

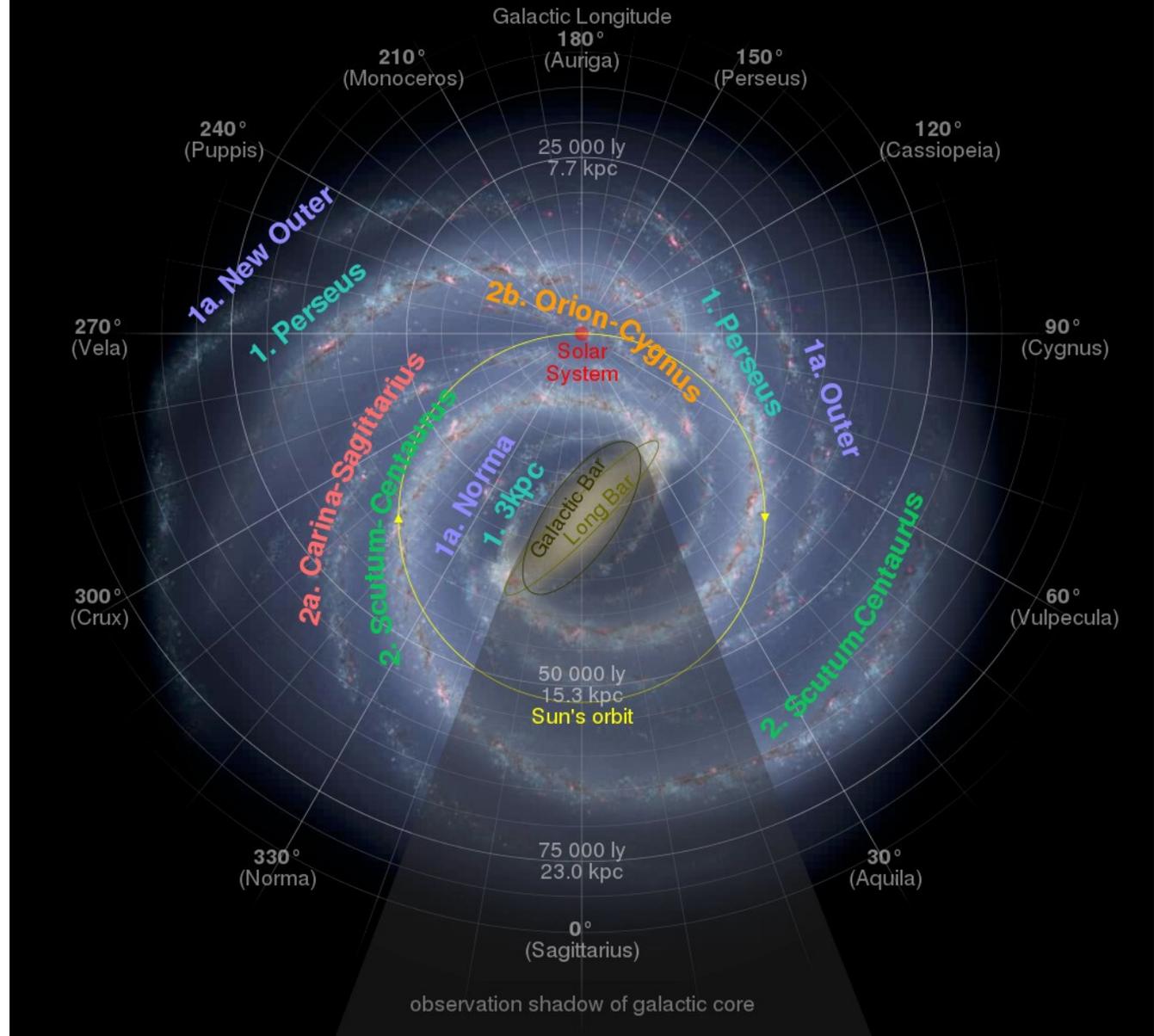
# O endereço do Sistema Solar

Encontra-se a ~25 mil al do centro galáctico, no braço de Órion-Cisne.

$v \sim 250$  Km/s (approx. a mesma dos braços  $\rightarrow$  estabilidade; hipótese de Shiva)

$T \sim 210$  milhões de anos (ano galáctico)

Ângulo entre a eclíptica e o plano galáctico  $\sim 60^\circ$

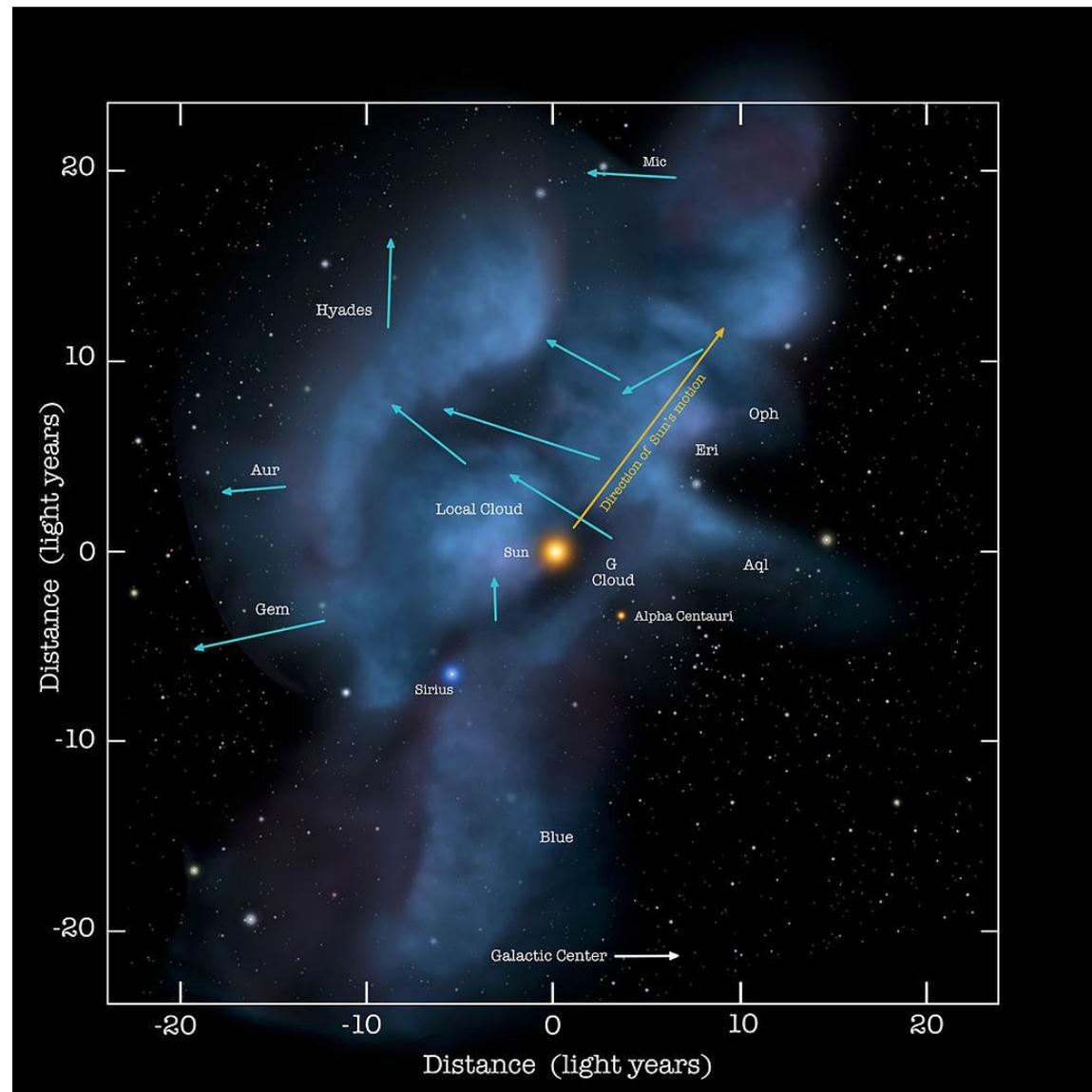


# A vizinhança do Sistema Solar

Encontra-se na Nuvem Interestelar Local na fronteira com a Nuvem G, que é uma região mais densa dentro da Bolha Local (ou Cavidade Local)

Estrelas mais próximas:  
Sistema triplo  $\alpha$ Cen (4,4 al)  
Estrela de Barnard (5,9 al)  
Wolf 359 (7,8 al)  
Lalande 21185 (8,3 al)

Sirius A ( $2M_{\odot}$ ) e B (anã branca) (8,6 al)



# Formação do Sistema Solar

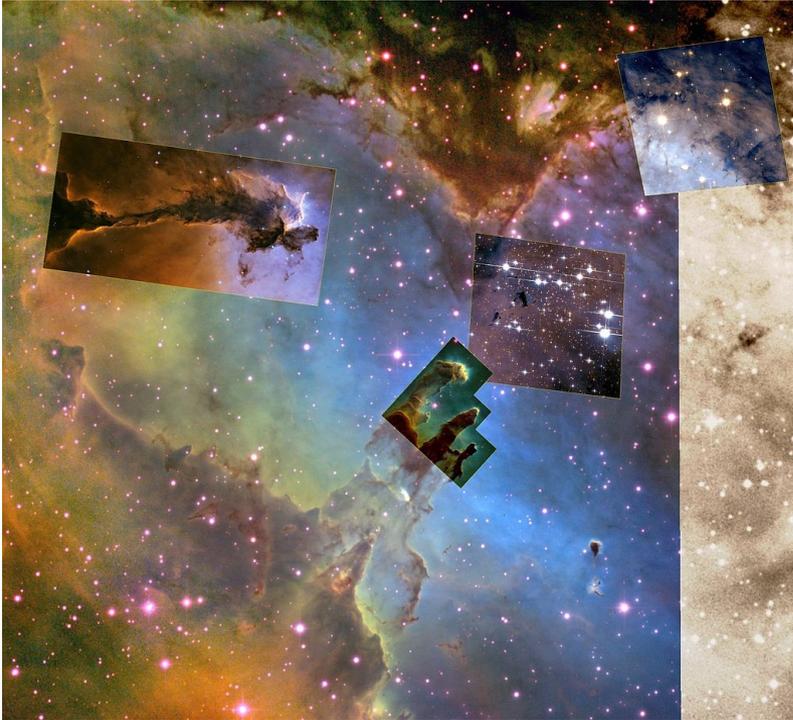
Sistemas solares são formados nos “pequenos” fragmentos de nuvens de gás e poeira interestelares.



Nebulosa do Cone em Monoceros

# Formação do Sistema Solar

Sistemas solares são formados nos “pequenos” fragmentos de nuvens de gás e poeira interestelares.



Nebulosa da águia em Serpente



Pilares da criação no visível e no infravermelho

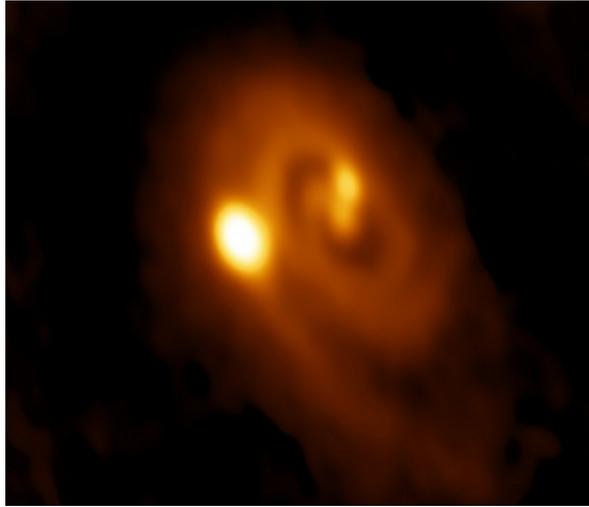


# Formação do Sistema Solar

Sistemas solares são formados nos “pequenos” fragmentos de nuvens de gás e poeira interestelares.



“Tadpoles” em Auriga



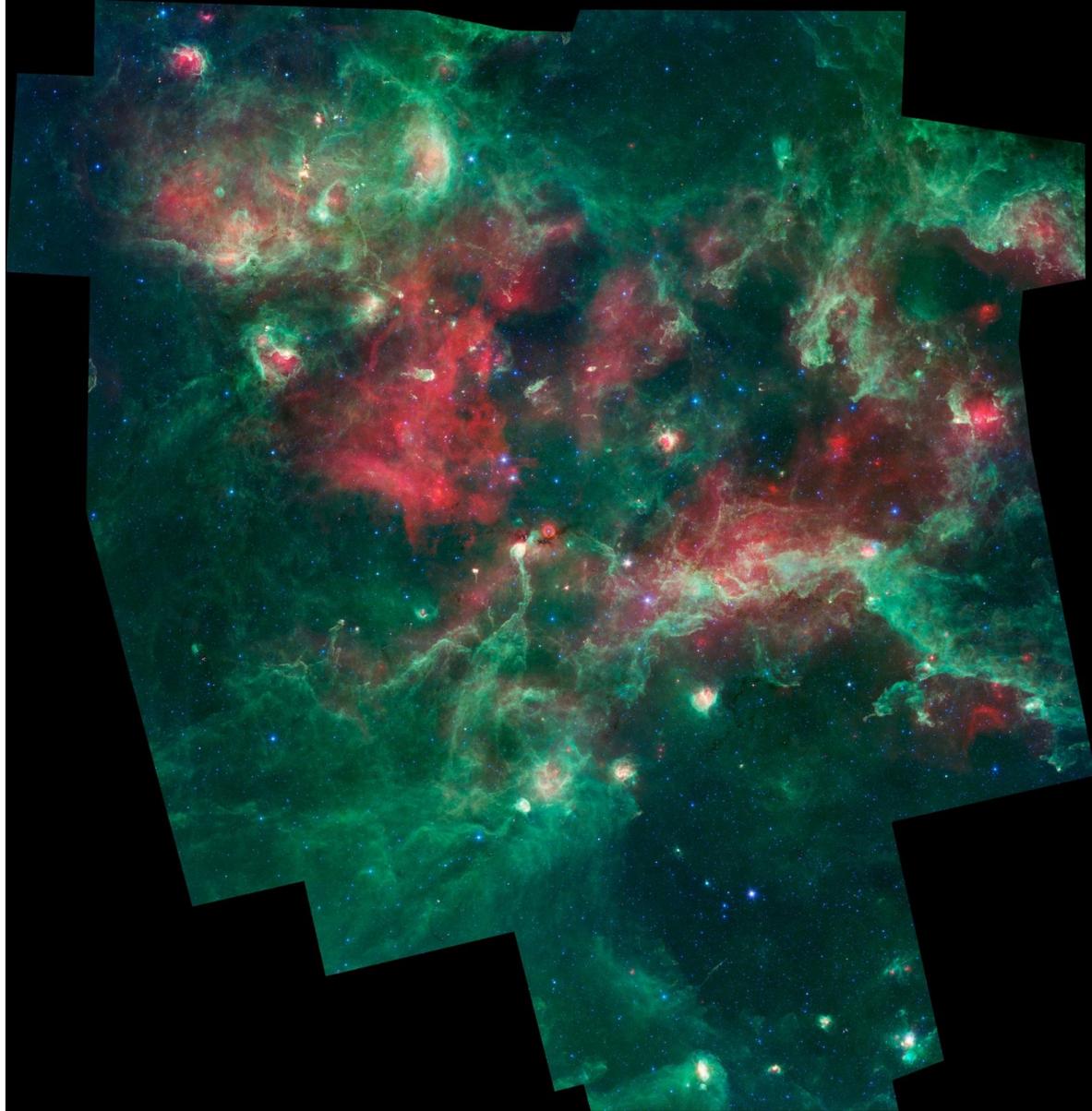
Sistema tri-estelar em Perseus



Destino incerto em Cisne

# Formação do Sistema Solar

Cygnus X (na constelação do Cisne) a 4.500 anos-luz de distância (visto pelo telescópio espacial Spitzer em infravermelho ao lado) é uma das regiões mais ativas em formação de estrelas na nossa galáxia.



Vast, rotating cloud of gas and dust (solar nebula) begins to collapse.

Protosun forms, begins to grow.

Increased density, temperature, rotation rate

Decreased overall size

Achatamento: conservação do momento angular

Tens of millions of years

Orbiting gas and dust form a disk. Heat from the protosun removes gases from the inner disk out to the "snow line."

Dusty debris

Snow line

Dust and ice debris

Protosun

Collisions between dust particles created large debris, including Moon-sized bodies. The first planet to form, Jupiter, cleared the gas and dust in its orbit.

