

FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Contração Nebular

**Primeiro modelo de contração nebular
René Descartes (século XVII)**

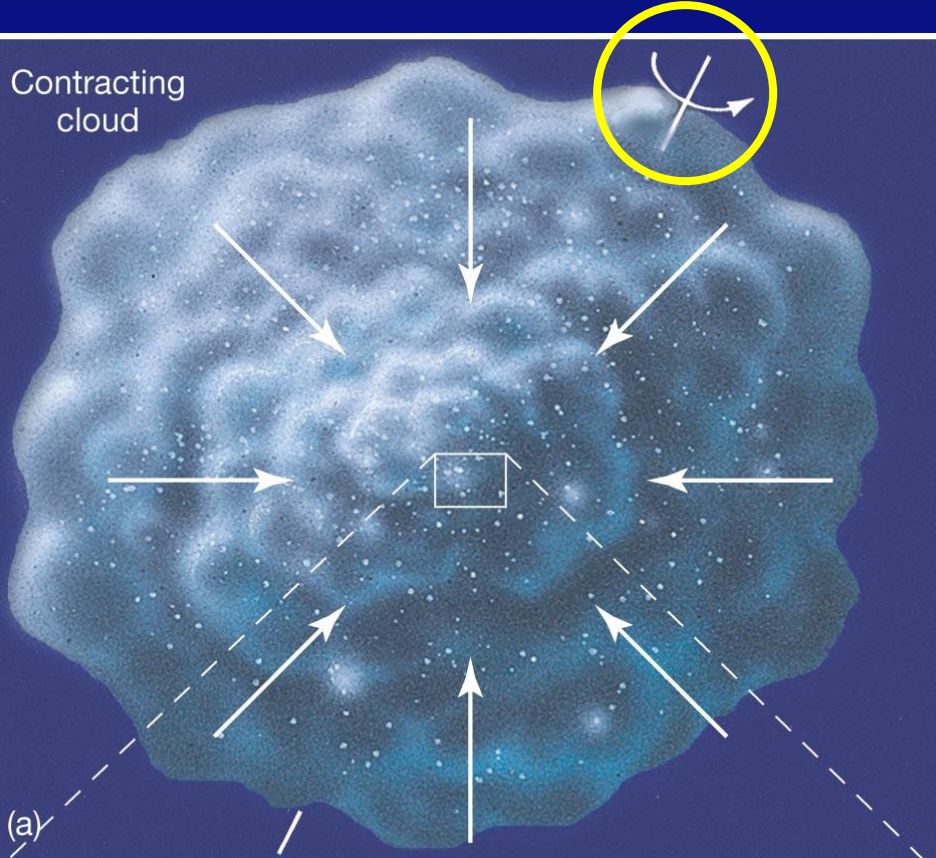
Nuvem grande de gás e poeira começa a se contrair sob a influência de sua própria gravidade ⇒ fica + densa e mais quente e eventualmente forma uma estrela

Enquanto o Sol se forma no centro mais quente e denso da nuvem, os planetas se formam nas regiões mais externas e frias ⇒ 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

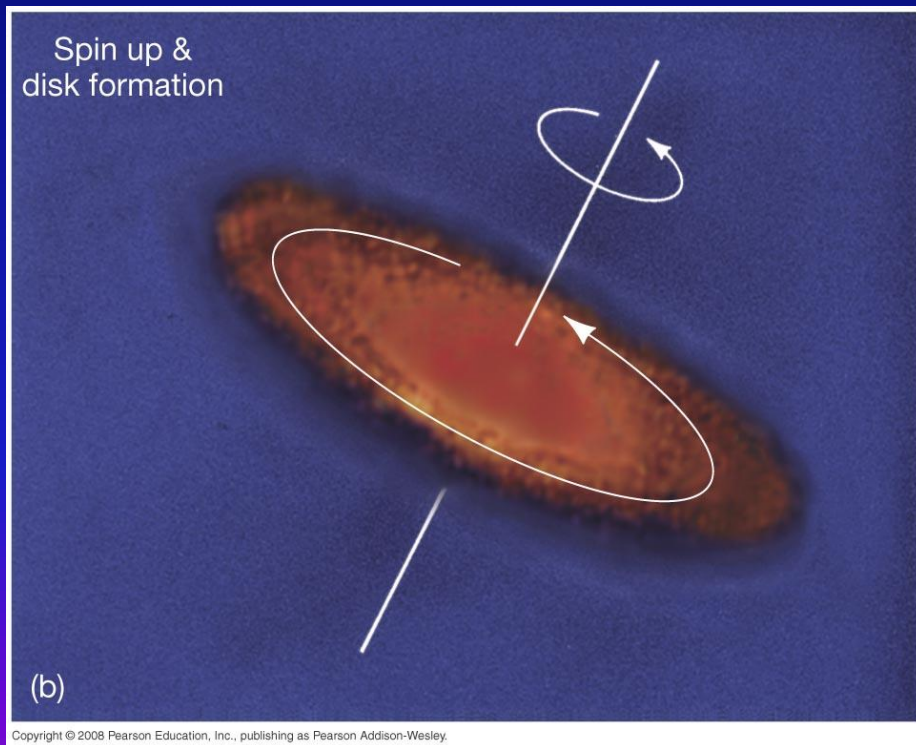
conservação de momentum angular :

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

FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Contração Nebular

Laplace (1796) \Rightarrow demonstração qualitativa



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

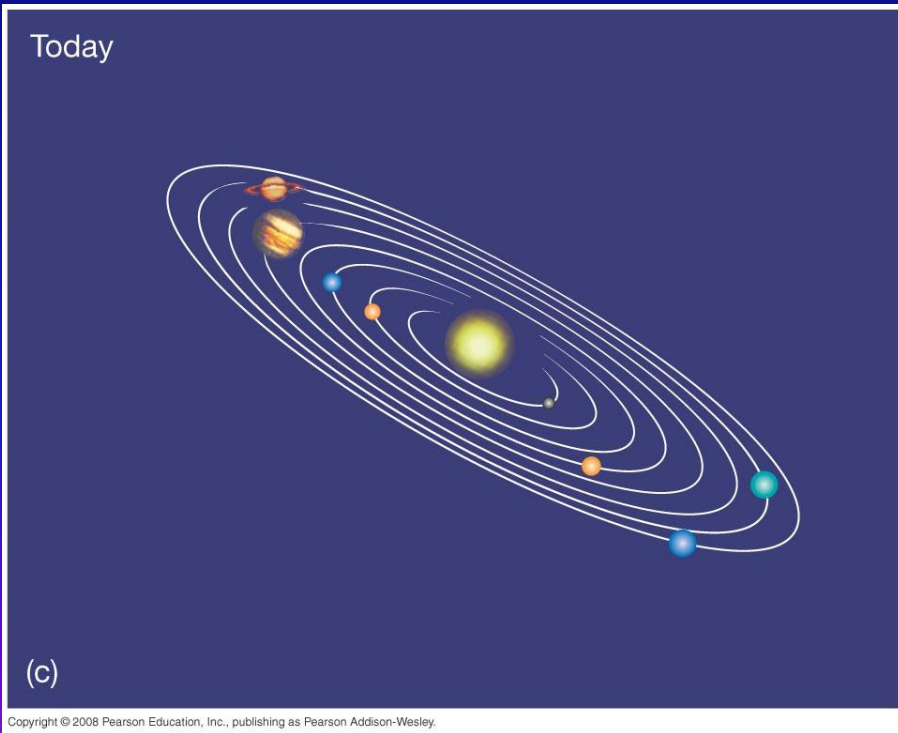
\Rightarrow **nuvem colapsa + rapidamente paralelamente ao eixo de rotação**

PANQUECA

FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

Contração Nebular

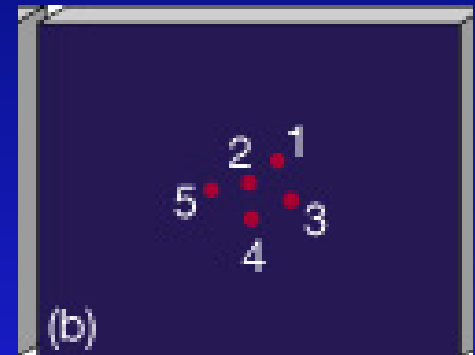
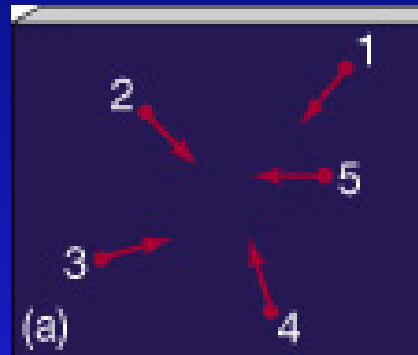
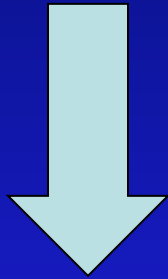
Laplace (1796) \Rightarrow demonstração qualitativa



FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR
Teoria Nebular

FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

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

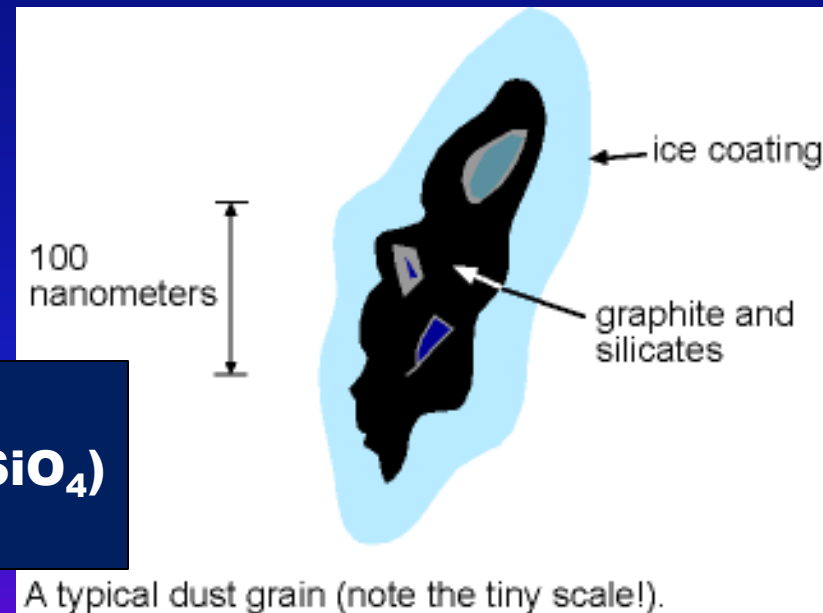


Teoria da Condensação

INGREDIENTE CHAVE: PRESENÇA DE POEIRA INTERESTELAR

POEIRA = grãos (aglomerados de moléculas) formados por:

- carbonáceos (ex. grafite)
 - silicatos (ex. Olivina (Mg^{2+} , Fe^{2+}) $_2\text{SiO}_4$)
- + cobertos com gelo**



Teoria da Condensação

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

Conversão de energia térmica (energia cinética) em energia radiante (fótons) no Infravermelho



Para excitar H ou He requer altas energias \Rightarrow T mais 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:** 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

RESFRIAMENTO DO GÁS INTERESTELAR OCORRE ATRAVÉS DE LINHAS METÁLICAS!

Mas... se o decaimento radiativo ocorre por meio de uma transição permitida \Rightarrow é muito provável que o fóton seja reabsorvido novamente pelo gás (re- excitação) \Rightarrow transição permitida é ineficiente para o resfriamento.

Em gases de baixíssima densidade tem uma probabilidade maior da ocorrência de transições proibidas (não seguem as regras de seleção):
ESTADOS META-ESTÁVEIS

Ex. Resfriamento de uma nuvem HI (H neutro)

Ion/Espectro	Transição	colisionador	$\Delta E/k$	$\lambda(\mu m)$
C⁺/[CII]	$^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$	H₂, H, e	92K	158
O⁰/[OI]	$^3P_1 \rightarrow ^3P_2$	H, e	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 (**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 (colapso gravitacional).

