

AULA 7

**FORMAÇÃO DO SISTEMA
SOLAR E EXOPLANETAS**

AGA0215

Profa. Thais Idiart

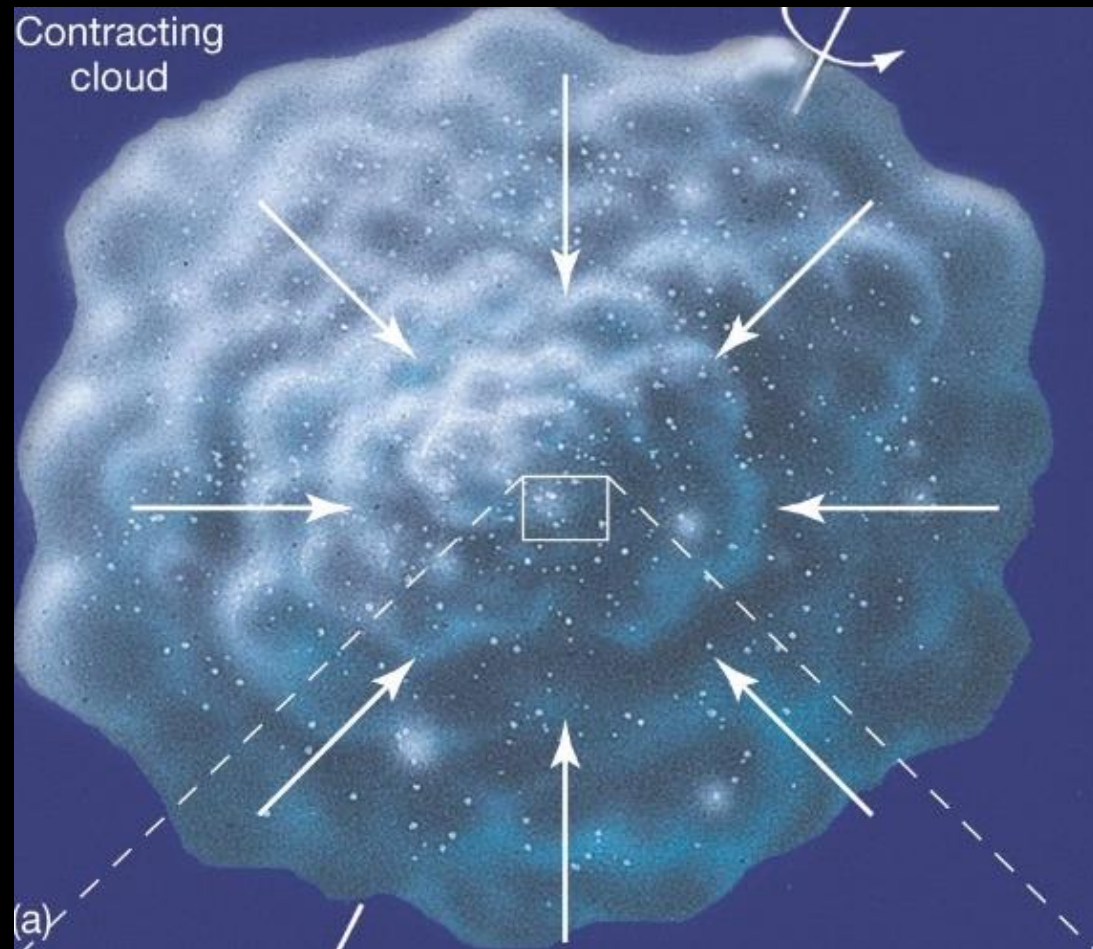
FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Contração Nebular

Primeiro modelo de contração nebular René Descartes (século XVII)

Nuvem grande e rotante de gás e poeira começa a se contrair sob a influência de sua própria gravidade $\Rightarrow$ fica + densa e mais quente no seu centro e eventualmente forma uma estrela.

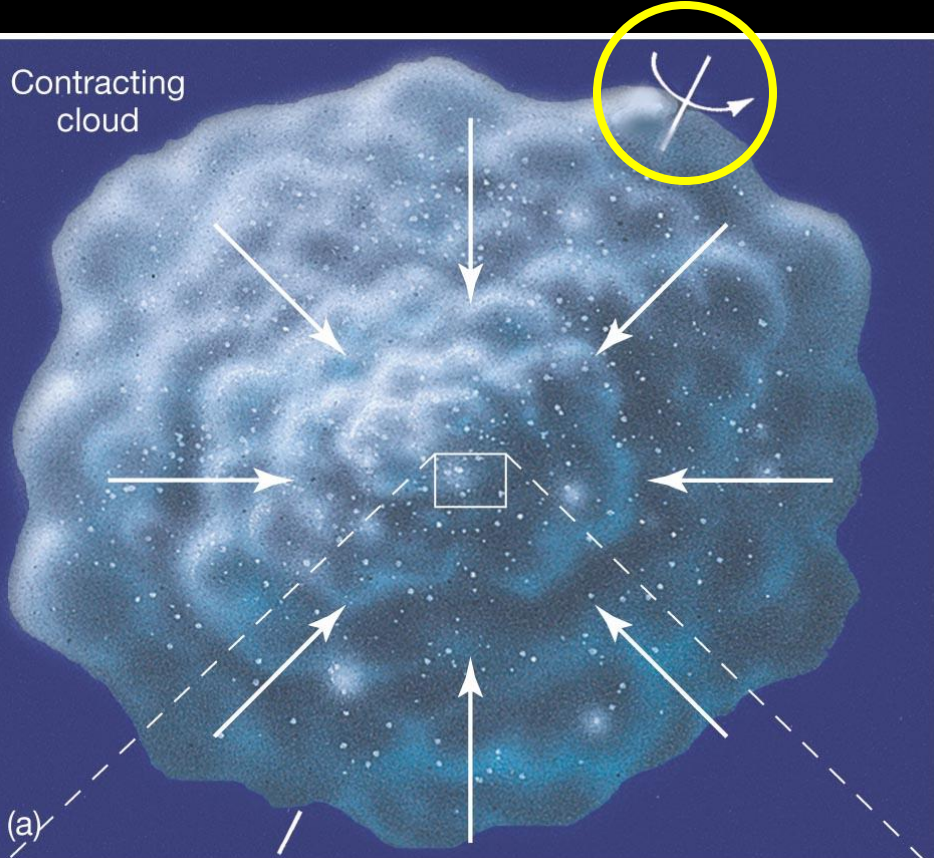
Enquanto o Sol se forma no centro mais quente e denso da nuvem, os planetas se formam nas regiões mais externas e frias $\Rightarrow$ planetas são subprodutos da formação de estrelas.



FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Contração Nebular

Laplace (1796) $\Rightarrow$ demonstração QUALITATIVA do colapso de uma nuvem de gás que gira (formato do sistema solar)



Quanto mais uma nuvem interestelar se contrai, mais rápido ela gira

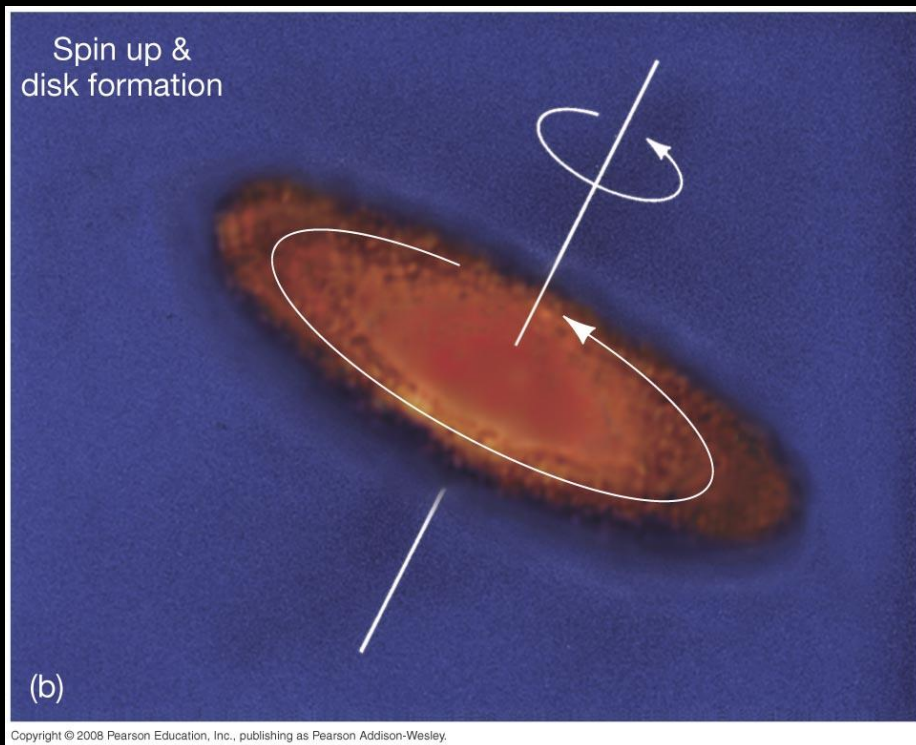
conservação de momentum angular :

$$L = m \cdot v \times r$$

FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Contração Nebular

Laplace (1796) $\Rightarrow$ demonstração qualitativa



Força centrífuga se opõe ao colapso na região perpendicular ao eixo de rotação

$\Rightarrow$ **nuvem colapsa + rapidamente paralelo ao eixo de rotação**

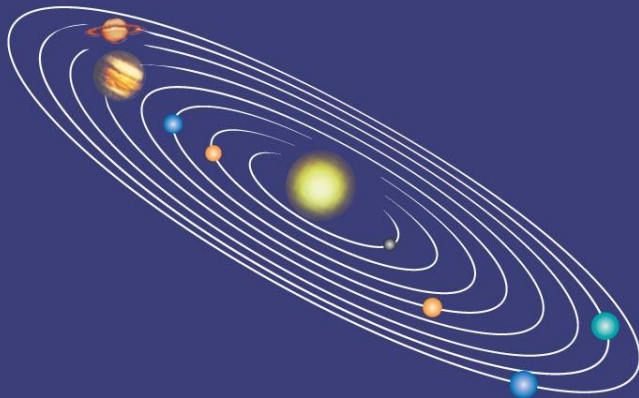
PANQUECA

FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Contração Nebular

Laplace (1796) $\Rightarrow$ demonstração qualitativa

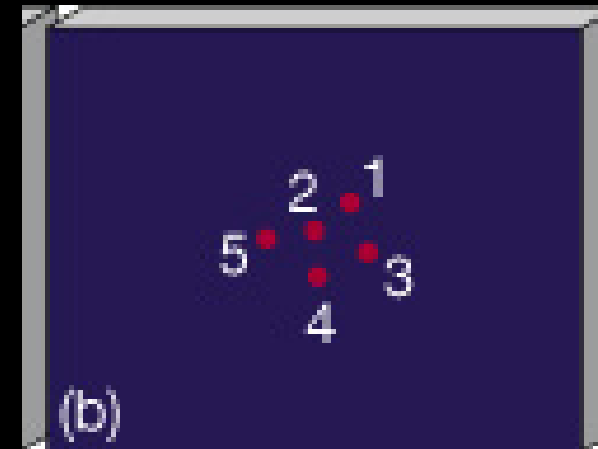
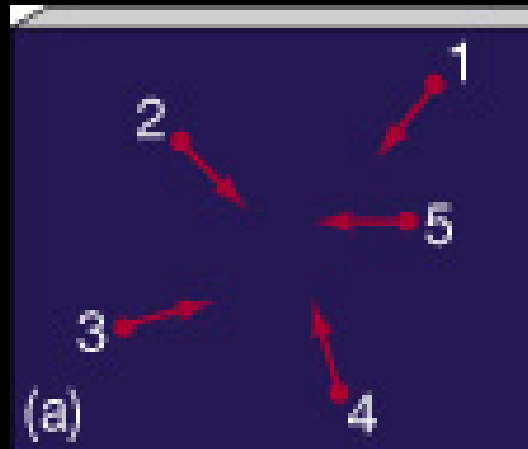
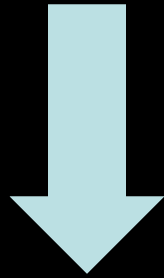
Today



(c)

FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR
Teoria Nebular

Mas... Disco de gás quente NÃO forma conjuntos de nuvens que eventualmente formarão planetas!