Tens of millions of years

Protosun

Snow line

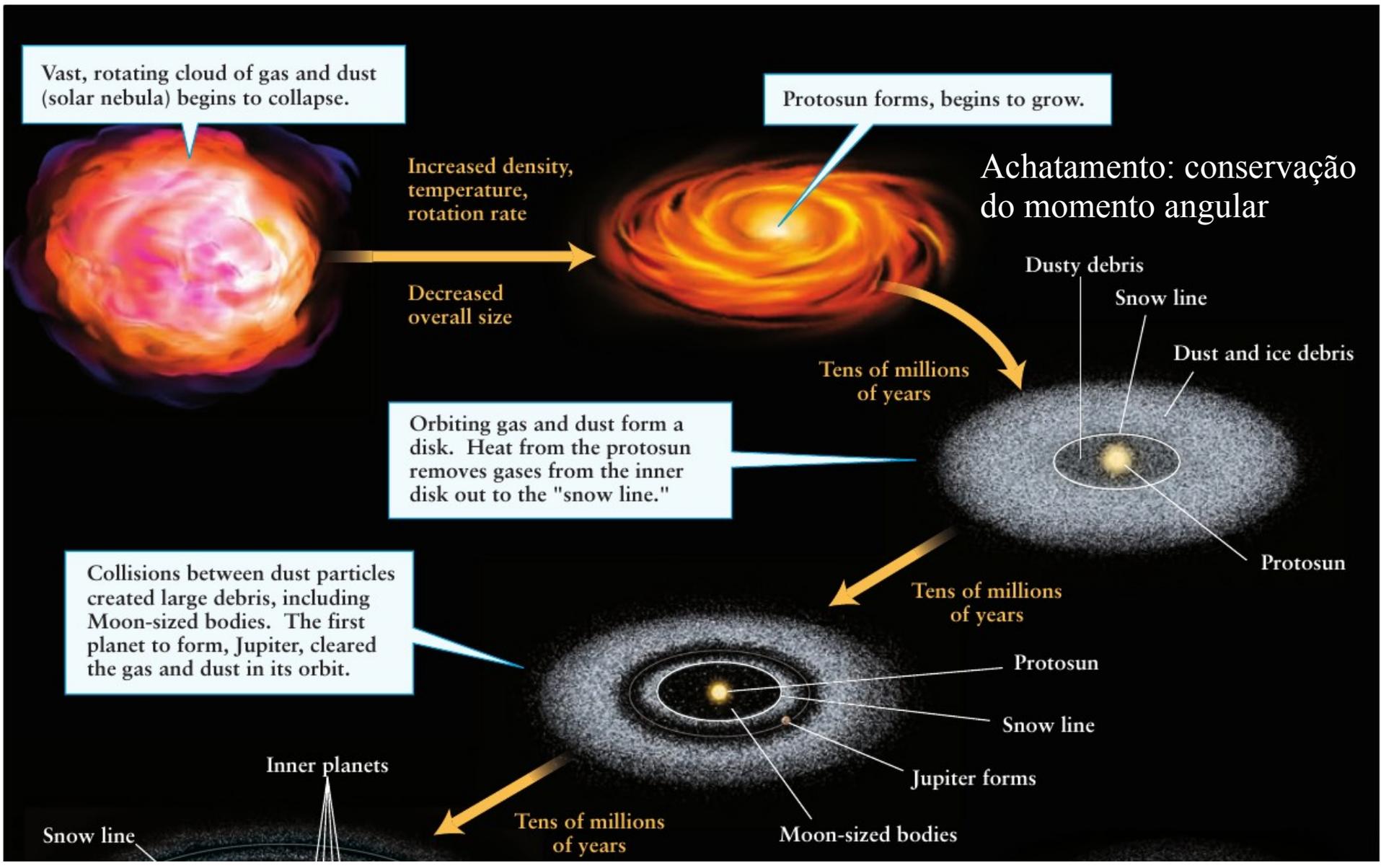
Jupiter forms

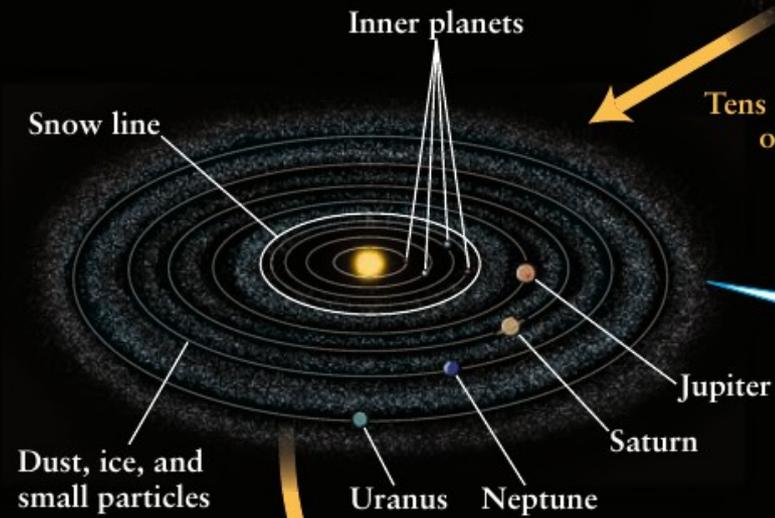
Inner planets

Snow line

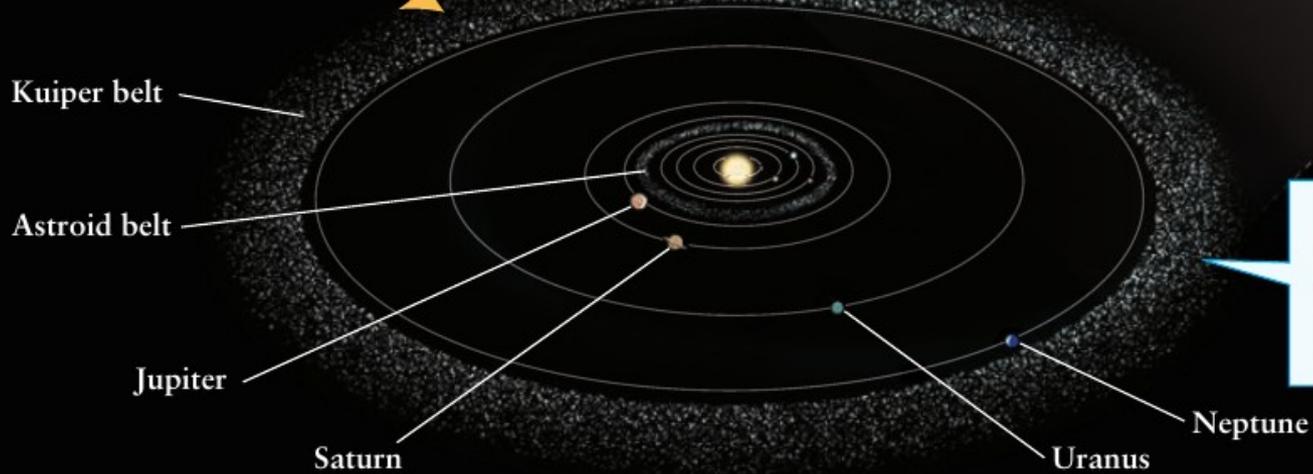
Tens of millions of years

Moon-sized bodies





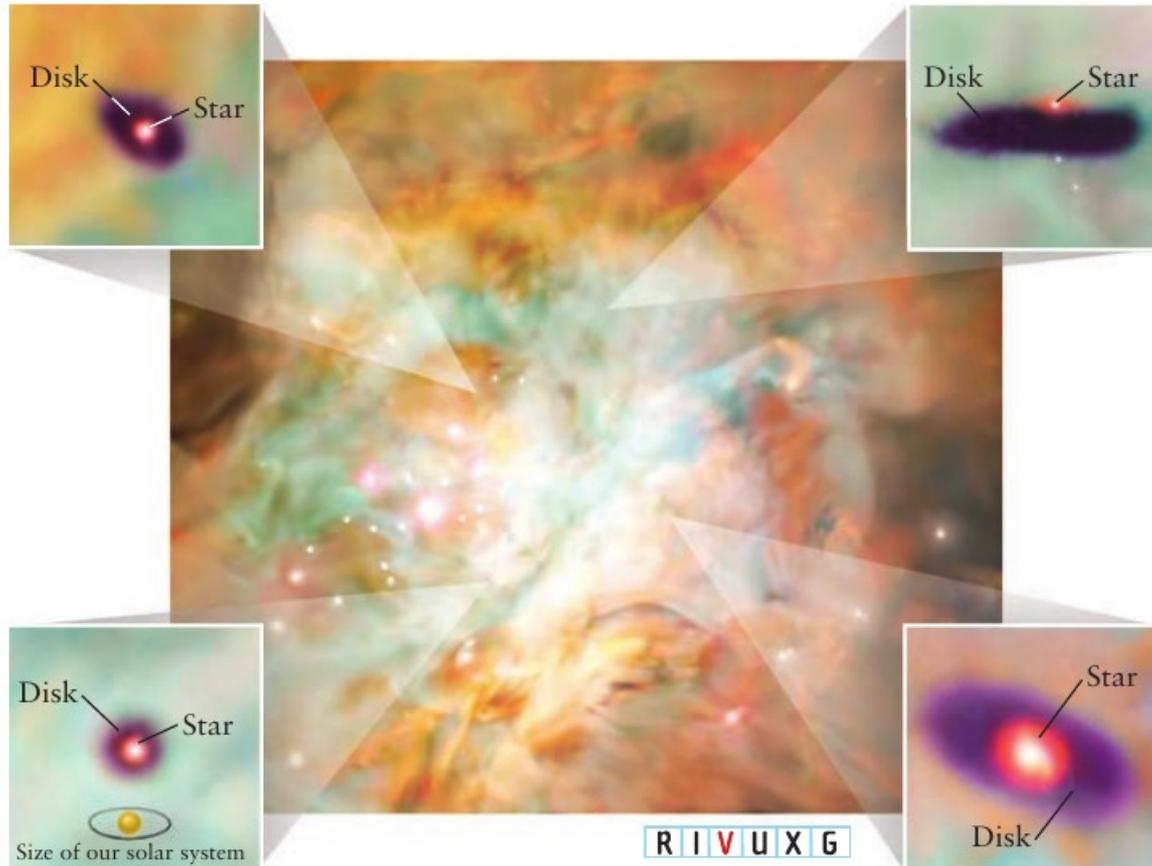
Saturn, Neptune, and Uranus formed, closer than they are today. Debris from outside the snow line spiraled inward. Terrestrial planets formed from this debris and orbiting Moon-sized bodies.



Saturn, Neptune, and Uranus spiraled outward, with Neptune and Uranus changing places. Much debris was sent inward and far outward during this period, creating the Kuiper belt and Oort cloud.

# Formação do Sistema Solar

Sistemas solares são formados nos “pequenos” fragmentos de nuvens de gás e poeira interestelares.



## FIGURE 5-4 Young Circumstellar Disks of Matter

The heart of the Orion Nebula as seen through the Hubble Space Telescope. The four insets are false-color images of protoplanetary disks within the nebula. A recently formed star is at the center of each disk. The disk in the upper right is seen nearly edge-on. Our solar system is drawn to scale in the lower left image. (C. R. O'Dell and S. K. Wong, Rice University/NASA)

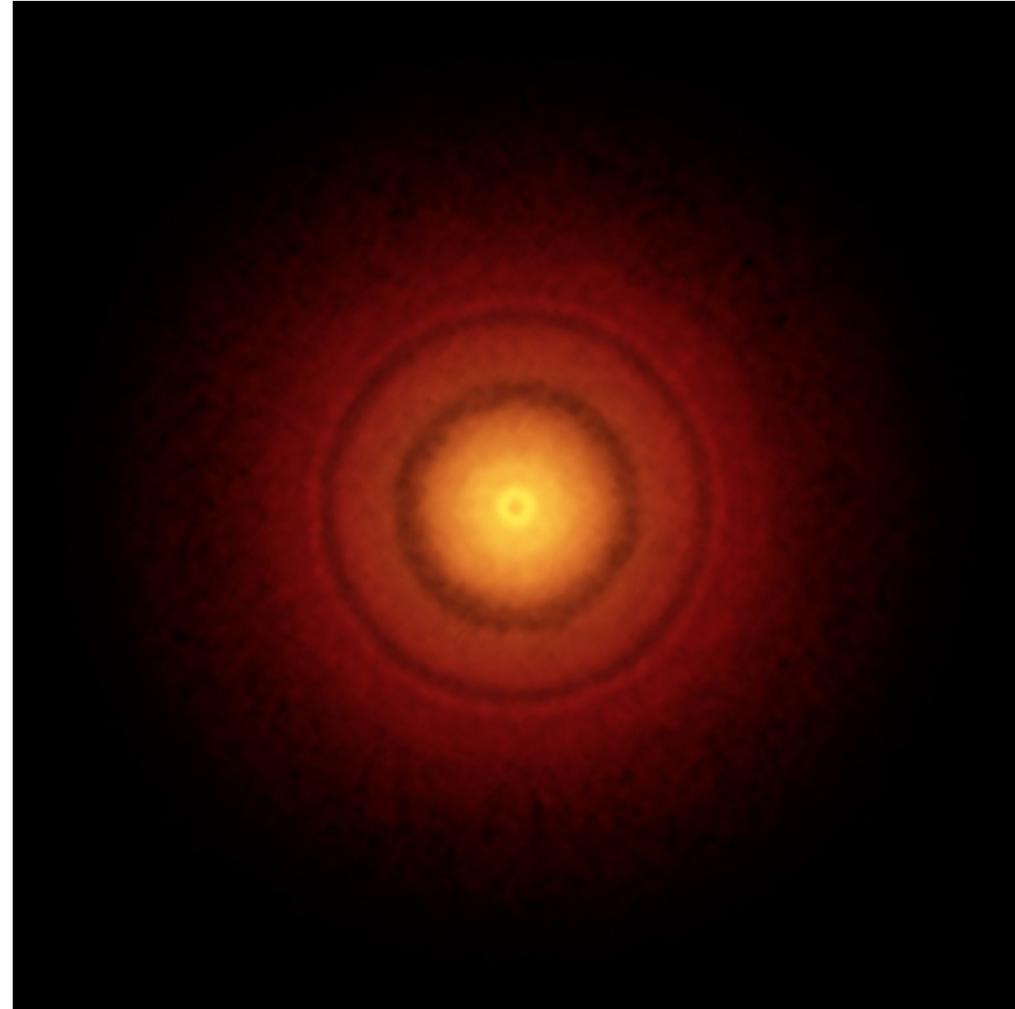
Discos protoplanetários em Órion

# Formação do Sistema Solar

Lacunas nas nebulosas solares são fortes indícios da formação de planetas.

Puzzle: Dependendo do comprimento de onda da luz utilizado, as lacunas aparecem em distâncias diferentes.

Imagem da “estrela” TW Hydrae (na constelação de Hidra) a 175 anos-luz de distância obtida pelo ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)



# Formação do Sistema Solar

- Formou-se a ~4,6 bilhões de anos atrás (datação radiométrica) de uma nuvem achatada e girante de gás, gelo e poeira (nebulosa solar).
  - O Sol se forma e evapora o gelo e os gases leves (H e He): linha do gelo.
  - Planetesimais (~0,1–100 Km) se formam a partir de colisões dando início a formação planetária.
  - Júpiter e Saturno eram inicialmente rochosos e metálicos. Posteriormente agregaram quantidades enormes de H, He e água.
  - Urano e Netuno também eram inicialmente rochosos e metálicos. Posteriormente atraíram mais água e menos H e He que os gigantes gasosos.
  - O modelo de Nice (em homenagem a cidade francesa onde foi proposto) indica que Júpiter foi formado primeiro, seguido de Saturno, Netuno e Urano. Estes últimos foram lançados para suas órbitas atuais (mais longe que as originais) pelas forças gravitacionais de Júpiter e Saturno.
  - Os quatro planetas rochosos internos foram formados por colisões de corpos menores (~ do tamanho da Lua) e, provavelmente, depois que os 4 planetas externos já estavam formados.
- × O proto-Sol se forma no centro. Depois de ~50 milhões de anos a temperatura é suficientemente alta para iniciar as fusões nucleares: forma-se o Sol.
- × Por ~800 milhões de anos depois que o Sol é formado, impactos de objetos do tamanho de asteroides sobre os jovens planetas dominam a história do sistema solar.

