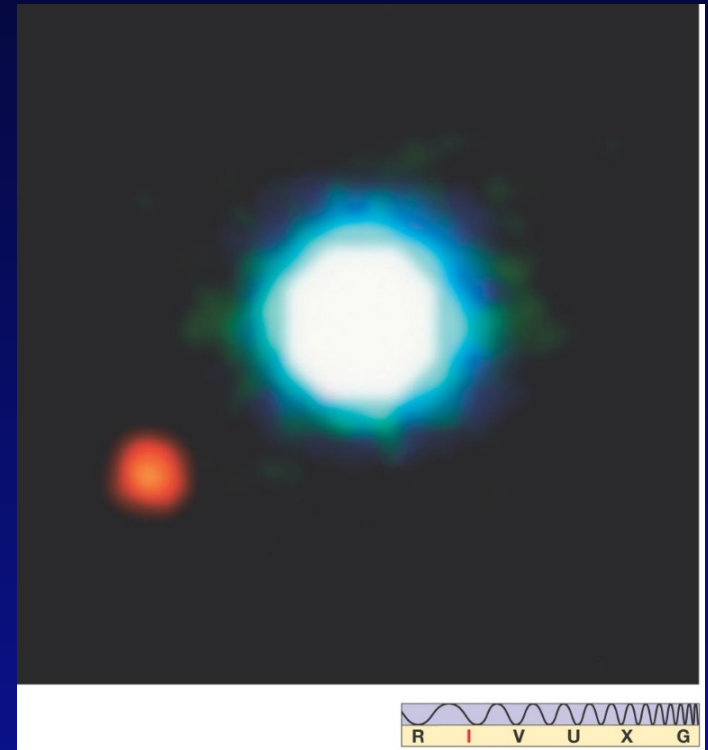


(Adaptado do curso AGA0215 da **Profa. Thais Idiart**)

A PROCURA DE PLANETAS EXTRASOLARES

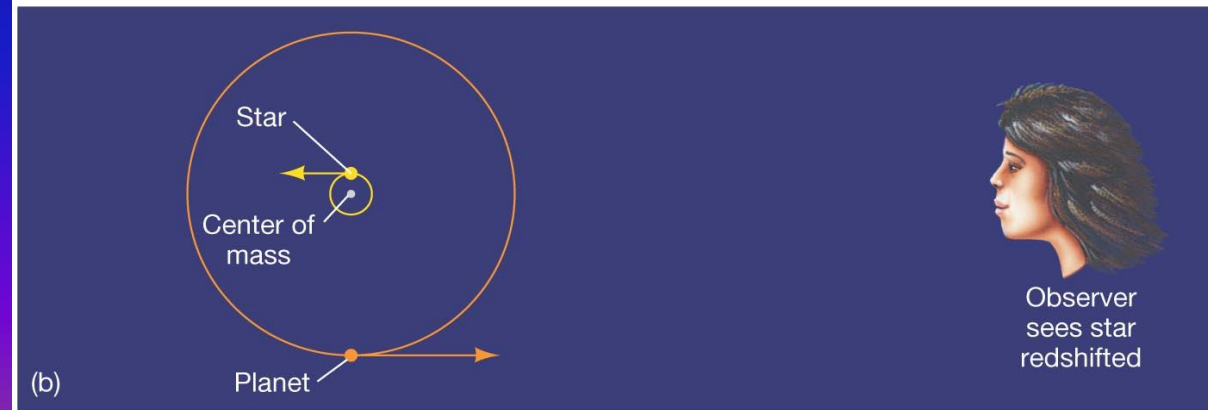
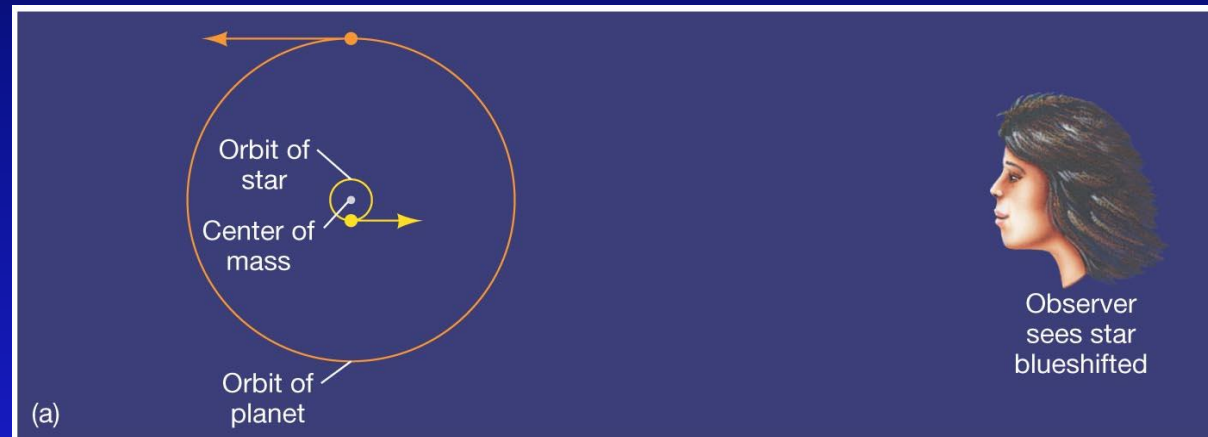
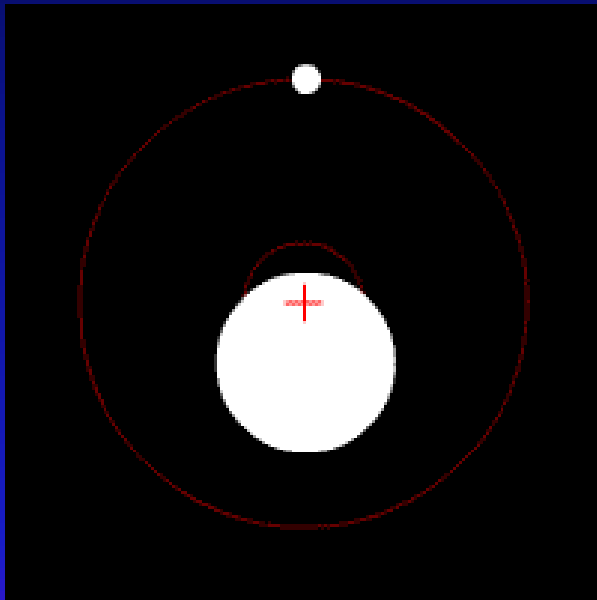
- Possibilidade de vida – astrobiologia
- Teste das teorias de formação do sistema solar
- Planetas extra-solares são muito fracos em brilho e geralmente estão muito próximos às suas estrelas \Rightarrow difícil a observação direta.
- **Algumas poucas dezenas de planetas foram detectados por imageamento direto.**

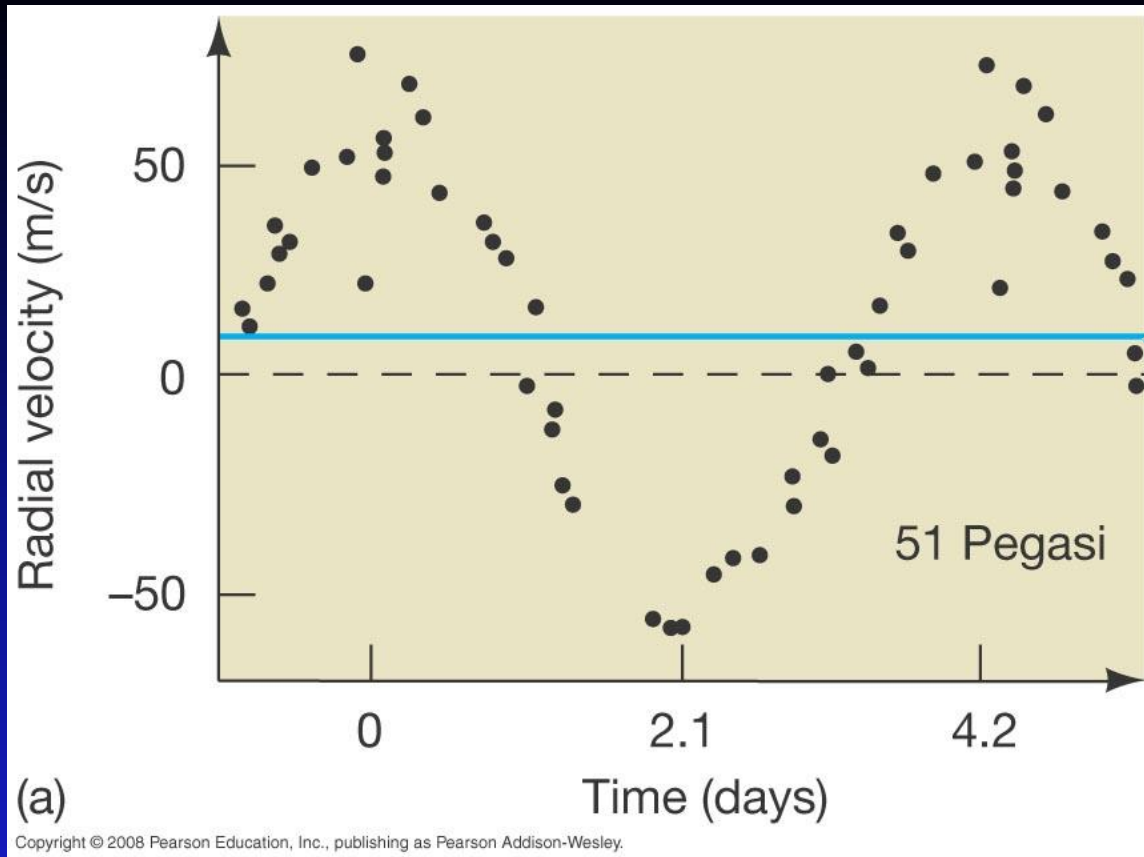
Na figura: planeta tipo Júpiter ($5M_J$) orbitando a 55 UA uma anã marron, fraca o suficiente para se observar o planeta.