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

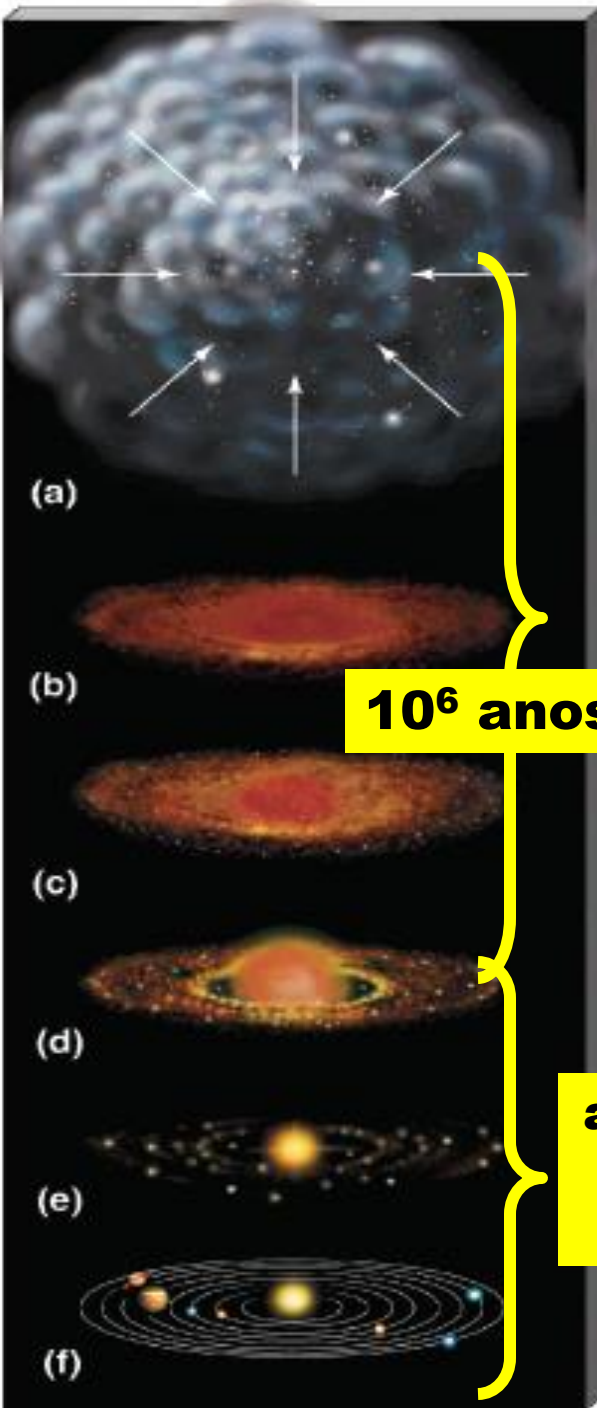
(d) A sequência das colisões forma corpos cada vez maiores (aglutinação de pequenos corpos que colidem), no centro forma-se o PROTOSOL.

(e) A ignição termonuclear do Sol (torna-se 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

10⁶ anos

alguns
10⁶
anos

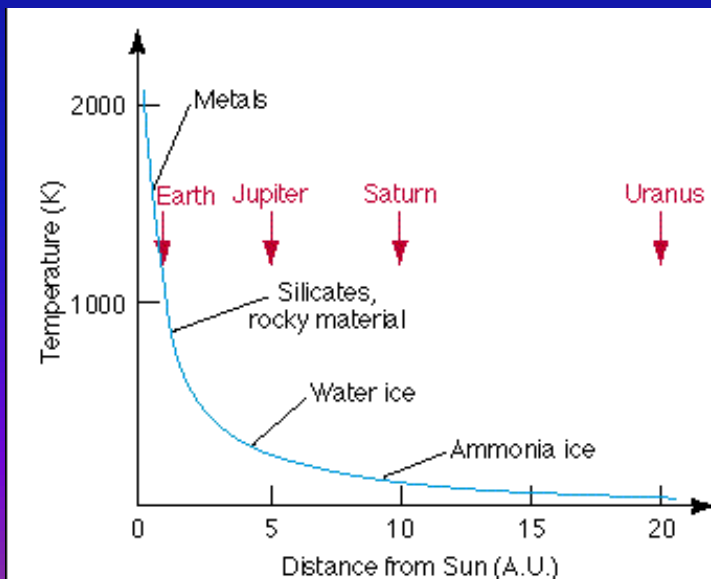


Idade do sistema solar = $4,5 \times 10^9$ anos

Sucesso do modelo de formação do sistema solar

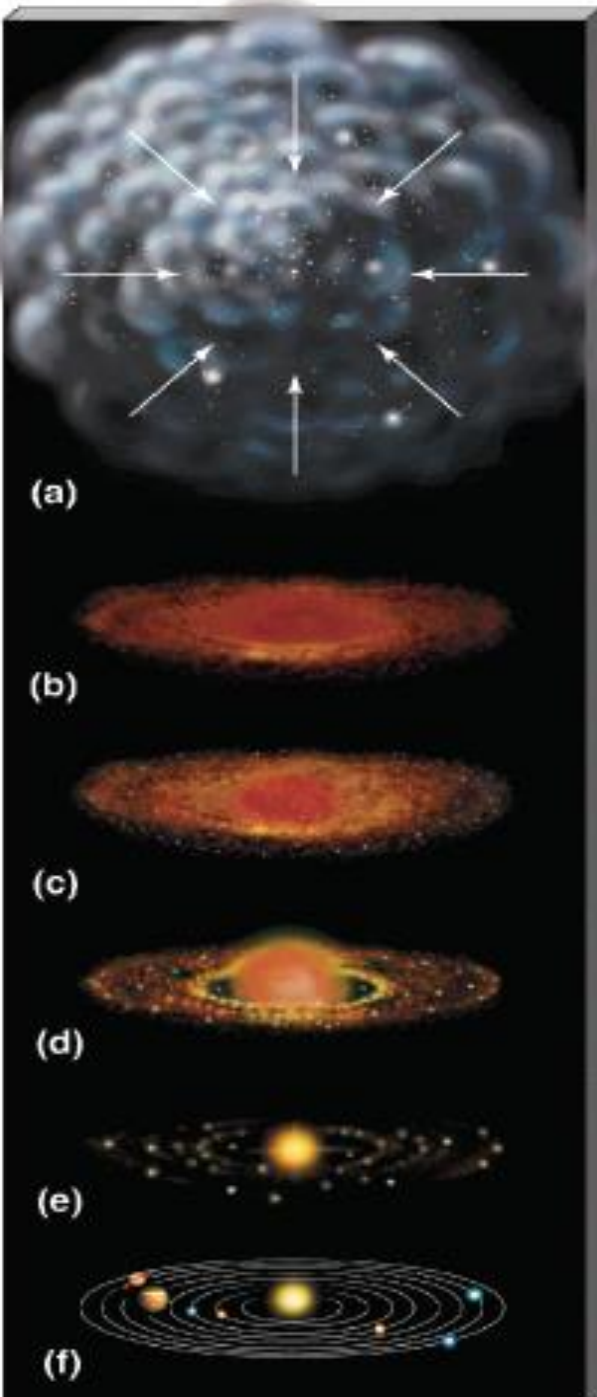
- as órbitas dos planetas e satélites seguem a rotação original da mesma nuvem de gás e poeira que os formou.
- as órbitas dos planetas principais estão ~ no mesmo plano (formação do disco)

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:

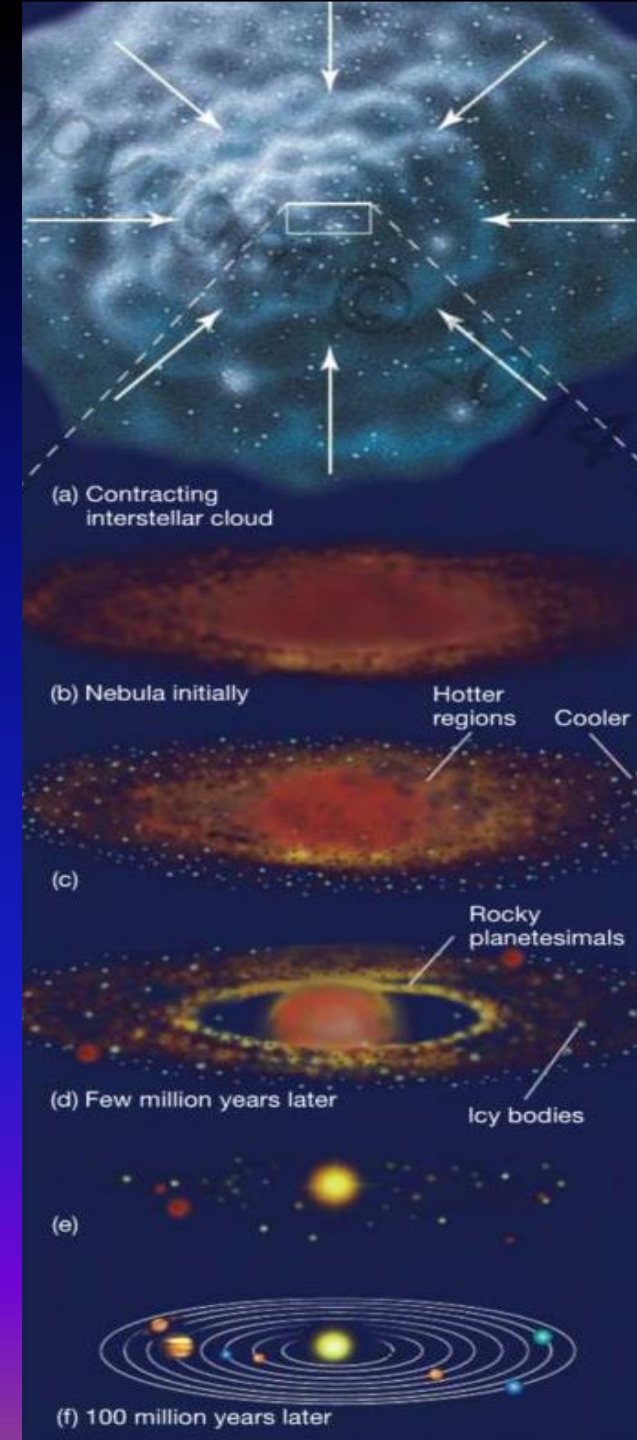
TEORIA DA CONTRAÇÃO NEBULAR + TEORIA DA CONDENSAÇÃO

Explicam as características do nosso sistema solar:

Órbitas dos planetas principais:

- 1. aproximadamente circulares**
- 2. 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.