# Formação do Sistema Solar

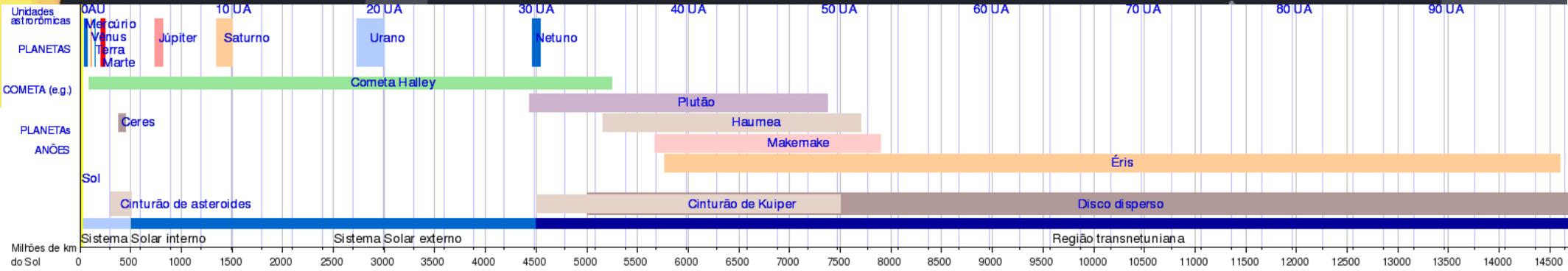
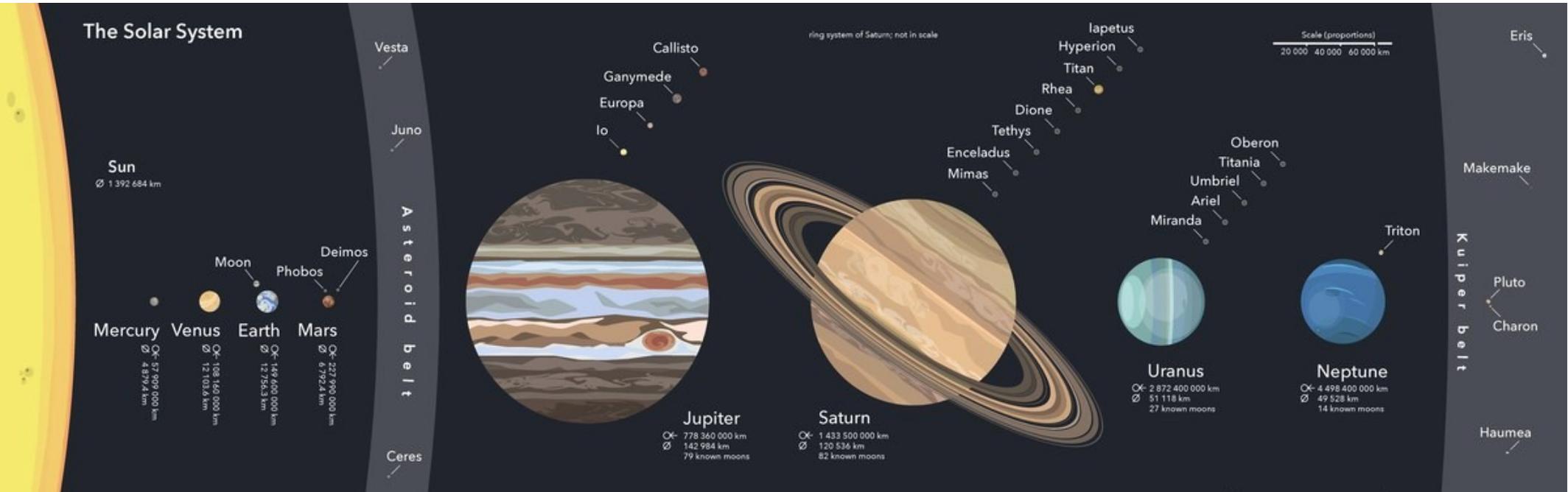
Muitas perguntas em aberto e hipóteses alternativas:

- Júpiter pode ter sido formado de maneira semelhante ao Sol, sem a necessidade de colisões de planetesimais. Ele teria então agregado muito H e He e só depois agregado o seu núcleo rochoso e metálico. Alternativamente, ambas as agregações de elementos “leves” e “pesados” podem ter acontecido simultaneamente.
- Júpiter pode ter tido uma órbita mais interna que impediu a formação de um planeta na região do cinturão de asteroides.
- Quando da migração planetária de Urano e Netuno, vários corpos de gelo foram perturbados dando início a uma fase denominada de intenso bombardeio tardio que terminou ~3,8 bilhões de anos atrás (datação radiativa de rochas na Lua).
- Netuno formou-se entre Saturno e Urano?
- De onde veio a água da Terra? Inicialmente, havia oceanos de lava. Só depois que a superfície se esfriou é que a Terra poderia ter agregado água.

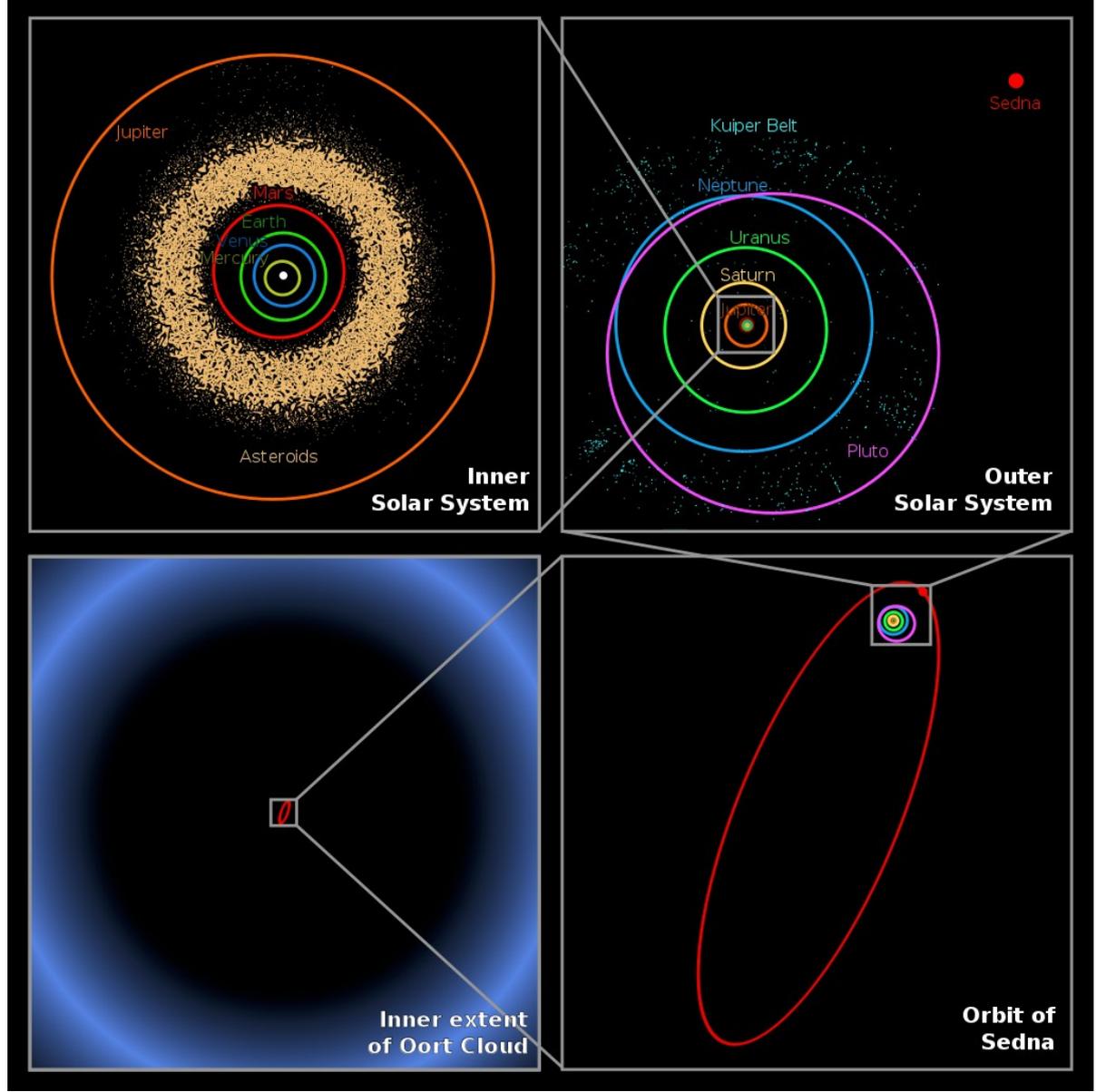
# O que há no Sistema Solar?

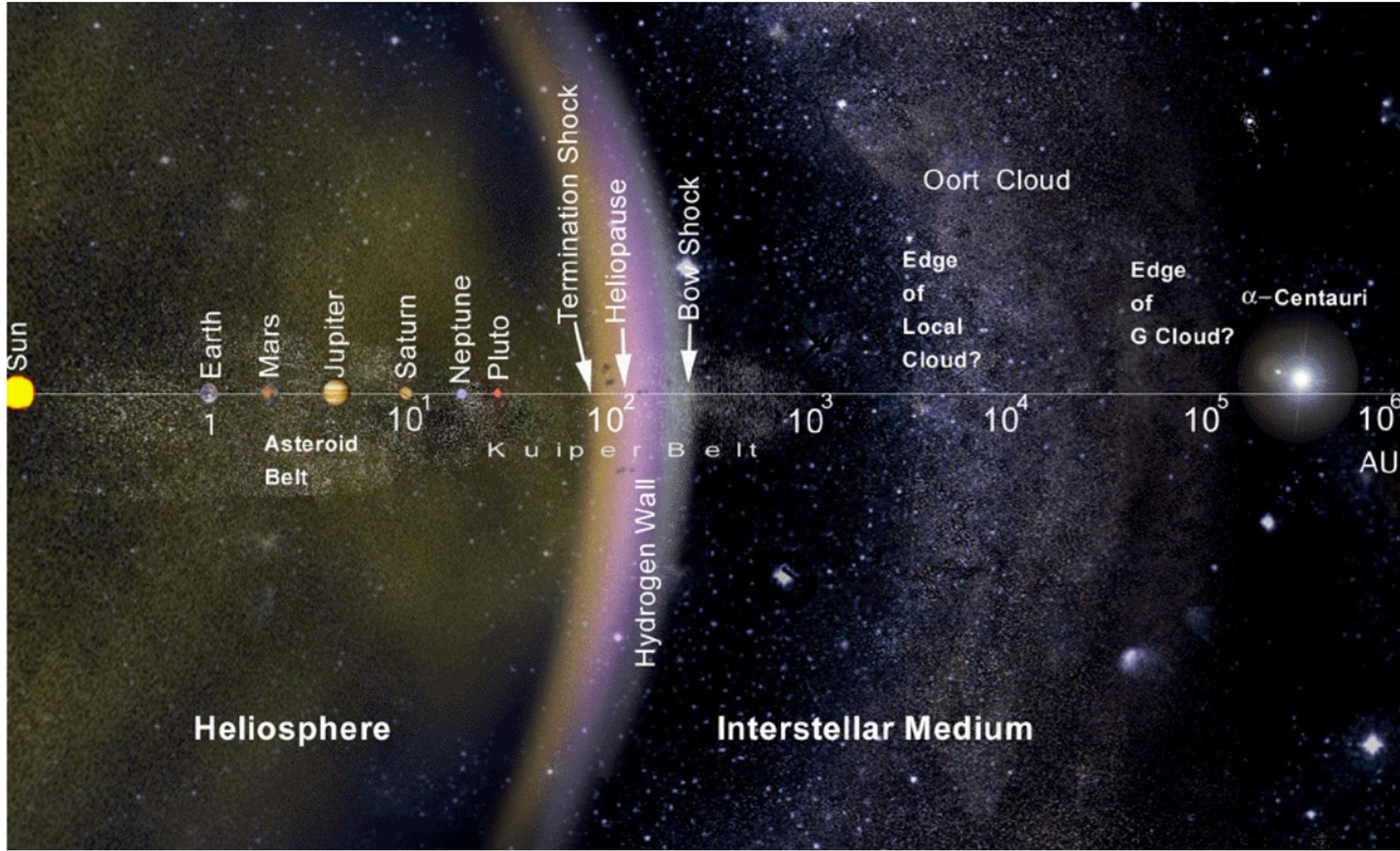
- 1 estrela: o Sol
- 4 planetas Telúricos (planetas internos predominantemente rochosos): Mercúrio, Vênus, Terra e Marte
- 4 planetas Jovianos (planetas externos, gigantes gasosos): Júpiter, Saturno, Urano, Netuno
- Planetas anões: Ceres, Plutão, Éris, Makemake, Haumea, Sedna(?), ...
- Inúmeras luas (satélites naturais)
- Cometas, asteroides, meteoroides, fragmentos de gelo, partículas de poeira interplanetária e objetos transnetunianos (fragmentos de gelo e de rocha)

# O Sistema Solar



# O Sistema Solar

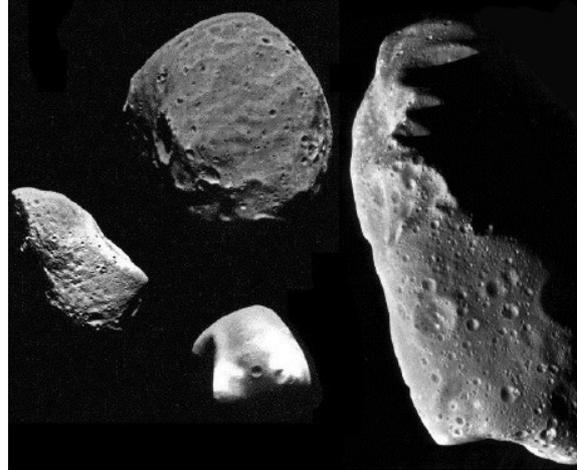




# Limites do Sistema Solar: objetos Transnetuianos

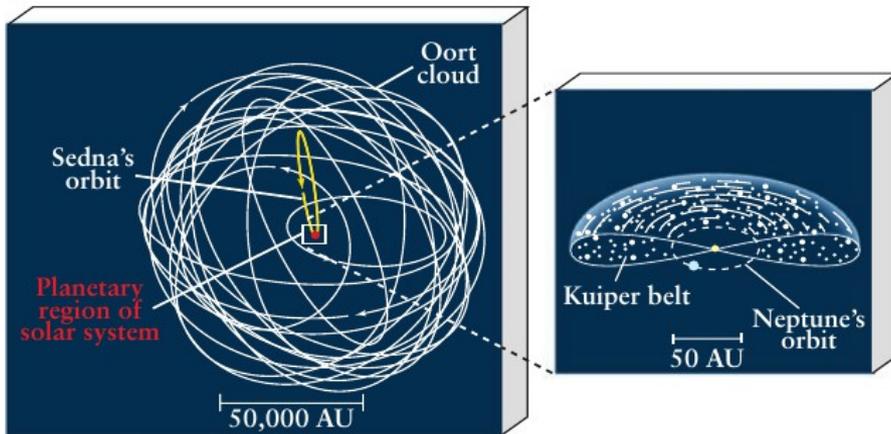
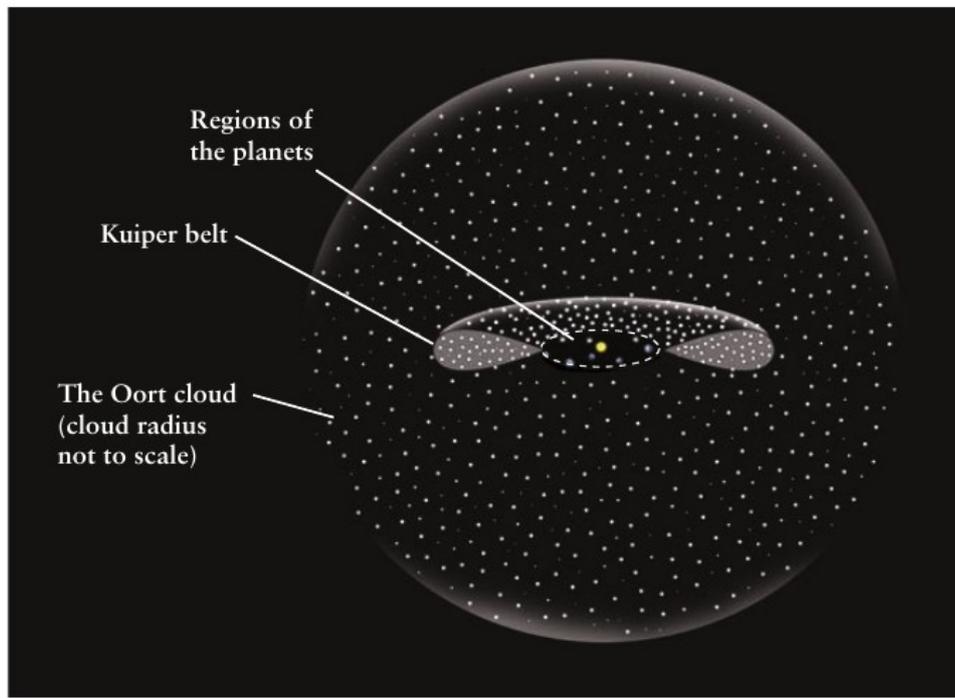
São os menores do Sistema Solar  
Compostos de rocha (silicatos) e gelo

Estão na região do Sistema Solar que se divide em:  
Cinturão de Kuiper  
Disco Disperso  
Nuvem do Oort