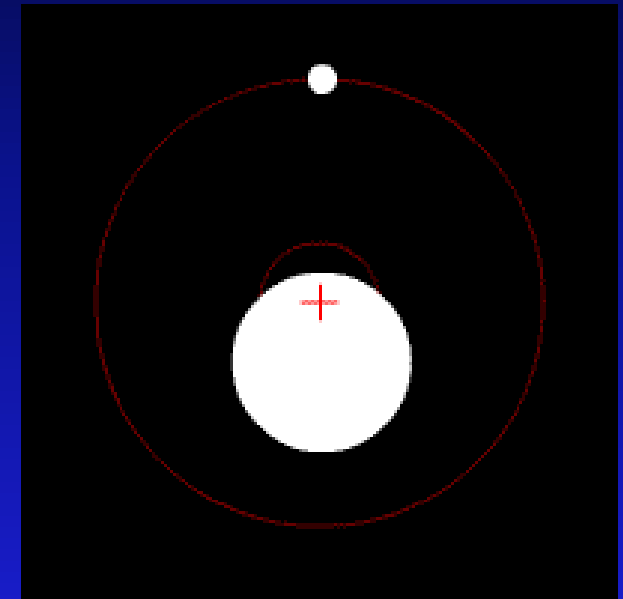
Medidas indiretas: análise da luz da estrela

VARIAÇÕES NA VELOCIDADE RADIAL DE ESTRELAS





Linha azul:
 flutuação na v_{rad} do
 Sol devido à
 presença de Júpiter
 $V_{\text{rad}} = \pm 12 \text{ m/s}$



(a) Variação na velocidade radial da estrela 51 Pegasi
 (estrela gêmea do Sol). $v_{\text{rad}} = 50 \text{ m/s}$. Período orbital \sim
 4,2 dias (1994) \Rightarrow limite inferior de M_p .

CÁLCULO

Se M_* é conhecida

Usando LEI DE KEPLER

$$(M_* + m) = \frac{a^3}{P^2}$$

Estimativa de a

Usando LEIS DE NEWTON

$$\frac{mV^2}{a} = \frac{GmM}{a^2} \Rightarrow M_* = \frac{aV_{PL}^2}{G}$$

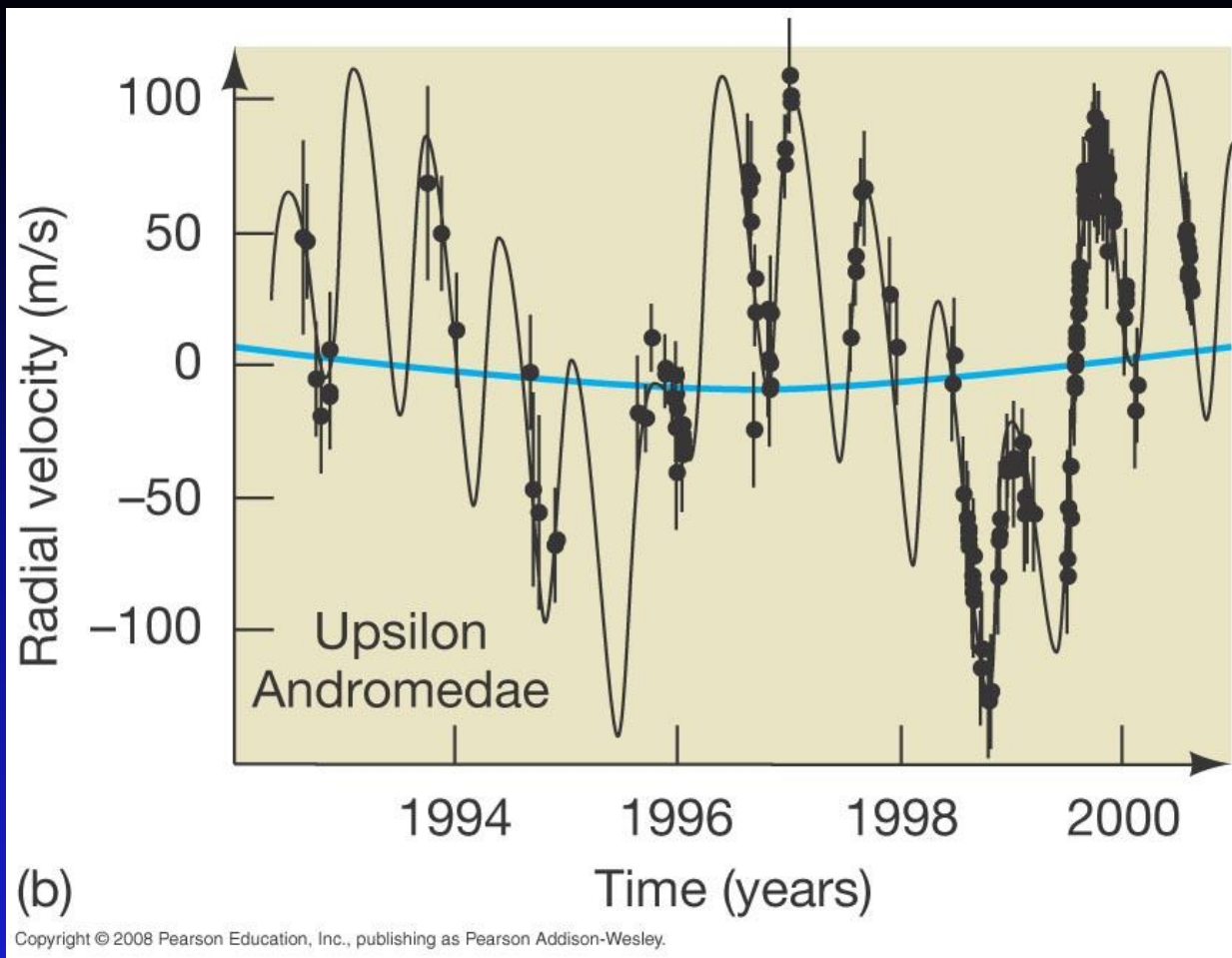
Estimativa de V_{PL}
orbital do planeta

Estimativa da massa do planeta:

CONSERVAÇÃO DO MOMENTUM LINEAR

$$p_* = p_{planeta} \rightarrow M_* V_* = m_{pl} V_{PL}$$

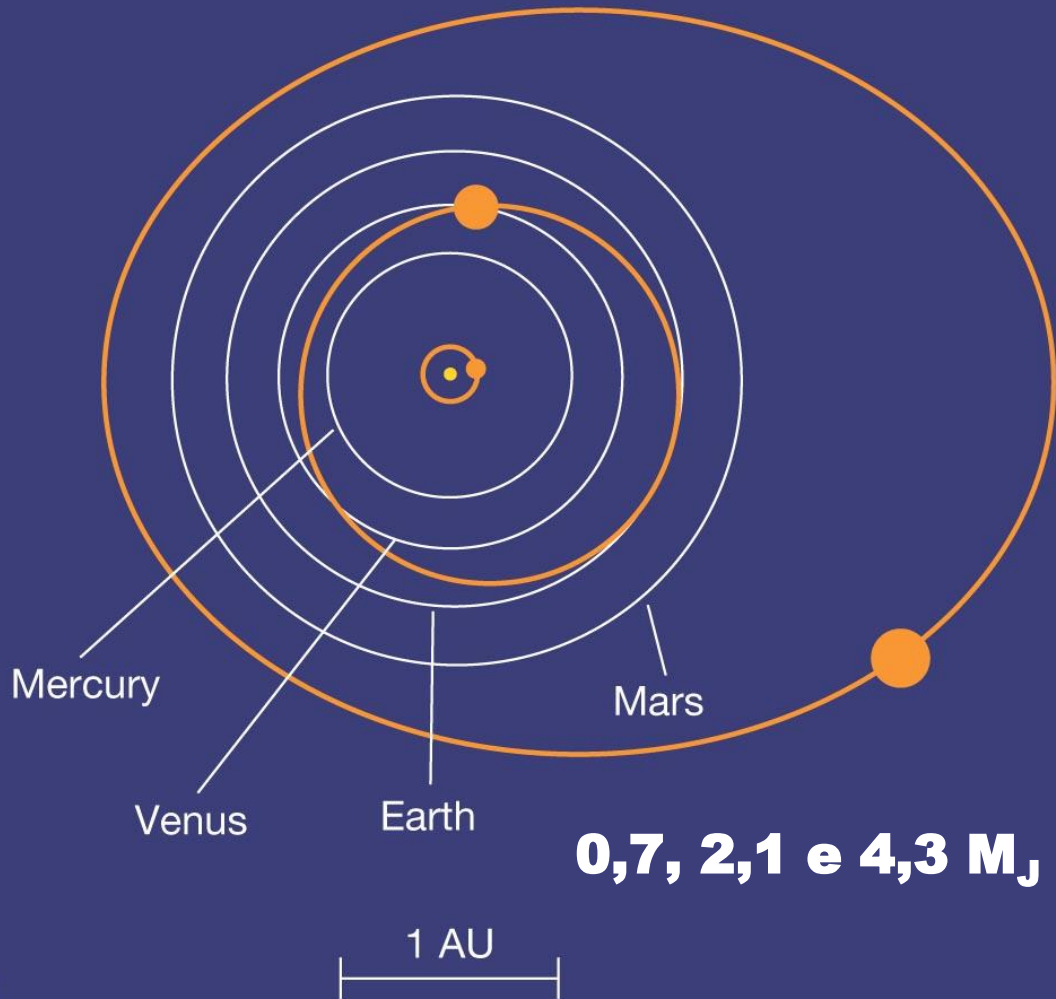
LIMITE INFERIOR DE MASSA: medimos $V_{rad*} = a$ componente da velocidade orbital na linha de visada = $V_* \times \sin\theta$