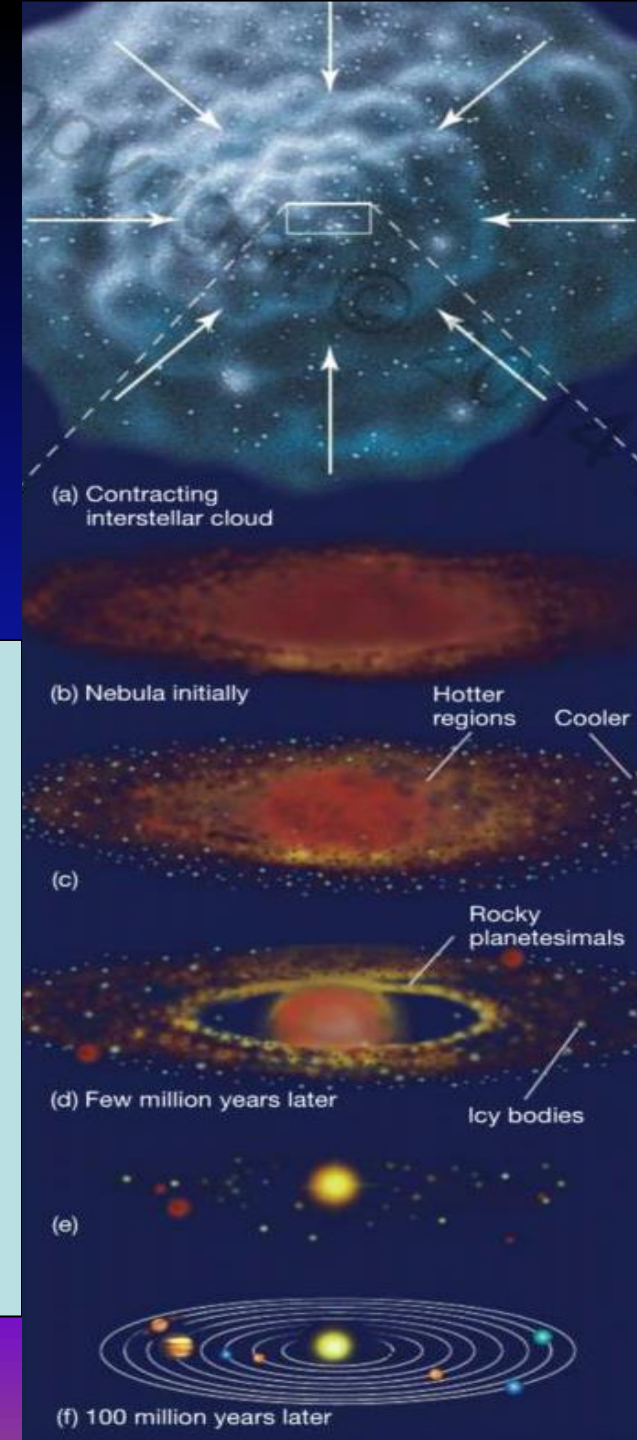
Resumindo:

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. Debris da fase de acreção + fragmentação: asteróides, 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:

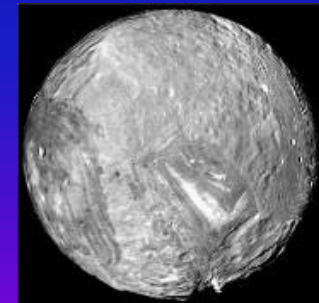
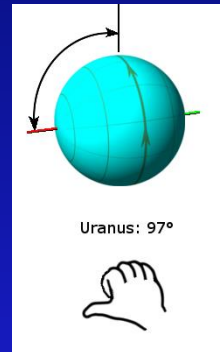
Exemplos:

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:

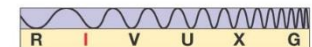
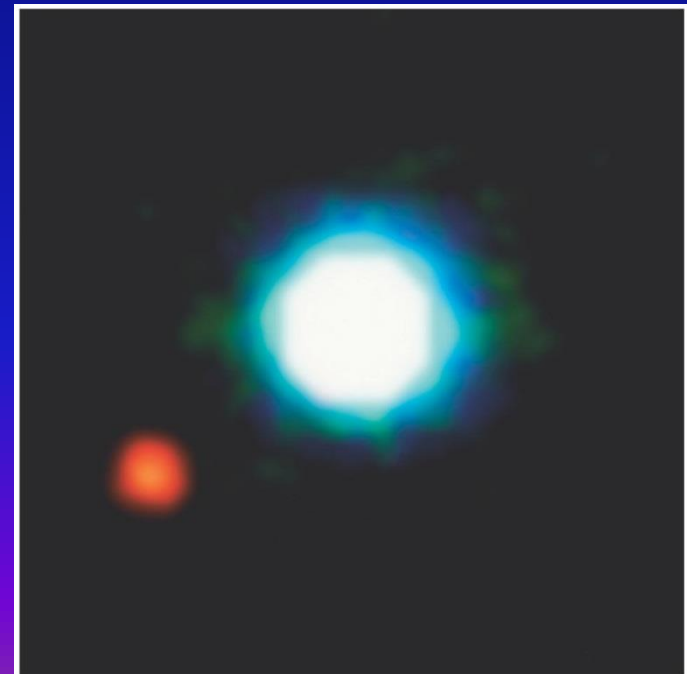
- ❖ 1 ou 2 protoplanetas podem ter colidido com Vênus na época de sua formação, dando origem à sua rotação muito lenta e retrógrada.
- ❖ o sistema Terra-Lua pode ter surgido da colisão entre a protoTerra e um objeto da ordem do tamanho de Marte.
- ❖ o eixo de rotação de Urano pode ter sido causado por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



A PROCURA DE PLANETAS EXTRASOLARES

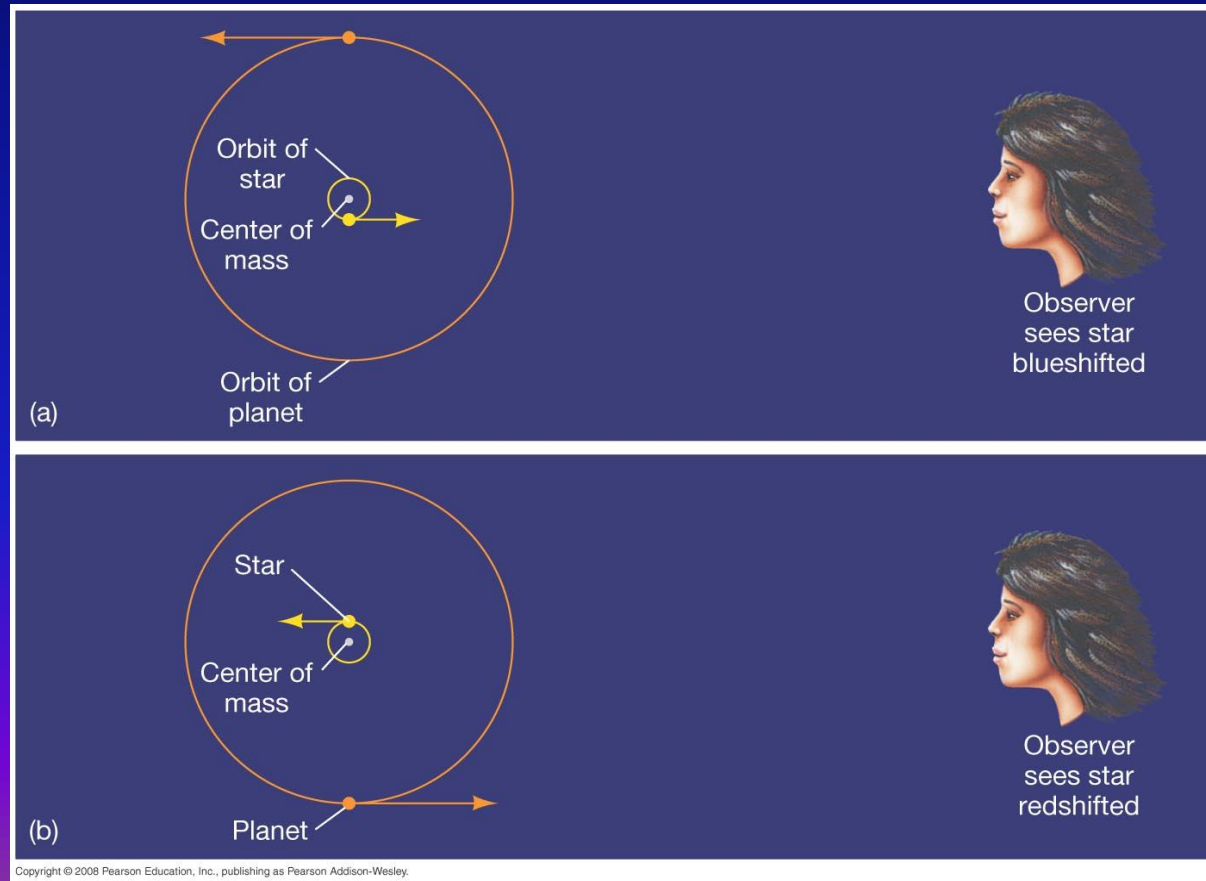
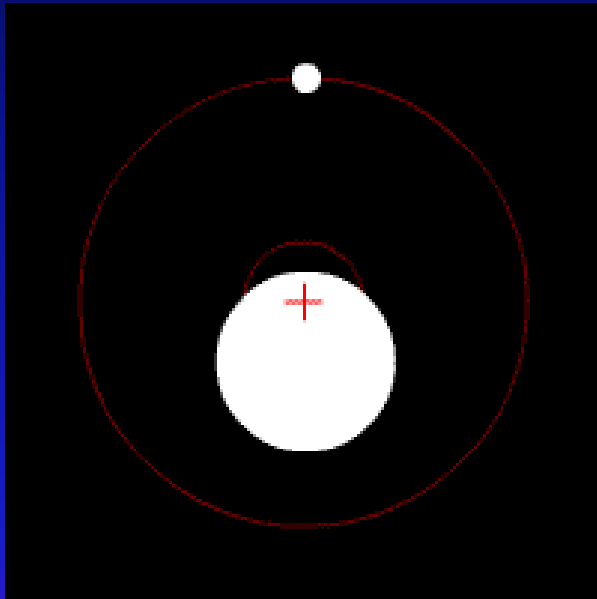
- **Possibilidade de vida – astrobiologia**
- **Teste das teorias de formação do sistema solar**
- Planetas extra-solares são muito fracos em brilho e geralmente estão muito próximos às suas estrelas ⇒ difícil a observação direta.
- Algumas poucas dezenas de planetas foram detectados por imageamento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

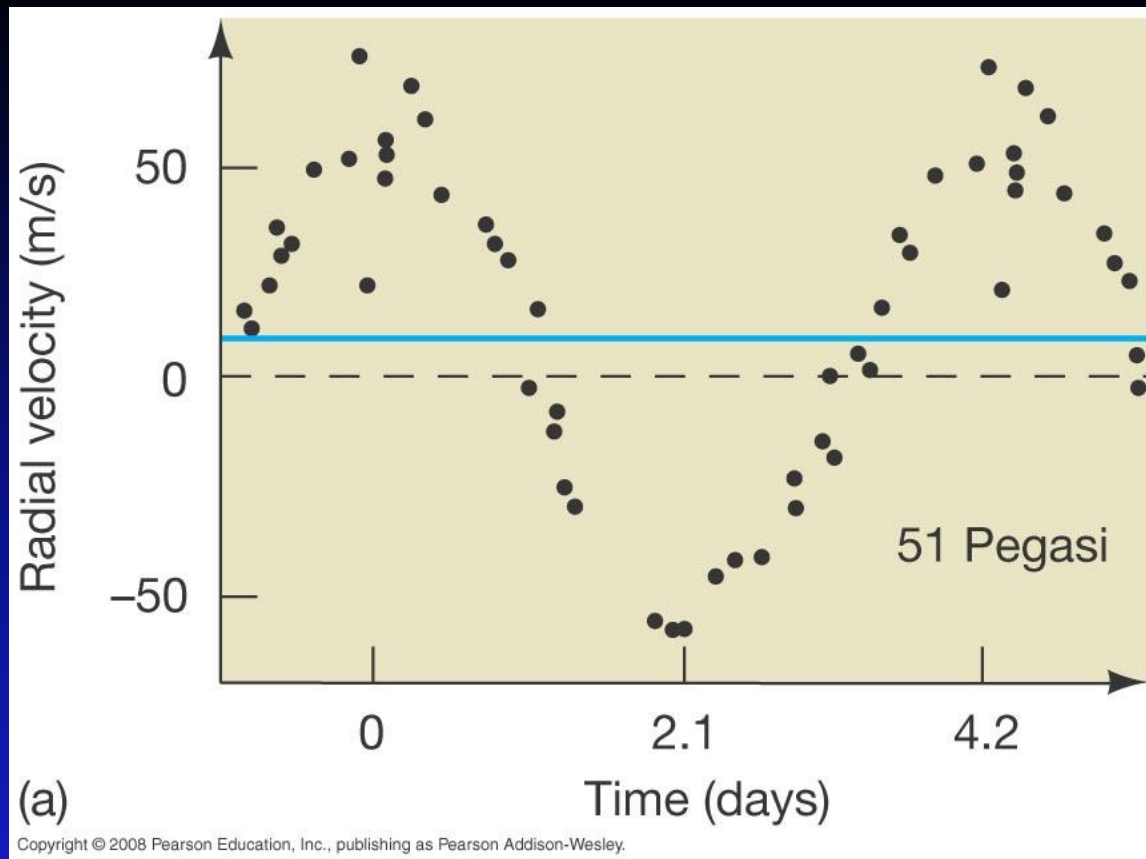
Na figura: planeta tipo Júpiter ($5M_J$) orbitando a 55 UA uma anã marron (failed star), fraca o suficiente para se observar o planeta (brilho da estrela não ofusca!).