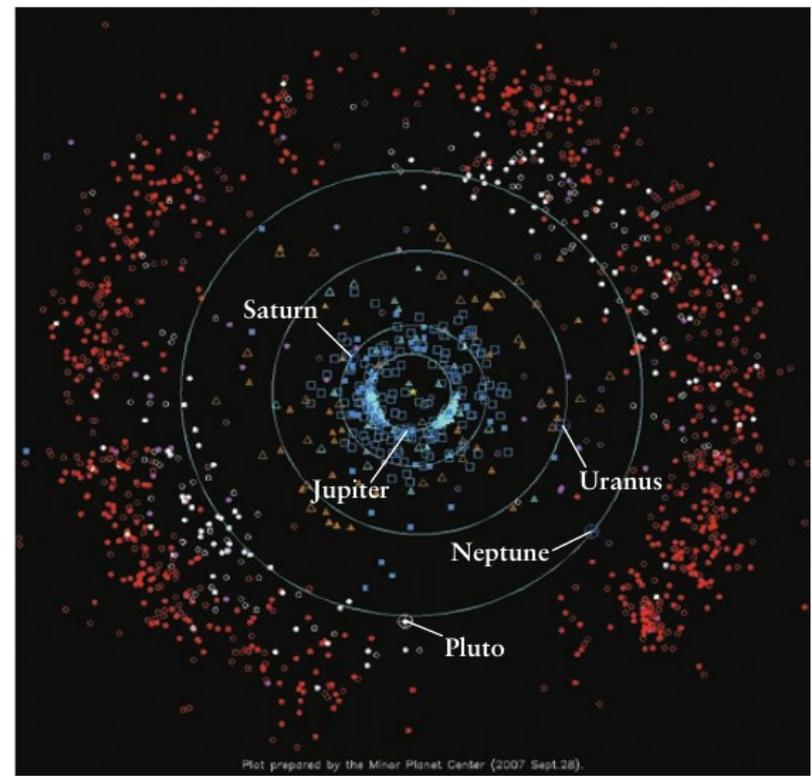


# Os maiores objetos transnetunianos conhecidos



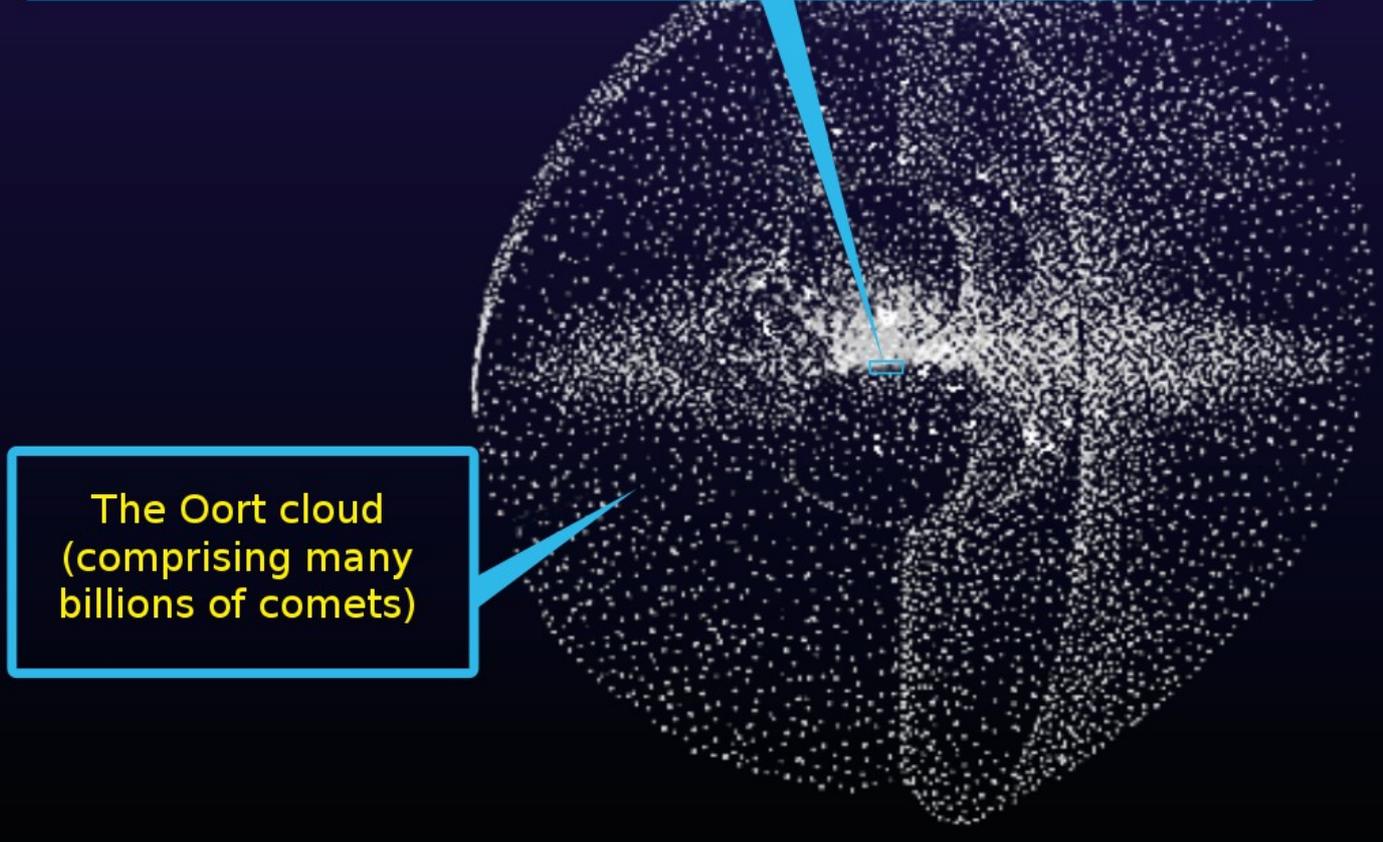
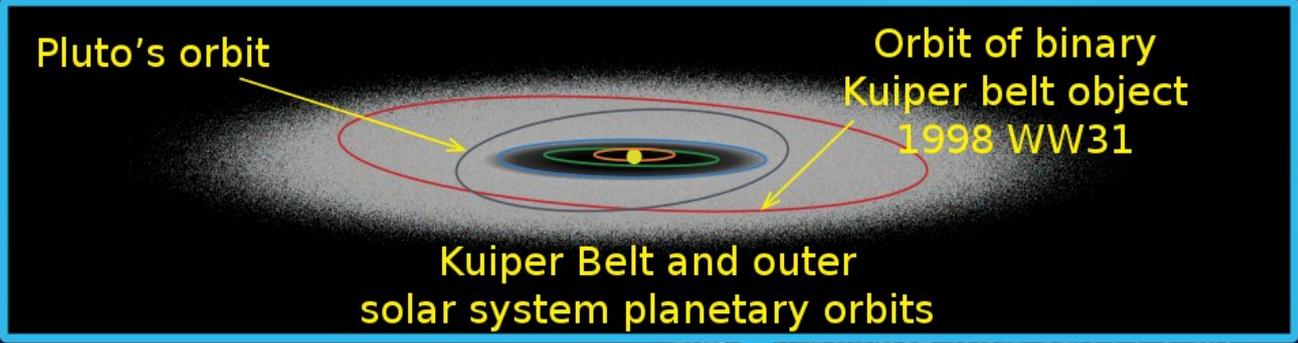


a Orbits of some Oort and Kuiper belt objects



b

**FIGURE 5-6 The Kuiper Belt and Oort Cloud** (a) The classical Kuiper belt of comets spreads from Neptune out 50 AU from the Sun. Most of the estimated 200 million Kuiper belt comets are believed to orbit in or near the plane of the ecliptic. The spherical Oort cloud, containing billions of comets, extends out beyond the Kuiper belt. (b) Positions of known bodies in the Kuiper belt and Oort cloud. (b: Gareth Williams/Minor Planet Centre.)



# Limite gravitacional do Sistema Solar

**Cinturão de Kuiper:** Região semelhante ao cinturão de asteroides (entre Marte e Júpiter) que se estende desde a órbita de Netuno (a 30 UA do Sol) até ~55 UA do Sol. Objetos nesta região são dinamicamente estáveis e, portanto, o cinturão não abriga a maioria dos cometas (como se pensava inicialmente).

Maiores objetos conhecidos: Plutão, Haumea e Makemake. (Possivelmente, as luas Tritão e Hiperion). Mais de mil objetos catalogados. Acredita-se que há mais de 100 mil objetos com mais de 100 Km de diâmetro. O menor objeto já catalogado tem ~ 1 Km de diâmetro. Acredita-se que existam muitos mais.

**Disco disperso:** Região similar ao cinturão de Kuiper, porém mais inclinada com relação à eclíptica. Acredita-se que os objetos nesta região são aqueles cujas órbitas foram afetadas quando da migração planetária de Urano e Netuno, e ainda são gravitacionalmente perturbados por Netuno. Por esse motivo, acredita-se que esta região é um repositório da maioria dos cometas periódicos.

Os objetos no disco disperso têm órbitas excêntricas (~0,8) e inclinadas (~40°) com perihélio ~ 30UA. Parte da comunidade astronômica não distingue o cinturão de Kuiper do disco disperso.

Maiores objetos conhecido: Éris (1300 Km em diâmetro, maior que Plutão com 1200 Km), sua lua Disnomia, Sedna (? , objeto não anexado “detached object”?)

**Nuvem de Oort:** Região hipotética que abrigaria os cometas de longo períodos. Se estende até ~50 mil UA (~0.8 al). Os objetos nesta região estariam fracamente ligados gravitacionalmente ao Sol e distribuídos esfericamente.

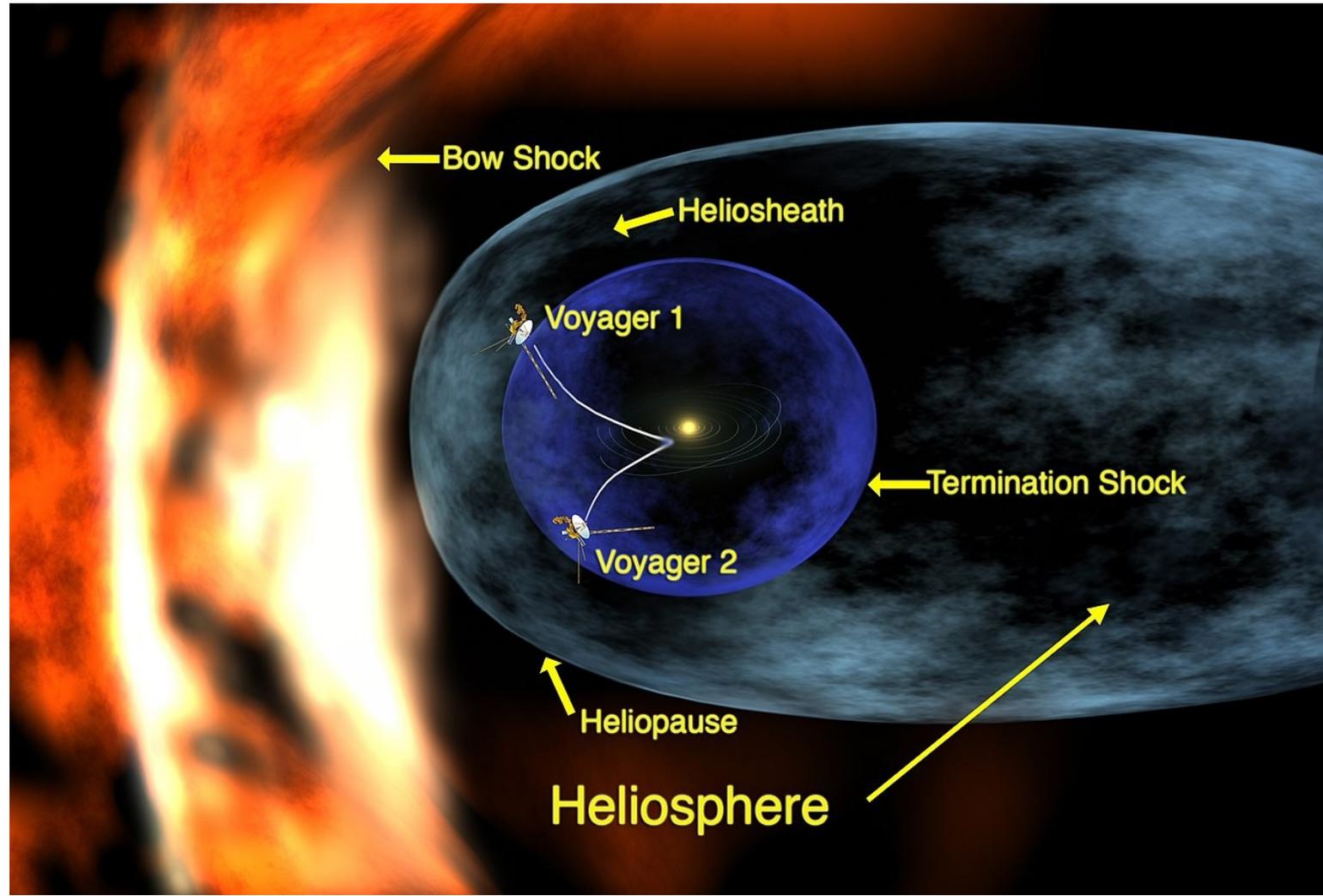
# Limite radiativo do Sistema Solar

## Heliosfera:

Região preenchida pelo vento solar (emissão contínua de partículas carregadas podendo ser elétrons e prótons além de sub-partículas como os neutrinos).

## Choque de terminação:

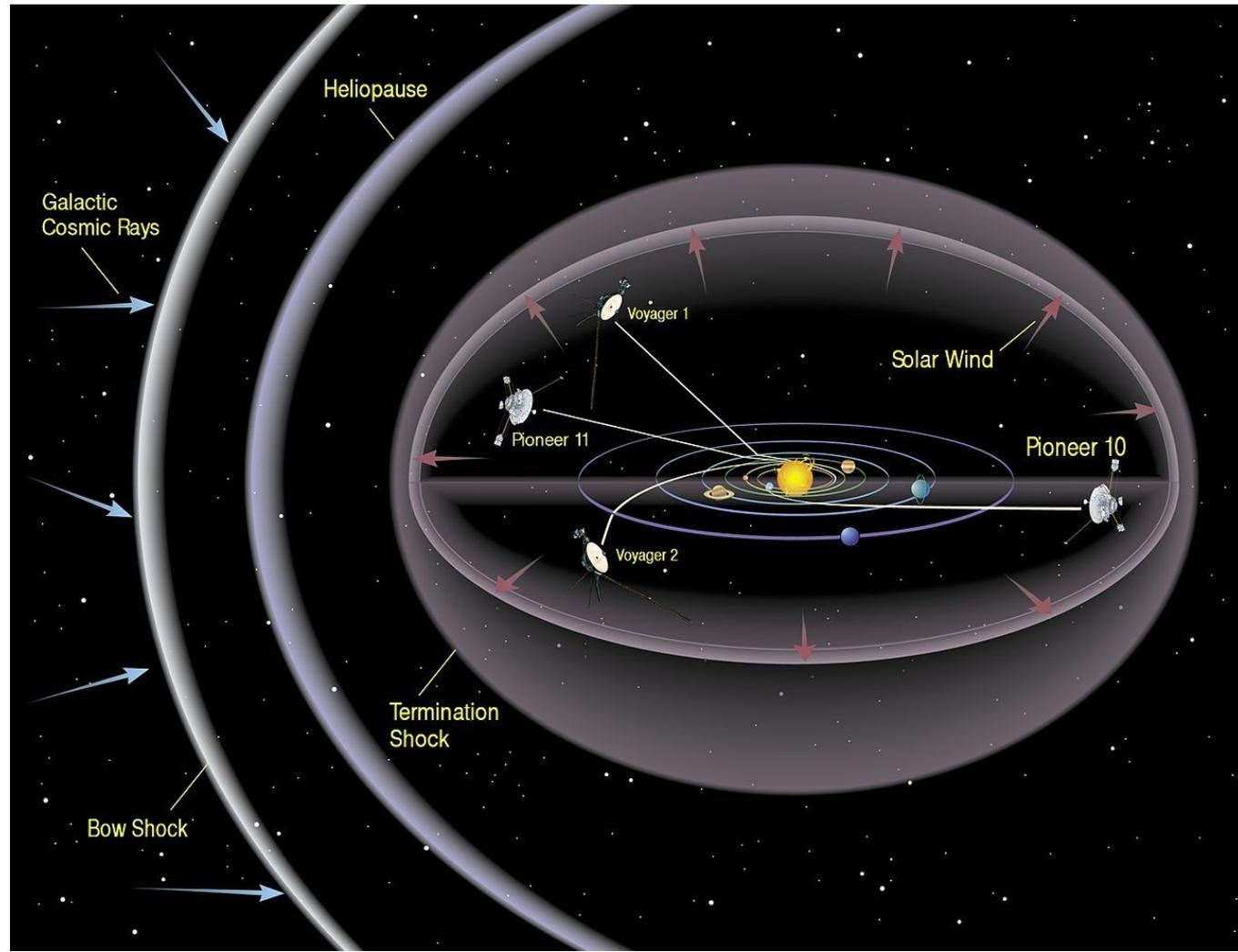
Região turbulenta onde os ventos solares diminuem subitamente quando confrontam com o vento interestelar.



# Limite radiativo do Sistema Solar

A Voyager 1 encontrou o Choque de Terminação aproximadamente a 90 UA do Sol (10 UA mais distante do que a Voyager 2), e isso confirmou que a Heliosfera não é esférica e tem, na realidade, um formato “amassado” para dentro no sul, em comparação com o norte.