(b) Variação na velocidade radial da estrela Upsilon Andromedae (estrela gêmea do Sol).

Evidência de 3 planetas com limites inferiores de massa 0,7, 2,1 e 4,3 M_J , com órbitas com semieixo maior de 0,06, 0,83 e 2,6 UA respectivamente.

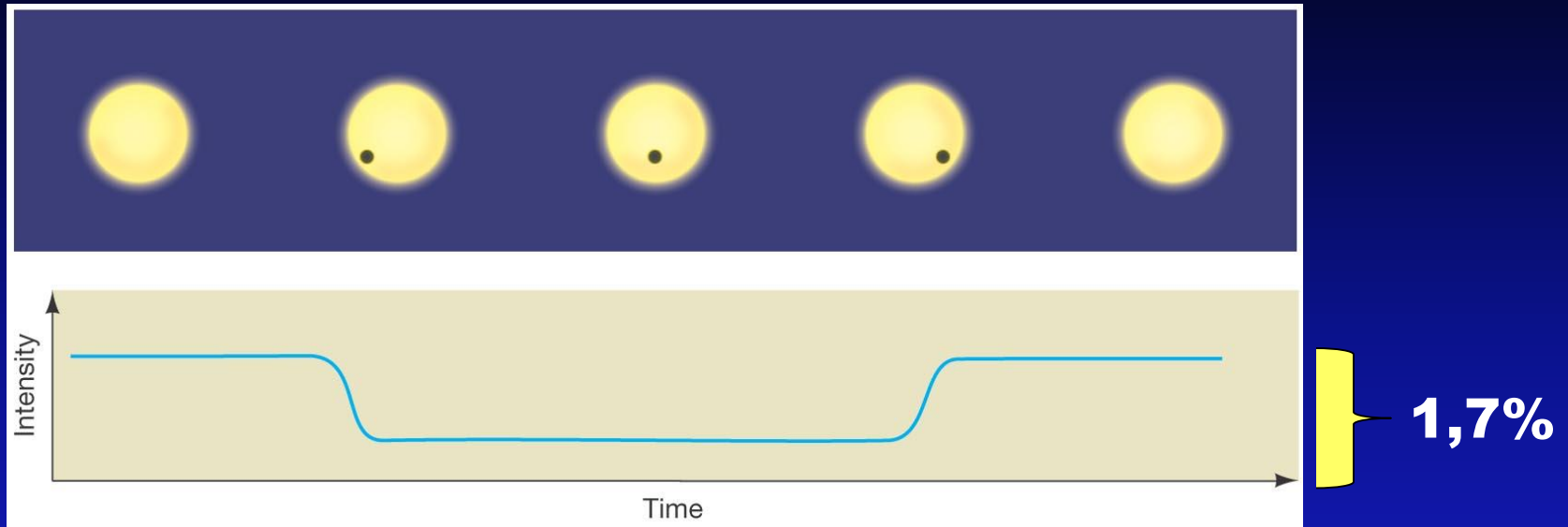
Comparação sistema solar com o sistema Upsilon Andromedae



Mais de 500 sistemas planetários foram detectados (até 2013) através de medida da V_{rad}

Medidas indiretas: análise da luz da estrela

TRÂNSITO



- Estrela HD209458. Determinação do raio do planeta ($1,4R_J$).
- Determinação da variação na v_{rad} da estrela \Rightarrow **órbita uma distância de 7 milhões de km ($0,05$ UA) e massa estimada do planeta de $m_{PL} = 0,6 M_J$**
- A queda no brilho ocorre a cada 3,5 dias.
- **ÚNICO MÉTODO QUE ESTIMA O TAMANHO DO PLANETA.**

Densidade = $200 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow$ planeta gasoso gigante e quente (órbita bem próximo a estrela)

Survey de telescópios espaciais para detectar trânsitos



Missão CoRoT (Convection Rotation and planetary transits 2006-2014): órbita geocêntrica:

- **34 planetas confirmados e estudados em detalhes.**
- **O menor exoplaneta detectado pelo CoRoT: $5M_{\oplus}$ e $1,7D_{\oplus}$.**
- **160.000 curvas de luz de estrelas com variações de brilho .**

TRÂNSITO

Sonda Kepler (2009-hoje): orbita heliocêntrica

2342 planetas foram confirmados e 2421 aguardam confirmação (25.04.2019)

