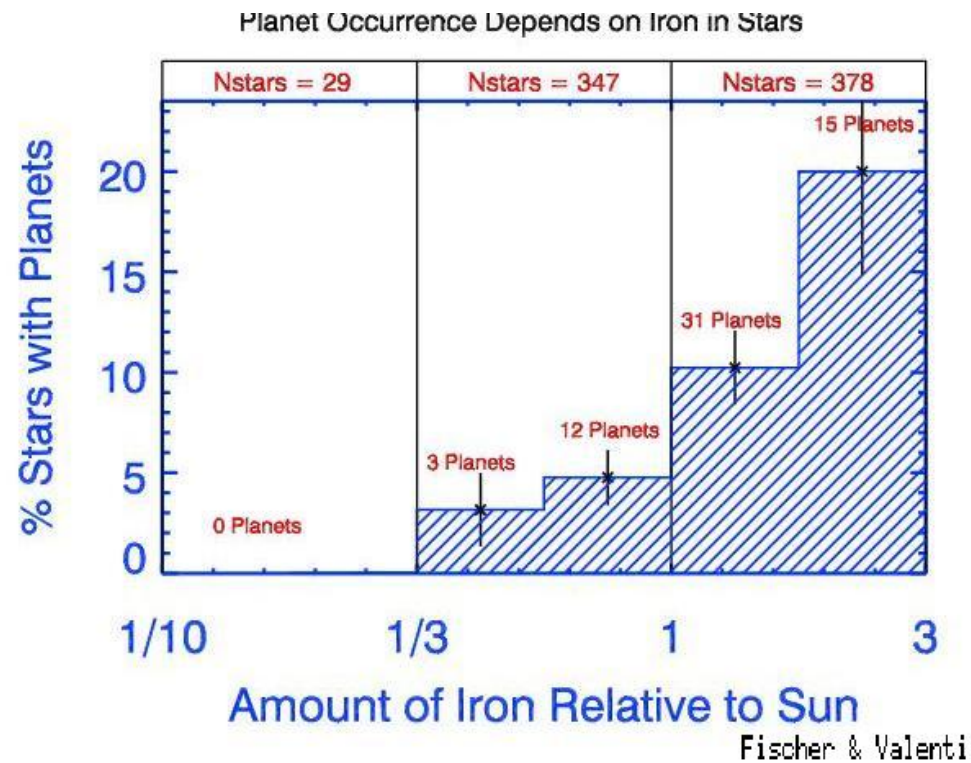


H₂ mass fraction
= 5×10^{-4} to 3%

All Planets Above Have $M = 6.4 M_E$ and $R = 2.9 R_E$

Different admixtures of H/He, water, rock, iron

Una clave para entender qué estrellas se forman con planetas a su alrededor: la anomalía del hierro



(Fisher, Valenti & Marcy 2004)

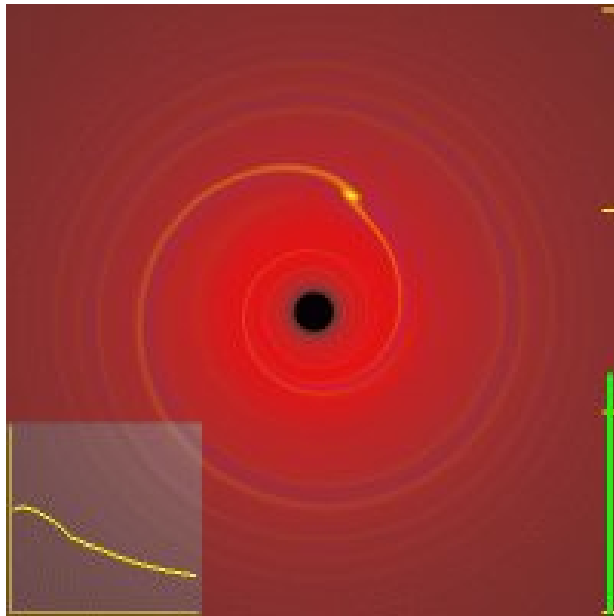
CONCLUSION:

* Las estrellas que poseen planetas tienden a ser ricas en metales.