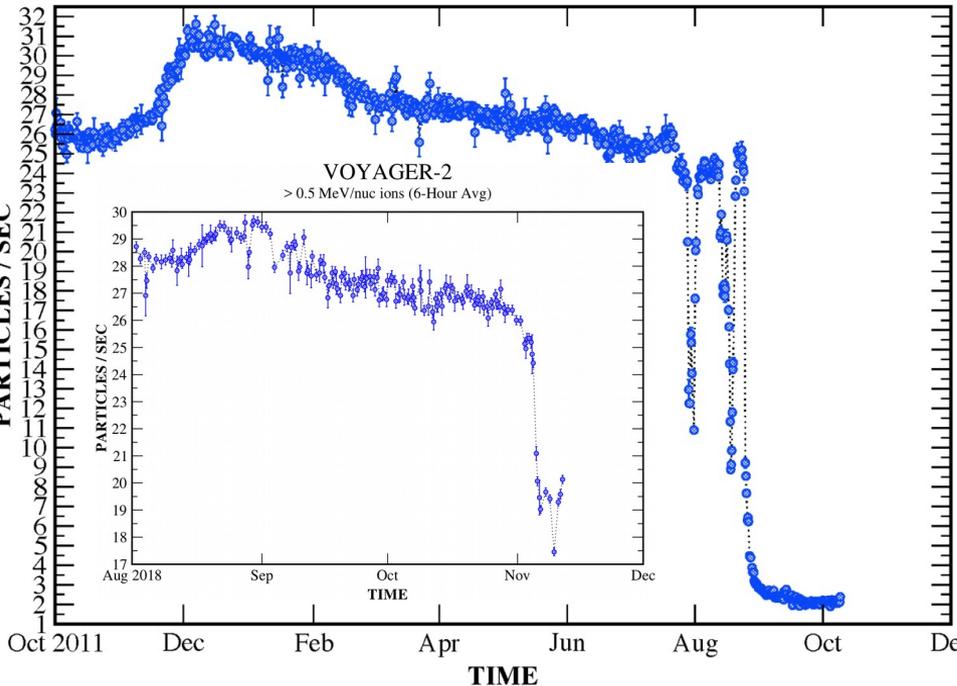
A Voyager 2 cruzou o limite do Choque de Terminação várias vezes, o que indica que a região é dinâmica, avançando e recuando como o mar na praia.



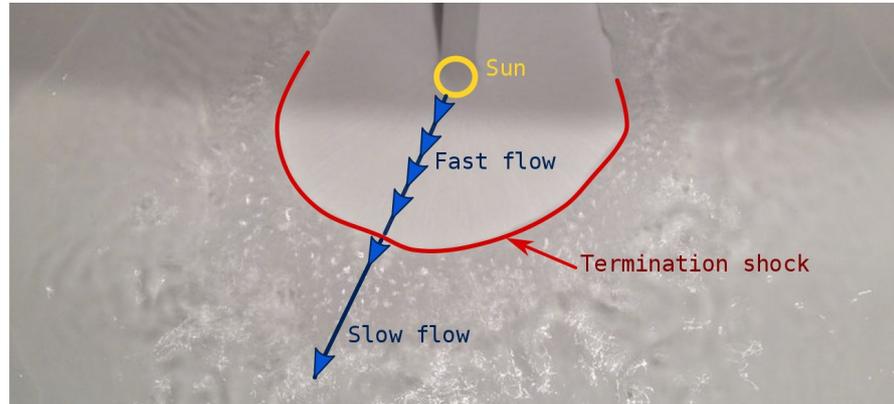
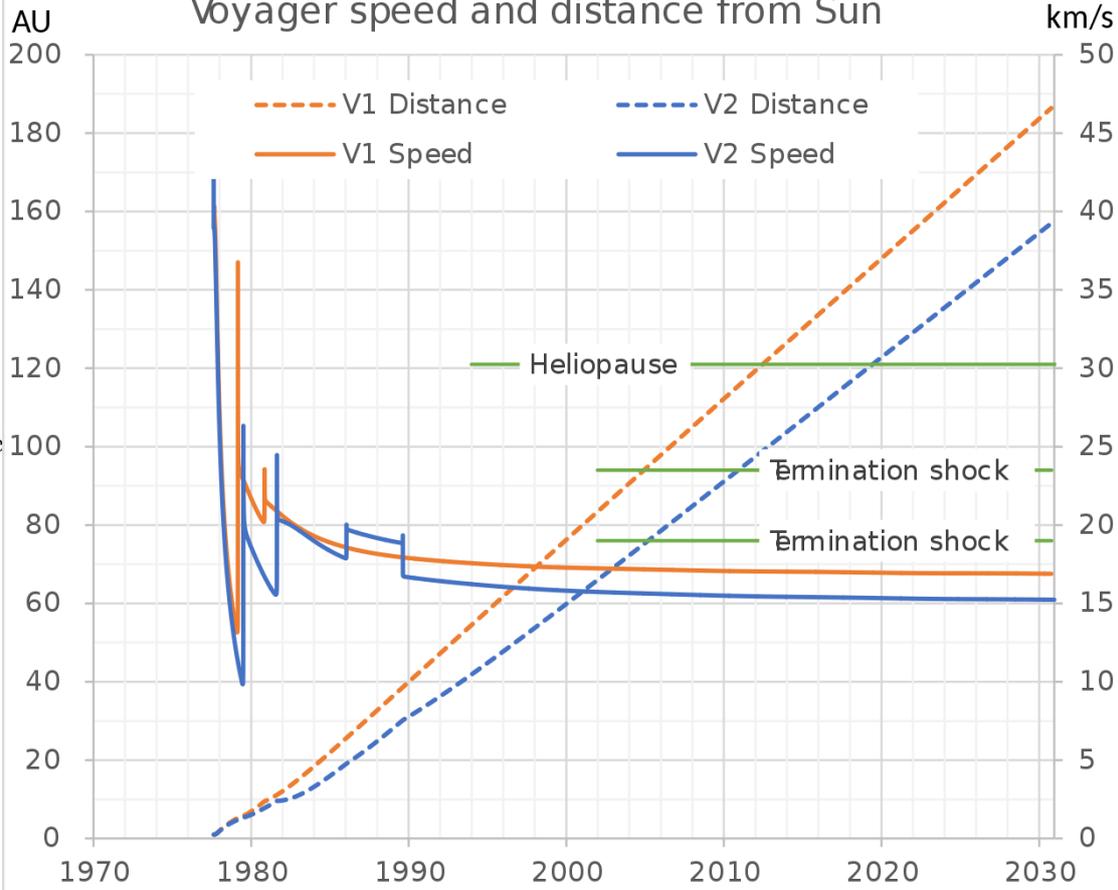
# Limite radiativo do Sistema Solar

## VOYAGER-1

> 0.5 MeV/nuc ions (6-Hour Avg)



## Voyager speed and distance from Sun



# Limite radiativo do Sistema Solar

## **Heliopausa:**

Limite da influência do vento solar localizado ao redor do Sistema Solar. O vento solar é parado pelo meio interestelar, pois nesta região as pressões são iguais. Estima-se que esta região encontra-se entre 110 e 160 AU do Sol.

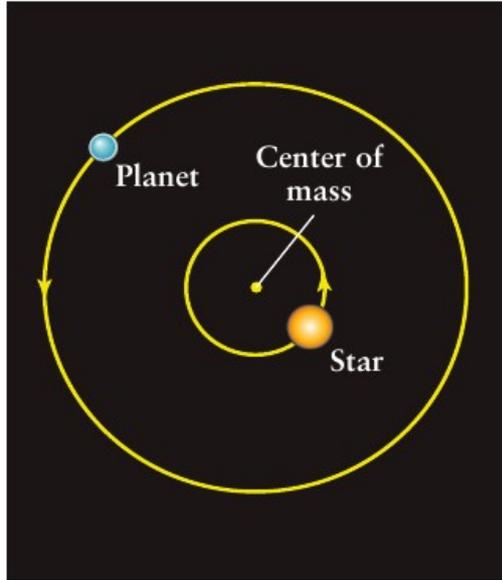
## **Arco de choque:**

Região turbulenta onde o vento interestelar, que viaja em direção oposta ao vento solar, colide e se mistura com a heliosfera. Estima-se que essa região se encontra a uma distância de 230 UA do Sol.

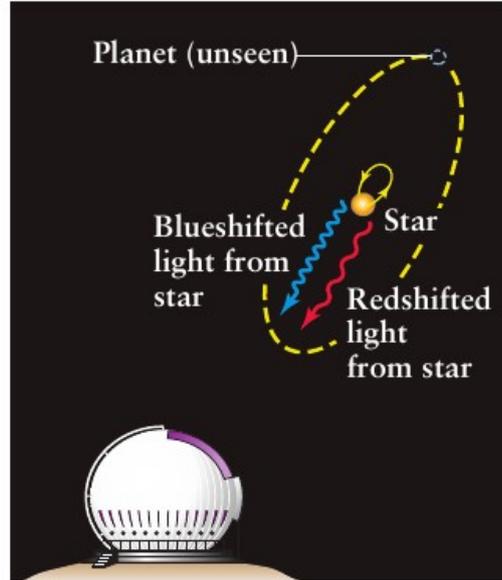


Arco de choque da estrela LL Orionis na nebulosa de Órion

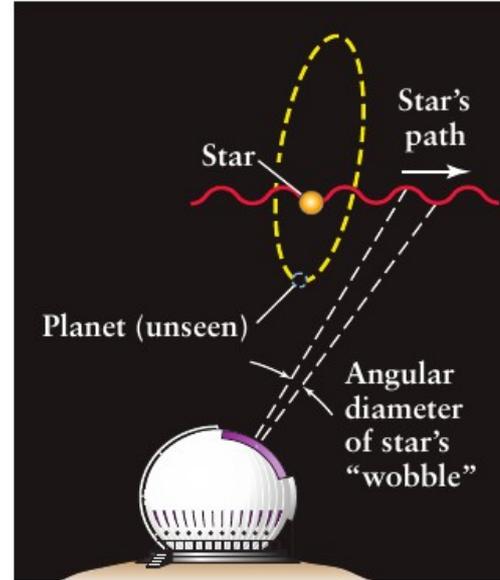
# Exoplanetas: como detectá-los?



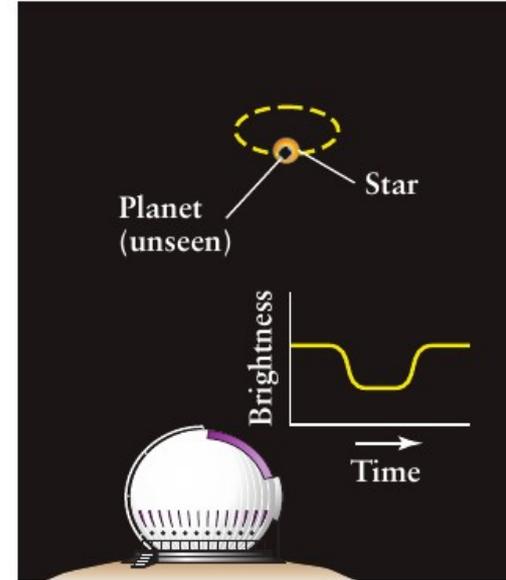
a A star and its planet



b The radial velocity method



c The astrometric method

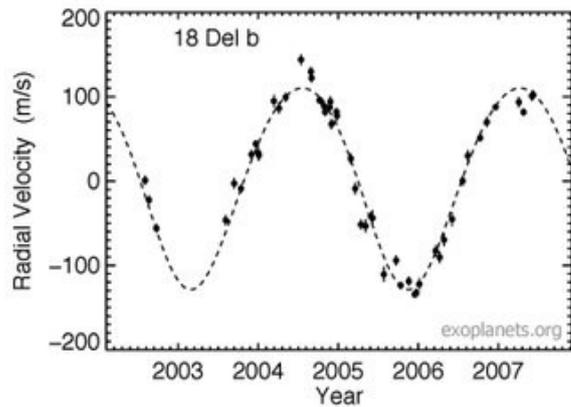


d The transit method

Os métodos “tradicionais” são indiretos e baseados nos efeitos que os planetas causam nas estrelas:

- 1) Efeito Doppler (velocidade radial)
- 2) Variação da trajetória (astrometria)
- 3) Trânsito

# Exoplanetas: efeito Doppler

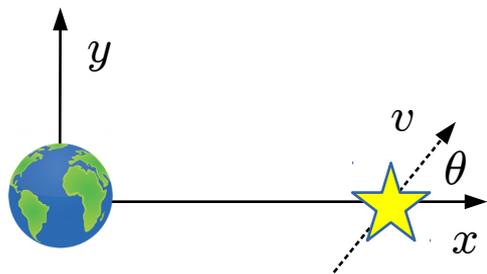
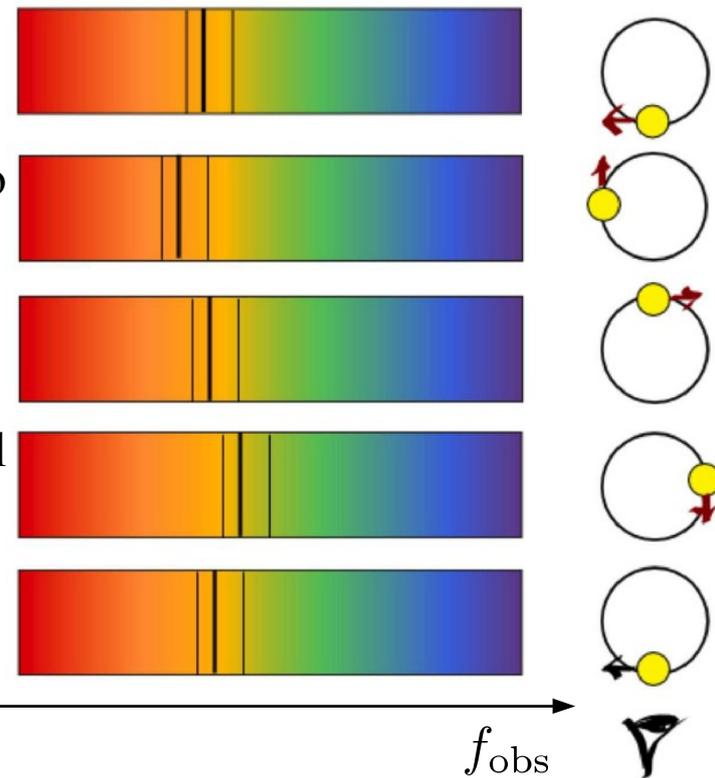


“Redshift” - desvio para o vermelho  
(estrela de afastando)

“Blueshift” - desvio para o azul  
(estrela se aproximando)



Michel Mayor & Didier Queiroz.  
½ do Prêmio Nobel de Física de 2019 “for the discovery of an exoplanet orbiting a solar-type star”



$$f_{obs} = f_{fonte} \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \beta \cos \theta}, \text{ onde } \beta = \frac{v}{c}$$

Com as técnicas de espectroscopia Doppler atuais, consegue-se resoluções de até 4 Km/h na velocidade das estrelas.

Júpiter sobre o Sol: 13 m/s  
Terra sobre o Sol: 9 cm/s

# Exercício

Como podemos ter acesso a massa total (ou limite inferior da mesma) do sistema (estrela+planeta) usando a técnica de velocidade radial?

Dica: 3ª Lei de Kepler

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G(M + m)} a^3$$

# Exoplanetas: astrometria

## Vantagens:

Melhor para os casos em que o plano da órbita é perpendicular a linha de visada

Melhor para planetas de longo período que causam maior “desvio” na órbita da estrela

Trânsito

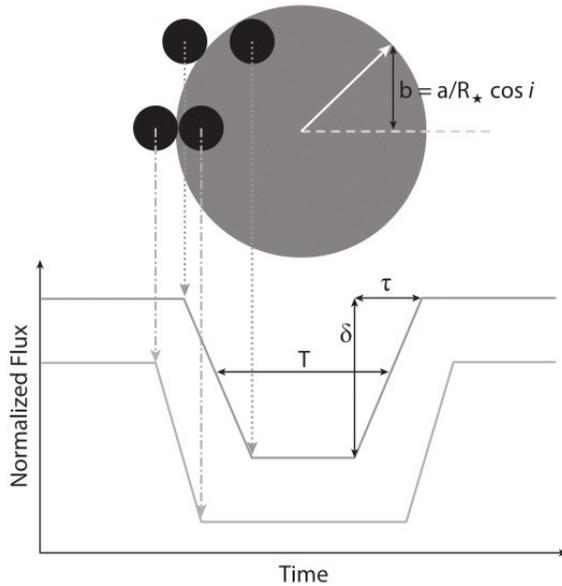
## Desvantagens:

Requer alta precisão (apenas para estrelas próximas)

Requer longo período de observação para determinar a oscilação da trajetória

(Até 2020, não há nenhum registro de um exoplaneta descoberto por essa técnica. Houveram várias propostas, mas todas refutadas)