30 planetas são de tamanho $< 2 \times$ Terra e estão em zonas habitáveis

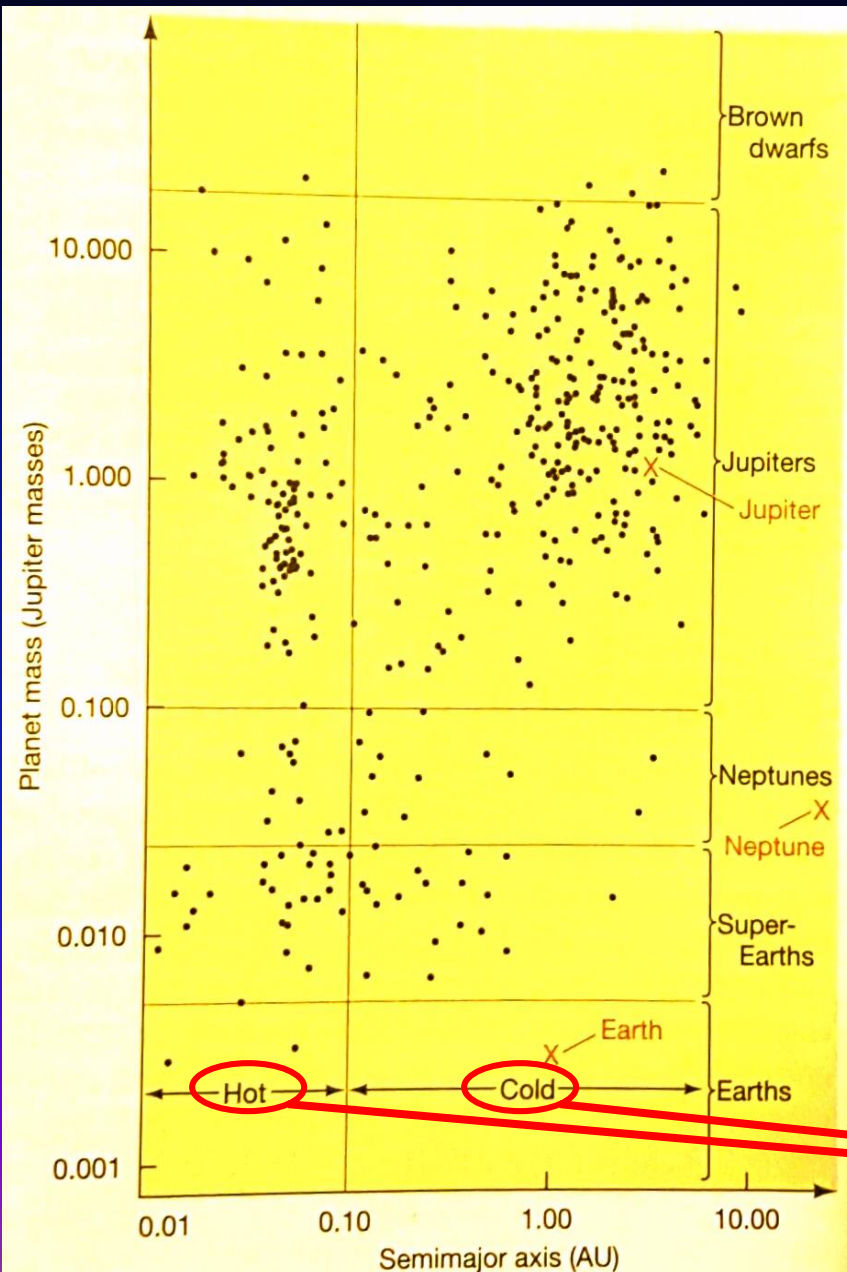
PROPRIEDADES DOS EXOPLANETAS

<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

**Até agora (25.04.19) : 3944 planetas extra-solares e
626* sistemas múltiplos confirmados**

**Pelo menos 10% das estrelas + próximas
observadas apresentam planetas**

PLANETAS TIPO JÚPITER, NETUNO, SUPER-TERRA E TERRA

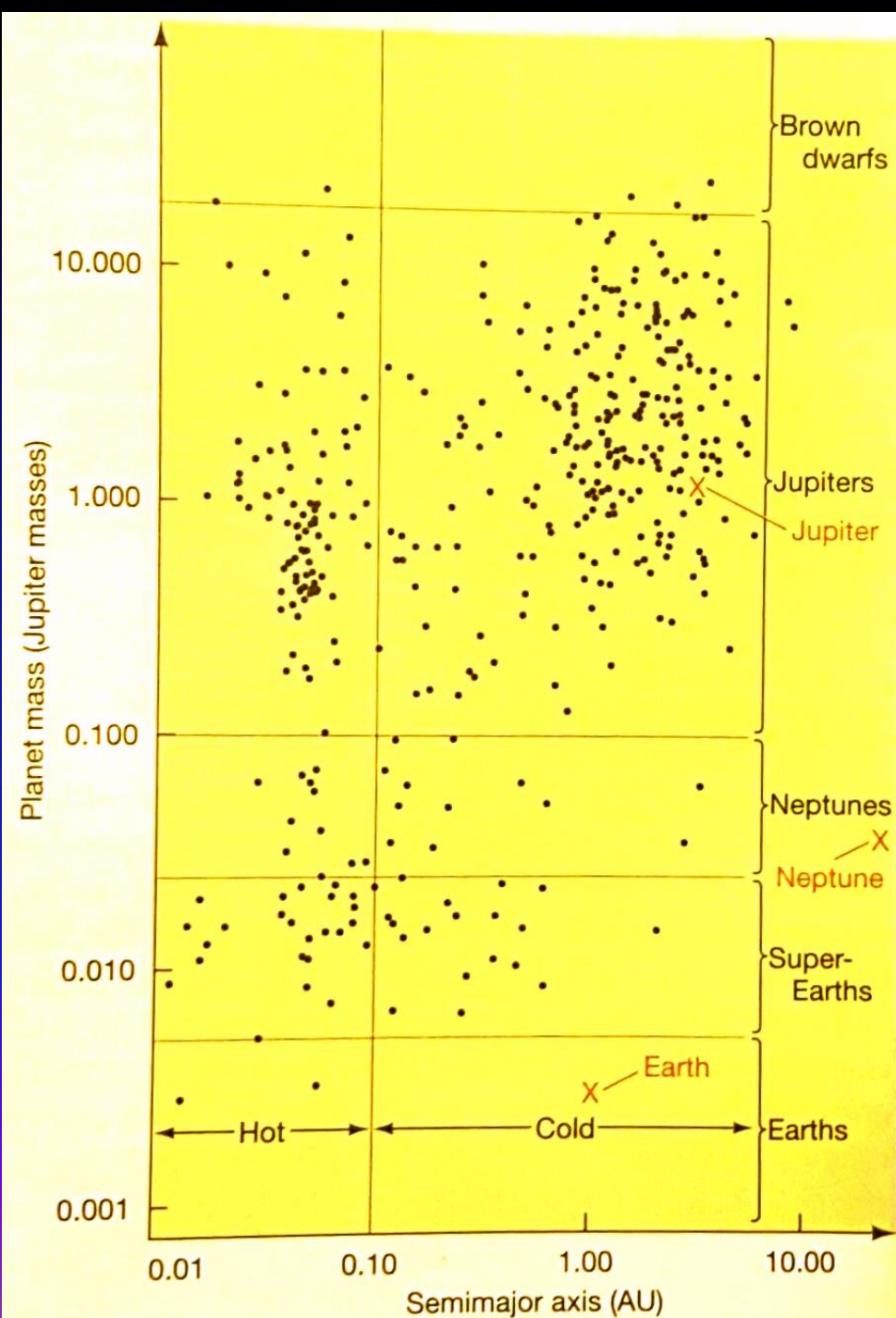


Massas determinadas por v_{rad} :
400 planetas extra-solares

Terminologia:

- Tipo Jupiter: planetas gasosos massivos
 - Tipo Jupiter quente: encontra-se próximo a estrela-mãe: atmosfera turbulenta
 - Tipo Netuno: planetas gasosos menos massivos
 - Super-Terras : planetas com $2M_{\oplus} < M < 10M_{\oplus}$
- Obs. Teoricamente $10M_{\oplus}$ representa o limite inferior de massa necessária para que o núcleo planetário rochoso agregue grandes quantidades de gás nebular, tornando-se assim um gigante gasoso.
- Tipo Terra : planetas com $M < 2 M_{\oplus}$

Baseado na distância



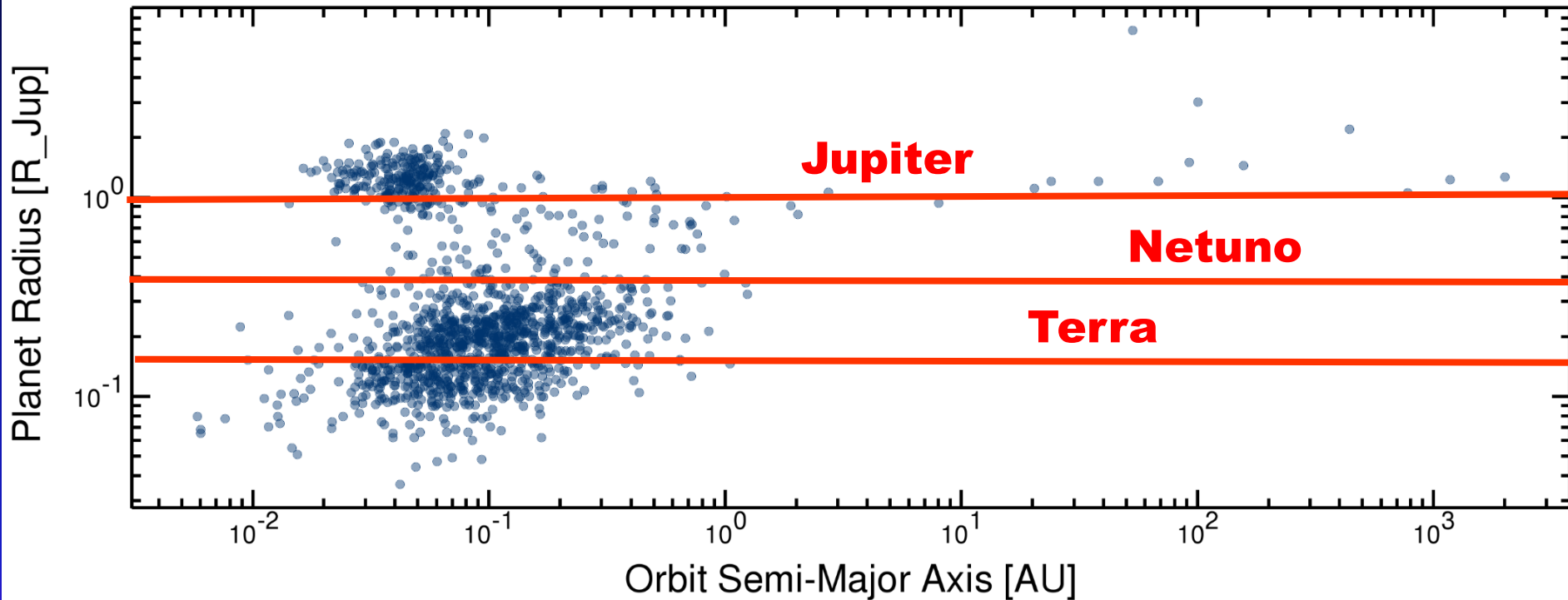
Método de v_{rad} não pode medir variações na estrela devido a órbitas de planetas muito pequenos ou muito distantes (mesmo serve para trânsito).

ATENÇÃO: BIAS OBSERVACIONAL

Métodos privilegiam objetos mais massivos ou maiores em tamanho e que orbitam mais próximos às suas estrelas.