O gás quente tende a se dispersar e não se aglomerar

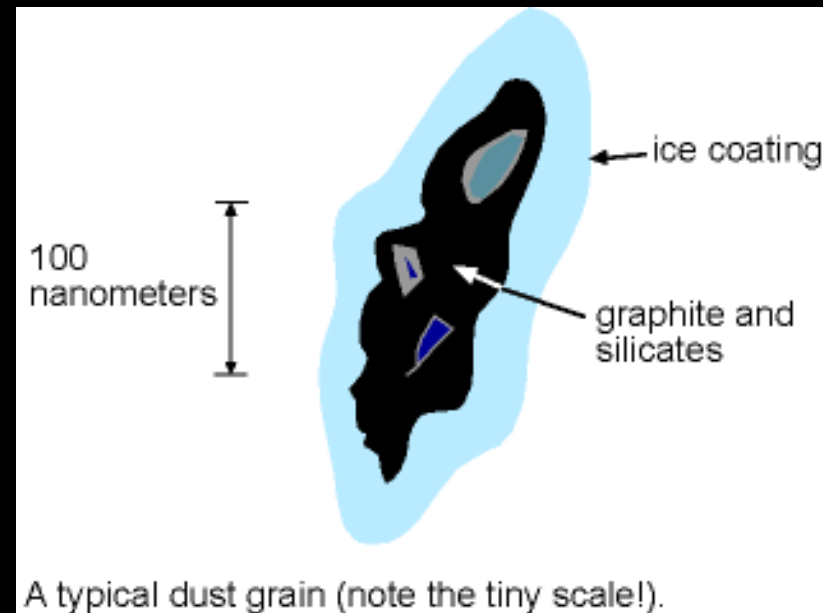


Teoria da Condensação

INGREDIENTE CHAVE: PRESENÇA DE POEIRA INTERESTELAR

POEIRA: grãos (aglomerados de moléculas) formados por:

- **Carbonáceos (ex. grafite)**
- **Silicatos**
(exemplo: Olivina (Mg^{2+} , Fe^{2+}) $_2\text{SiO}_4$)
+ cobertura de gelo



Teoria da Condensação

a) Resfriamento do gás quente através da presença de metais: irradia o calor através de emissão de radiação no Infravermelho IR.

Conversão de energia térmica (energia cinética) em energia radiante (fótons – partículas de luz) no IR



Para excitar os elementos mais abundantes como H ou He requer altas energias $\Rightarrow$ temperaturas muito altas para excitação **COLISIONAL** de seus estados fundamentais $\Rightarrow$ mais provável excitar elétrons em átomos mais pesados.

Colisão de H ou elétrons com íons e átomos neutros mais pesados:
TRANSMITE ENERGIA CINÉTICA = elétron vai para um nível de maior energia.
 $\Rightarrow$ transformação em emissão de fótons no IR quando o elétron volta para um nível de menor energia [desexcitação]

Teoria da Condensação

Mas... se o decaimento radiativo ocorre por meio de uma **transição permitida pelas regras de seleção** $\Rightarrow$ é muito provável que o fóton seja REABSORVIDO novamente pelo gás (reexcitação)

$\Rightarrow$ **TRANSIÇÃO PERMITIDA É INEFICIENTE PARA O RESFRIAMENTO.**

Em gases de baixíssima densidade existe uma probabilidade maior da ocorrência de TRANSIÇÕES PROIBIDAS (que não seguem as regras de seleção)

Ex. Resfriamento de uma nuvem HI (H neutro)

Ion/Espectro	Transição entre subníveis	colisionador	$\Delta E/k$ T de excitação	$\lambda(\mu m)$
C⁺/[CII]	$^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$	H₂, H, é	92K	158
O⁰/[OI]	$^3P_1 \rightarrow ^3P_2$	H, é	228K	63,2
	$^3P_0 \rightarrow ^2P_1$		99K	146

Radiação emitida por transições proibidas (~~regras de seleção~~) são menos prováveis de serem reabsorvidas

Teoria da Condensação

INGREDIENTE CHAVE: PRESENÇA DE POEIRA INTERESTELAR

b) Resfriamento $\Rightarrow$ diminui pressão interna $\Rightarrow$ facilita colapso

c) Facilita um agrupamento maior de moléculas através de núcleos de condensação formados pela poeira $\Rightarrow$ como gotas de chuva que se formam na atmosfera da Terra: poeira e fuligem atuam como núcleos de condensação ao redor dos quais moléculas de água podem se aglomerar.



Grãos de poeira formam núcleos de condensação ao redor dos quais a matéria começa a se aglomerar **(efeito bola de neve)**

FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

(a) Uma nuvem de gás que tem uma rotação inicial, começa a se contrair devido a sua própria massa (ocorre o colapso gravitacional).

(b) Quanto mais uma nuvem interestelar se contrai, mais rápido ela gira (conservação de momentum angular $L = m \cdot v \times r$: **formação de um DISCO**).

(c) Grãos de poeira atuam como núcleos de condensação: através de colisões, moléculas se aderem aos grãos e formam pequenos corpos chamados “planetesimais” (tamanho da Lua).

(d) A sequência das colisões forma corpos cada vez maiores, no centro forma-se o **PROTOSOL (PROTOESTRELA)**.

(e) A ignição termonuclear do Sol (NASCE uma estrela) aquece o disco, fazendo com que os corpos + próximos, menores e + voláteis evaporem

(f) **O sistema solar é formado com a configuração que é observada atualmente**

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

1 milhão
de anos

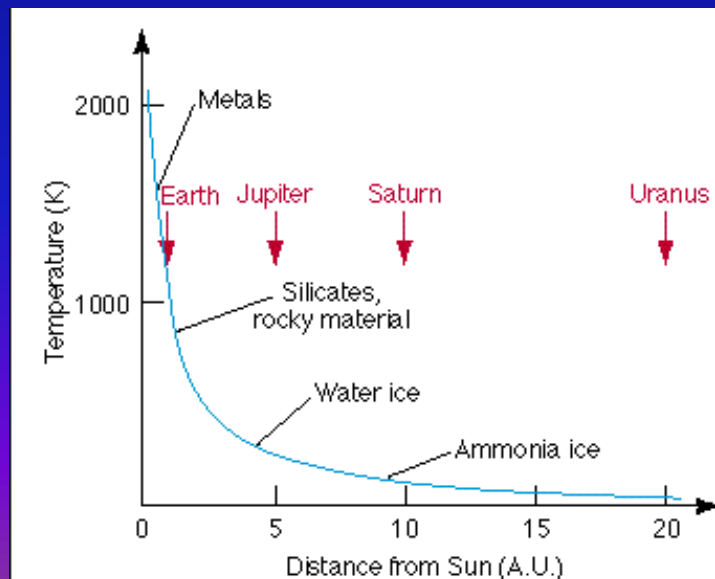
alguns
milhões
de
anos

Idade do sistema solar = $4,5 \times 10^9$ anos

Sucesso do modelo de formação do sistema solar

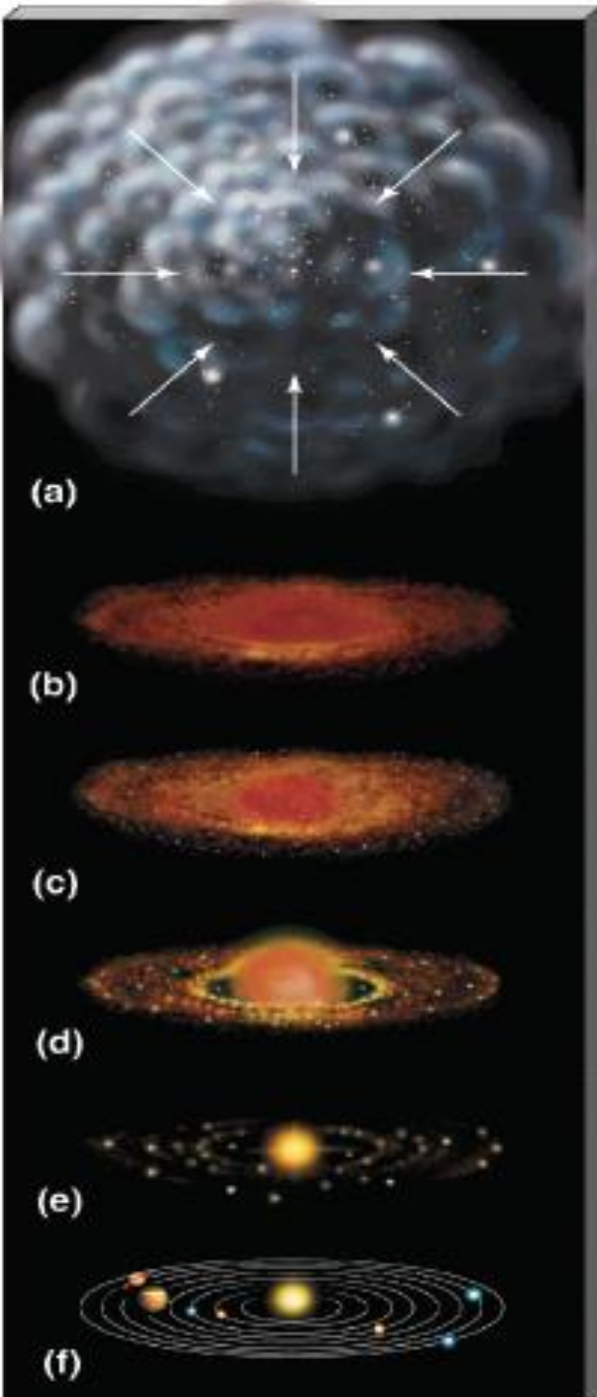
- as órbitas dos planetas e satélites seguem a rotação original da mesma nuvem de gás e poeira que os formou.
- as órbitas dos planetas principais estão ~ no mesmo plano (FORMAÇÃO DO DISCO)

Temperatura no sistema solar primitivo antes da aglutinação começar



Temperatura maior: somente metais podem se condensar para formar grãos.

Temperatura menor: podem se formar grãos de gelo



Resumindo:

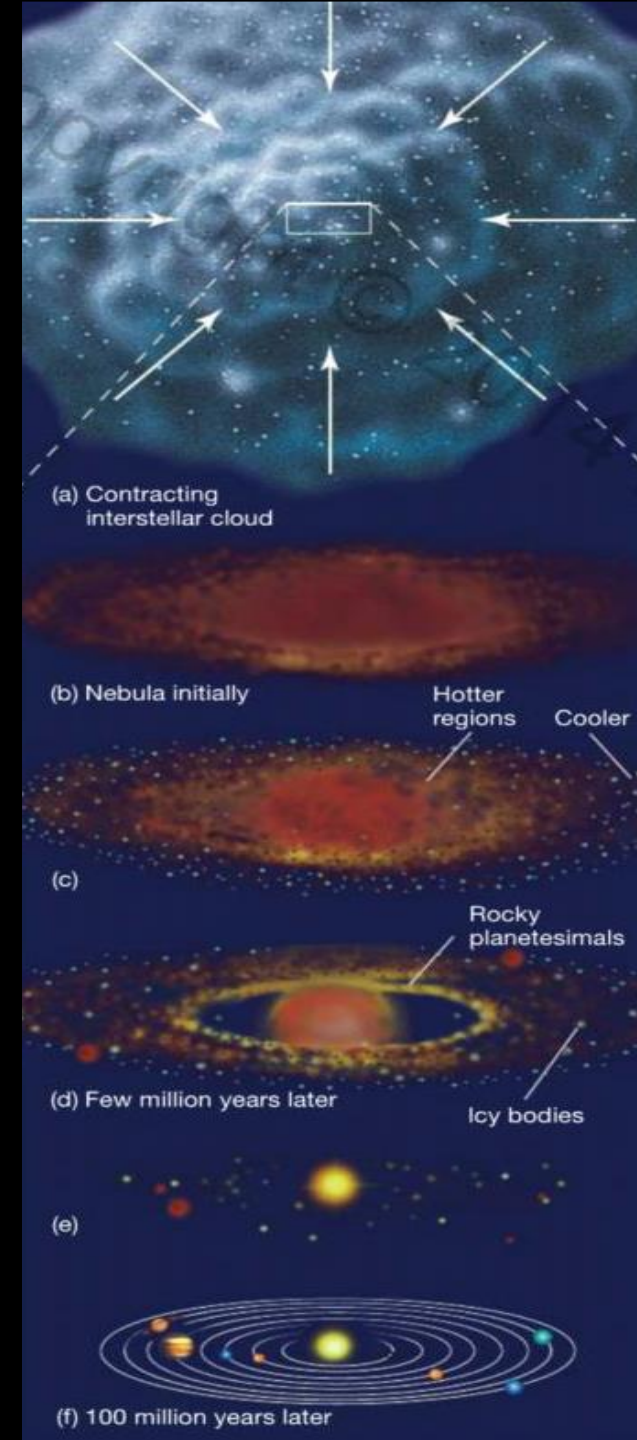
TEORIA DA CONTRAÇÃO NEBULAR + TEORIA DA CONDENSAÇÃO

Explicam as características do nosso sistema solar:

Órbitas dos planetas principais:

- 1. aproximadamente circulares**
- 2. Aproximadamente no mesmo plano**
- 3. na mesma direção da rotação do Sol em torno do seu próprio eixo**

Consequência do formato e rotação da nuvem mãe.