# Exoplanetas: fotometria de trânsito



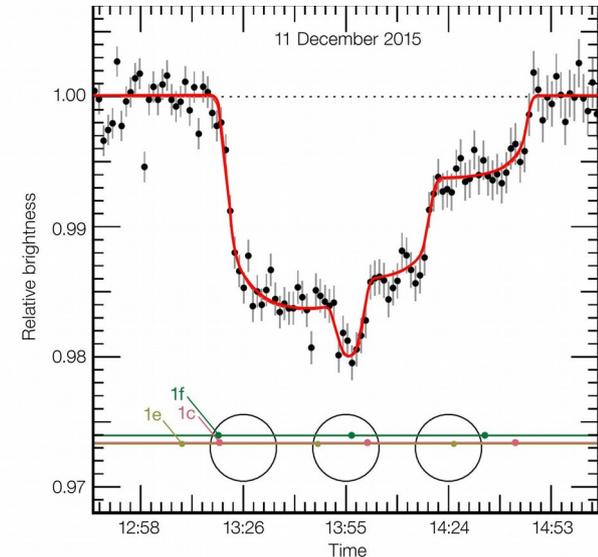
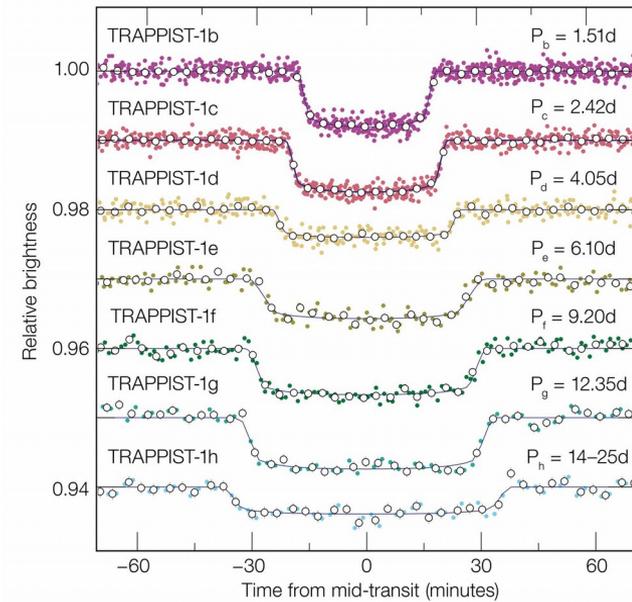
## Vantagens:

- Informação sobre o tamanho relativo planeta/estrela
- Aplicável para estrelas  $\sim$  milhares de anos-luz de distância

## Desvantagens:

- Plano da órbita e linha de visada alinhados
- Muitos falso-positivos (sistema binário, Anãs brancas e marrons)

## Sistema Trappist 1



# Exoplanetas: microlente gravitacional

## Vantagens:

Maior sensibilidade para planetas distantes (1-10 UA)

Sensível para planetas tão massivos quanto Marte

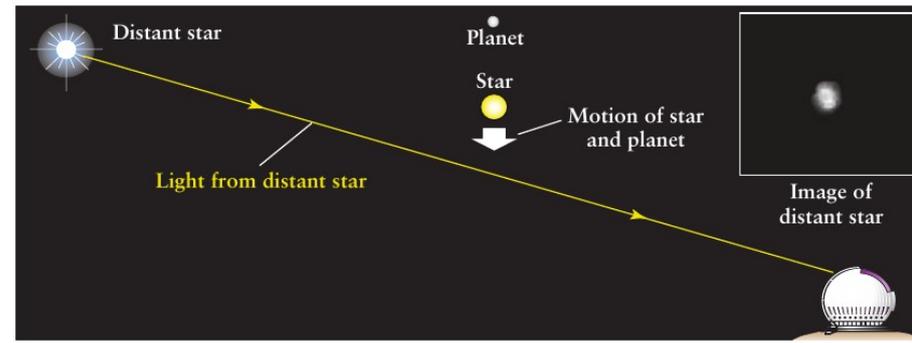
Aplicável para estrelas distantes

## Desvantagens:

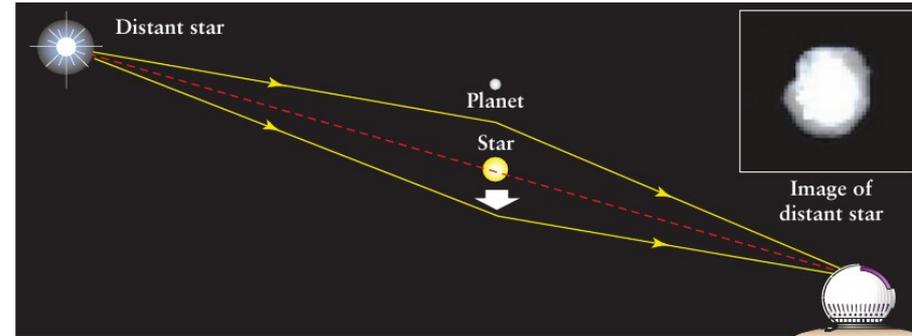
Não pode ser repetido

Precisa-se do eclipse (sistemas entre a Terra e o centro galáctico)

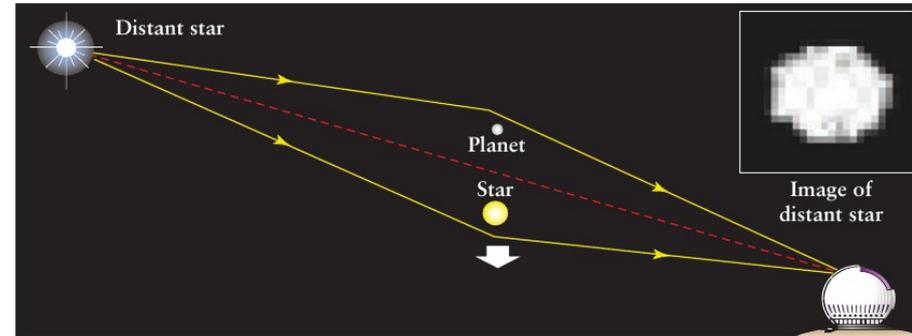
Mais de 1000 observações feitas até 2020.



a No microlensing



b Microlensing by star



c Microlensing by star and planet

# Exoplanetas: imageamento direto

Imagem direta no visível é possível praticamente impossível.

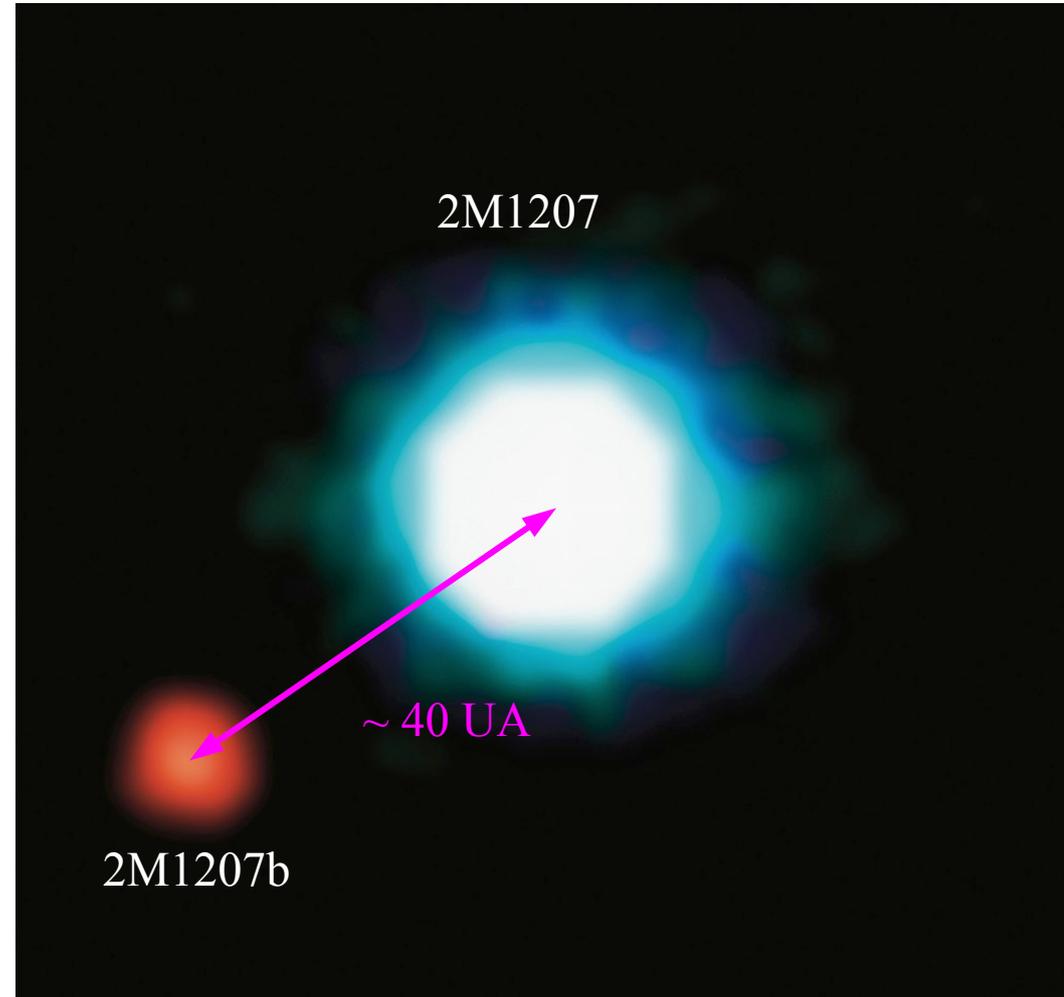
Estratégia: **Emissão térmica**.

Imagem direta (no infra-vermelho, em 2004) da Anã Marrom 2M1207 e de seu objeto-companheiro 2M1207b. O sistema se encontra a 172 anos-luz de distância na constelação do Centauro.

Massa da Anã Marrom:  $\sim 0,024 M_{\odot} = 25 M_{\oplus}$

(Muito pequena para proporcionar fusão de H; precisa-se de  $\sim 0,08 M_{\odot} = 84 M_{\oplus}$ )

O objeto-companheiro 2M1207b (por que não é um exoplaneta?) tem de 3 a  $10 M_{\oplus}$ .



# Exoplanetas: imageamento direto

Imagem direta do planeta Fomalhaut b (denominado de Dagon) que orbita a estrela Fomalhaut. O sistema está a 25 anos-luz de distância na constelação do Peixe Austral.

Período da órbita:  $\sim 1.700$  anos

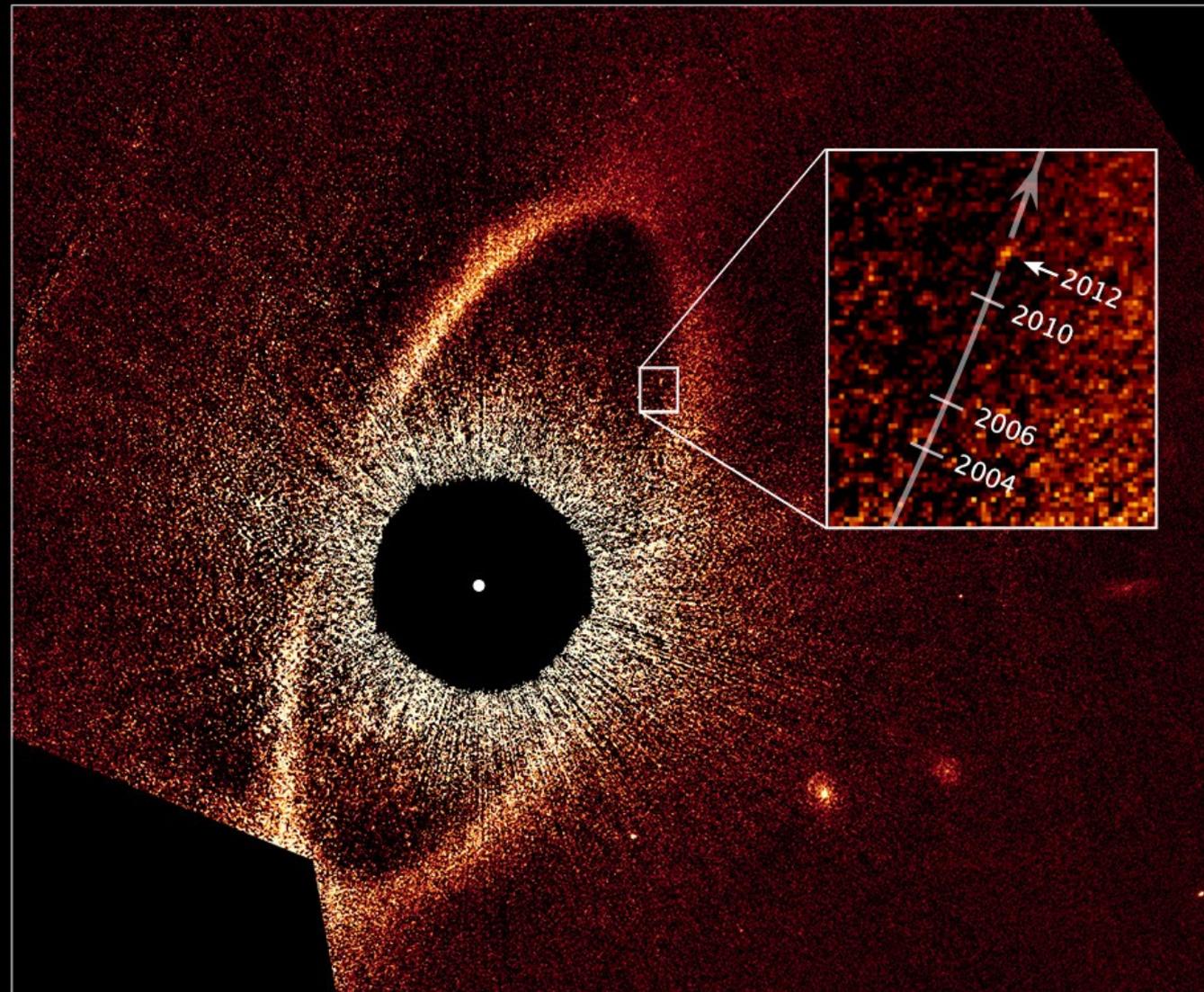
Periastro:  $\sim 50$  UA

Apoastro:  $\sim 300$  UA

Causa de uma órbita tão excêntrica  
( $e \sim 0.8$ )?

Fomalhaut System

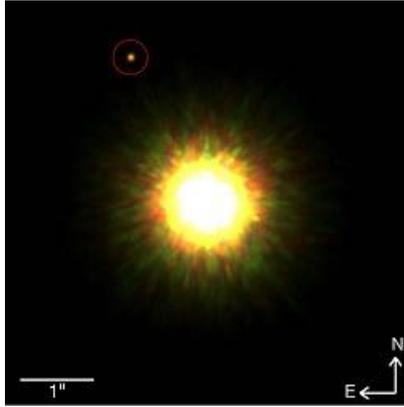
Hubble Space Telescope



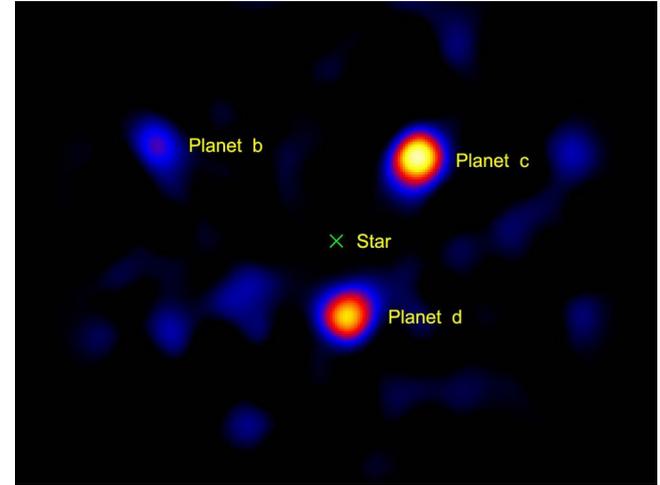
NASA and ESA

STScI-P

# Exoplanetas: imageamento direto

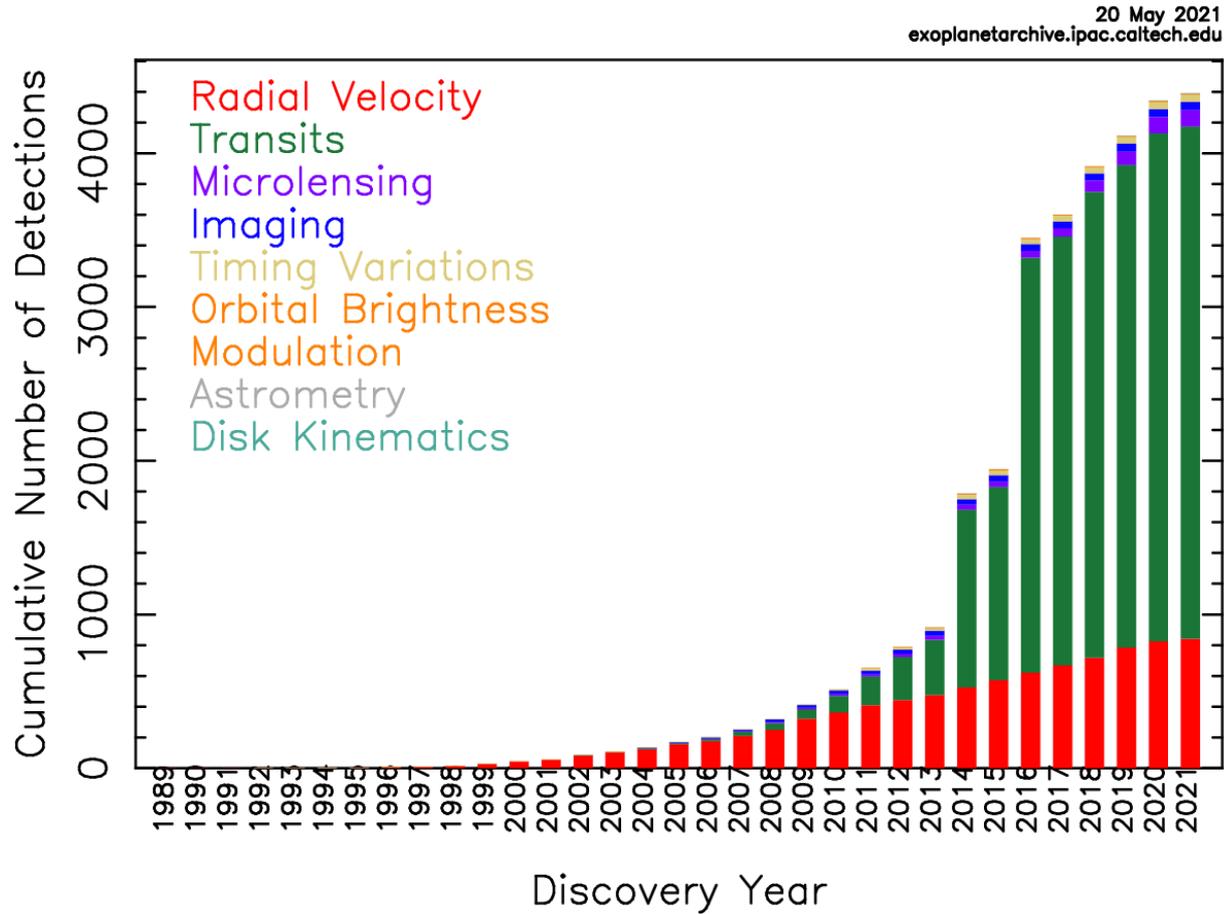


1RXS 1609  
~ 460 al em Escorpião  
~ 330 UA



HR8789  
~ 133 al em Pégasus  
~ 24, 38 e 68 UA  
São maiores que Júpiter  
e mais um planeta mais  
interno foi descoberto  
HR8789e