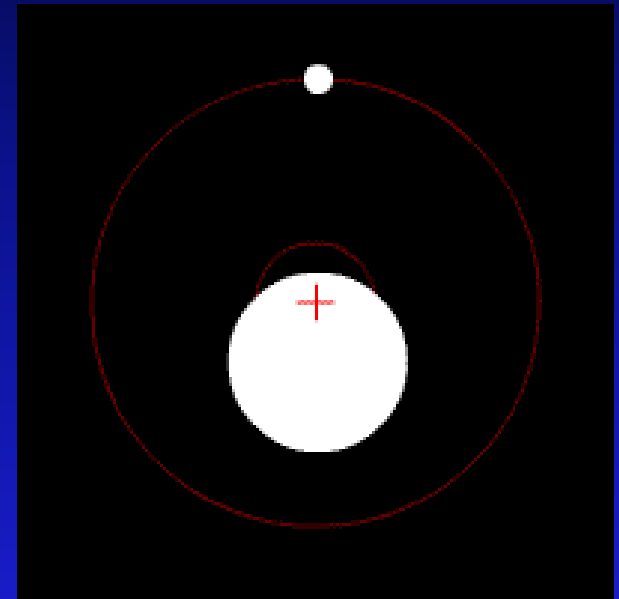
Medidas indiretas: análise da luz da estrela

VARIAÇÕES NA VELOCIDADE RADIAL DE ESTRELAS





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 **limite inferior de M do planeta.**

CÁLCULO

1) LEI DE KEPLER

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

Estimativa de **a**

2) LEIS DE NEWTON

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

Estimativa de **V_{plan}**
orbital do planeta

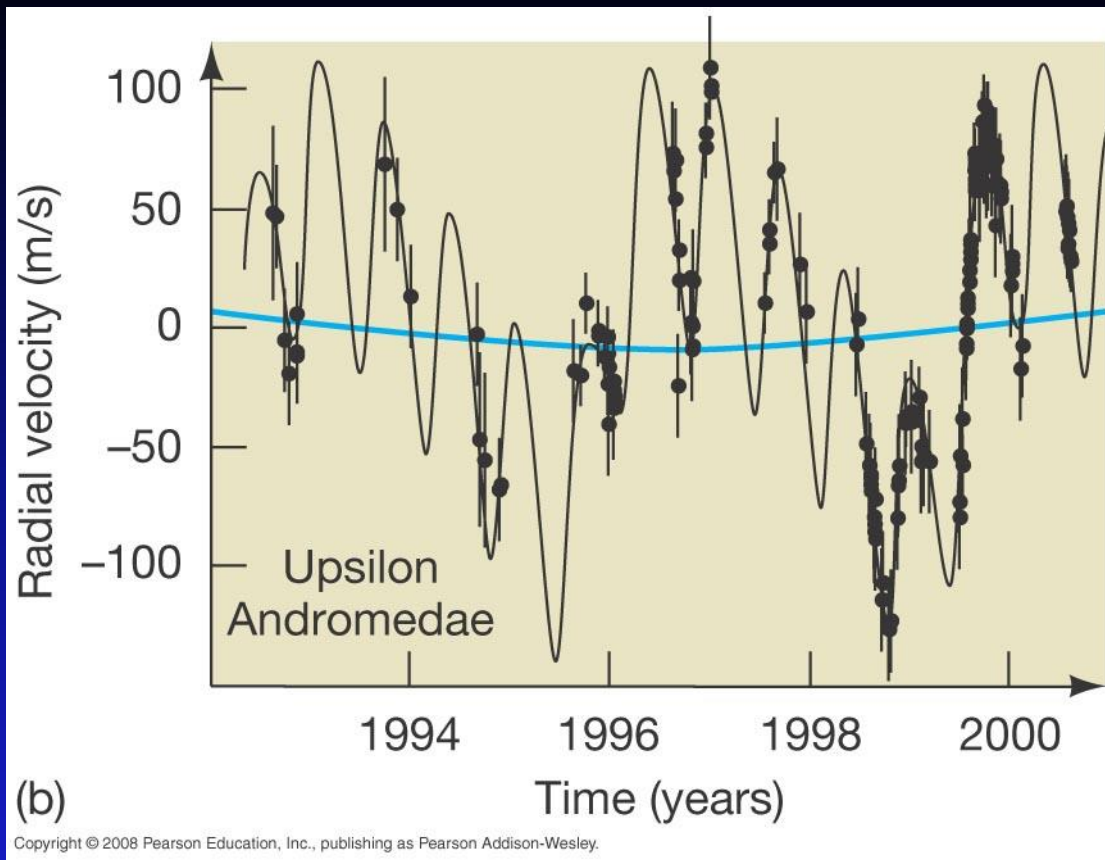
Estimativa da massa do planeta:

3) CONSERVAÇÃO DO MOMENTUM LINEAR

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

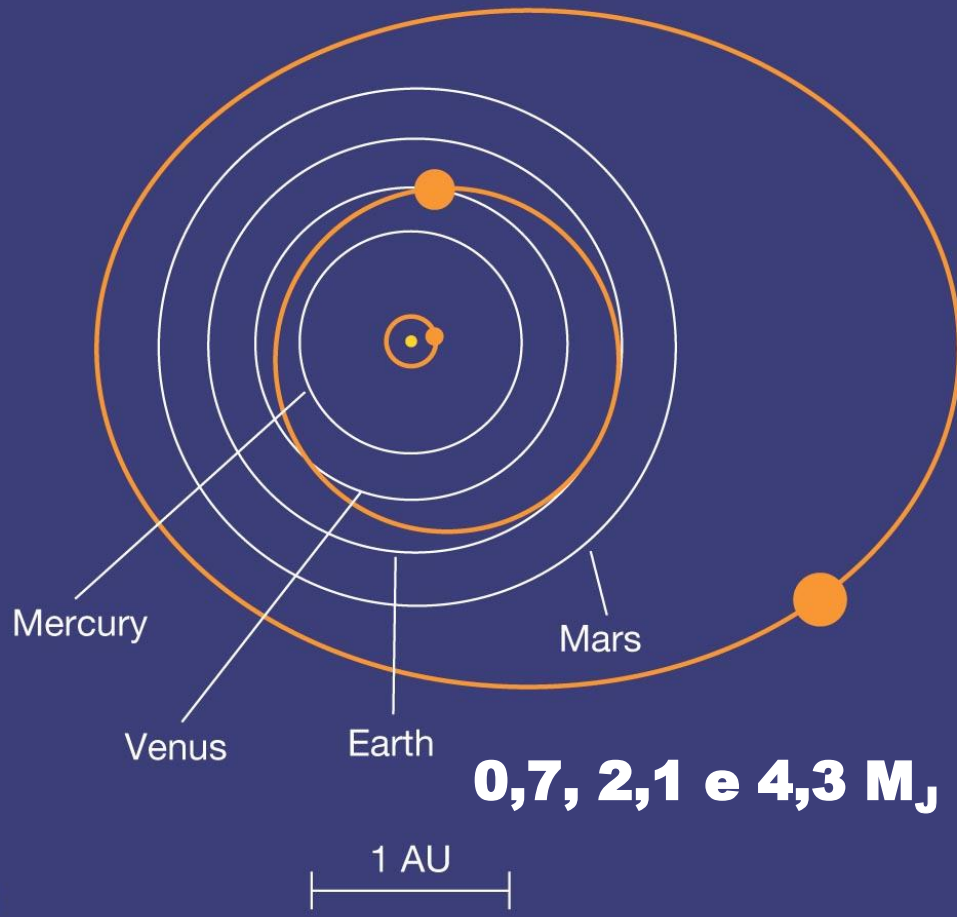
LIMITE INFERIOR DE MASSA: medimos **V_{rad}★** = a componente da velocidade orbital na linha de visada **V_★ × sinθ**

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



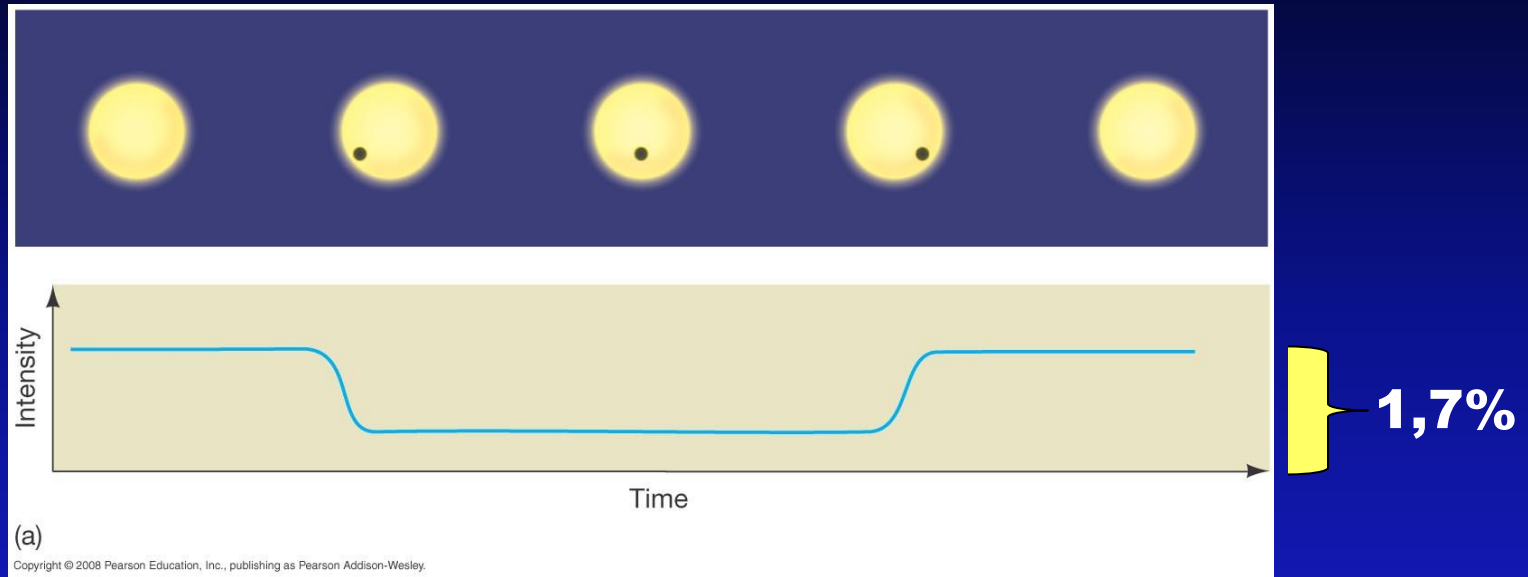
(b) Variação na velocidade radial da estrela Upsilon Andromedae (estrela gêmea do Sol). Evidência de 3 planetas com limites inferiores de massa 0,7, 2,1 e 4,3 M_J , com órbitas com semieixo maior de 0,06, 0,83 e 2,6 UA respectivamente.