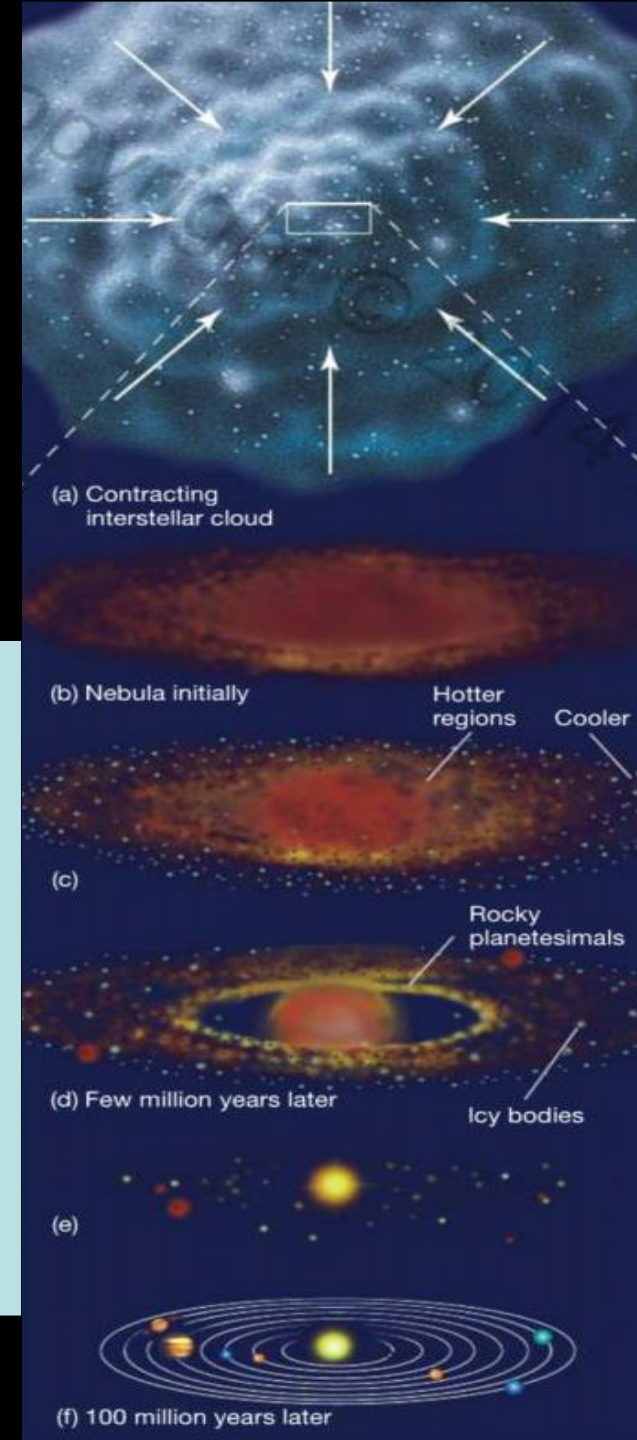
Resumindo:

TEORIA DA CONTRAÇÃO NEBULAR + TEORIA DA CONDENSAÇÃO

Explicam as características do nosso sistema solar:

Crescimento dos protoplanetas através da aglomeração de matéria e posterior aquecimento da nebulosa quando o Sol se torna uma estrela:

- 1. Planetas se encontram largamente espaçados**
- 2. Restos (debris) da fase de acreção + fragmentação: ASTEROIDES, O CINTURÃO DE KUIPER E NUVEM DE OORT.**



Mas...

**TEORIA DA CONTRAÇÃO NEBULAR
+
TEORIA DA CONDENSAÇÃO**

TEORIAS SÃO FLEXÍVEIS NO QUE DIZ RESPEITO A DETALHES:

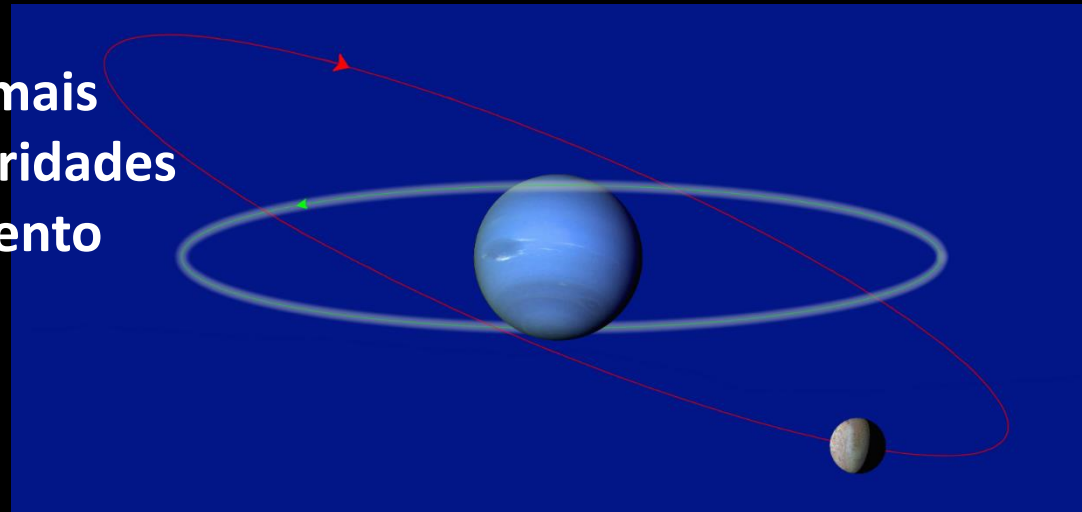
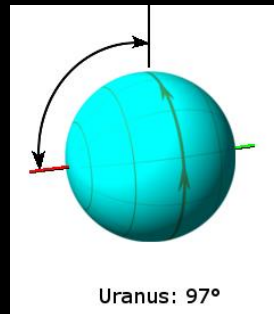
Exemplos:

TEORIA NEBULAR: não implica necessariamente que os planetas devem todos rotar em torno de seu próprio eixo no mesmo sentido.

TEORIA DA CONDENSAÇÃO: encontros randômicos combinam os planetesimais em protoplanetas.

Algumas características do sistema solar que podem ser modeladas por eventos randômicos:

- ❖ 1 ou 2 protoplanetas podem ter colidido com Vênus na época de sua formação, dando origem à sua rotação muito lenta e retrógrada.
- ❖ o sistema Terra-Lua pode ter surgido da colisão entre a protoTerra e um objeto da ordem do tamanho de Marte.
- ❖ o eixo de rotação de Urano pode ter sido causado por colisões de dois ou mais protoplanetas na época da sua formação.
- ❖ interações entre os planetas jovianos e um ou mais planetesimais podem explicar algumas irregularidades nas luas destes planetas (movimento retrógrado da orbita de Tritão **(maior lua de Netuno)**).

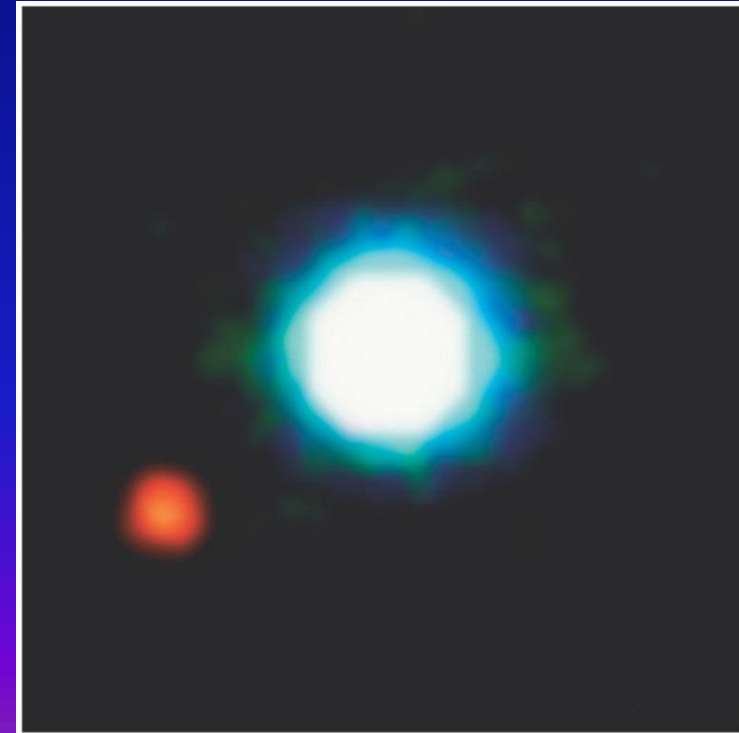


PLANETAS EM OUTROS SISTEMAS SOLARES OU EXOPLANETAS

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 os descobertos geralmente estão muito próximos às suas estrelas $\Rightarrow$ difícil a observação direta.
- SOMENTE ALGUMAS POUCAS CENTENAS DE PLANETAS FORAM DETECTADOS POR IMAGEAMENTO DIRETO

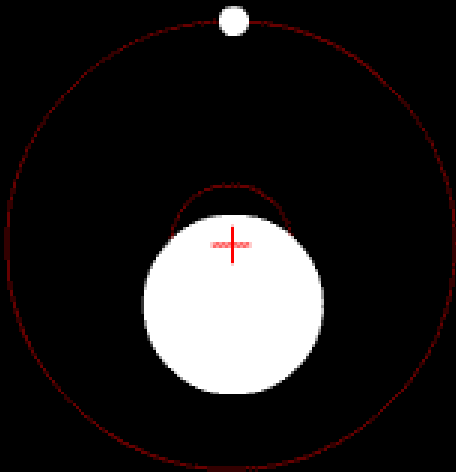
Na figura ao lado : planeta tipo Júpiter ($5M_J$) orbitando a 55 UA uma anã marrom (failed star), fraca o suficiente para se observar o planeta (brilho da estrela não ofusca!).



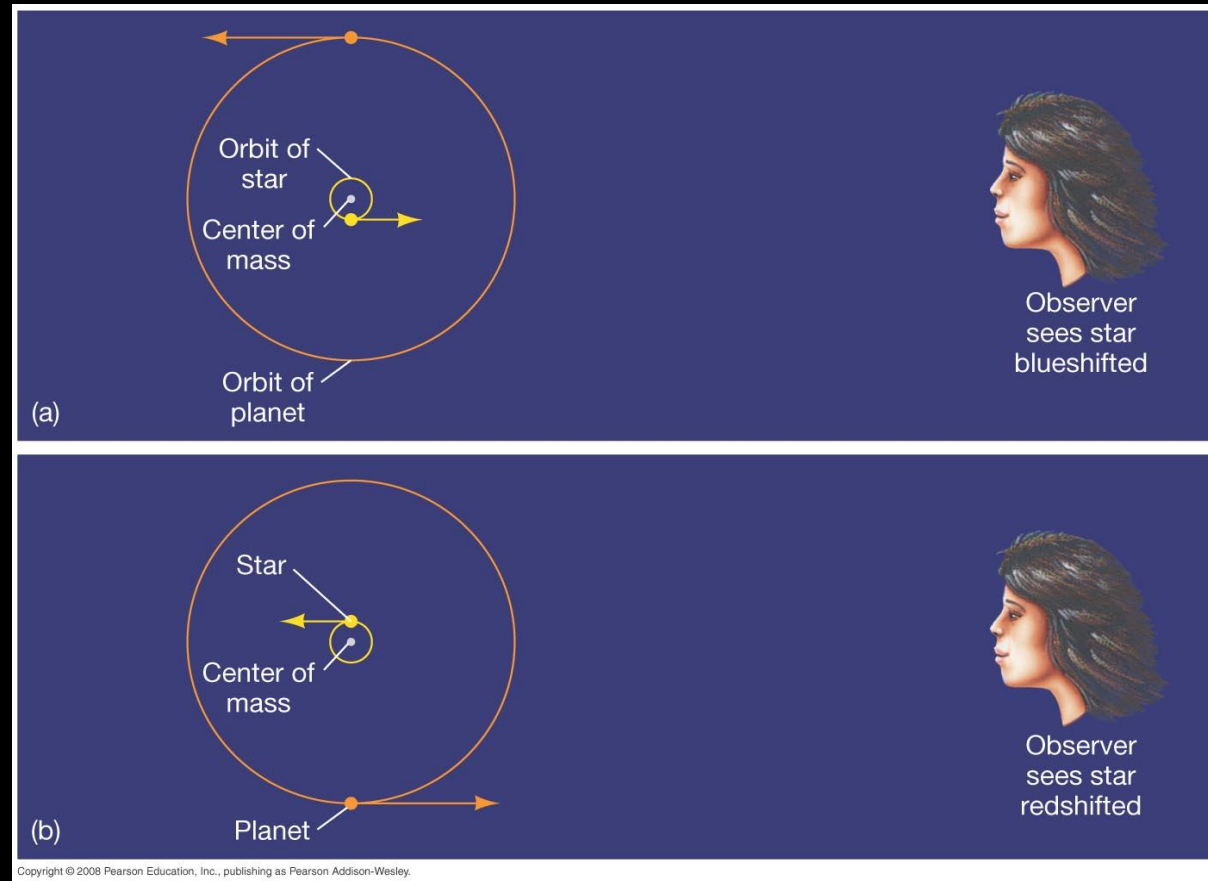
Medidas indiretas: análise da luz da estrela