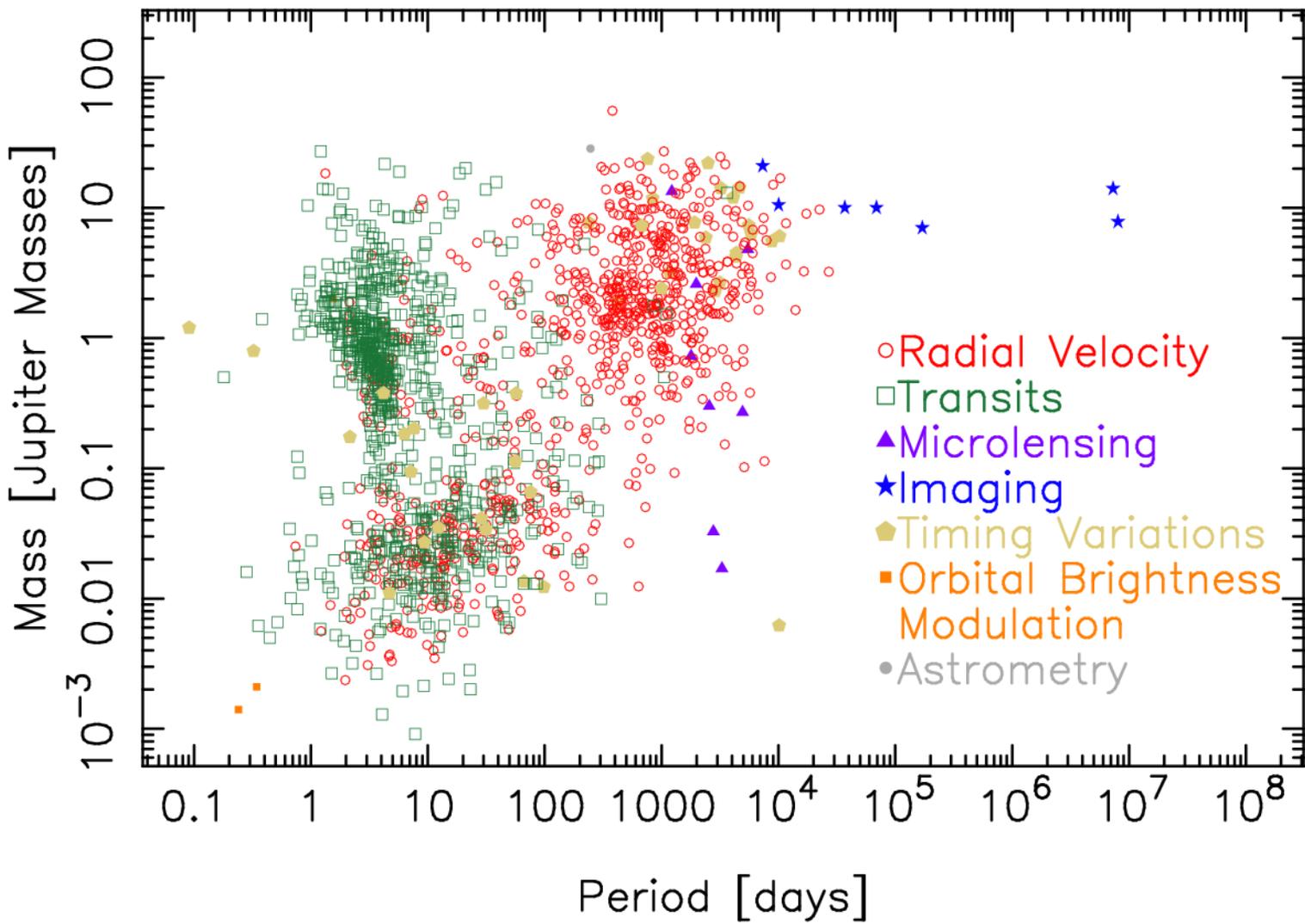
# Cumulative Detections Per Year



Até 2020, 4.389 exoplanetas descobertos (por pelo menos 2 métodos) em 3.260 sistemas estelares.

# Mass – Period Distribution

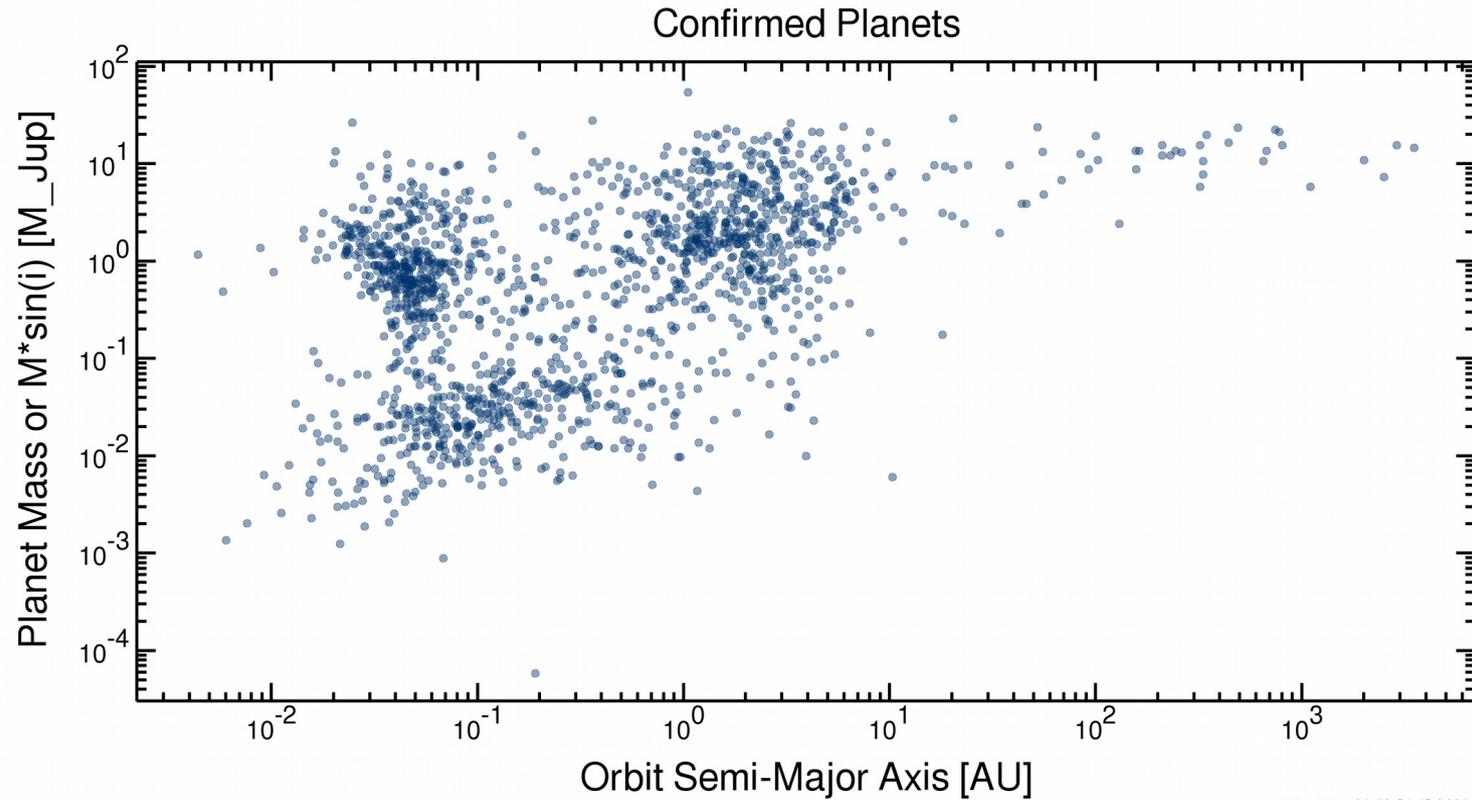
20 May 2021  
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu



# Exercício

A maioria dos exoplanetas são tipo Júpiter de órbitas menores que 1 UA?

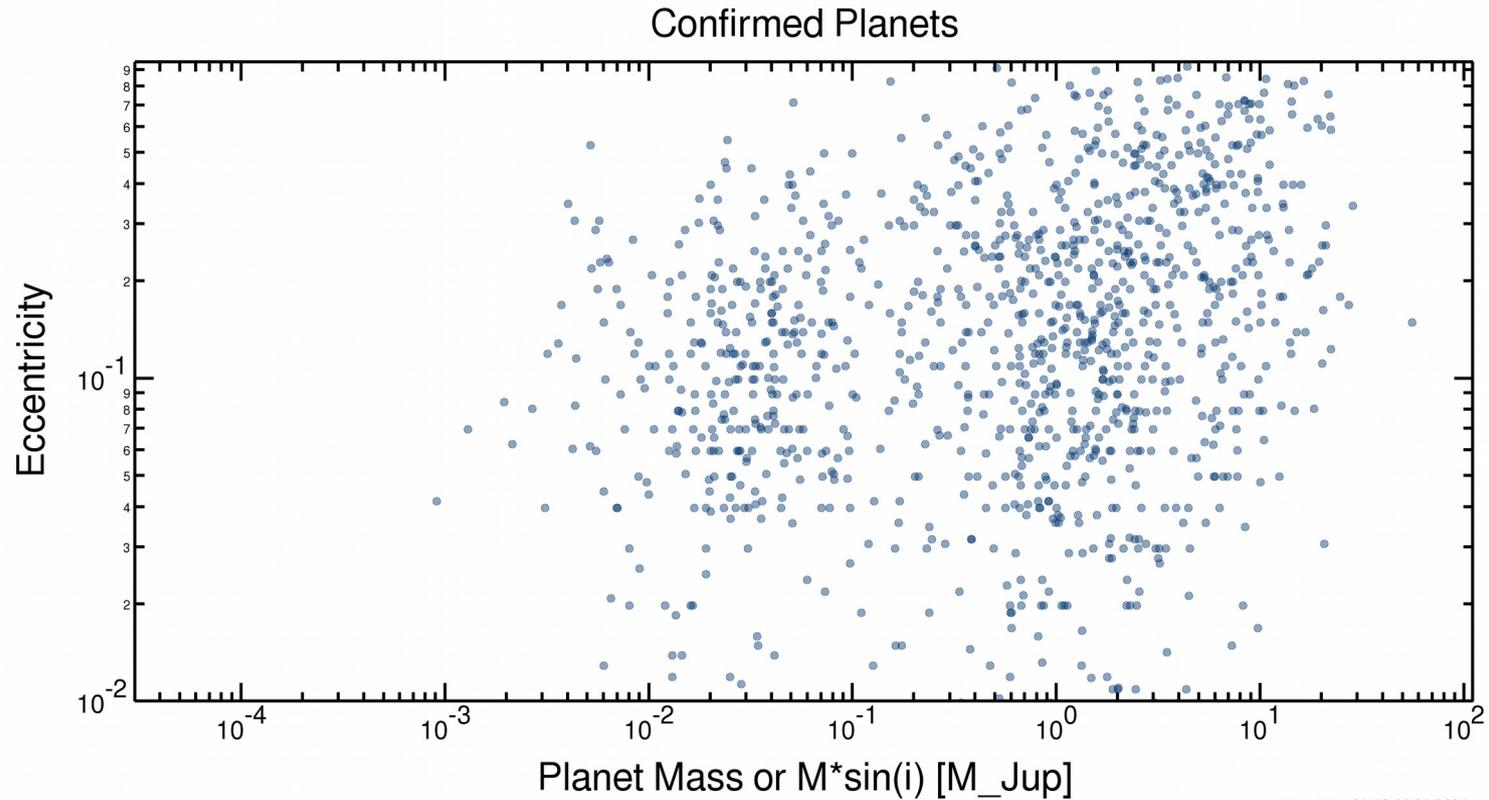
- 1) Sim
- 2) Não



# Exercício

A maioria dos exoplanetas estão em órbitas com excentricidades  $e > 0,1$ ?

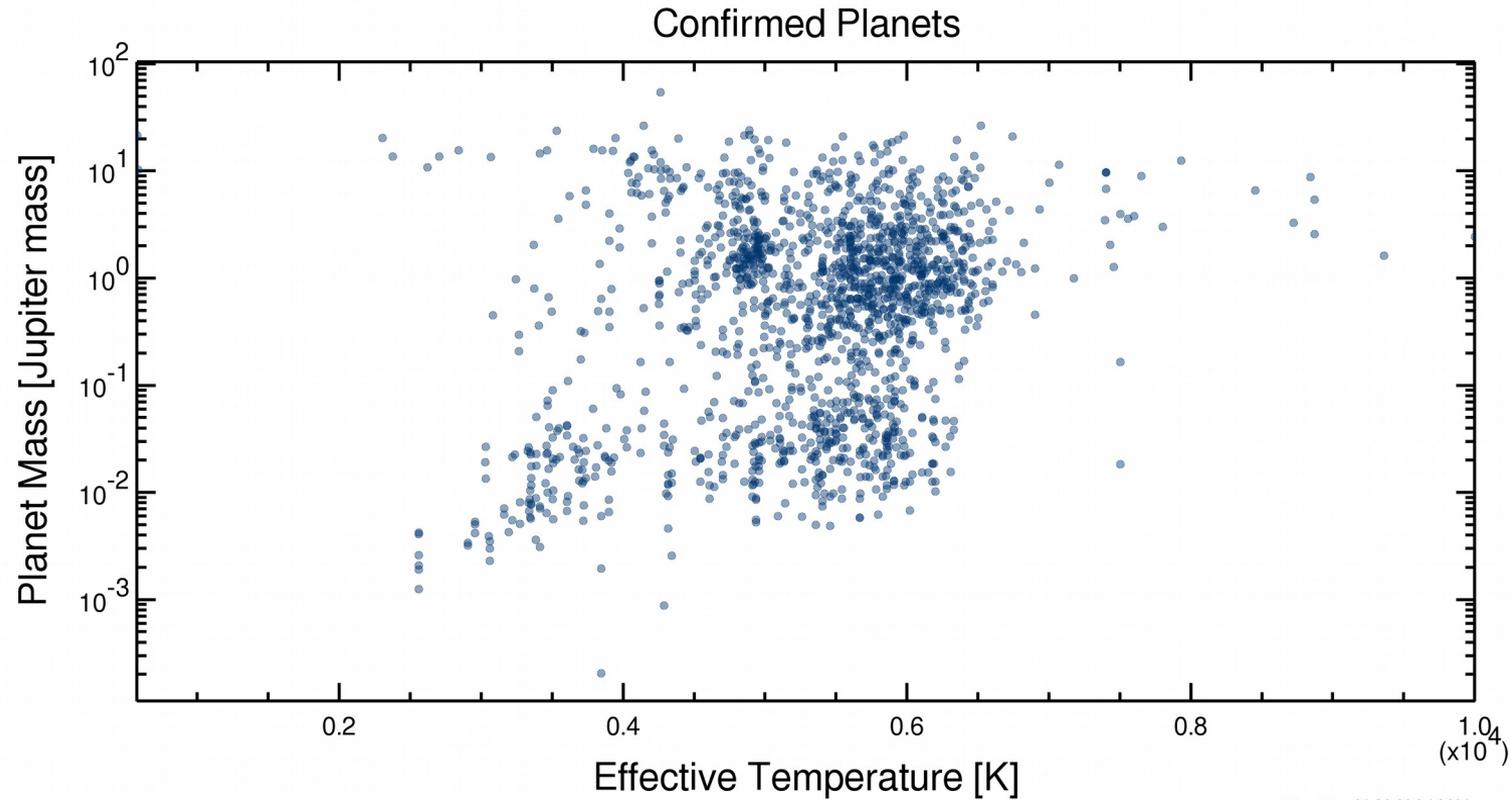
- 1) Sim
- 2) Não



# Exercício

A maioria dos exoplanetas são muito quentes?