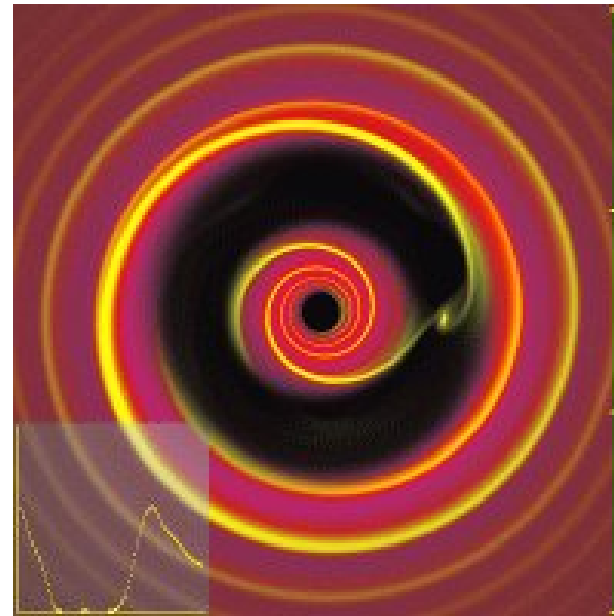
RAZONES:

- 1) Material rico en metales es necesario para formar planetas.
- 2) Contaminación de la estrella central con planetas que colisionan.

¿Porqué se observan planetas masivos cerca de la estrella central: La teoría de la migración planetaria revisitada



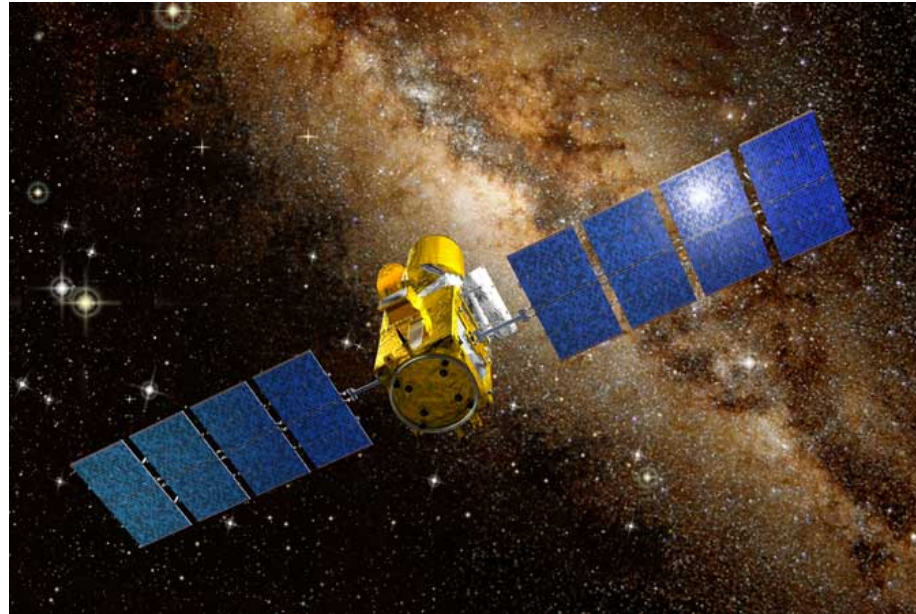
Migración Tipo I :
La interacción planeta-disco es relativamente débil. El planeta excita una onda de densidad por detrás de su movimiento.



Migración Tipo II
En el caso de un planeta más masivo, el intercambio de momento angular repele el gas de las cercanías del planeta, lo que abre una brecha.