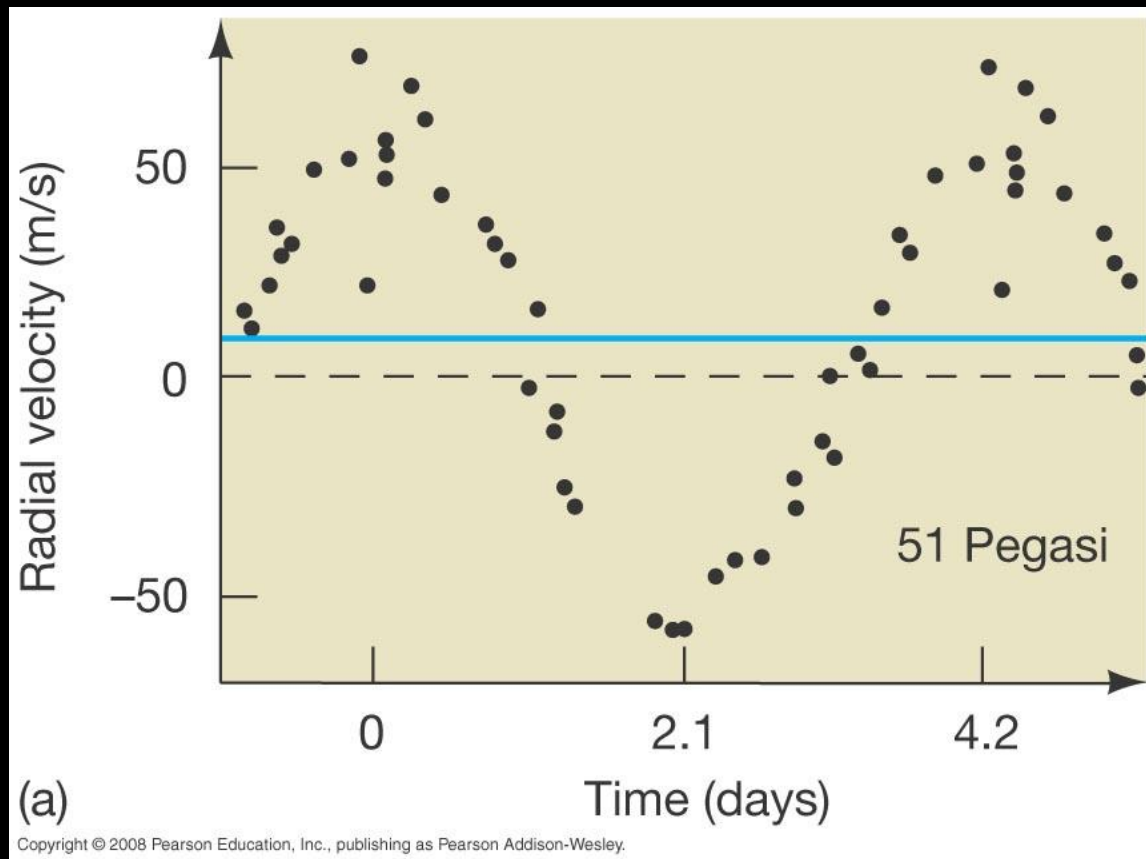
VARIAÇÕES NA VELOCIDADE RADIAL DE ESTRELAS

EFEITO DOPPLER

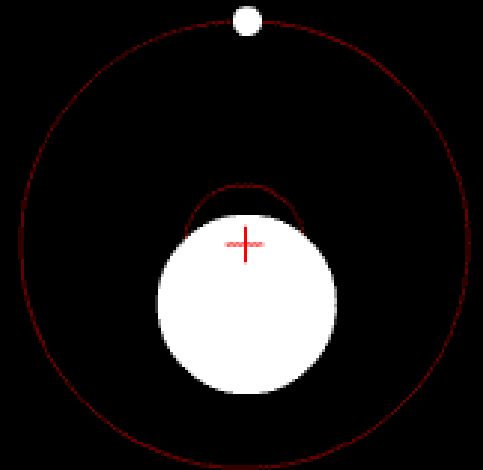


Velocidade radial:
componente da
velocidade da estrela
paralela a nossa linha
de observação





Flutuação na v_{rad}
do Sol devido à
presença de Júpiter
12 m/s



(a) Variação na velocidade radial da estrela 51 Pegasi (estrela gêmea do Sol – $1M_{\odot}$). $v_{\text{rad}} = \pm 50$ m/s. Período orbital $\sim 4,2$ dias (1994) $\Rightarrow$ fornece um limite inferior para a massa m do planeta.

RECEITA DE CÁLCULO para estimar a massa de um exoplaneta

1) LEI DE KEPLER

$$(M_{\star} + m_{plan}) = \frac{a^3}{P^2}$$

Tendo o P observado, estimativa de a (semieixo maior da órbita).

2) LEIS DE NEWTON

$$F_c = F_G$$

$$\frac{\cancel{m_{plan}} V_{plan}^2}{a} = \frac{G \cancel{m_{plan}} M_{\star}}{a^2} \Rightarrow V_{plan}^2 = \frac{G M_{\star}}{a}$$

Estimativa de V_{plan} orbital do planeta

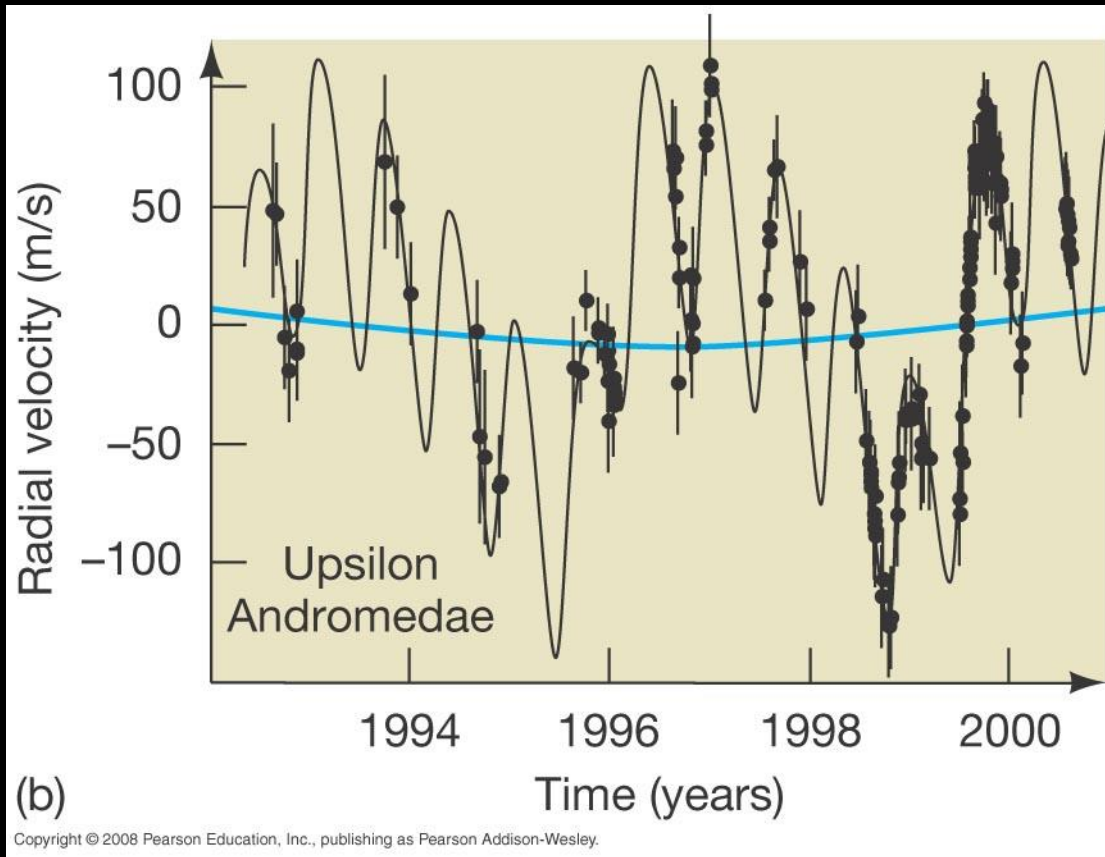
Estimativa da massa do planeta:

3) CONSERVAÇÃO DO MOMENTUM LINEAR

$$p_{\star} = p_{plan} \Rightarrow M_{\star} V_{\star} = m_{plan} V_{plan}$$

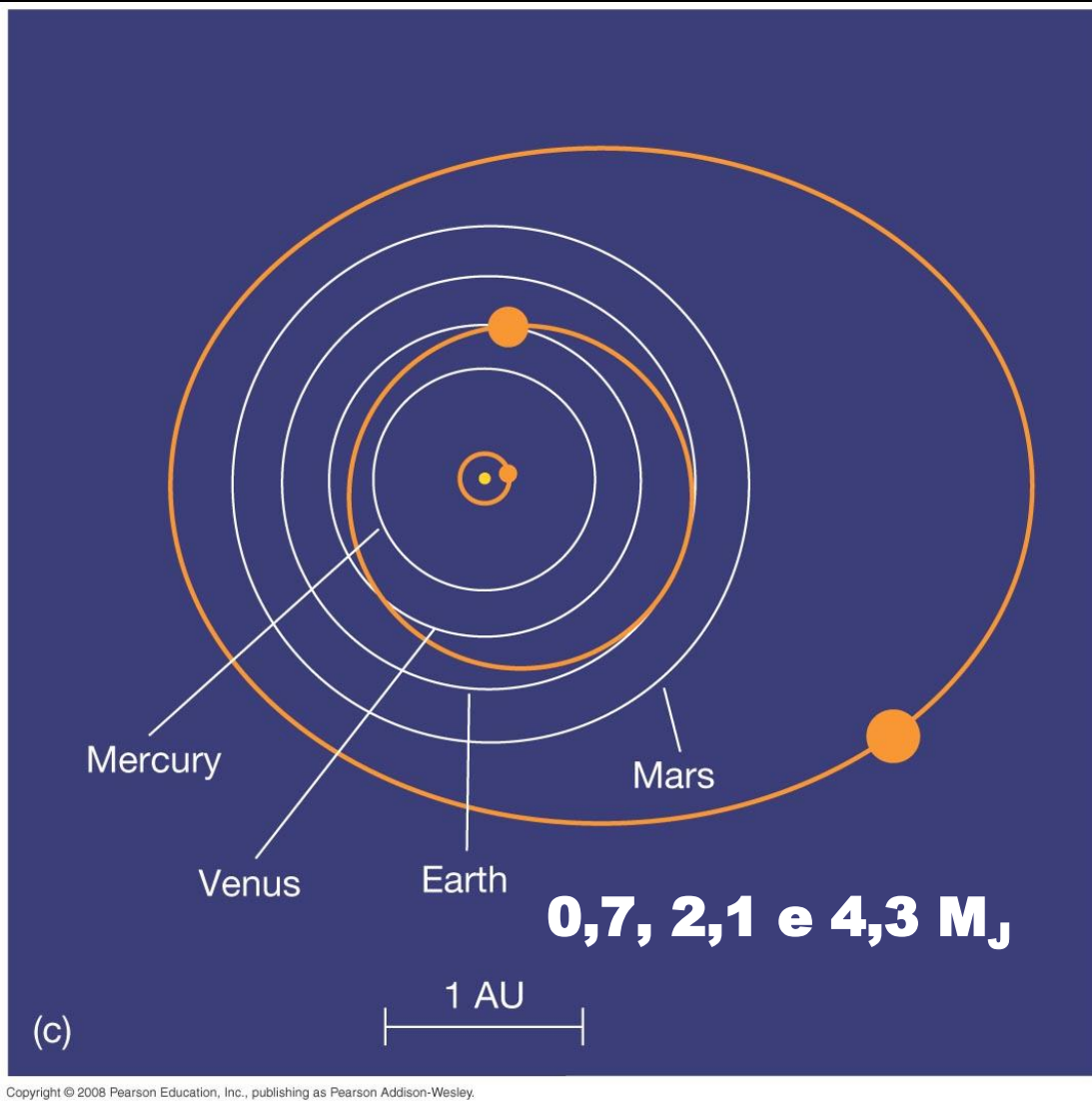
LIMITE INFERIOR DE MASSA: medimos $V_{rad\star}$ = a componente da velocidade orbital na linha de visada $V_{\star} \times \sin\theta$

$$m_{plan}^{(lim\ inf)} = \frac{M_{\star} V_{rad\star}}{V_{plan}}$$



(b) Variação na velocidade radial da estrela Upsilon Andromedae (outra 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.