Dados Kepler

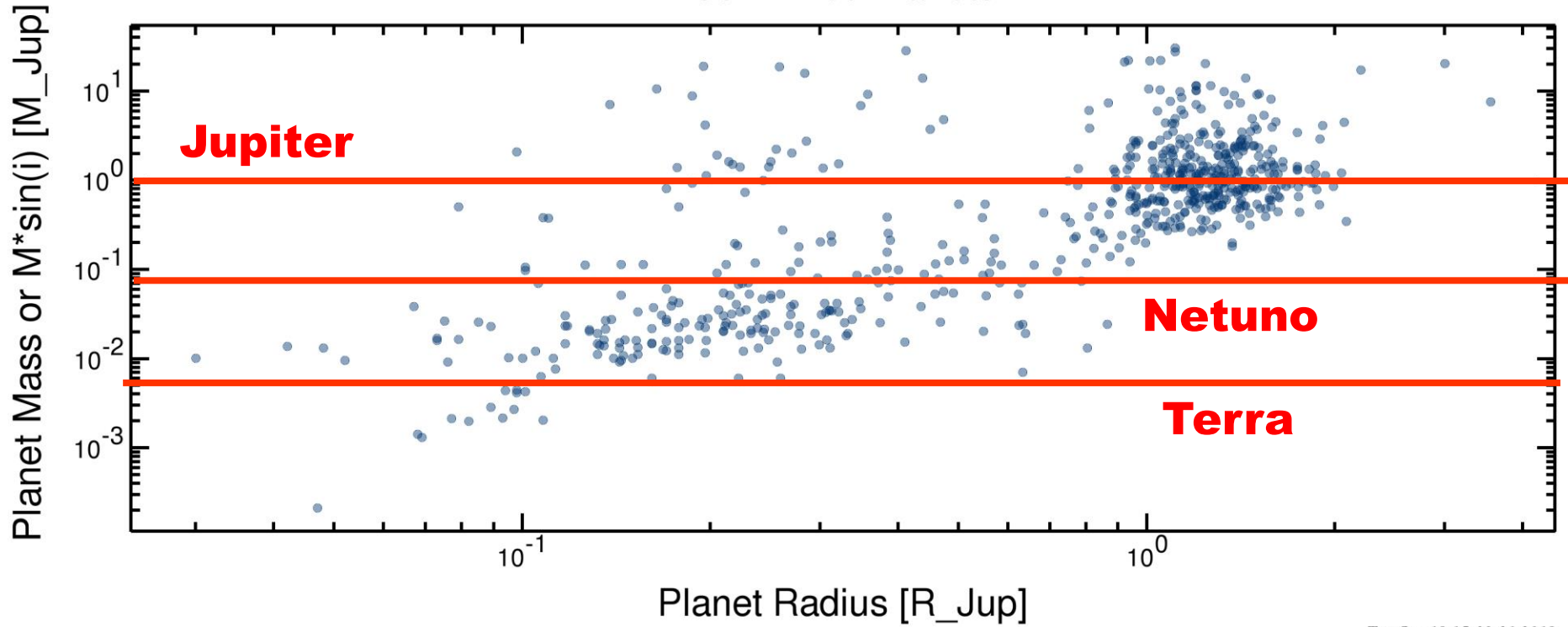
Confirmed Planets



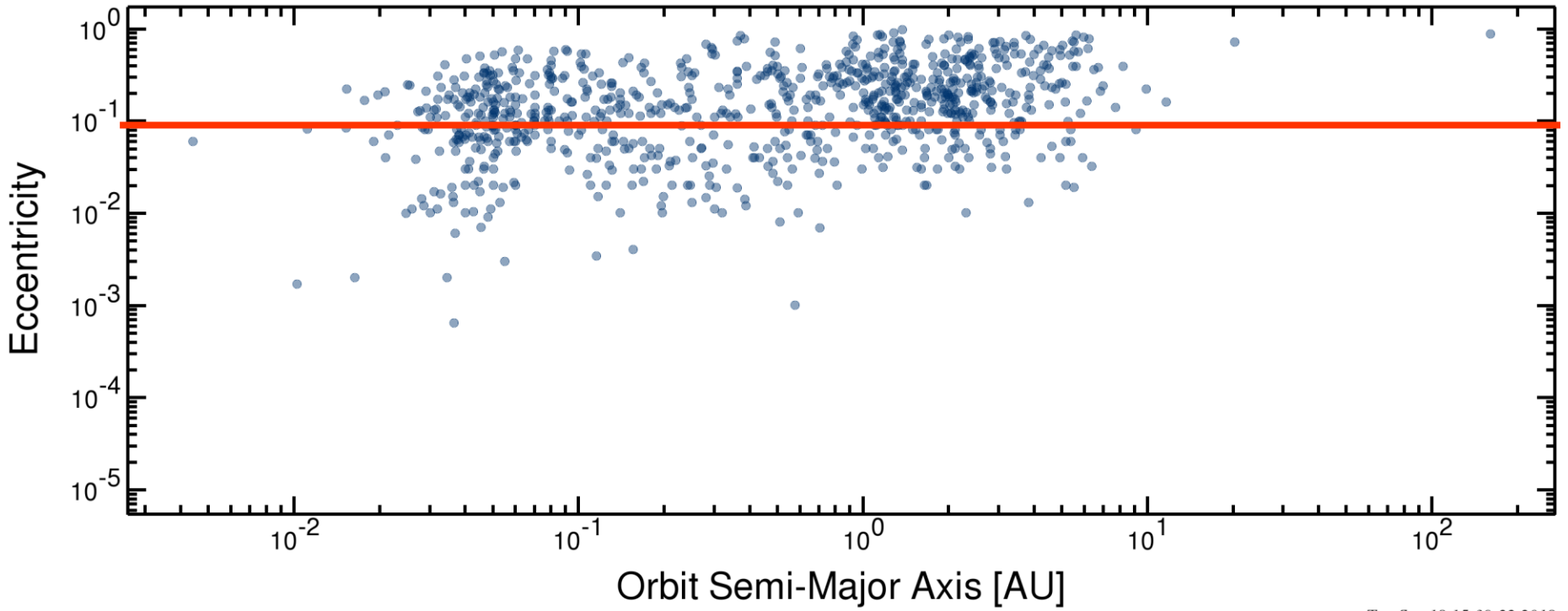
Tue Sep 18 15:25:13 2018

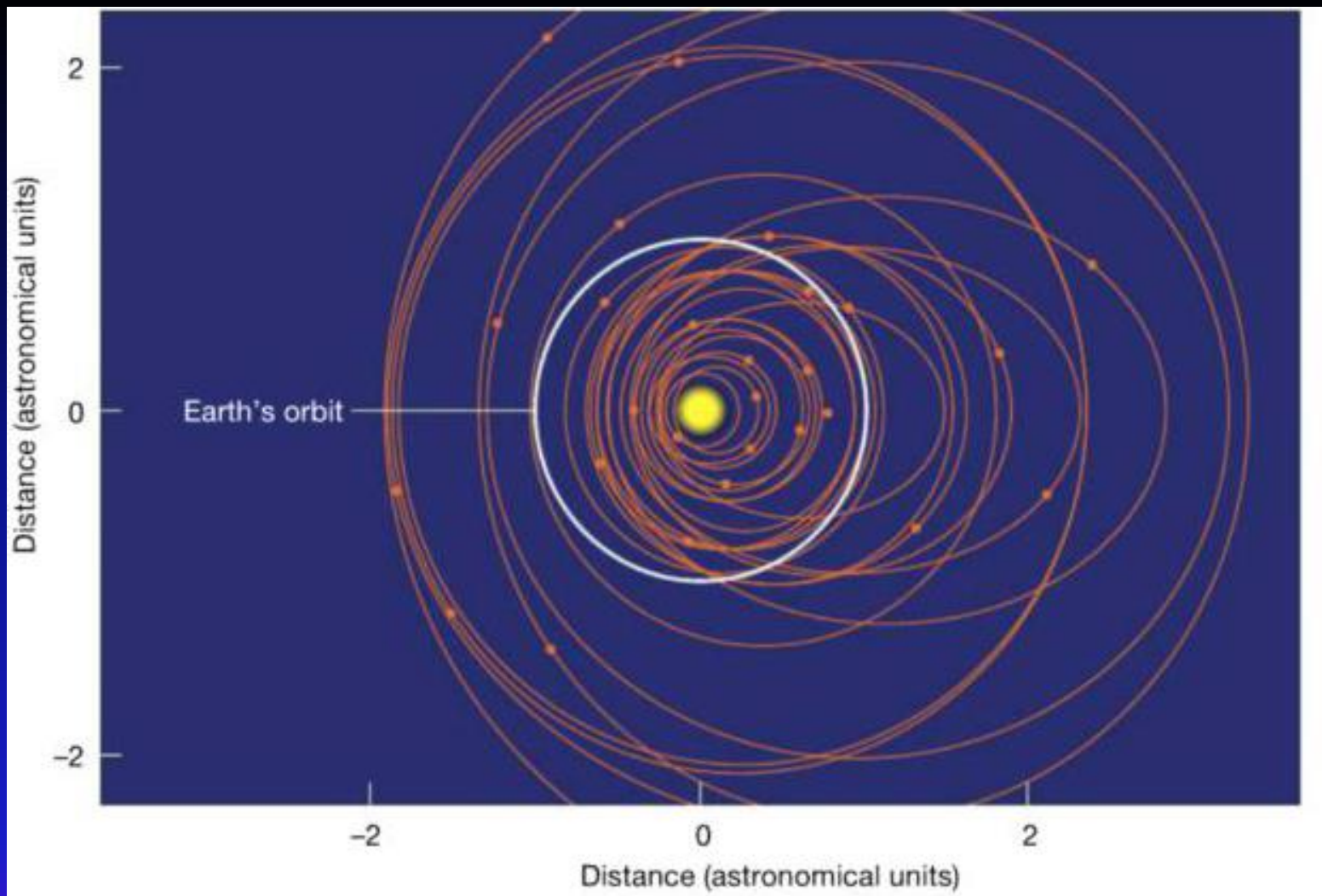
<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/IcePlotter/nph-icePlotInit?mode=demo&set=confirmed>

Confirmed Planets



Confirmed Planets





Planetas de massa $\sim M_J$.