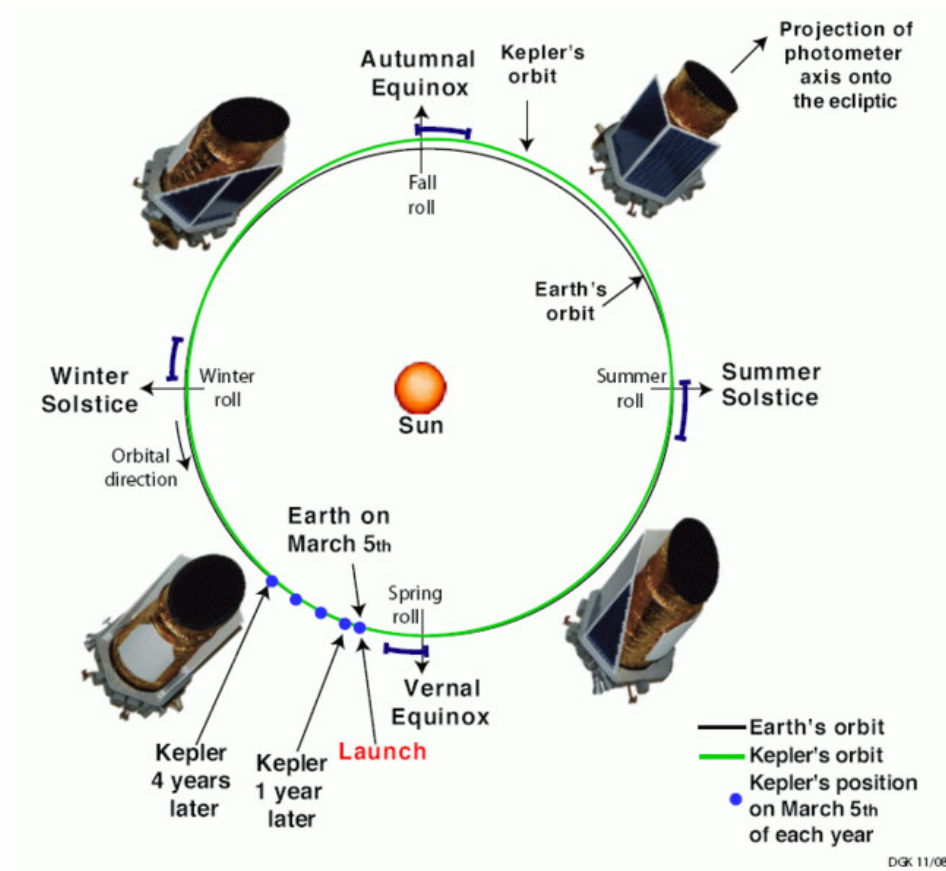
La nueva frontera: Detección de planetas extrasolares desde el espacio

* **Misiones concluidas:** COROT (COncvection ROtation et Transits planétaires) : Misión espacial francesa lanzada en diciembre/2006.



- * Instrumental : telescopio de 27 cm de diámetro.
- * Método de descubrimiento : tránsito.
- * Resultados : 33 exoplanetas confirmados.