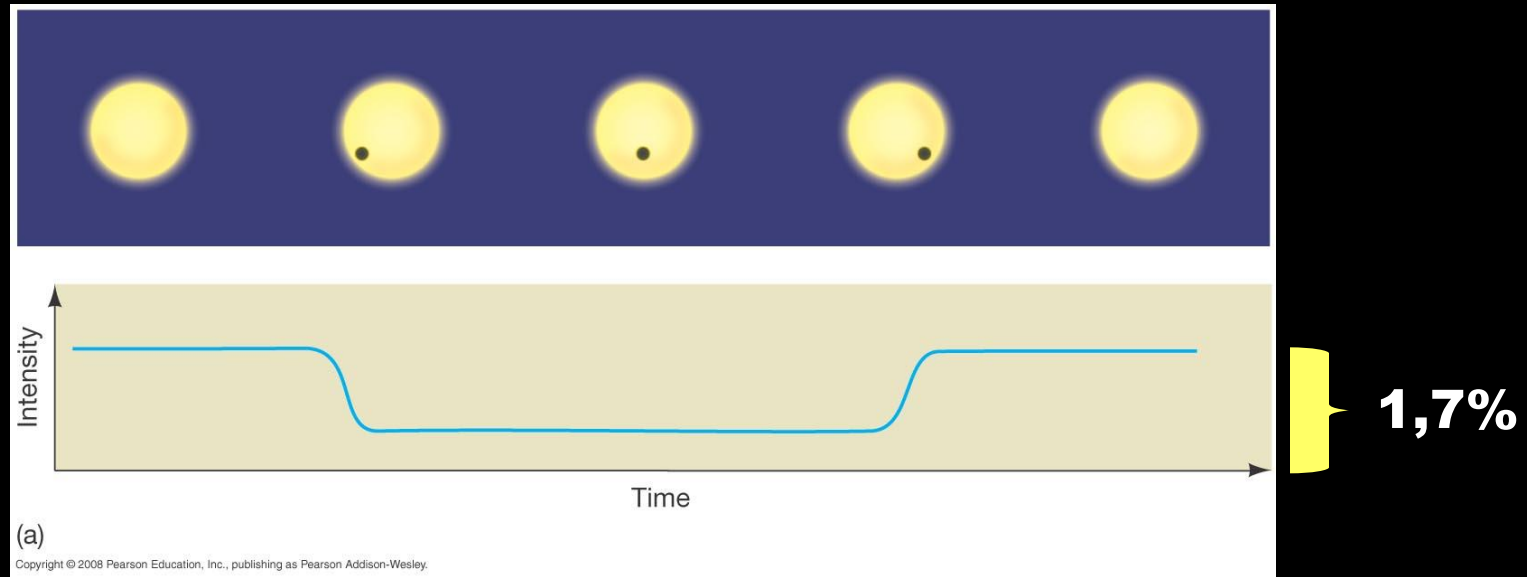
Comparação com os 3 planetas do sistema Upsilon Andromedae



Até hoje (07/09/2023) foram detectados 1063 sistemas extra-solares confirmados 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 $\Rightarrow$ **o planeta orbita a uma distância de 7 milhões de km (0,05 UA) e massa inferior estimada é de $m_{\text{plan}} = 0,6 M_J$**
- A queda no brilho ocorre a cada 3,5 dias.
- **ÚNICO MÉTODO QUE ESTIMA O TAMANHO DO PLANETA.**

Densidade = 200 kg/m^3 ($0,2 \text{ g/cm}^3$) $\Rightarrow$ planeta gasoso gigante e quente (orbita bem próximo a estrela)

TRÂNSITO

Este método funciona apenas com uma pequena porcentagem de planetas cujos planos orbitais estejam perfeitamente alinhados com nossa linha de visada, mas pode ser aplicado mesmo a estrelas muito distantes.

***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

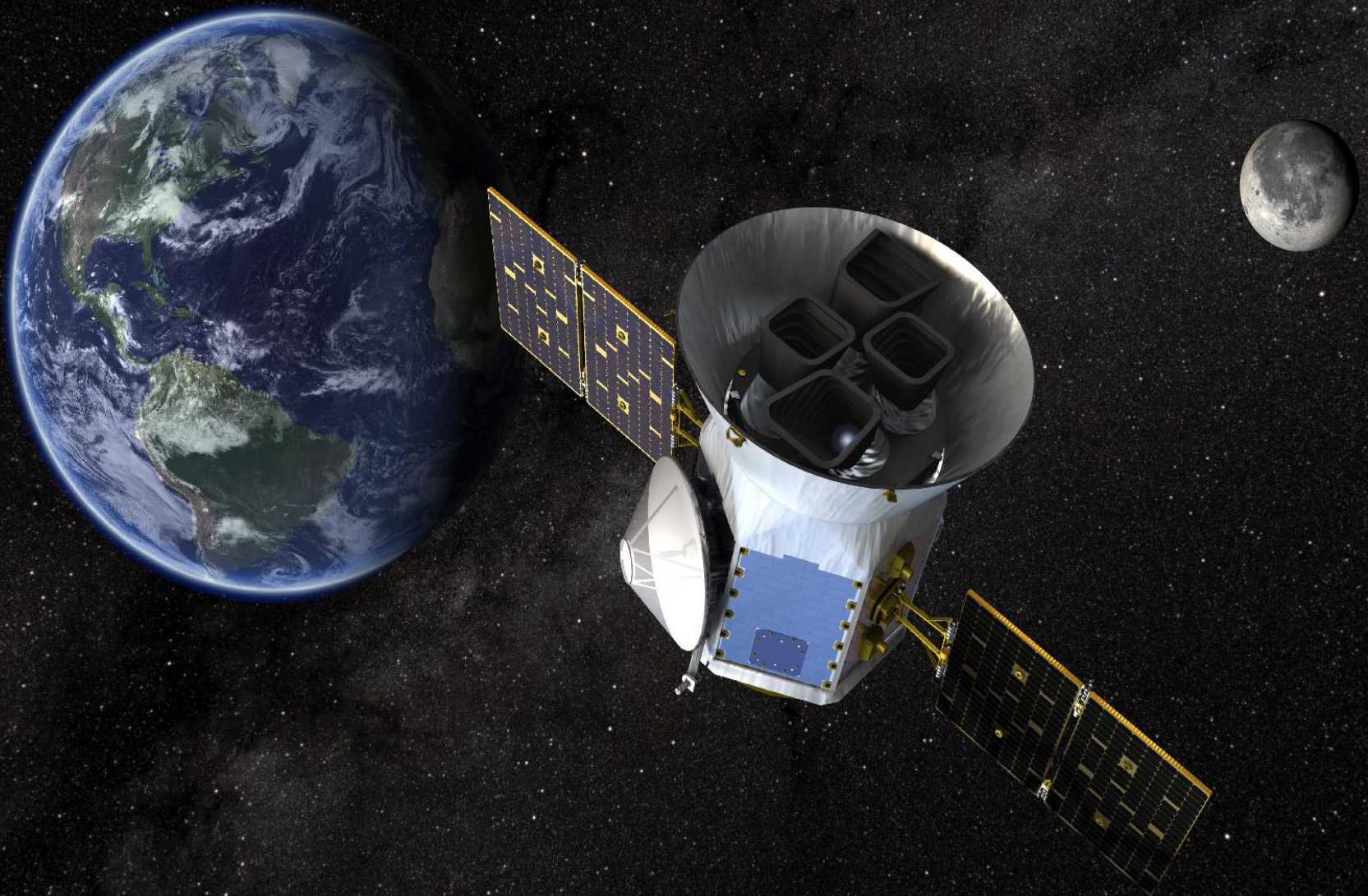
Sonda Kepler (2009-final de outubro de 2018): órbita heliocêntrica

2778 planetas foram confirmados, 1984 a serem confirmados.

811 são ~ do tamanho da Terra ($0,7_{\oplus}$ a $1,25_{\oplus}$)



O último a ser lançado : TESS
Transiting Exoplanet Survey Satellite (Julho 2018)



385 novos planetas confirmados

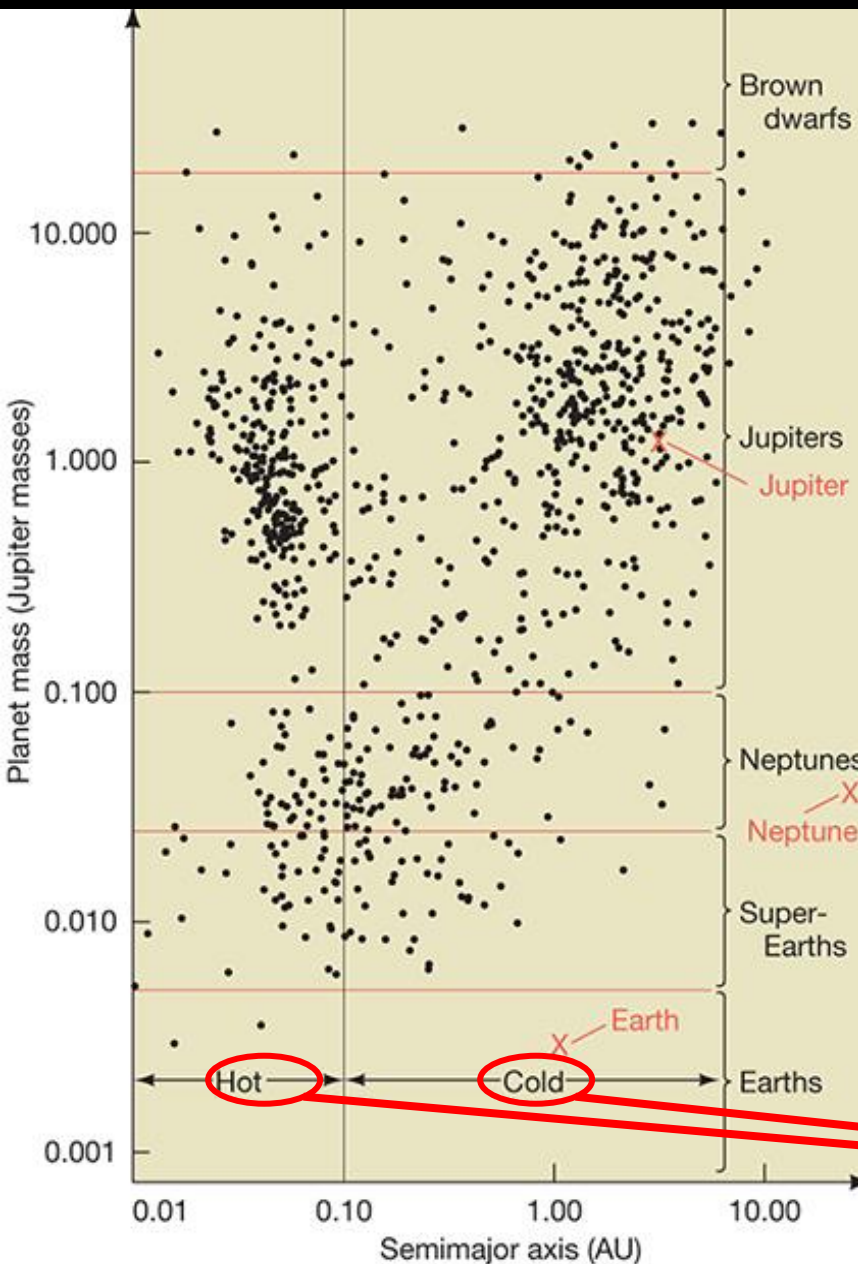
PROPRIEDADES DOS EXOPLANETAS

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

**Até hoje (07/09/23) : 5514 planetas extra-solares e
2335 sistemas múltiplos confirmados**

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

PLANETAS TIPO JÚPITER, NETUNO, SUPER-TERRA E TERRA



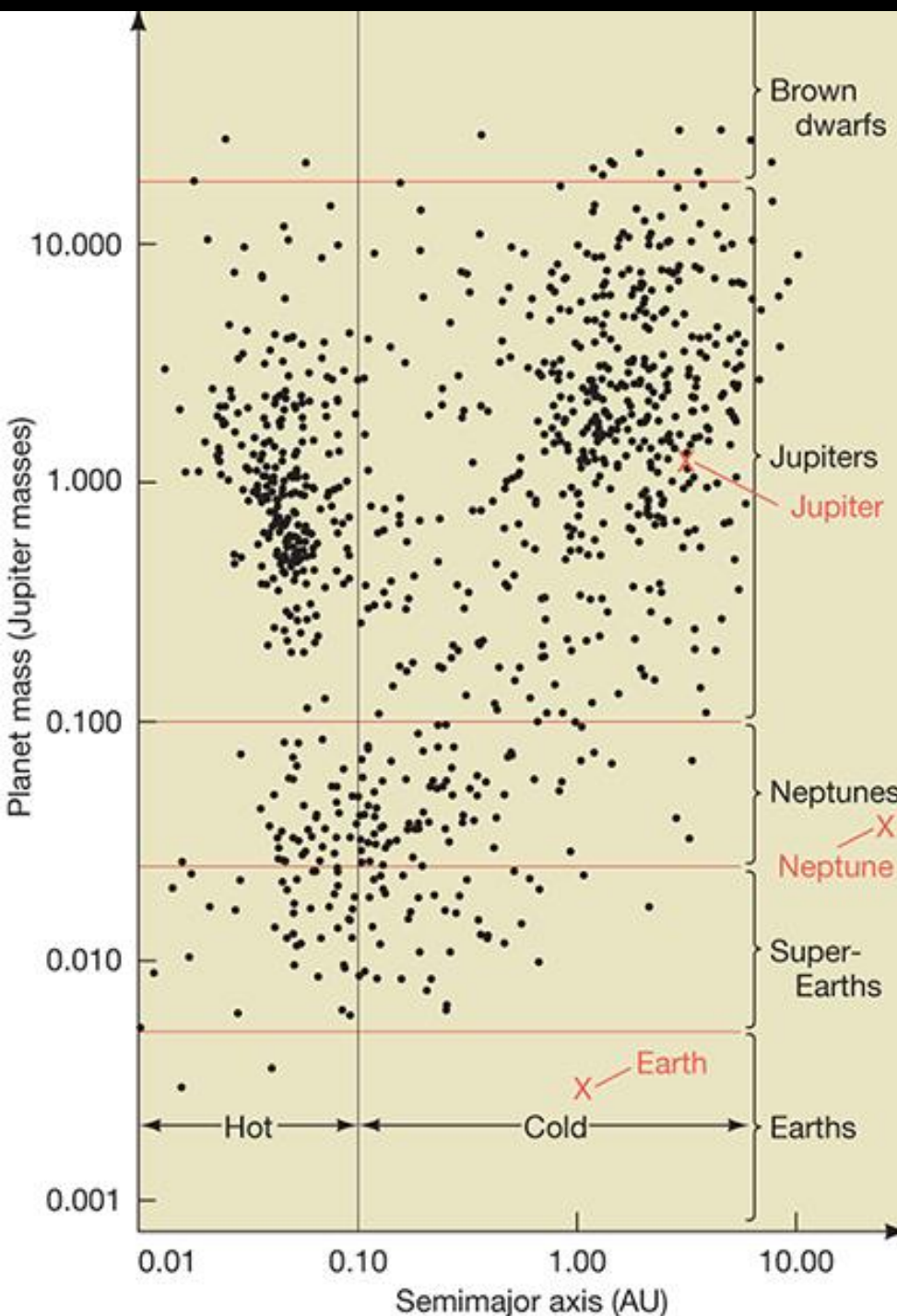
Massas determinadas por v_{rad} :