Órbitas de planetas extra-solares (muitos estão a 0,05 UA da estrela).

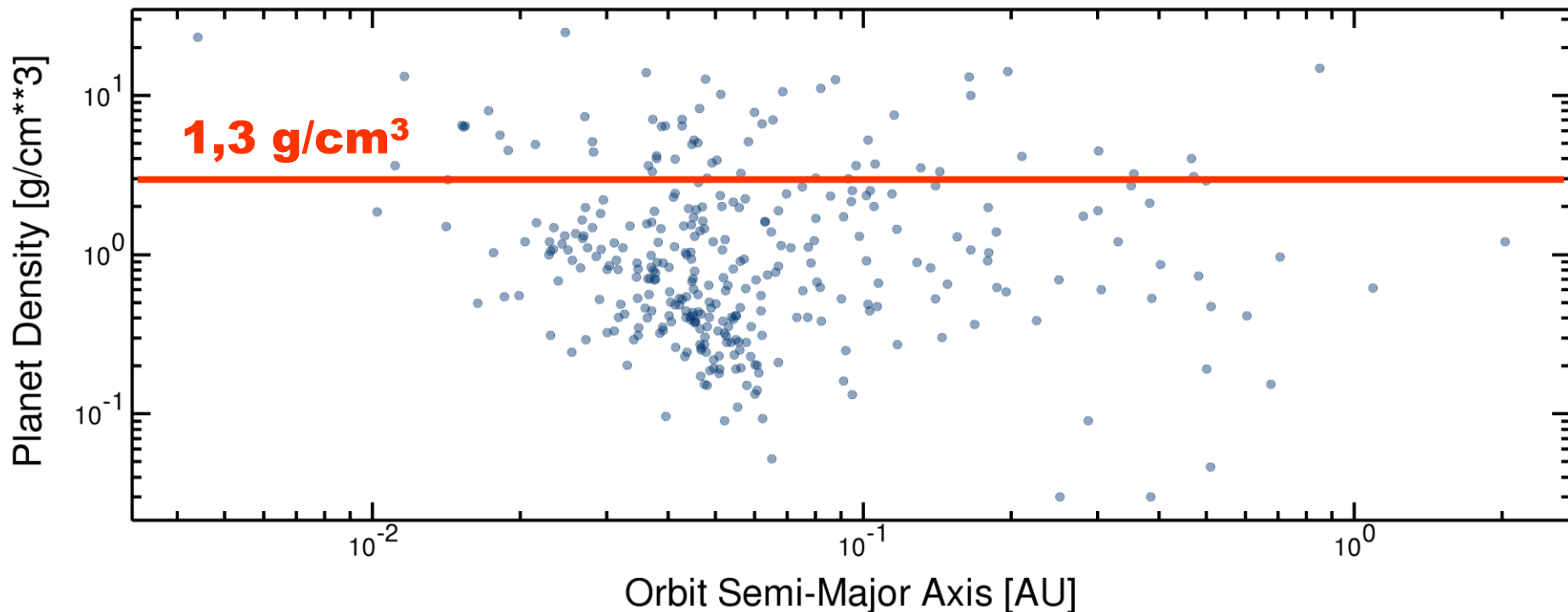
Muitos planetas tem alta excentricidade orbital (o que não ocorre com os jovianos do nosso sistema solar).

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS EXOPLANETAS

Estimando MASSA e RAIO \Rightarrow densidade

ESTIMATIVA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA 

Confirmed Planets



Tue Sep 18 15:43:55 2018

PROBLEMAS:

Densidades muito baixas entre $1,3 < \rho < 0,1 \text{ g/cm}^3$

Inconsistentes com modelos teóricos (menor do que densidade mais leve de puro H+He) !!! \Rightarrow DETERMINAÇÃO DO LIMITE INFERIOR DE MASSA???

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS EXOPLANETAS

TALVEZ: planetas gasosos muito próximos as estrelas \Rightarrow calor e efeitos de maré fizeram com que o tamanho destes planetas fossem maiores do que o normal.

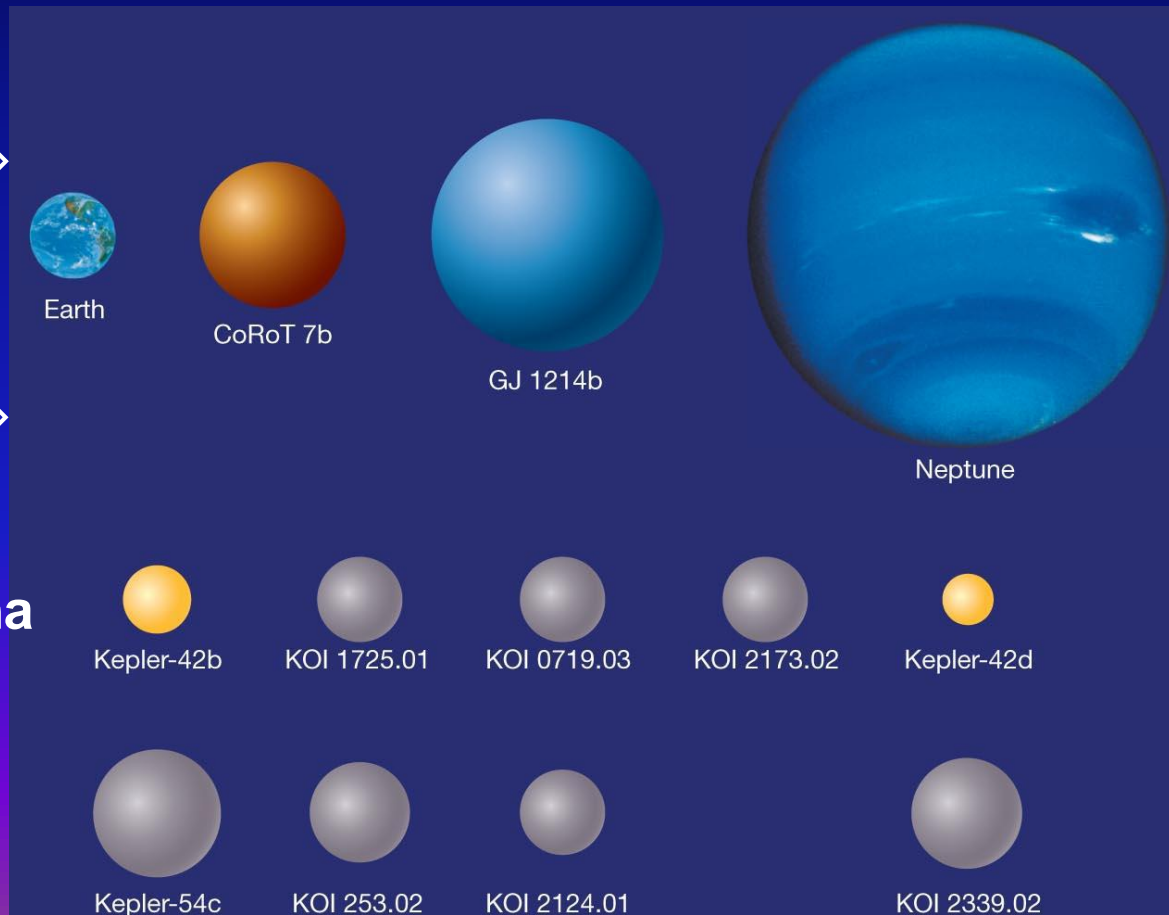
	Dens. g/cm ³
Sol	1,410
Mercúrio	5,4
Vênus	5,2
Terra	5,5
Lua	3,3
Marte	3,9
Ceres (asteróide)	2,7
Júpiter	1,3
Saturno	0,7
Urano	1,3
Neptuno	1,6
Plutão (Kuiper)	2,1
Hale-Bopp (cometa)	0,1

Somente dezenas de Terras e Super-Terras tem M e R conhecidos:
densidades médias de $0,5 < \rho < 9 \text{ g/cm}^3$.

- Menor limite de densidade: anãs gasosas: núcleo de rocha/gelo e atmosferas de H+He,
- Maior limite de densidade: composição rochosa: terras comprimidas.