Comparação com os 3 planetas do sistema Upsilon Andromedae



Até Setembro de 2020
foram detectados 820
sistemas extra-solares
confirmados através de
medida da v_{rad}

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 ($0,05 \text{ UA}$) e massa estimada do planeta 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 (órbita 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

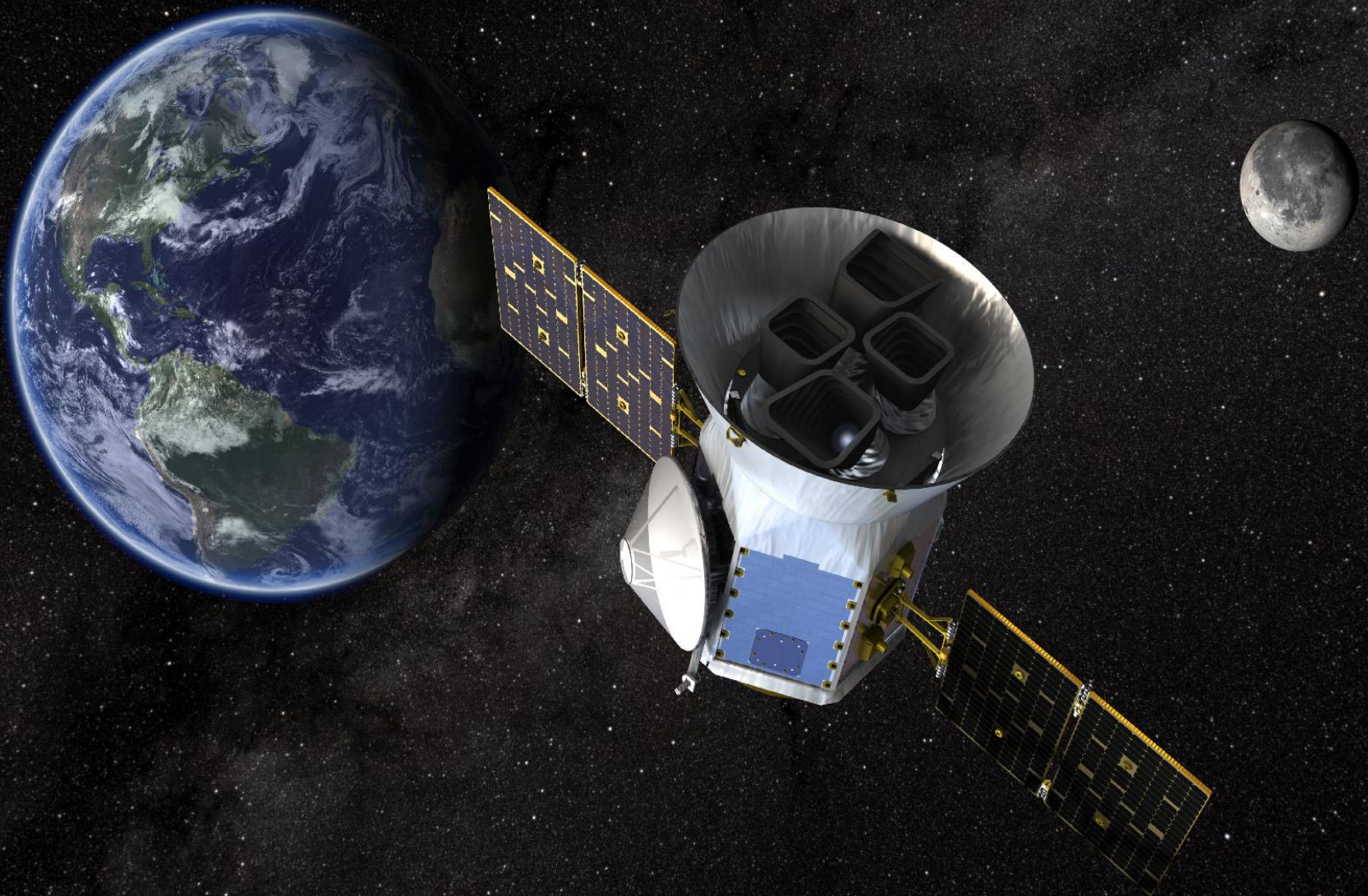
Sonda Kepler (2009-final de outubro de 2018): orbita heliocêntrica

2392 planetas foram confirmados, 2368 a serem confirmados.

941 são ~ do tamanho da Terra



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



74 novos planetas confirmados

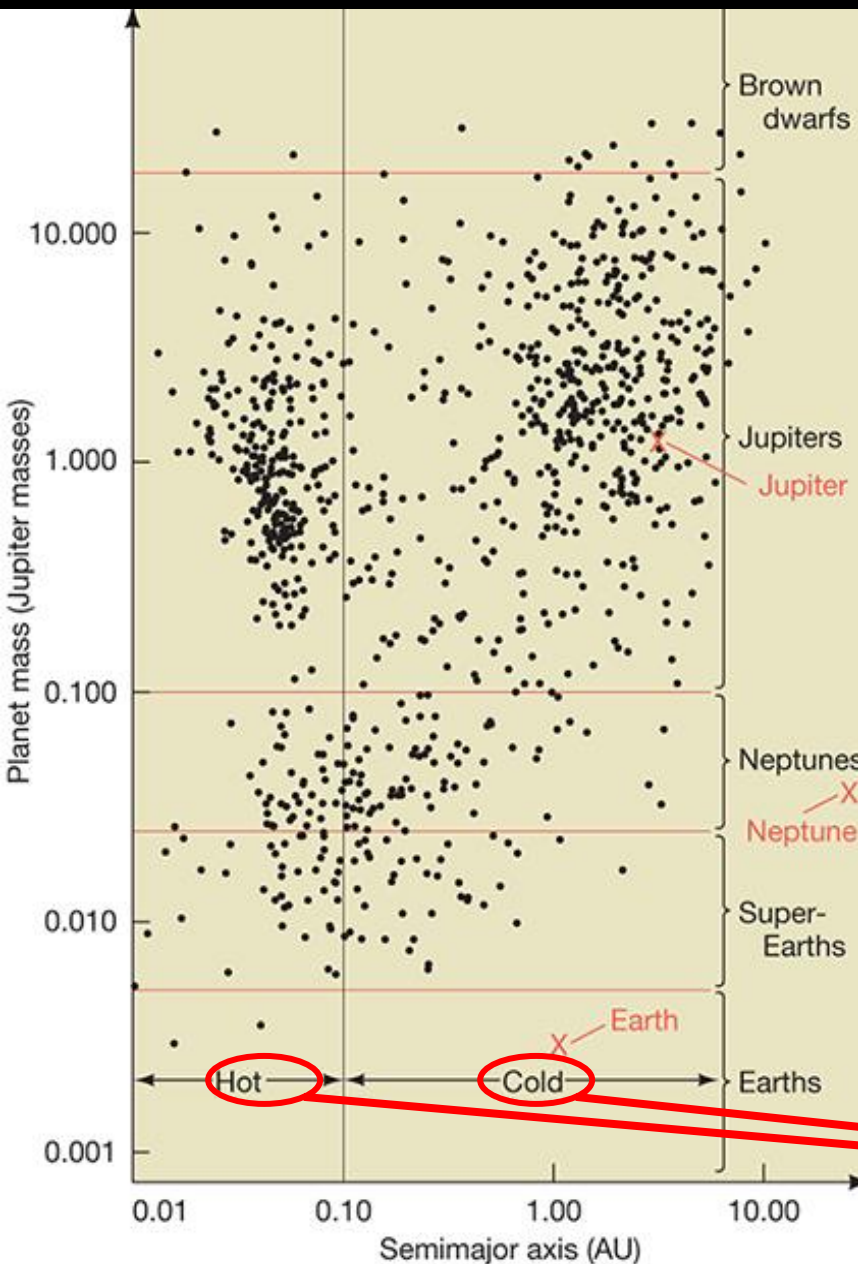
PROPRIEDADES DOS EXOPLANETAS

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

**Até agora (24/09/20) : 4284 planetas extra-solares e
1717 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

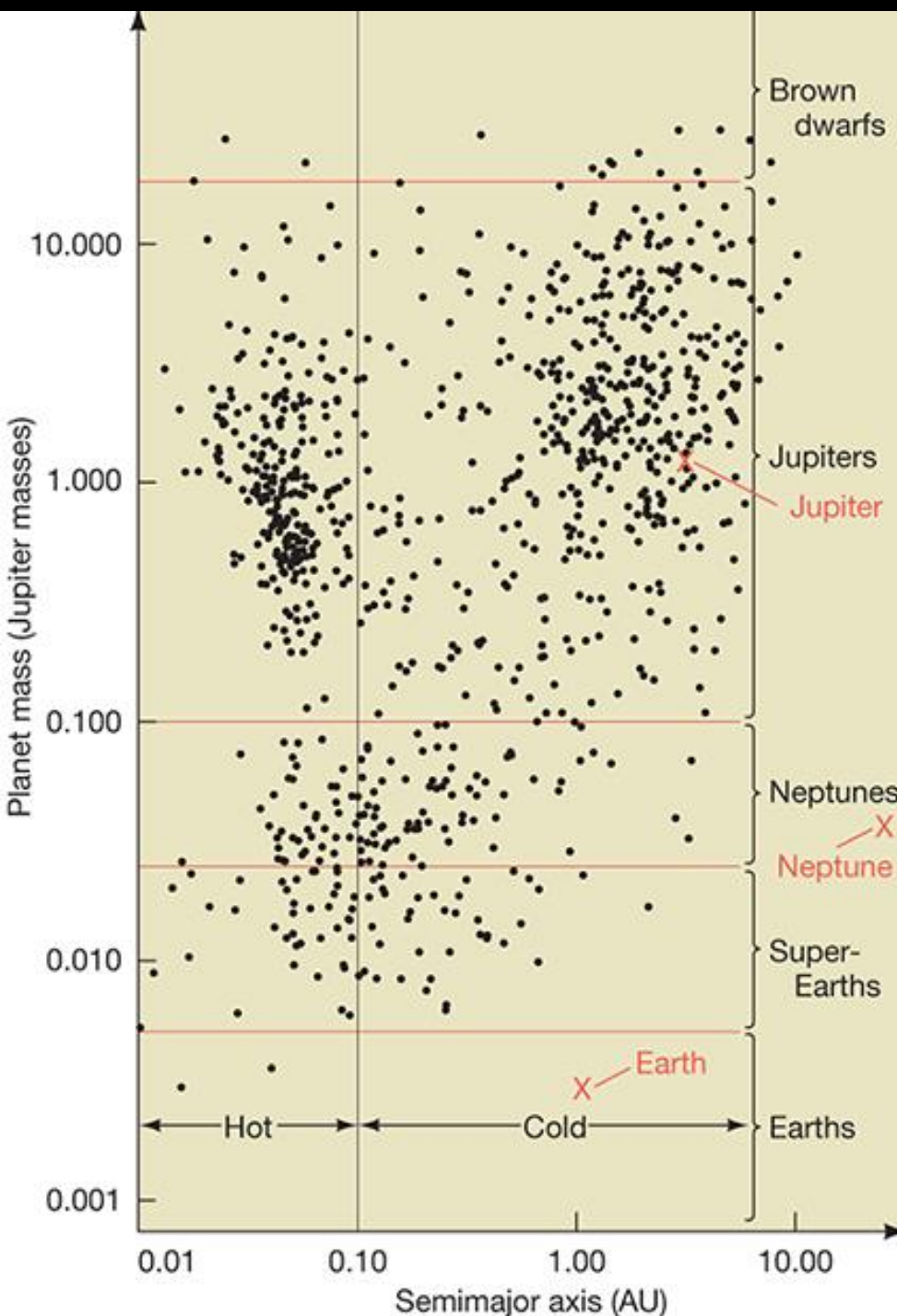
Terminologia:

- 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 $M < 2 M_{\oplus}$

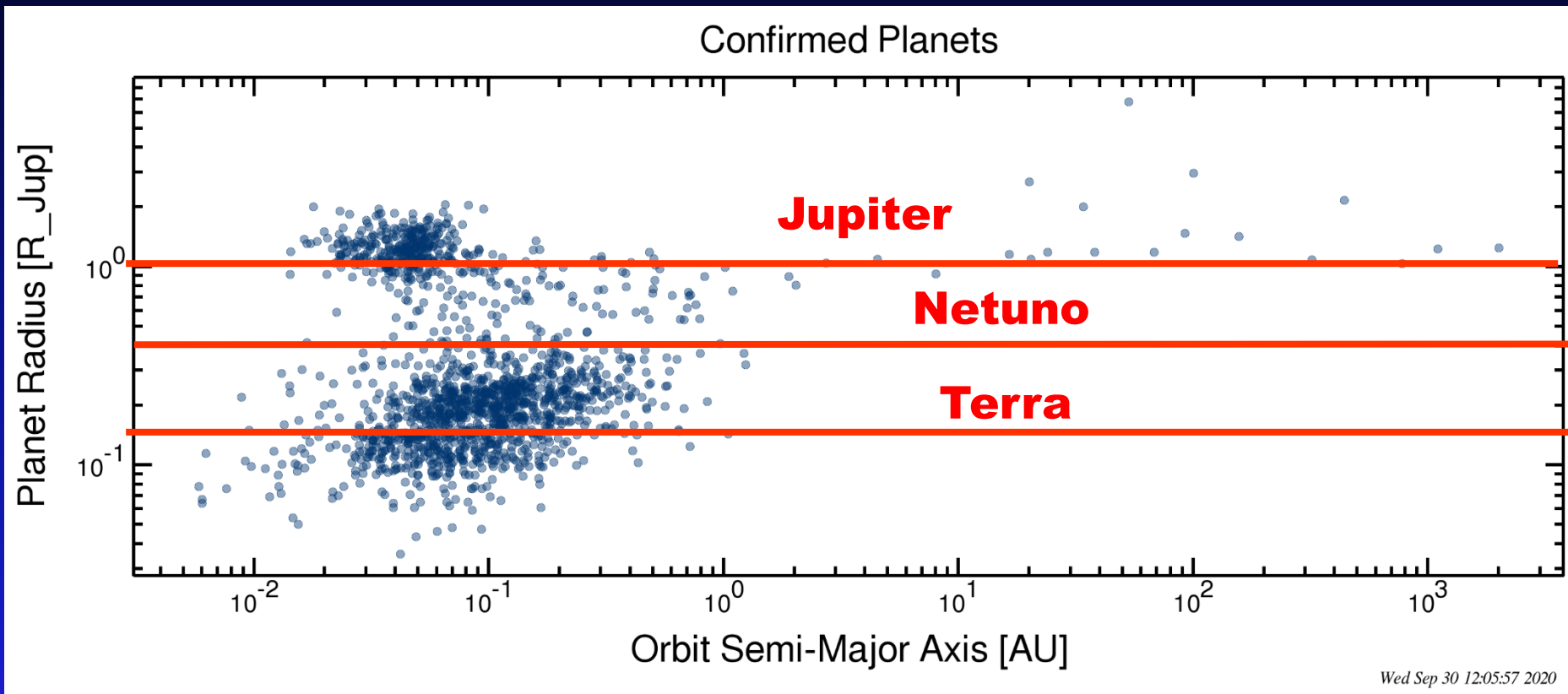
Baseado na distância



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

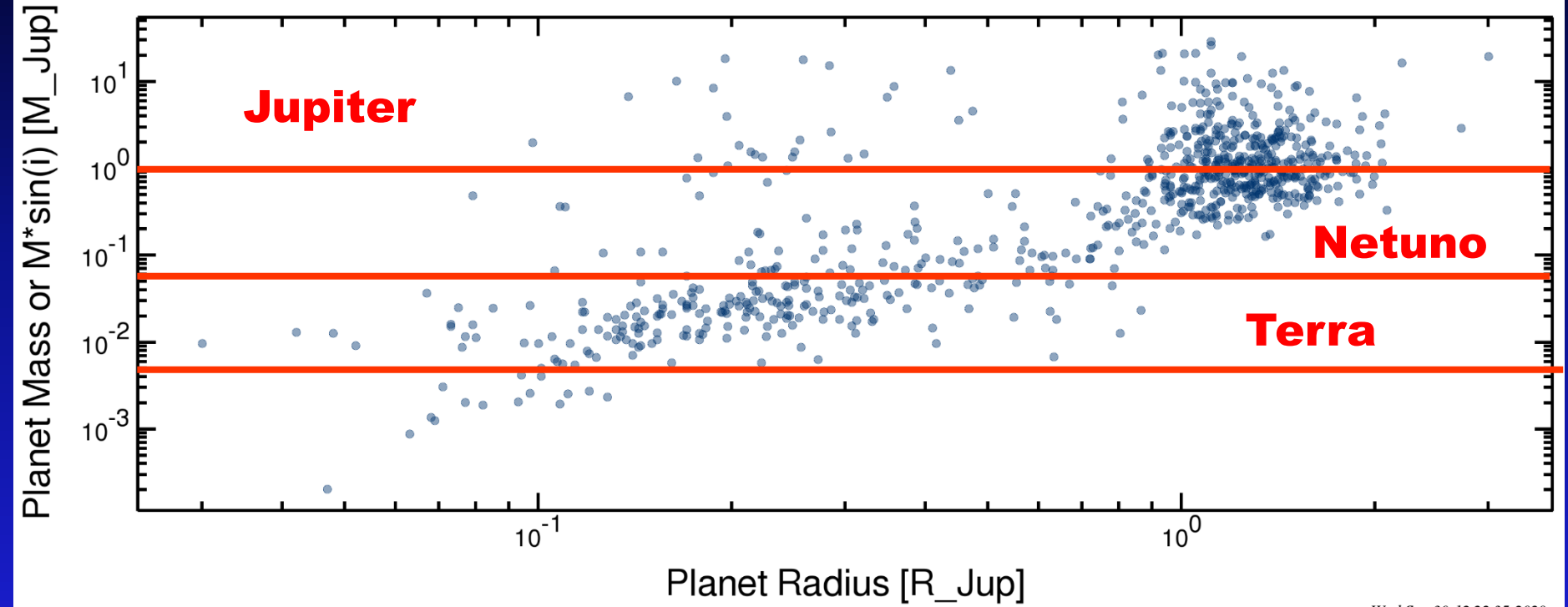
ATENÇÃO: BIAS OBSERVACIONAL

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

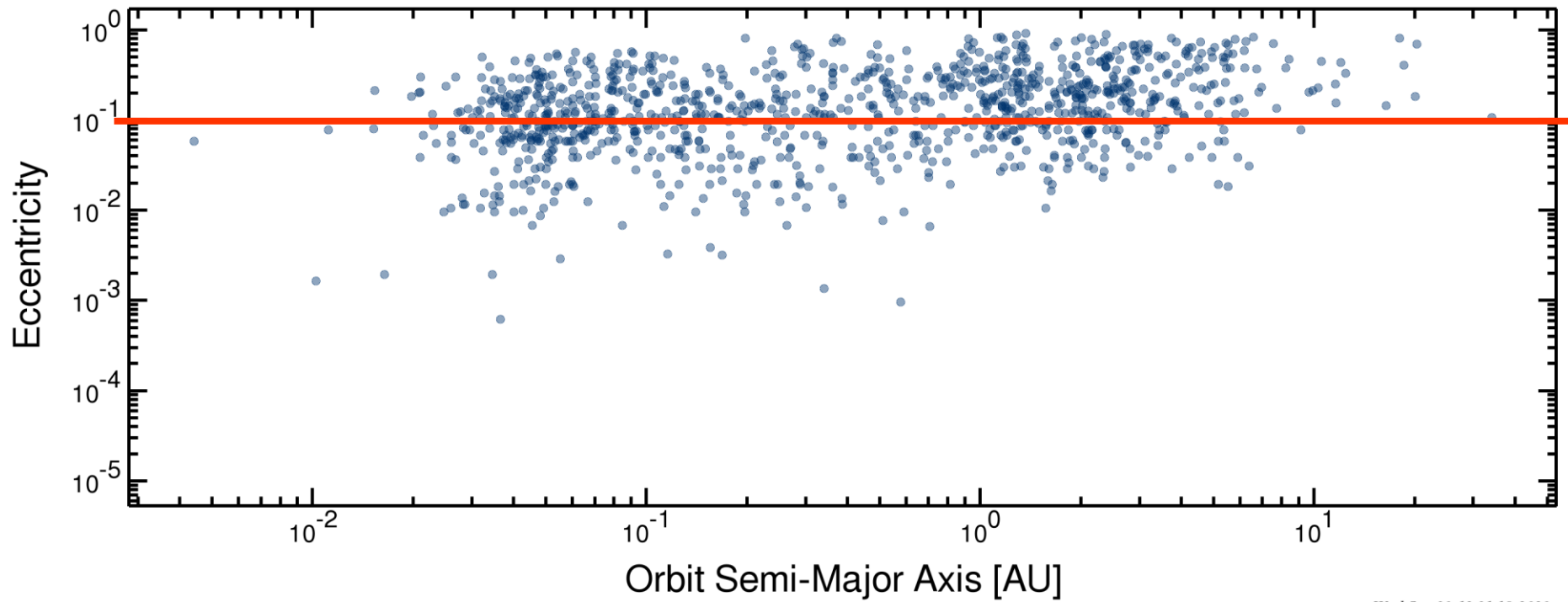


<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/cgi-bin/IcePlotter/nph-icePlotInit?mode=demo&set=confirmed>