400 planetas extra-solares

Terminologia:

- Jupiters: planetas gasosos massivos
 - Jupiter quente: encontra-se próximo a estrela - mãe: atmosfera turbulenta
 - Netunos: 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 nebuloso, tornando-se assim um gigante gasoso.**
- Terras : planetas com $M < 2 M_{\oplus}$

Baseado na distância

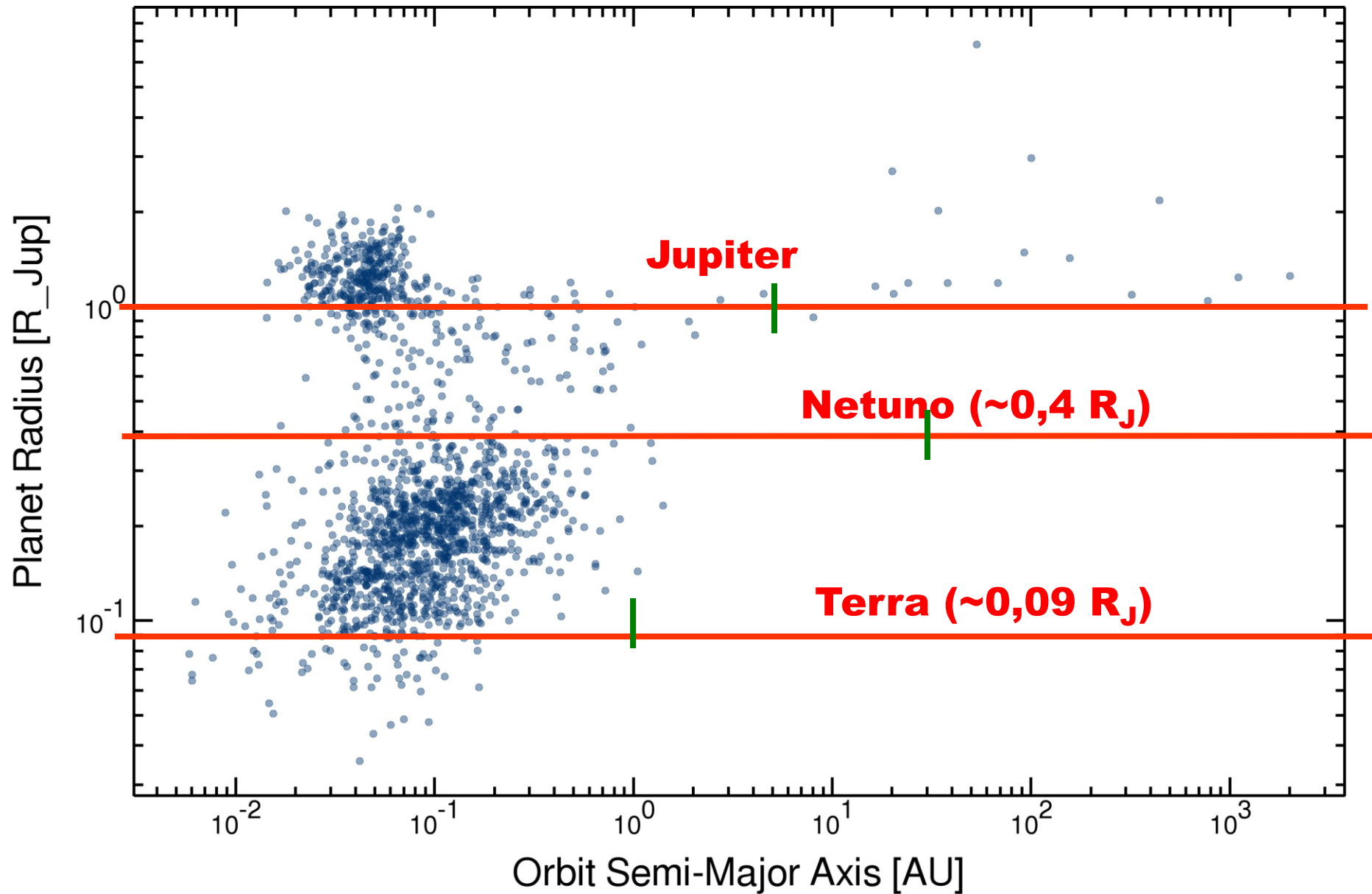


Método de v_{rad} não pode medir variações na estrela devido a órbitas de planetas muito pequenos ou muito distantes (mesmo serve para trânsito) .