CoRoT 7b: $4,8M_{\oplus}$ e $1,7R_{\oplus} \Rightarrow$
 $\rho = 5,3 \text{ g/cm}^3$
 $a = 0,02 \text{ UA}$ (quente)

GJ 1214b: $5,7M_{\oplus}$ e $2,7R_{\oplus} \Rightarrow$
 $\rho = 1,6 \text{ g/cm}^3$ (Netuno
pequeno) núcleo de
água/gelo cercado por uma
atmosfera de H+He

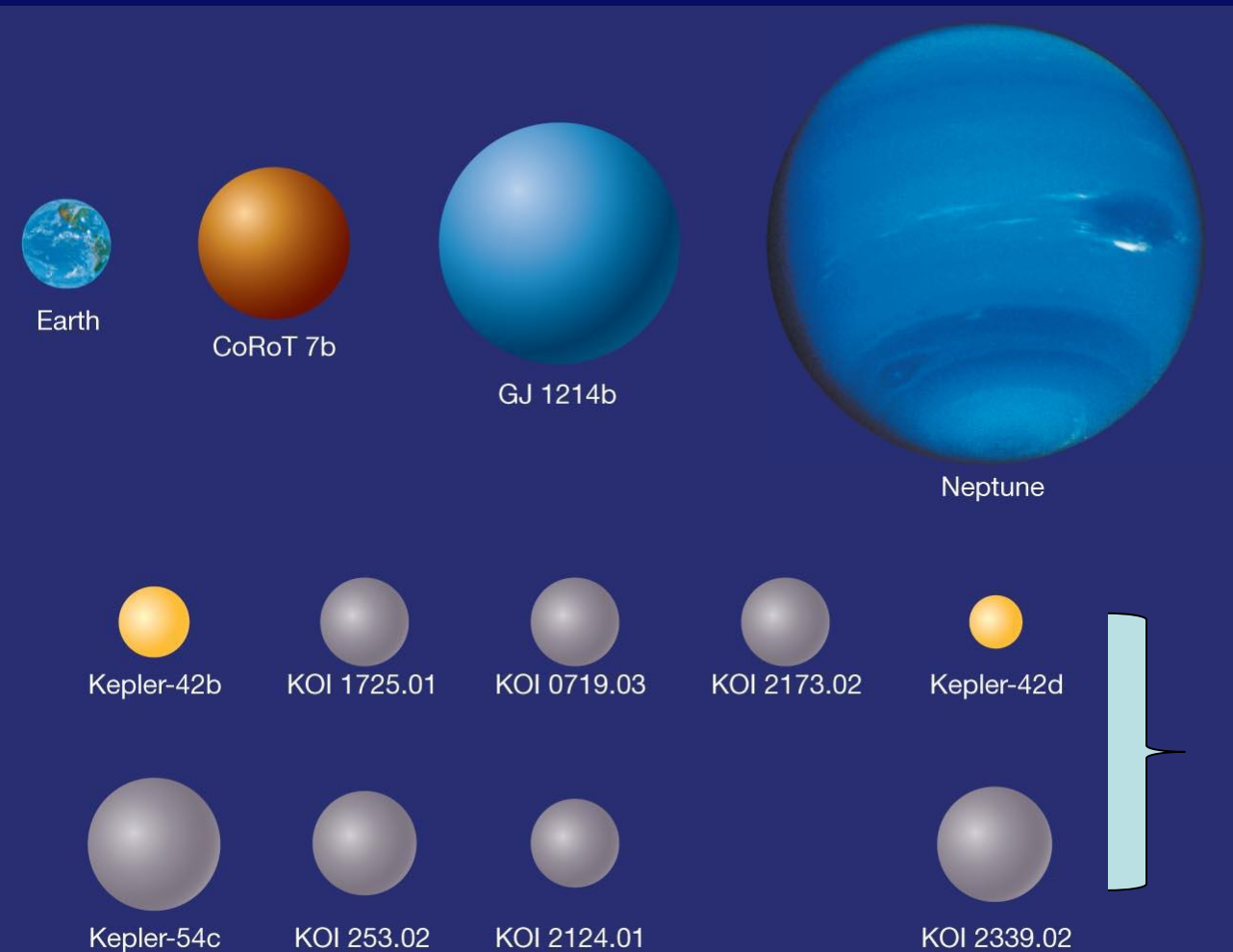


Marrom : rochoso

Azul: gasoso e gelo no núcleo

Amarelo: gasosos (densidade baixa)

Cinza: desconhecido

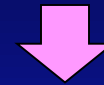


9 planetas candidatos pela Kepler que estão na zona habitável: distantes o suficiente da estrela para possuir água líquida em suas superfícies.



Concepção artística + detalhada de (a) CoRot 7b e (b) Kepler-42b

Medidas de trânsito : previsão da posição do planeta na sua fase quarto-crescente/quarto minguante



espectroscopia IR (neste λ a luz refletida na atmosfera do planeta (que é bem mais frio do que a estrela) é distinguível da luz vinda direto da estrela.



Composição química da atmosfera do planeta.

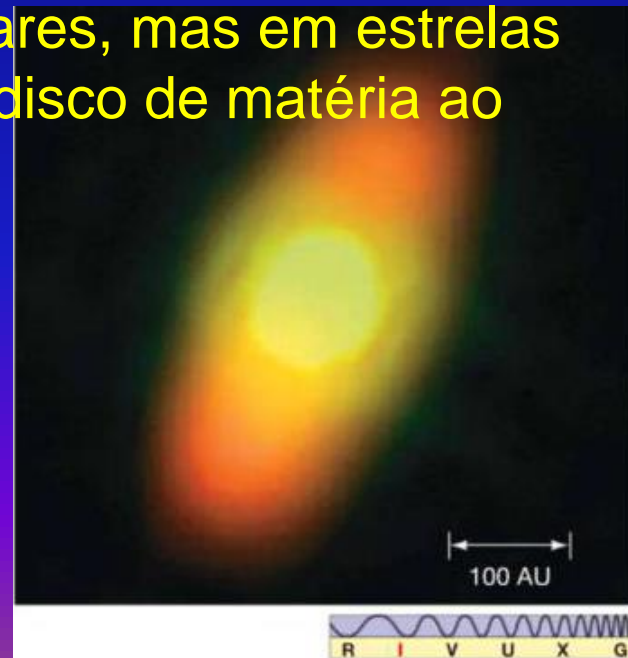


Spitzer Space Telescope: observou H, Na, CH₄ (metano), CO₂ e vapor d'água e determinou a T das atmosferas de uns poucos planetas.

Comparação com as propriedades do nosso sistema solar com o observado em exoplanetas

1. Órbitas coplanares e largamente espaçadas: sistemas com múltiplos **exoplanetas também parecem apresentar o mesmo**.
2. Planetas orbitam na mesma direção da rotação solar: **exoplanetas parecem apresentar o mesmo**. No entanto, foi achado um Júpiter quente com órbita perpendicular ao eixo de rotação da estrela (possível colisão com outro objeto?).
3. Debris como asteroides e objetos do cinturão de Kuiper: **não dá para observar isso em sistemas extra-solares, mas em estrelas recém formadas dá para se observar um disco de matéria ao redor.**

SST
Estrela recém formada

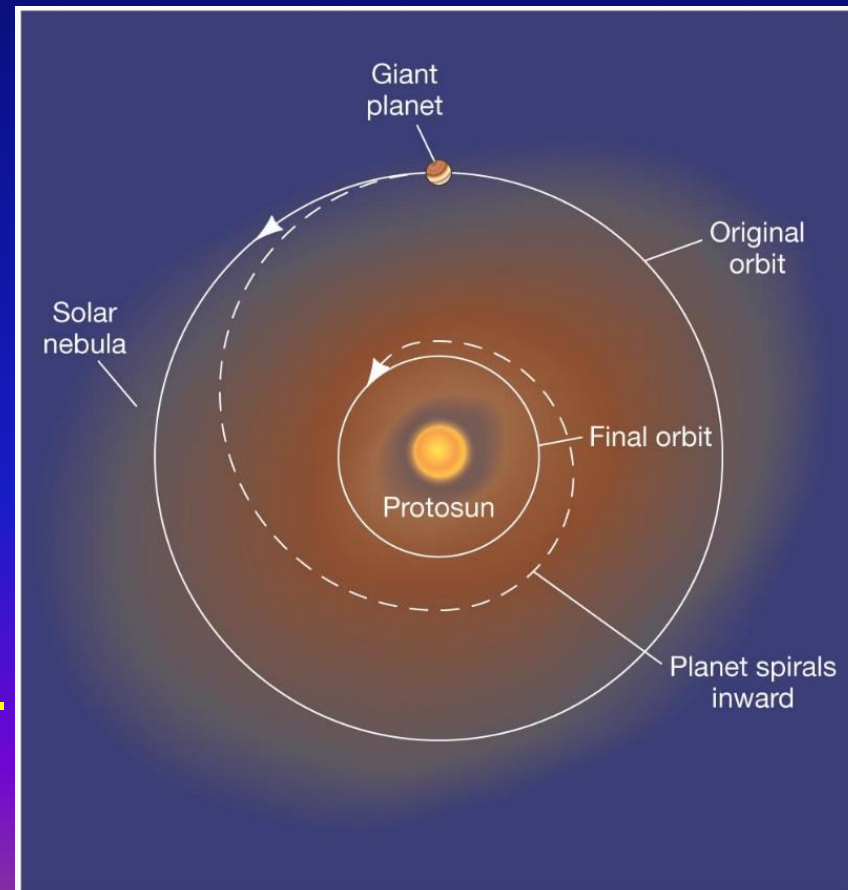


Como se formam os planetas do tipo Júpiter quente, se a proximidade com a estrela faria este tipo de formação improvável?

R. O Júpiter quente poderia ter sido formado em uma órbita mais externa e aos poucos foi espiralando na direção da estrela por fricção com o disco nebular.