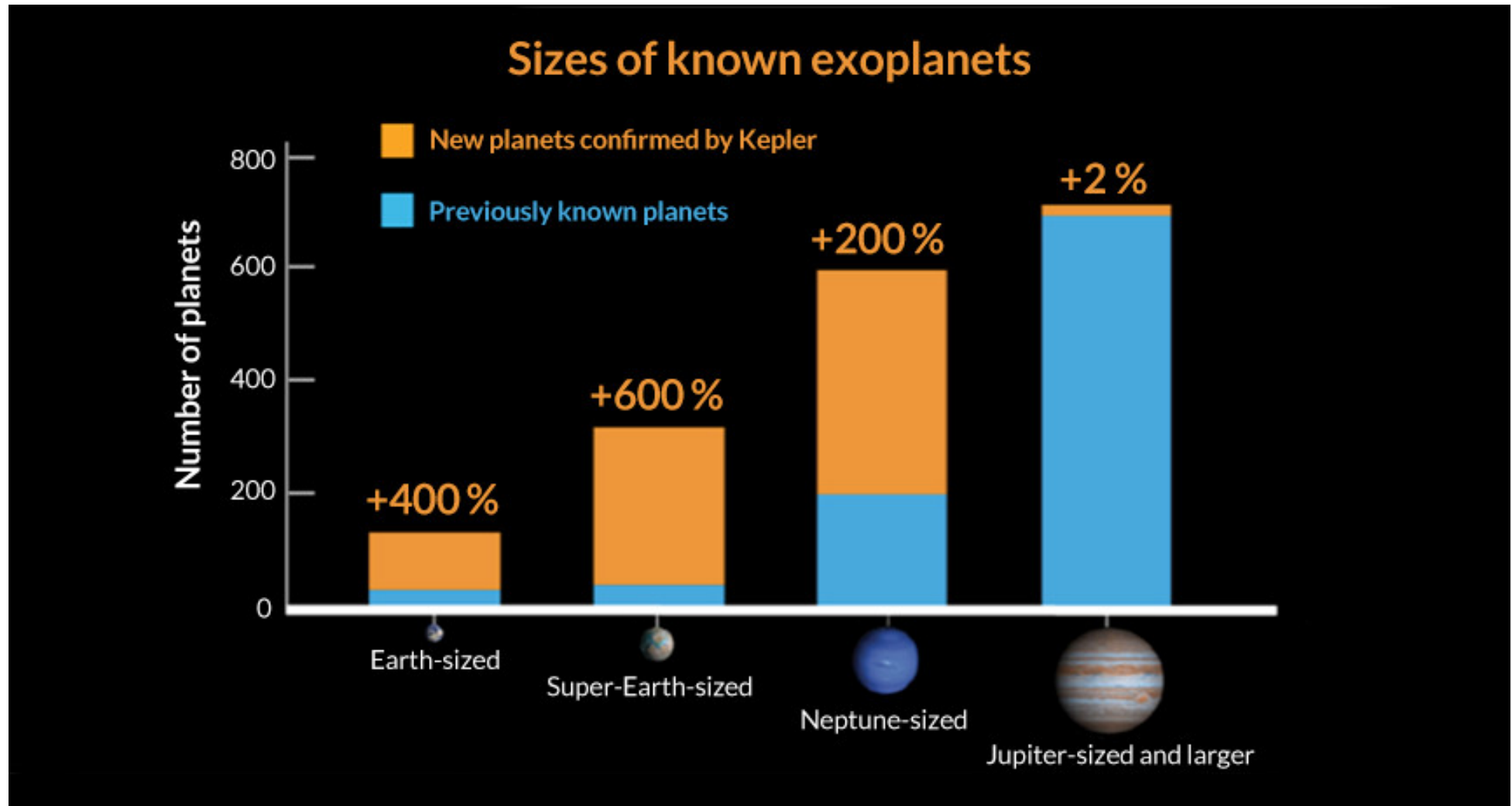
La misión KEPLER



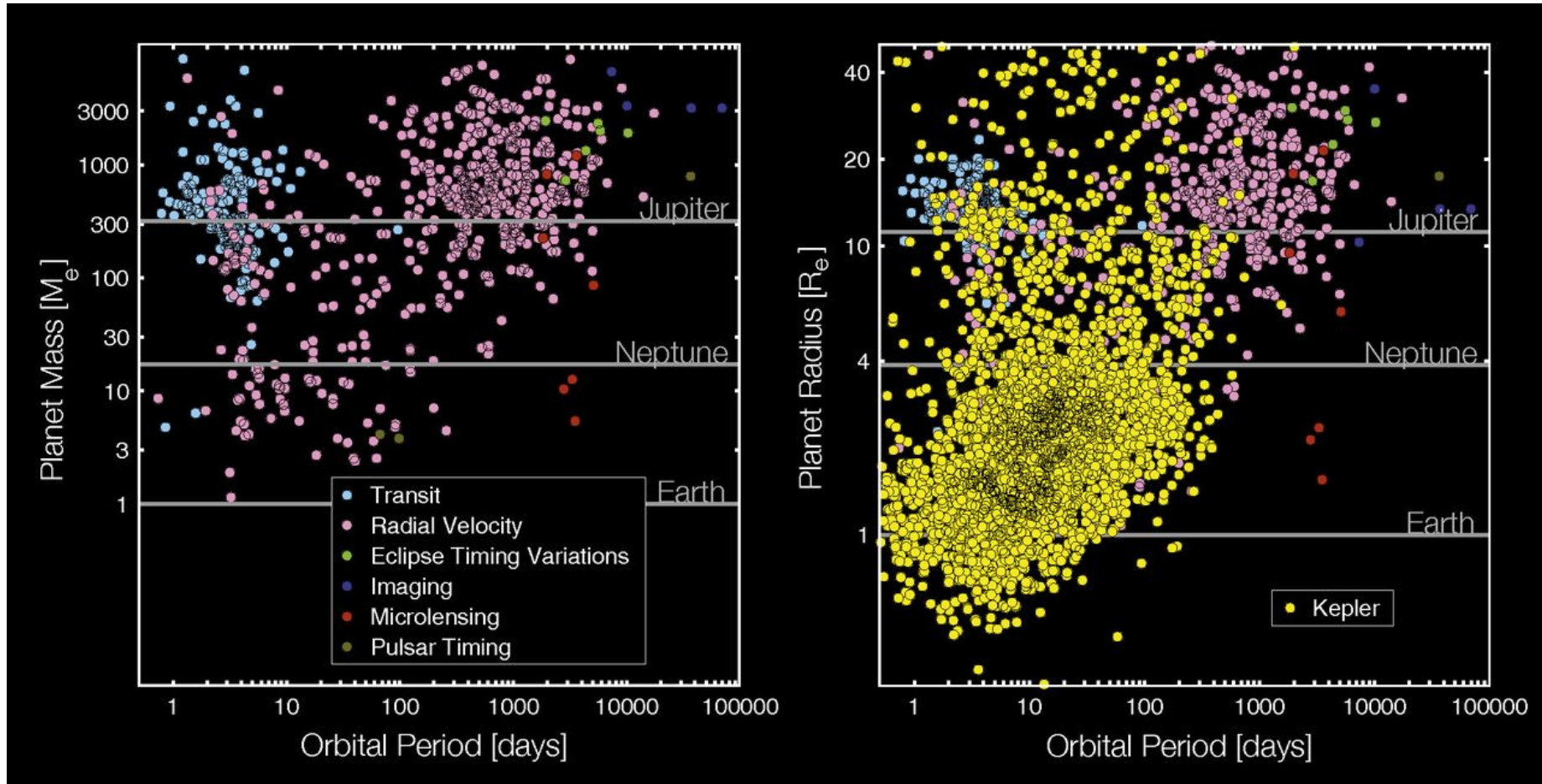
Kepler es una misión de la NASA lanzada en marzo/2009. Se mueve en una órbita heliocéntrica con un período de 372,5 días lo que hace que paulatinamente se vaya alejando de la Tierra. Contiene un telescopio con una apertura de 0,95 cm con un fotómetro que monitorea continuamente 145000 estrellas de la Secuencia Principal en una dirección fija del cielo.

- * Método de descubrimiento : tránsito.
- * Objetivo : monitoreo del brillo de 145 000 estrellas de la Secuencia Principal.