ATENÇÃO: BIAS OBSERVACIONAL

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

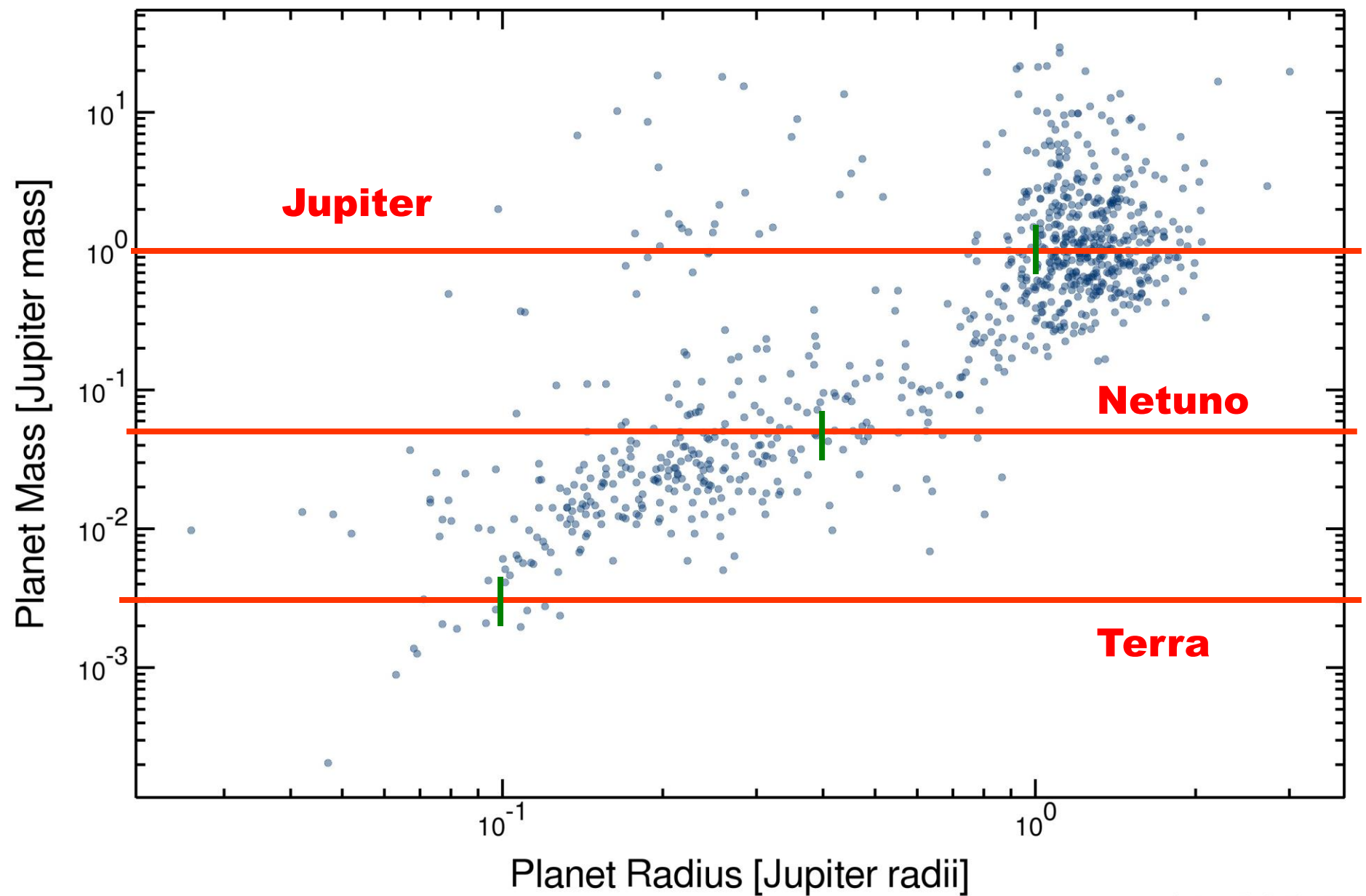
Confirmed Planets



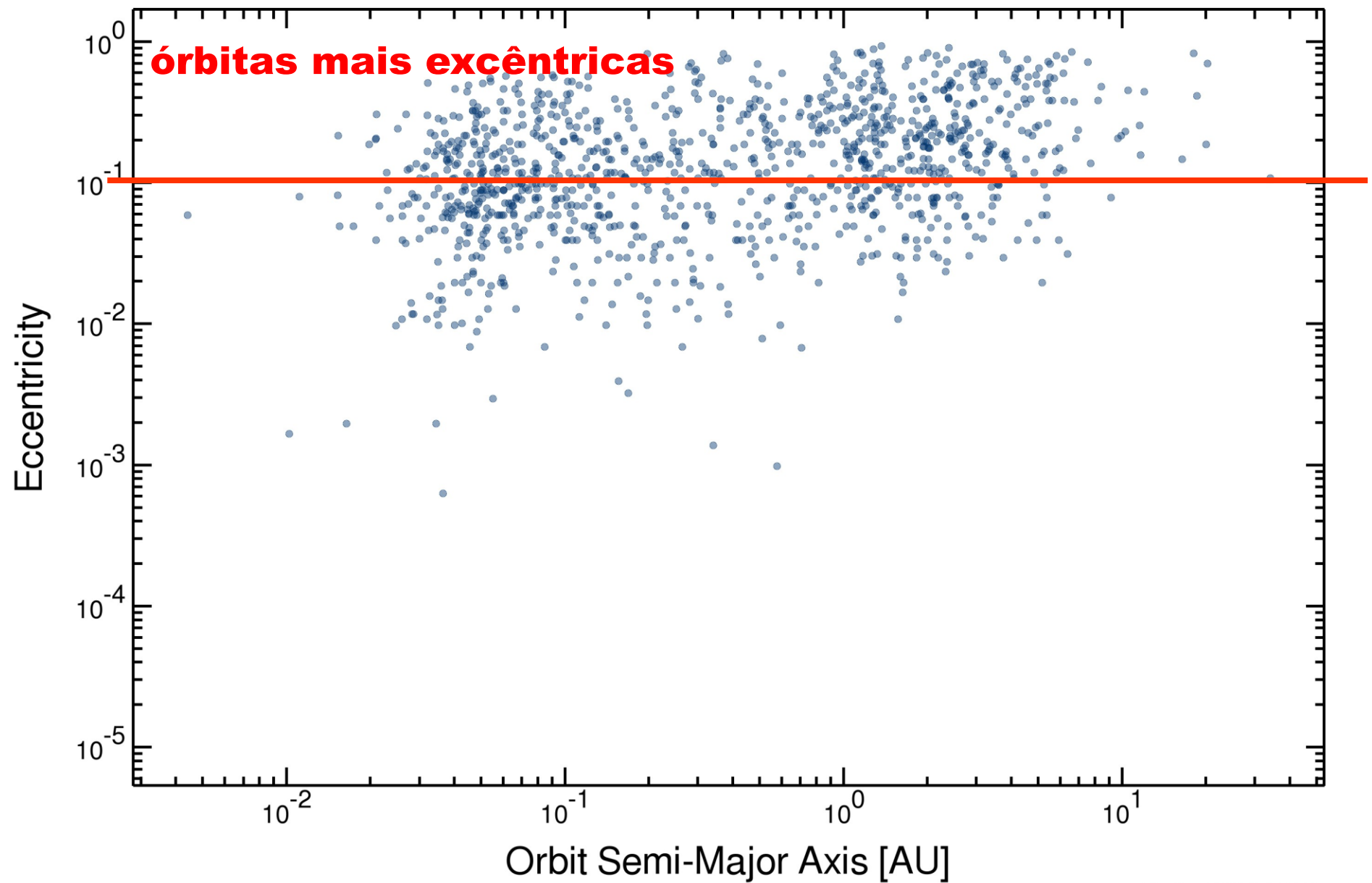
Thu Sep 7 17:02:32 2023

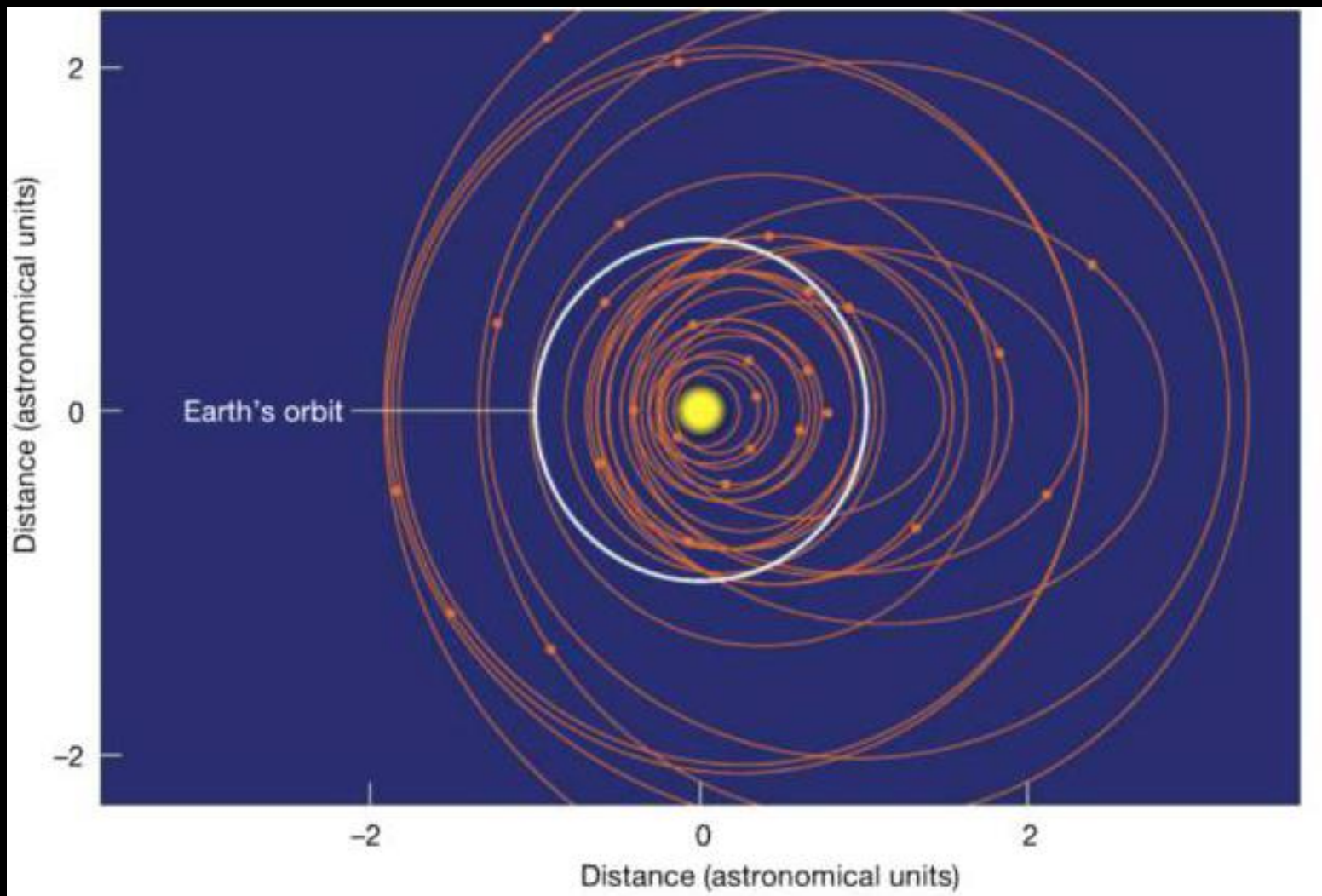
Plot dos exoplanetas confirmados

Confirmed Planets



Confirmed Planets





Planetas de massa $\sim M_J$.

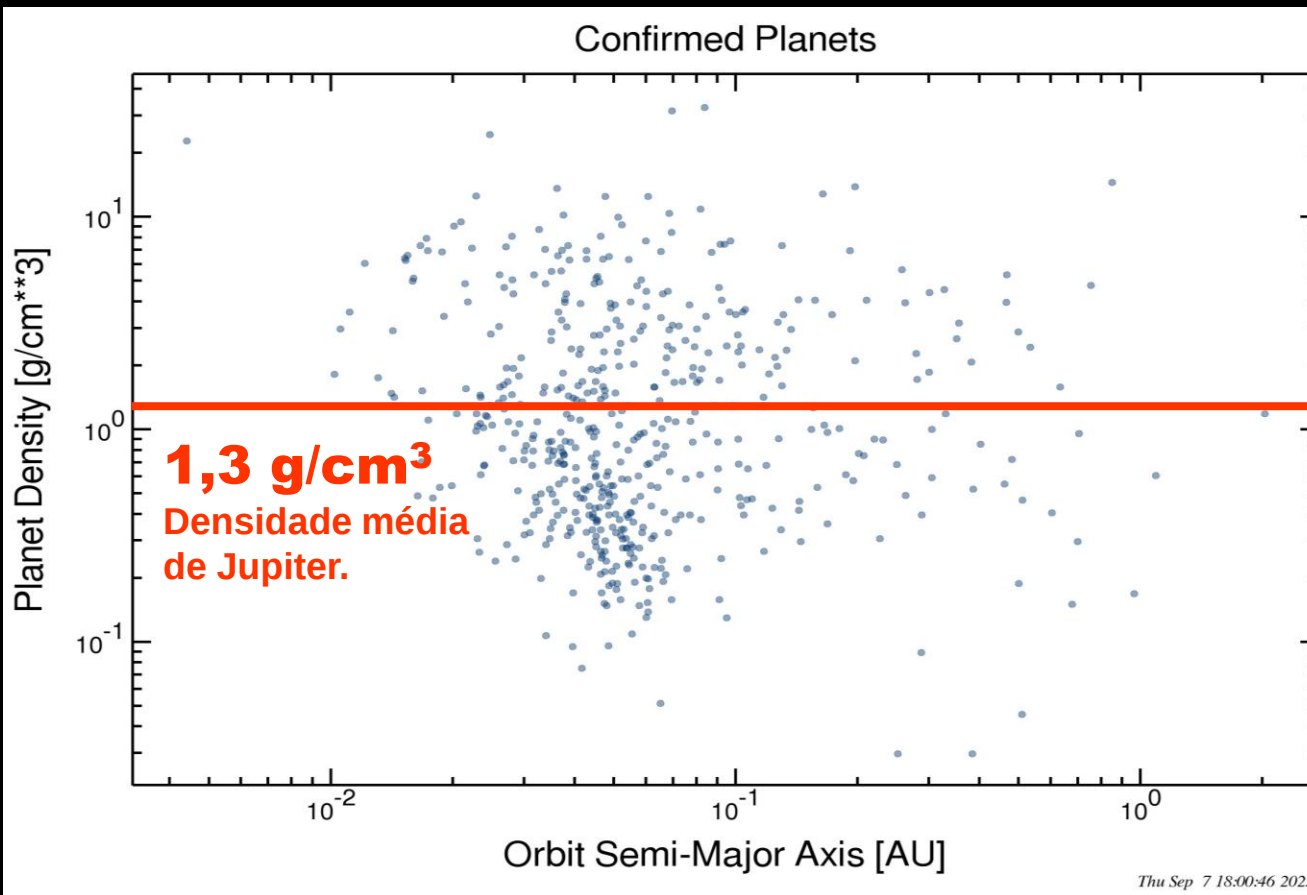
Órbitas de planetas extra-solares (muitos estão a 0,05 UA da estrela).

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 



Thu Sep 7 18:00:46 2023

PROBLEMAS:
Densidades muito baixas entre $1,3 < \rho < 0,2 \text{ g/cm}^3$
Inconsistentes com modelos teóricos:
menor do que densidade mais leve de puro H + He!!!

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS EXOPLANETAS

Possível explicação: planetas gasosos muito próximos as estrelas $\Rightarrow$ calor e efeitos de maré fizeram com que o tamanho destes planetas ficassem maiores do que o normal $\Rightarrow$ **densidades menores**

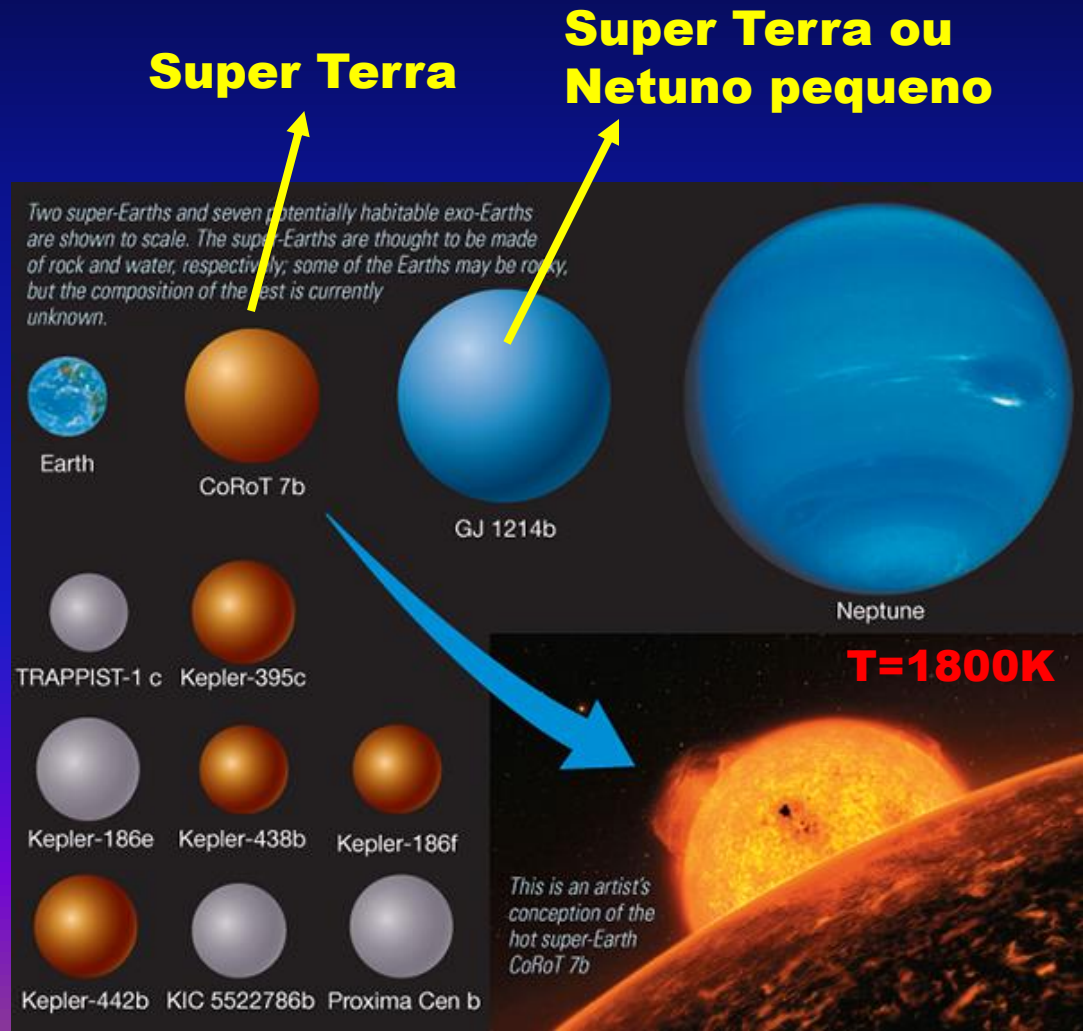
	Dens. g/cm ³
Sol	1,410
Mercúrio	5,4
Vênus	5,2
Terra	5,5
Lua	3,3
Marte	3,9
Ceres (Planeta anão)	2,7
Júpiter	1,3
Saturno	0,7
Urano	1,3
Neptuno	1,6
Plutão (Planeta anão)	2,1
Hale-Bopp (cometa)	0,1

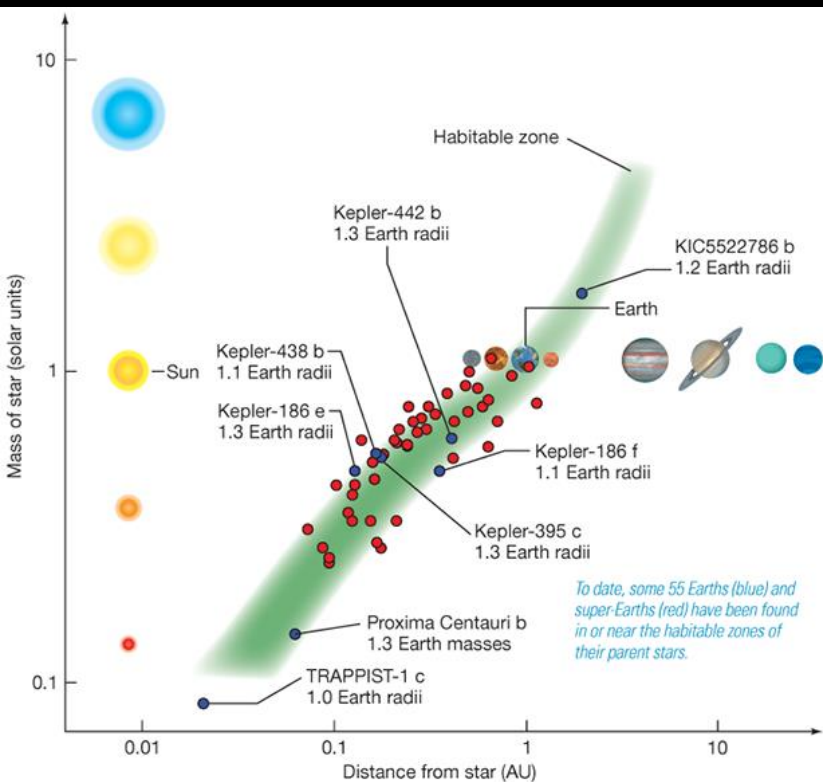
Centenas de Terras e Super - Terras tem M e R conhecidos, com densidades médias de $0,4 < \rho < 12 \text{ g/cm}^3$.