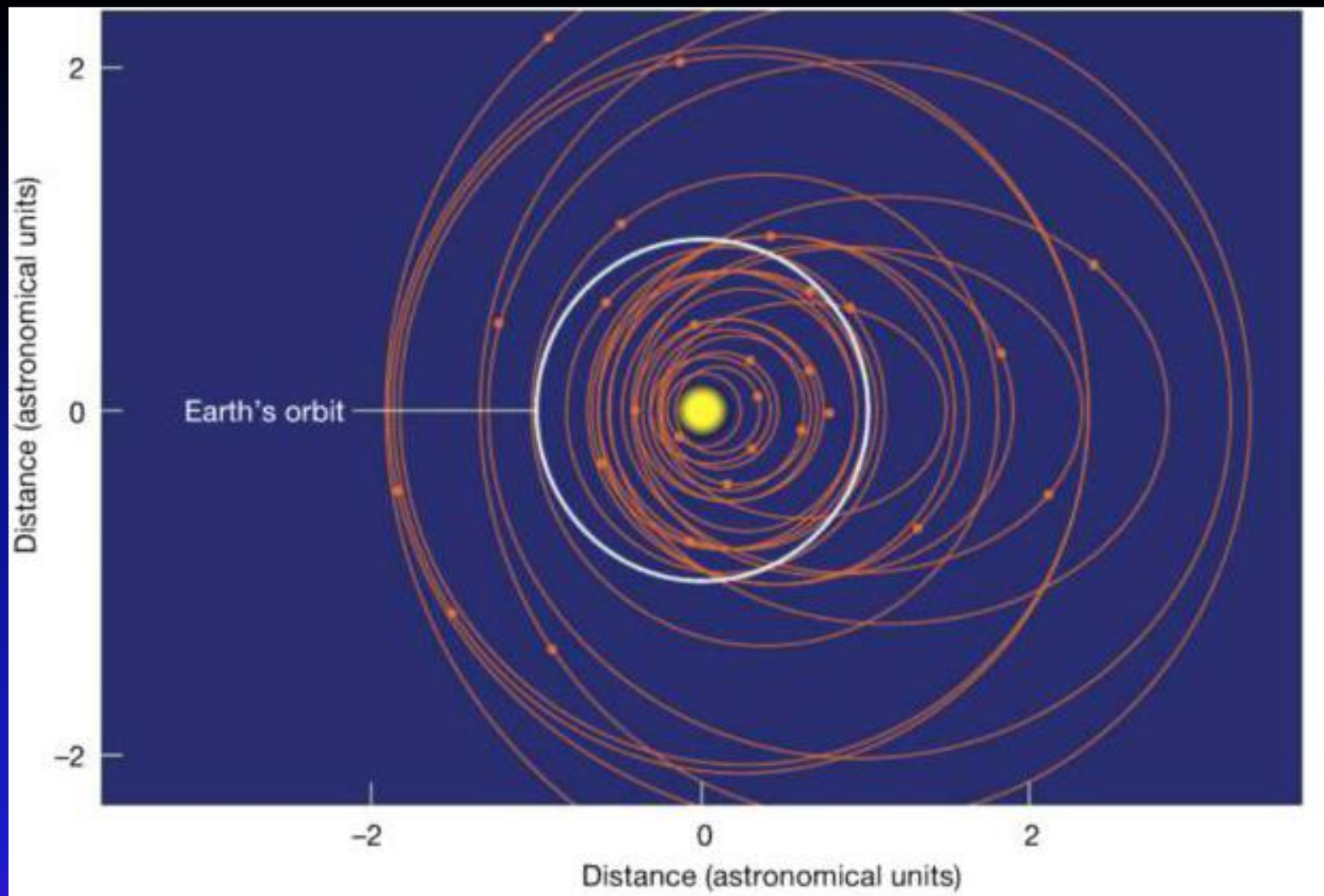
Confirmed Planets



Confirmed Planets



Wed Sep 30 12:31:18 2020



Planetas de massa $\sim M_J$.

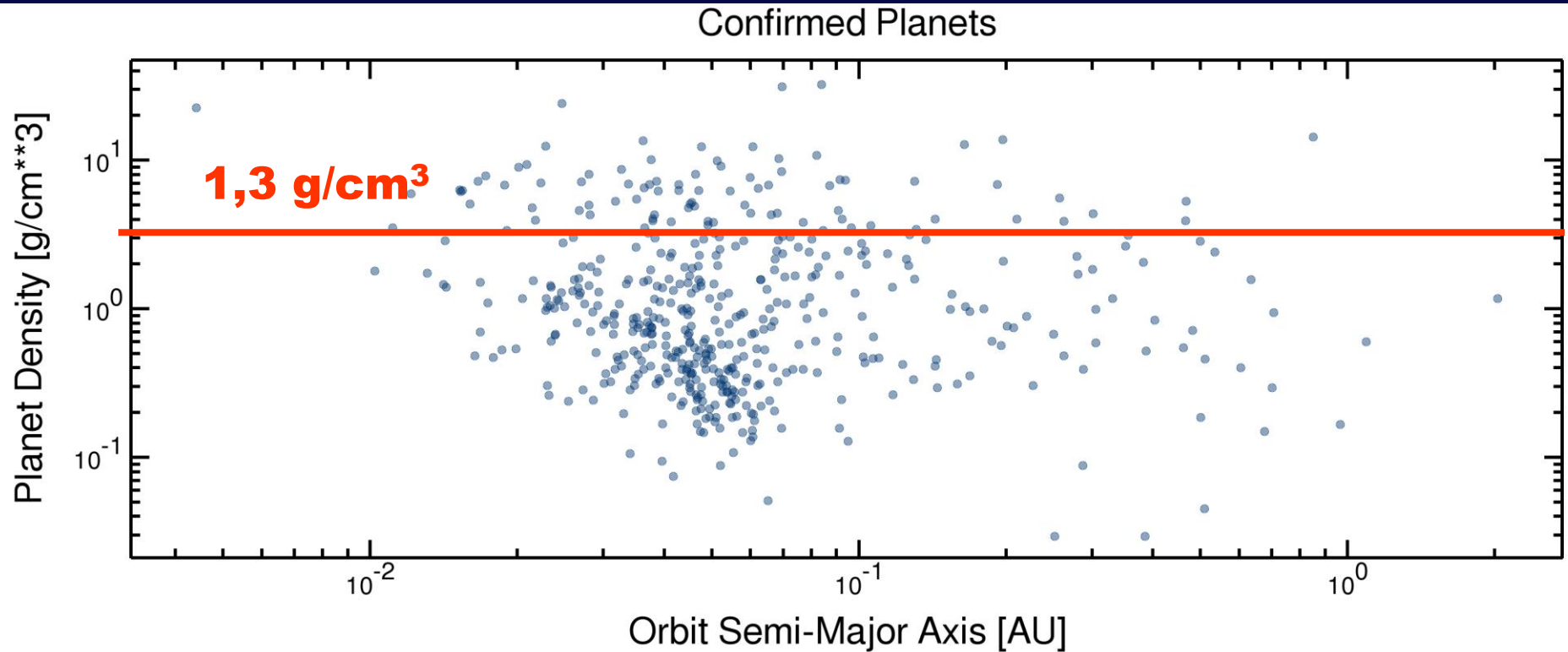
Órbitas de planetas extra-solares (muitos estão a 0,05 UA da estrela).

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



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

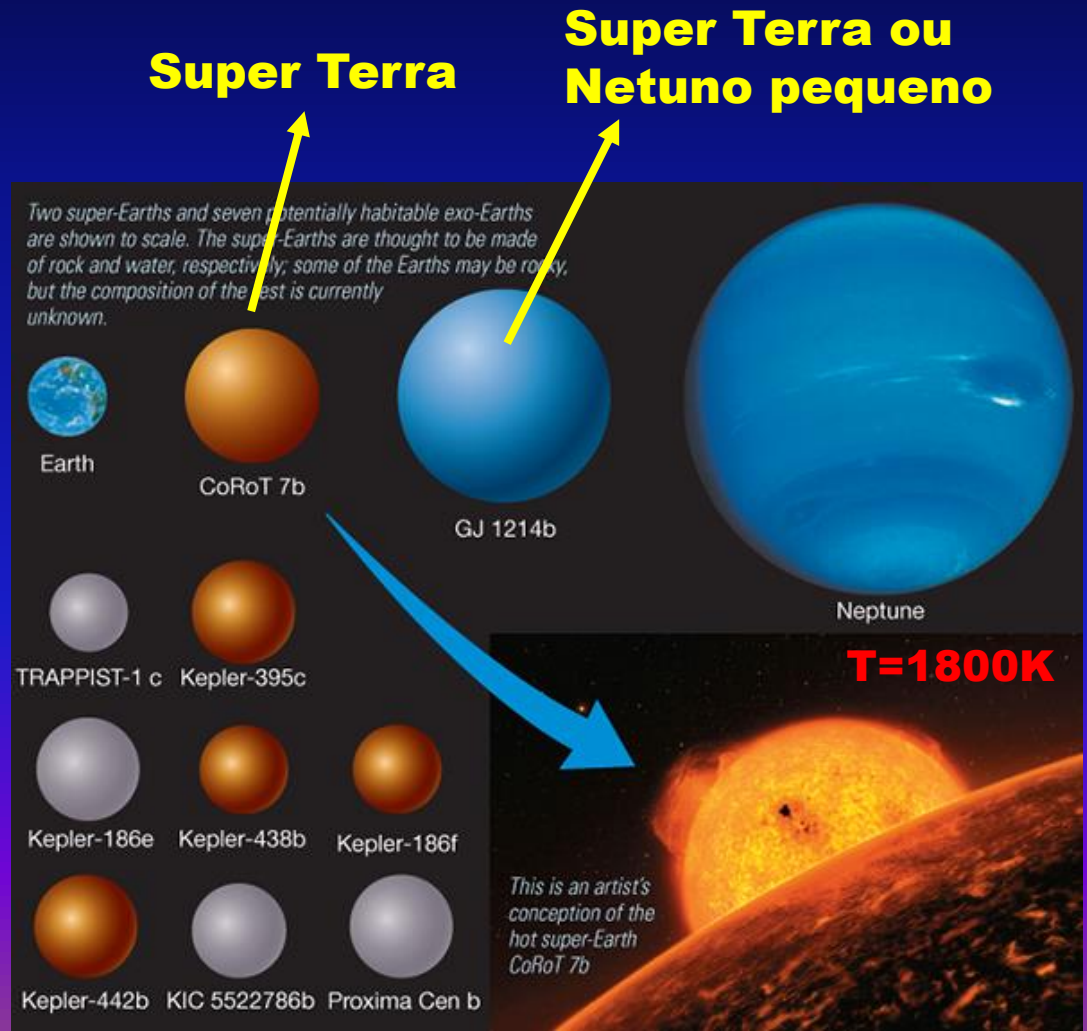
	Dens. g/cm ³
Sol	1,410
Mercúrio	5,4
Vênus	5,2
Terra	5,5
Lua	3,3
Marte	3,9
Ceres (asteróide)	2,7
Júpiter	1,3
Saturno	0,7
Urano	1,3
Neptuno	1,6
Plutão (Kuiper)	2,1
Hale-Bopp (cometa)	0,1

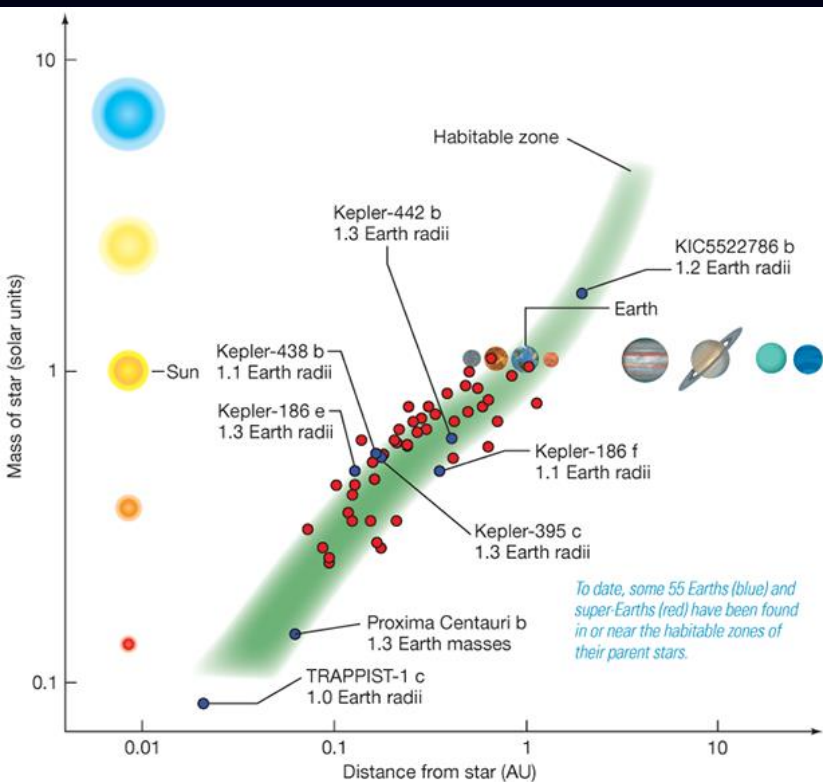
Somente dezenas de Terras e Super-Terras tem M e R conhecidos:
densidades médias de $0,5 < \rho < 9 \text{ g/cm}^3$.