- 1) Este efeito continua até o disco começar a ser disperso pela estrela recém nascida.
- 2) Este processo não inibe a formação posterior de planetas terrestres no disco interno do sistema solar.

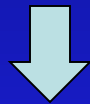
No nosso sistema solar isso não aconteceu porque a formação de Saturno estabilizou a órbita de Júpiter.



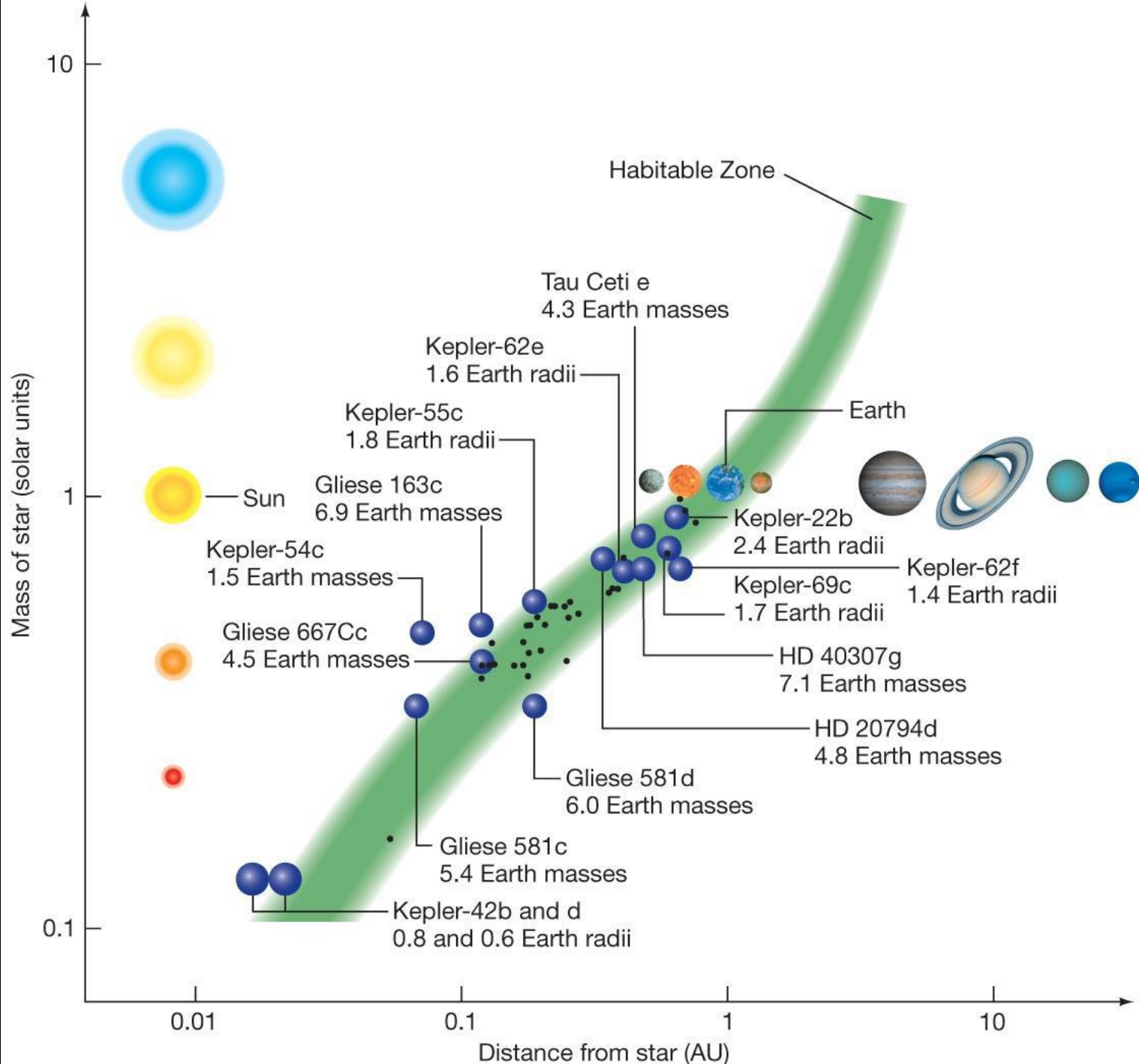
A PROCURA POR PLANETAS TIPO TERRA

Condições para formação de vida:

Existência de água líquida na superfície \Rightarrow planeta na zona habitável \Rightarrow T superficial entre 0 e 100° C.

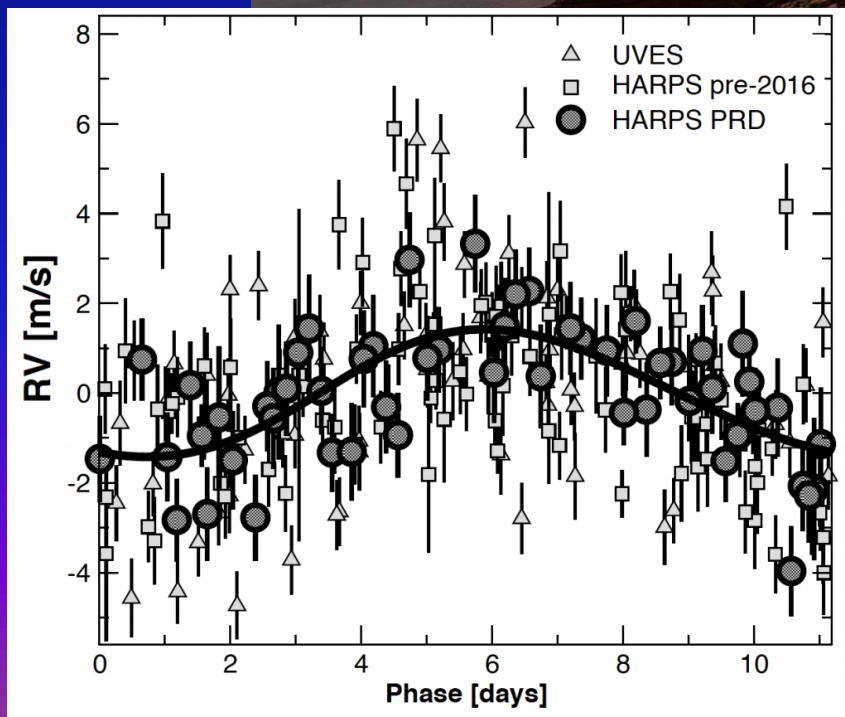
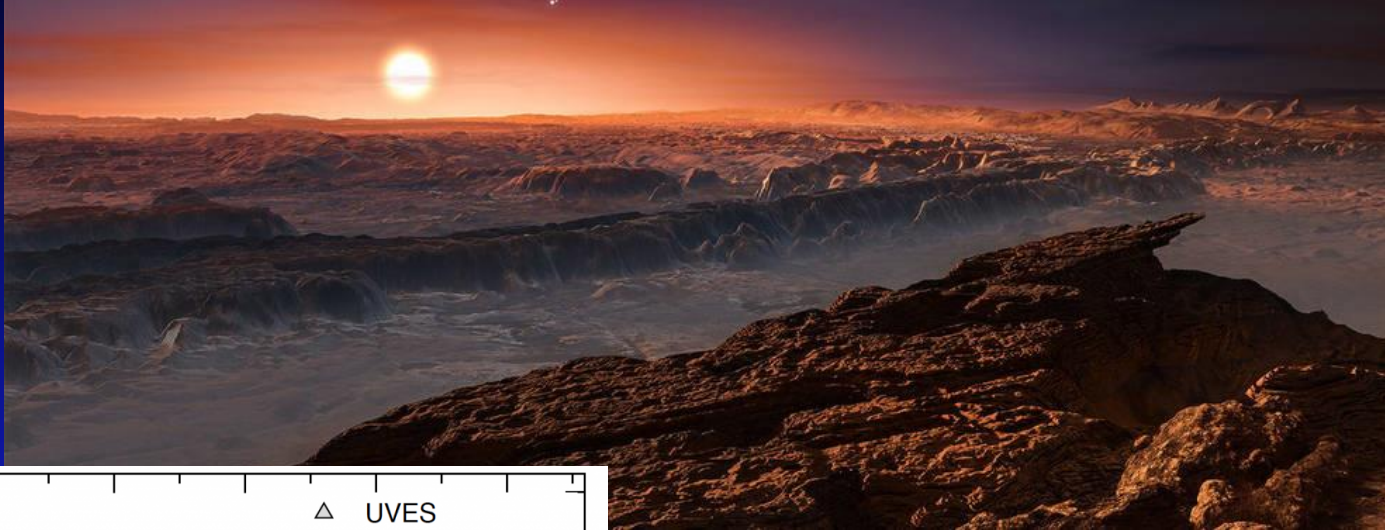


Zona habitável \Rightarrow depende da distância e do brilho intrínseco da estrela



AGOSTO 2016

Planeta do tipo terrestre foi descoberto orbitando **Próxima Centauri**, a estrela mais próxima do nosso sistema solar, que fica a uma distância de 4,2 anos-luz.



Método da velocidade radial (telescópios: 3,6 m do ESO em la Silla e o VLT[8 m]).