Inventario de exoplanetas descubiertos por Kepler



Nuevas tendencias a partir de los descubrimientos de Kepler

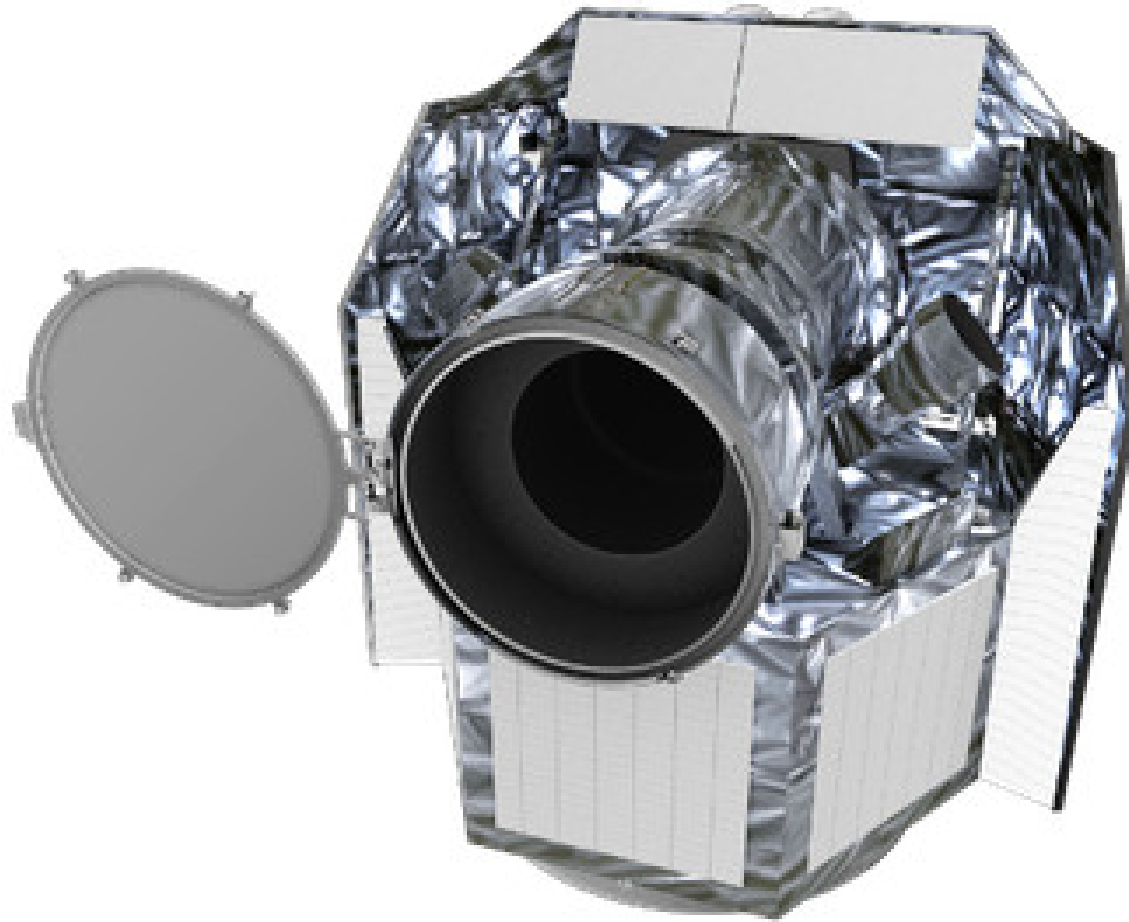


Descubrimientos de exoplanetas previos a Kepler coloreados de acuerdo a la técnica usada (izquierda). Los más de 3500 descubrimientos por Kepler (amarillo) se agregan por comparación en el panel de la derecha. Se usa una relación masa-luminosidad simplificada para pasar del radio a la masa planetaria.