- Menor limite de densidade: anões gasosos: núcleo de rocha/gelo e atmosferas de H + He ?
- Maior limite de densidade: composição rochosa: terras comprimidas?

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

GJ 1214b: $6,3M_{\oplus}$ e $2,9R_{\oplus} \Rightarrow$
 $\rho = 1,5 \text{ g/cm}^3$ (Netuno pequeno) núcleo de água/gelo cercado por uma atmosfera de H + He

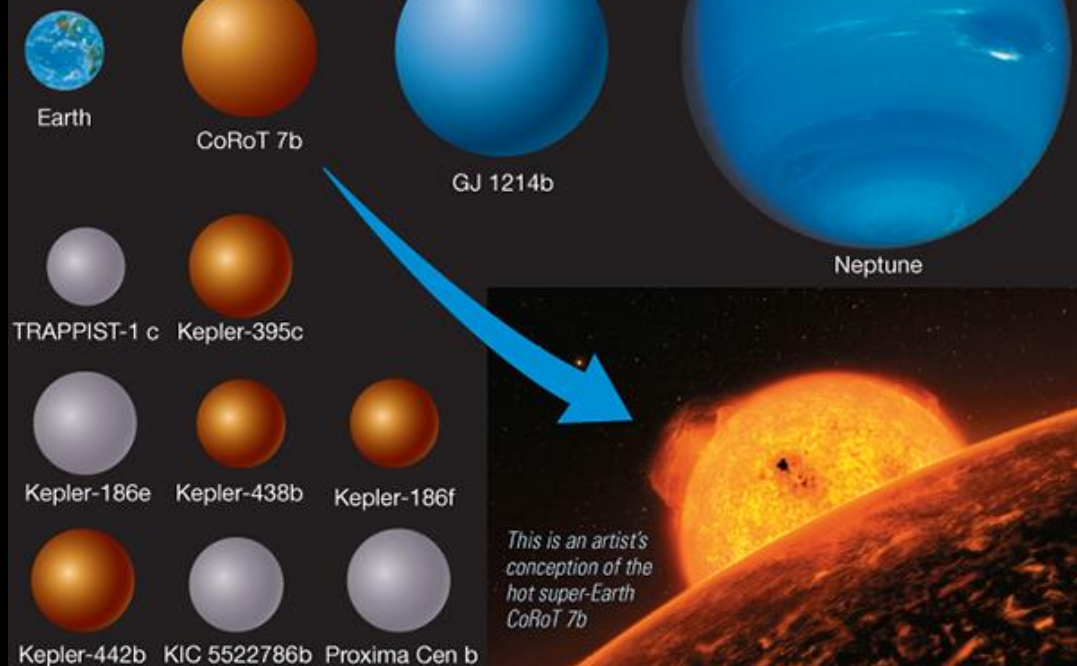




Marrom : rochoso
Azul: gasoso e gelo no núcleo

7-8 planetas confirmados pela Kepler que estão na zona habitável: distantes o suficiente da estrela para possuir água líquida em suas superfícies.

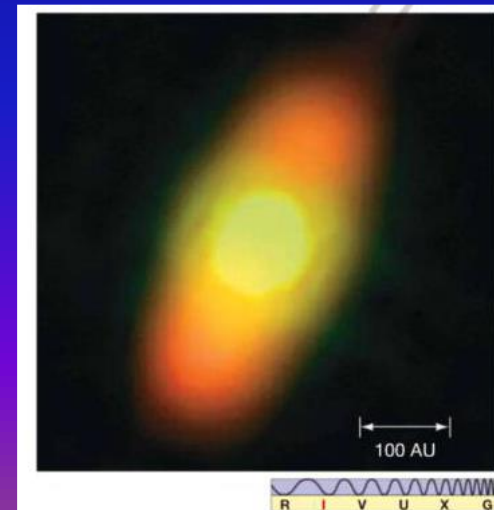
Two super-Earths and seven potentially habitable exo-Earths are shown to scale. The super-Earths are thought to be made of rock and water, respectively; some of the Earths may be rocky, but the composition of the rest is currently unknown.



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 normal a 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

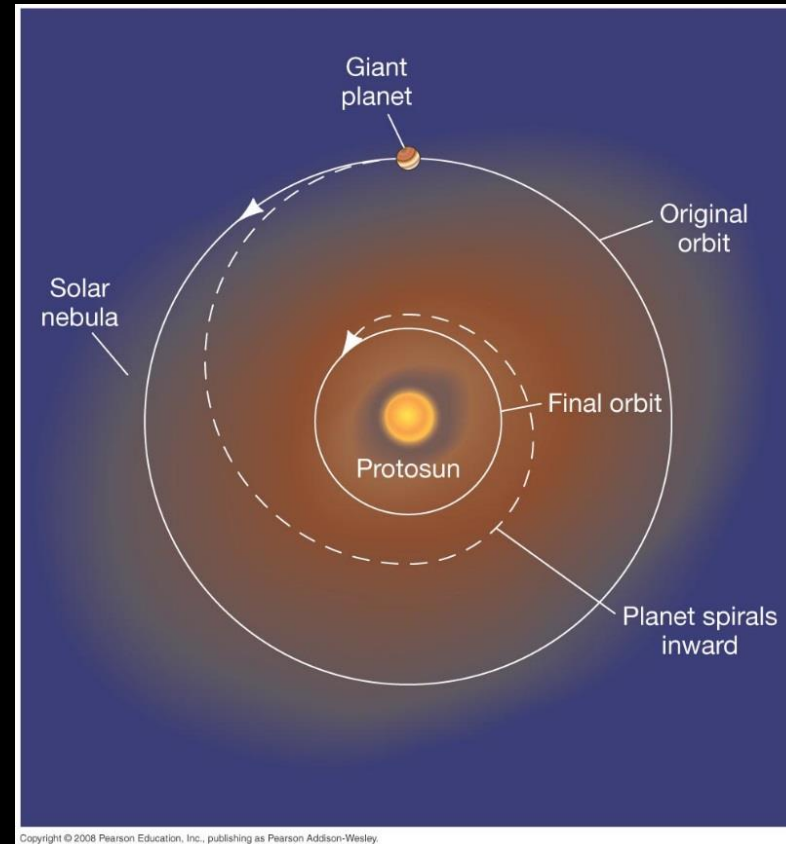


Como se formam os planetas do tipo Júpiter quente, se a proximidade com a estrela faria este tipo de formação improvável?

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.

Este efeito continua até o disco começar a ser disperso pela estrela recém nascida. 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:

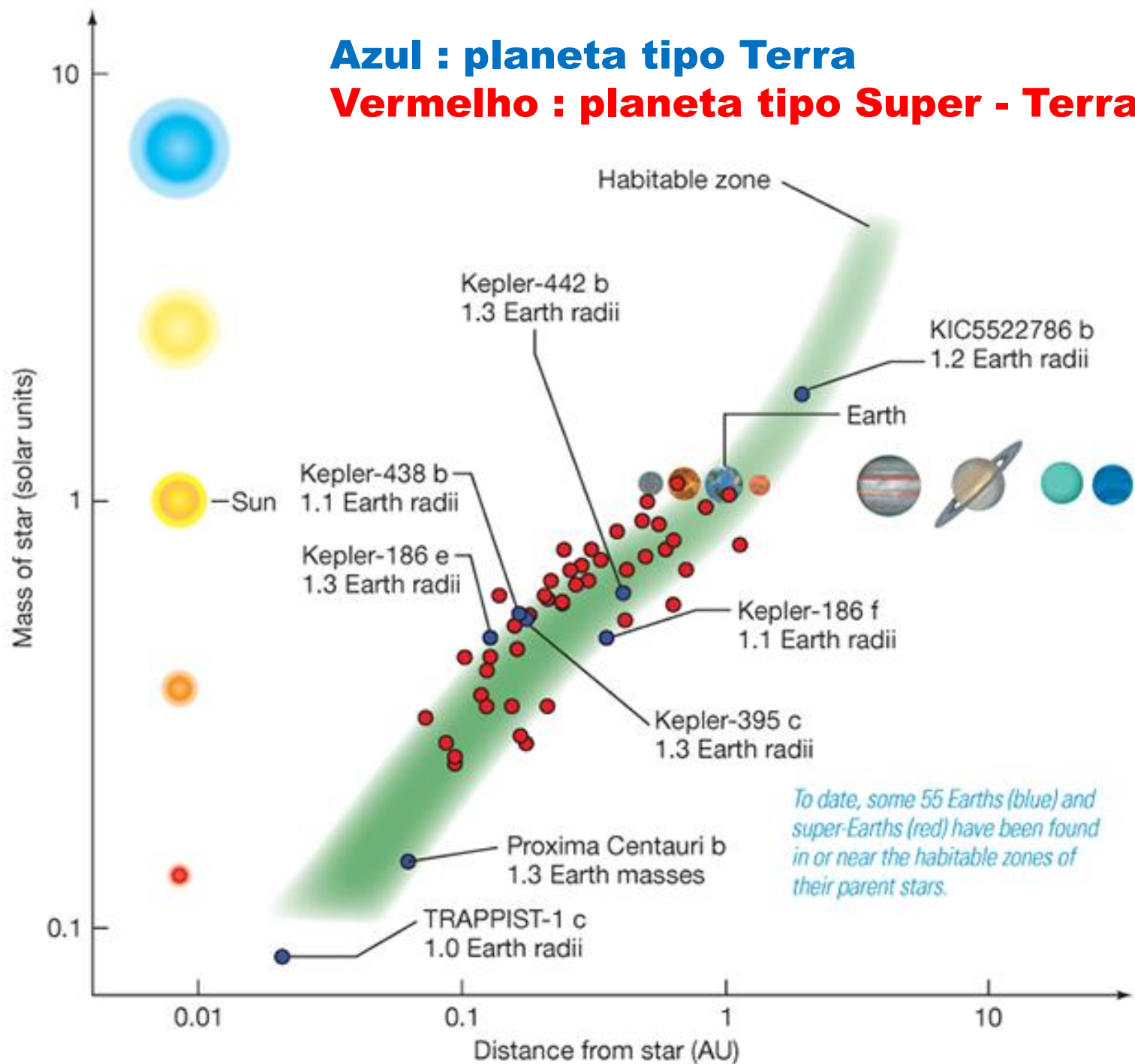
Existência de água líquida na superfície $\Rightarrow$ planeta na zona habitável $\Rightarrow$ T superficial entre 0 e 100° C.



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

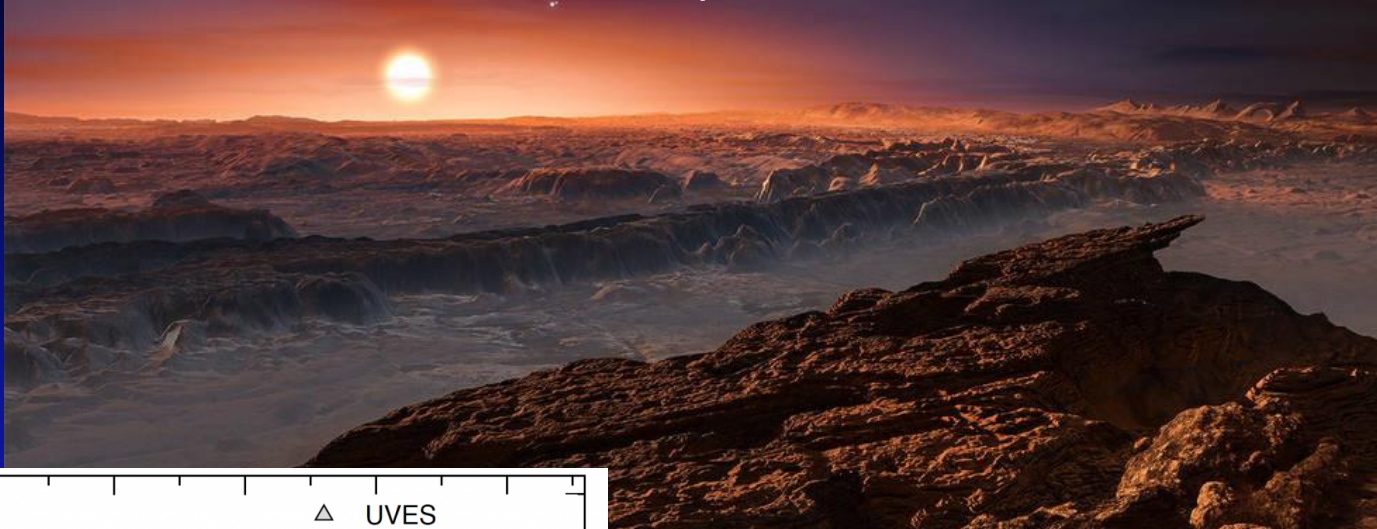
Azul : planeta tipo Terra

Vermelho : planeta tipo Super - Terra



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.



Próxima Centauri b

1,5 m/s

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