- 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: $5,7M_{\oplus}$ 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
Cinza: desconhecido

7-8 planetas candidatos 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.



Earth



CoRoT 7b



GJ 1214b



Neptune



TRAPPIST-1 c



Kepler-395c



Kepler-186e



Kepler-438b



Kepler-186f



Kepler-442b



KIC 5522786b



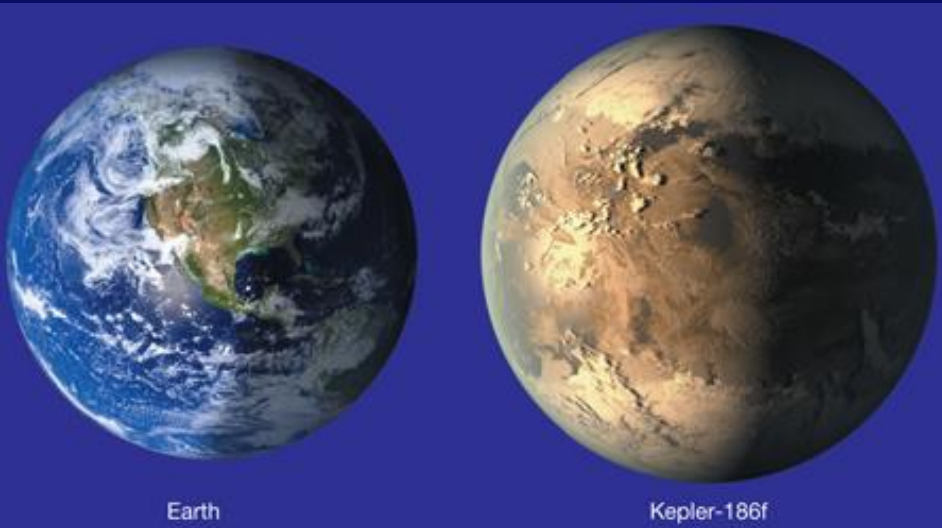
Proxima Cen b



This is an artist's conception of the hot super-Earth CoRoT 7b

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

Kepler-186f



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.



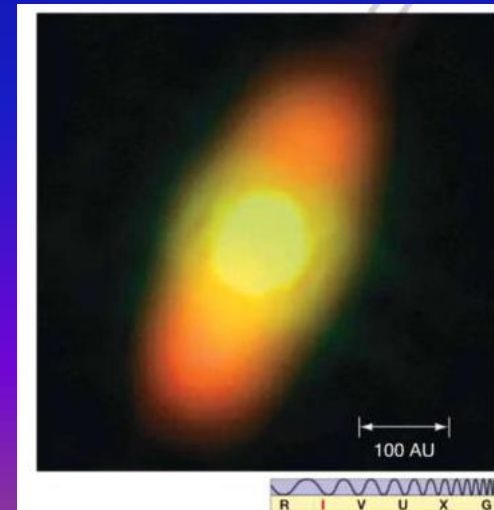
Composição química da atmosfera do planeta.

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 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

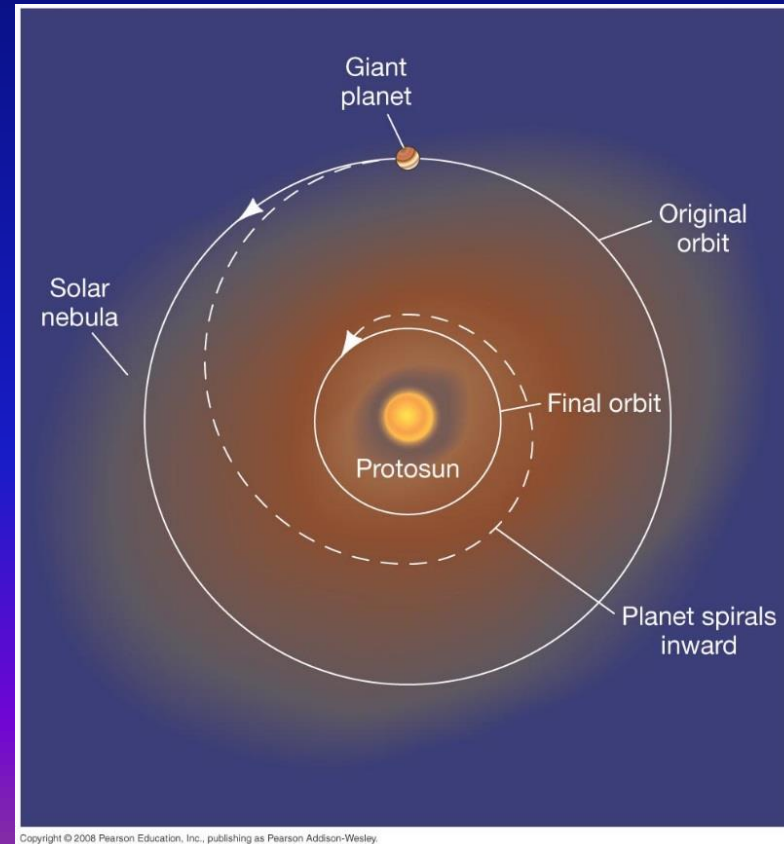


Como se formam os planetas do tipo Júpiter quente, se a proximidade com a estrela faria este tipo de formação improvável?

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.

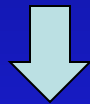
No nosso sistema solar isso não aconteceu porque a formação de Saturno estabilizou a órbita de Júpiter.



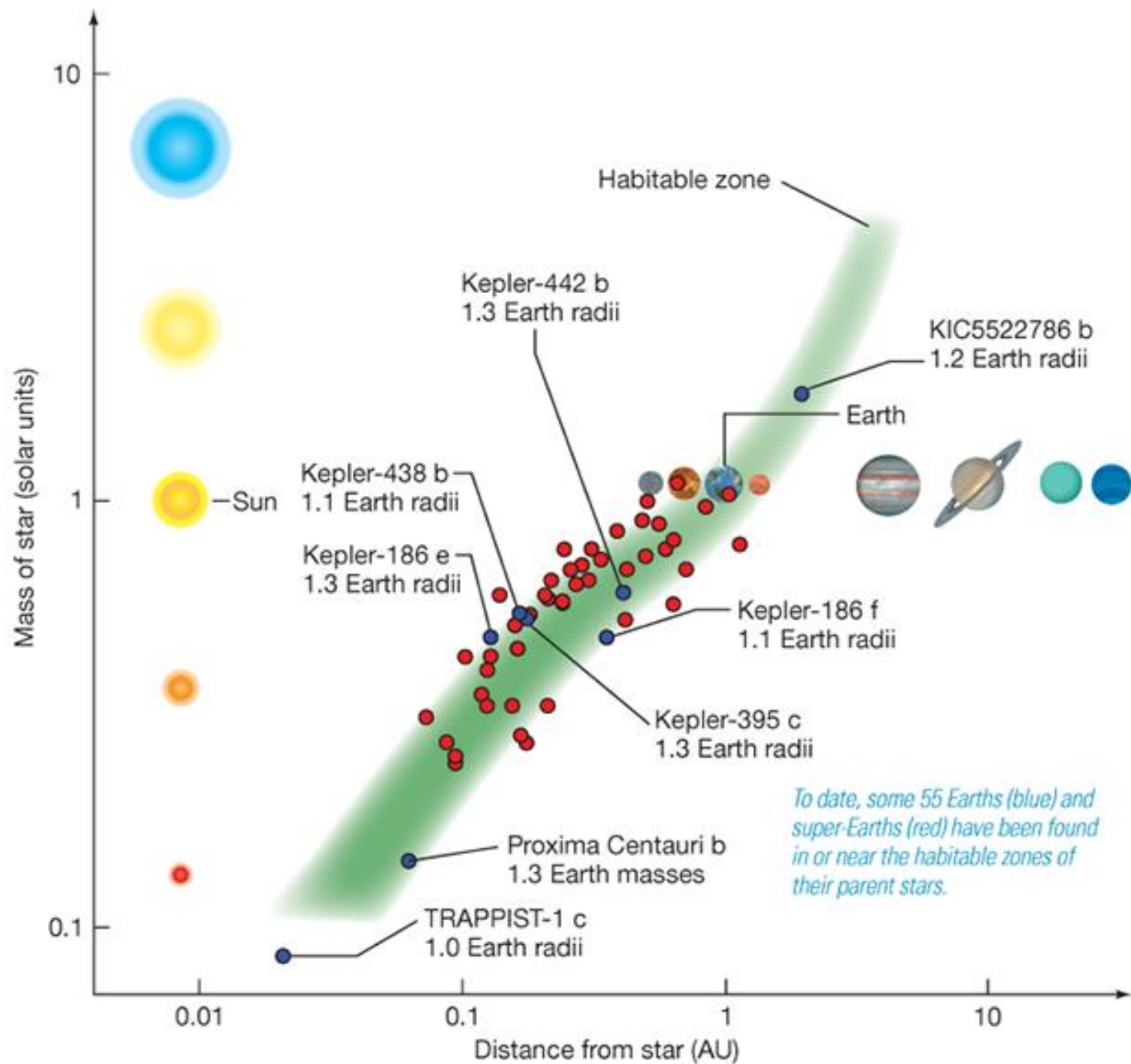
A PROCURA POR PLANETAS TIPO TERRA

Condições para formação de vida:

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

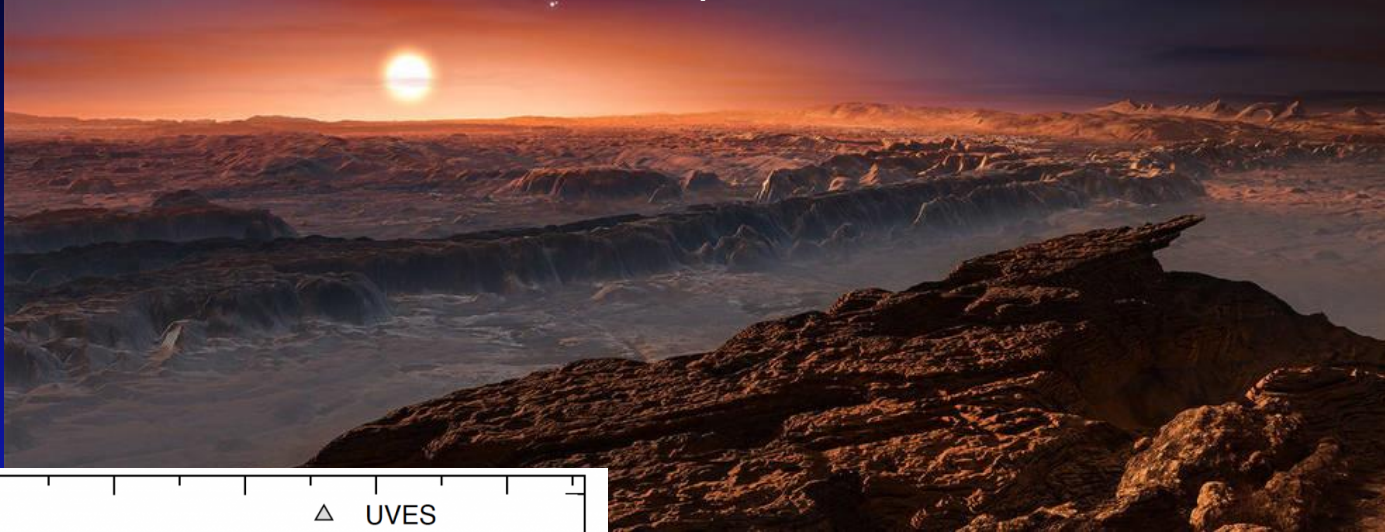


Zona habitável \Rightarrow depende da distância e do brilho intrínseco da estrela



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]).**