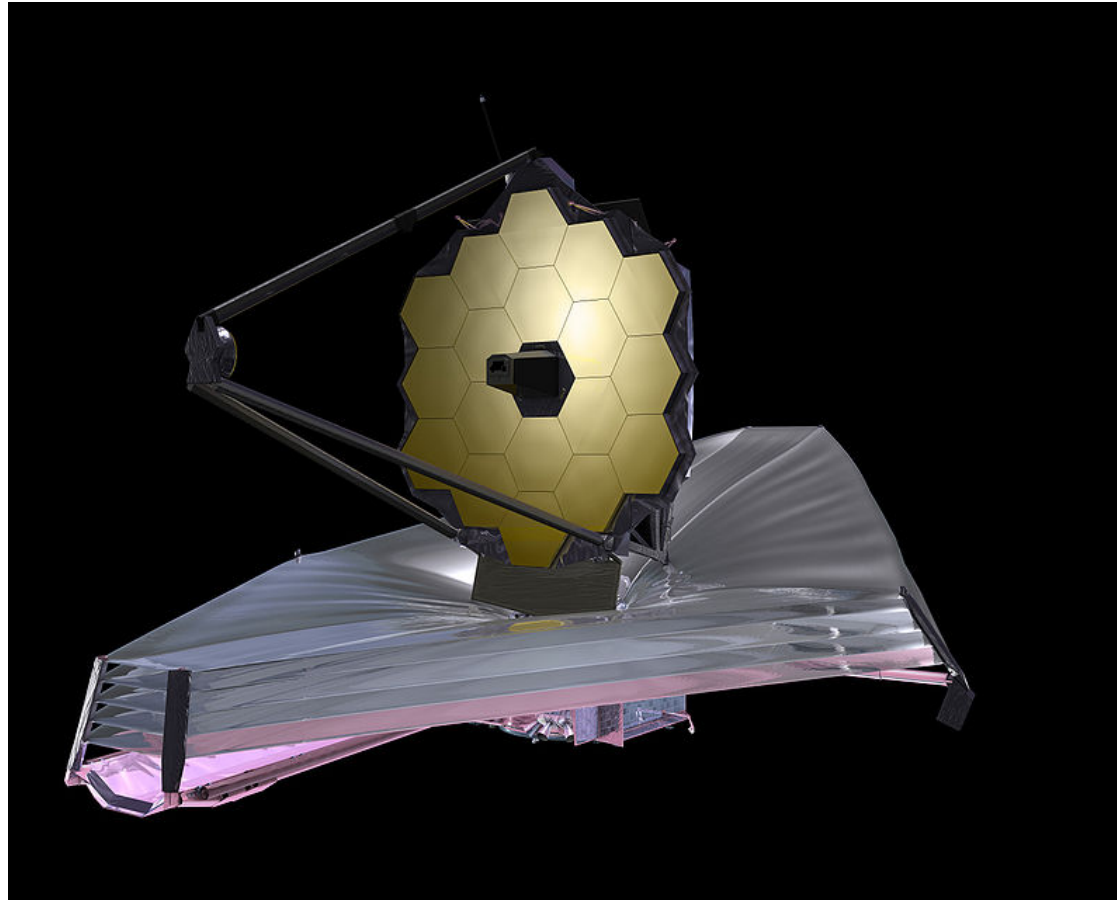
El futuro



TESS (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*): Búsqueda de exoplanetas utilizando el método de tránsito en un área 400 veces más grande que la explorada por la misión Kepler. Se espera que durante los 2 años de operación primaria (2018-2020) descubra unos 20000 exoplanetas alrededor de estrellas tipo G, K y M. El satélite está en una órbita excéntrica alrededor de la Tierra.



CHEOPS (*CHaracterising ExOPlanets Satellite*): Es una misión europea que llevará un telescopio de 32 cm con el objetivo de estudiar exoplanetas ya descubiertos y con masas bien determinadas por el método espectroscópico para determinar sus diámetros con alta precisión por el método de tránsito. Con la masa y el diámetro se podrán conocer con precisión las densidades de esos exoplanetas. Lanzamiento previsto para noviembre/2019.



James Webb Space Telescope (JWST): Es un telescopio espacial planeado como el sucesor del Telescopio Espacial Hubble. Entre sus finalidades está la observación de zonas de formación planetaria y la imagen directa de planetas. El rango de longitudes de onda a observar va desde 0.6μ hasta 28μ . Lanzamiento previsto para marzo/2021 para ser colocado en el punto Lagrangeano L2. Misión de NASA, ESA y la Agencia Espacial Canadiense.

El descubrimiento de atmósferas planetarias ... y vida