- 1) Sim
- 2) Não



# Exercício

Verdadeiro ou falso: alguns planetas foram detectados sem estarem ligados à nenhum astro (chamados de planetas nômades ou planetas inter-estelares).  
Estima-se que há mais desses planetas do que estrelas em nossa galáxia.

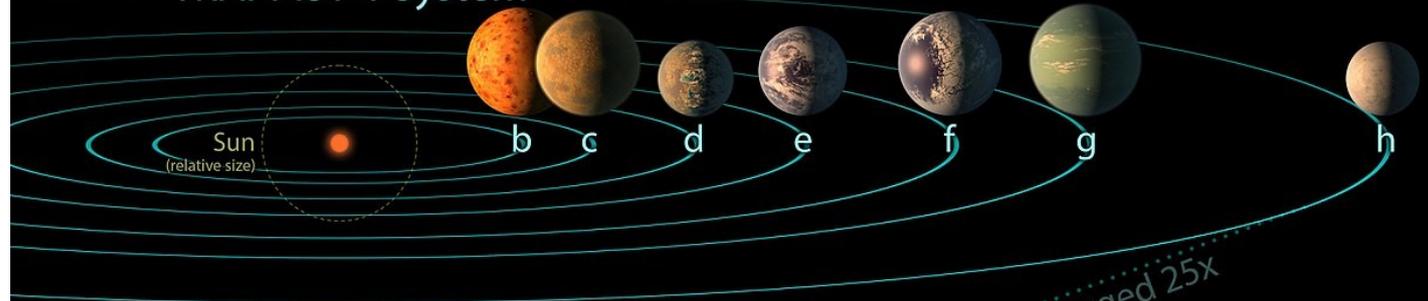
- 1) Verdadeiro
- 2) Falso

# Sistema TRAPPIST 1

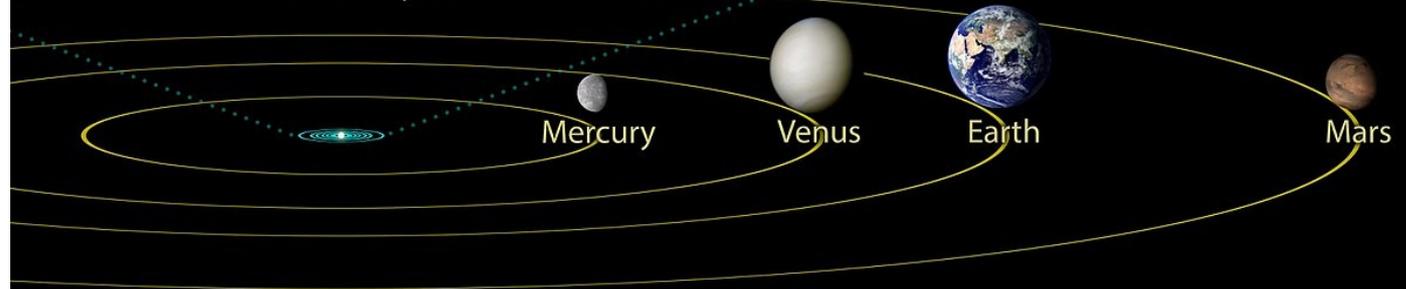
## Jupiter & Major Moons



## TRAPPIST-1 System



## Inner Solar System



Anã vermelha

~39 anos-luz (Aquário)

0,08  $M_{\odot}$

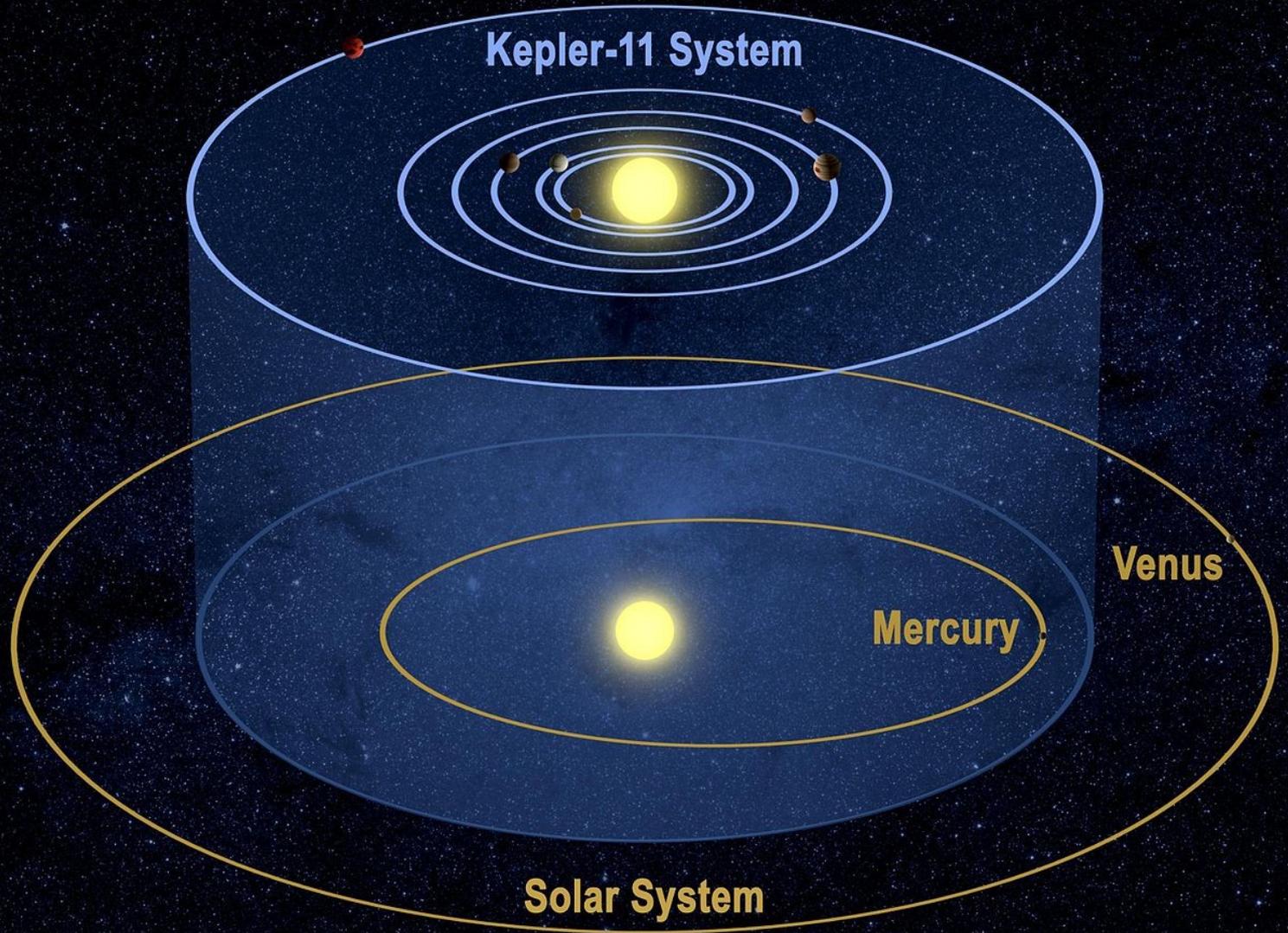
Maior número de planetas  
semelhantes à Terra: 7

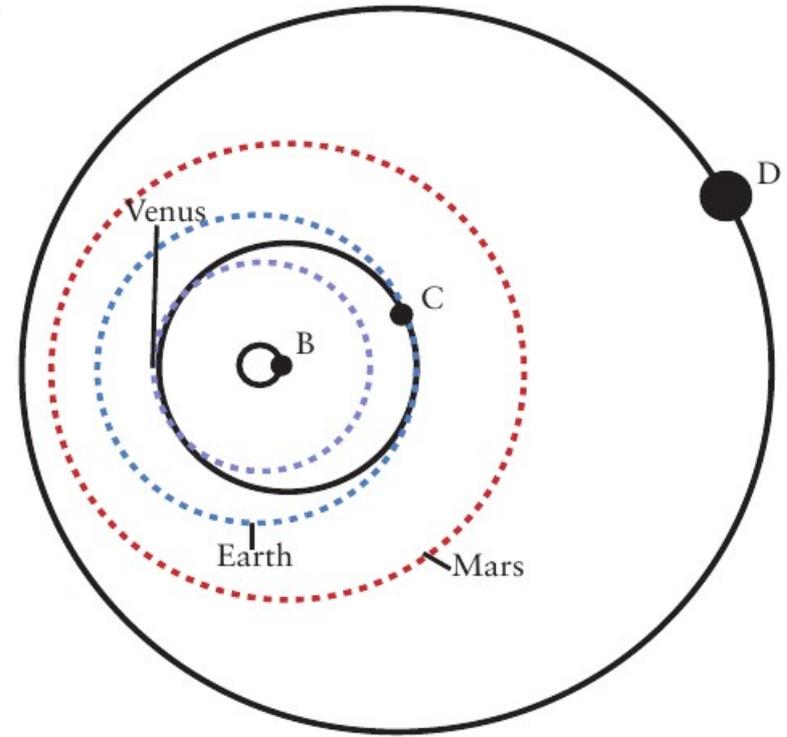
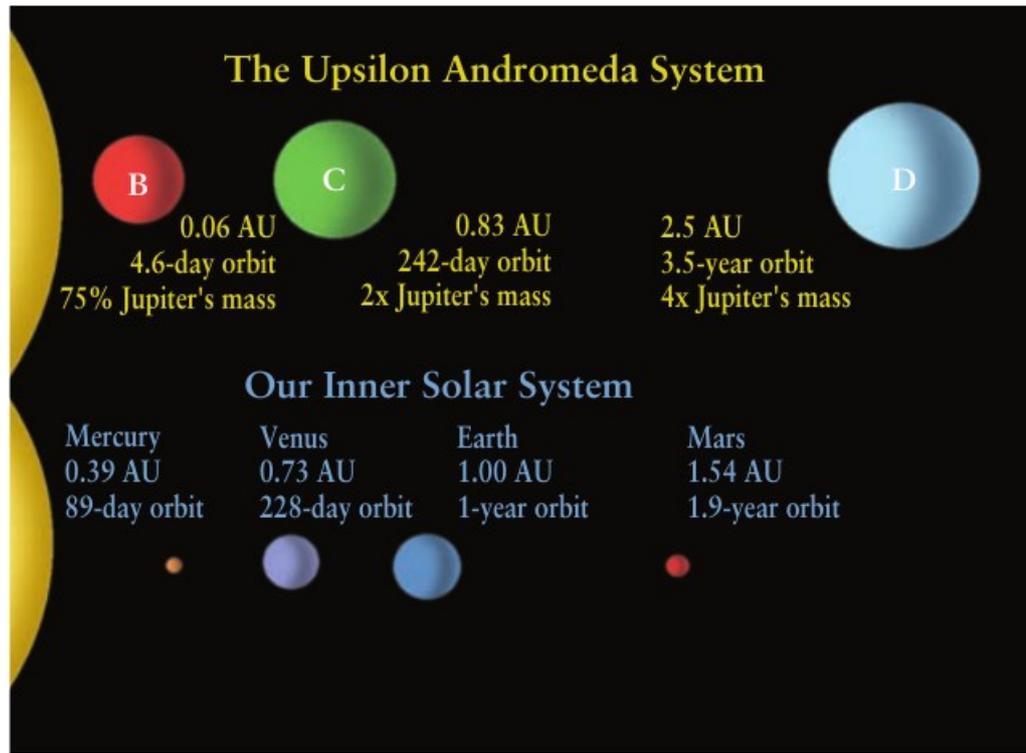
Possibilidade de água  
líquida

Semelhante ao Sol  
~2.150 anos-luz (Cisne)  
 $1,04 M_{\odot}$

6 planetas tipo Super-Terra ( $2,5 - 10 M_{\oplus}$ )

Idade: 3,2 bilhões de anos





Sistema binário ( $1,27 M_{\odot} + \text{Anã-vermelha} > 750 \text{ UA}$ )  
 43,95 anos-luz (Andrômeda)

Planeta mais interno: 1/10 da distância Sol-Mercúrio  
 Diferença de temperatura entre dia e noite: 1400 K

Idade: 3,12 bilhões de anos

# Sistema Gliese 581

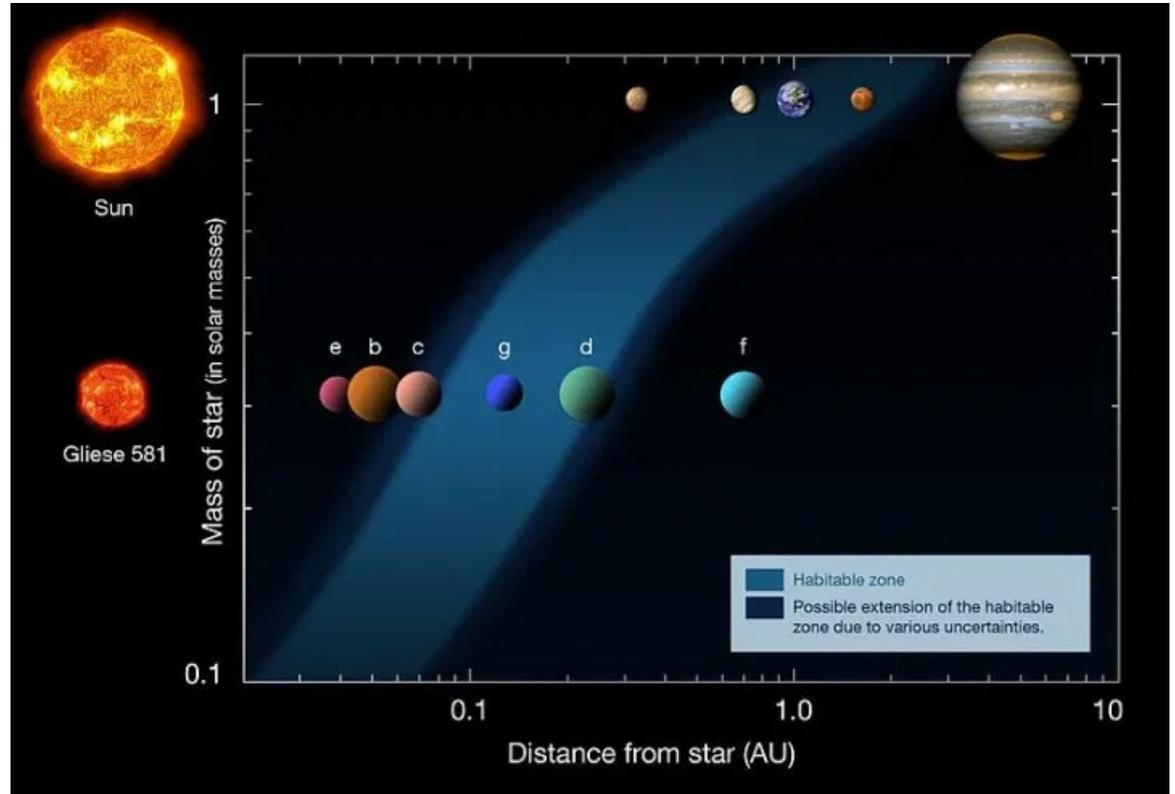
Anã-Vermelha

~20,56 anos-luz (Libra)

0,31  $M_{\odot}$

6 planetas, sendo 2 (cuja  
existências ainda são debatidas)  
na zona habitável

Idade: 7 – 11 bilhões de anos



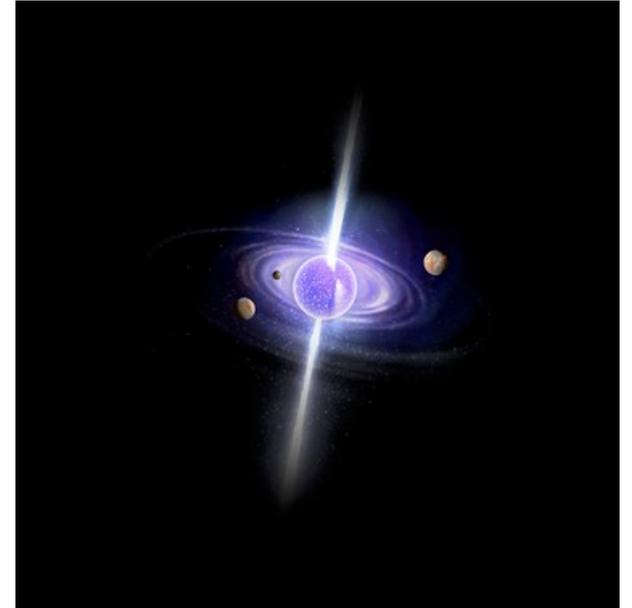
# Sistema PSR B1257+12

Pulsar de período 6,2 ms  
~2.300 anos-luz (Virgem)  
~1,4  $M_{\odot}$   
~28.000 K

3 planetas:  
0,02, 4,3 e 3,9  $M_{\oplus}$  orbitando, respectivamente, a  
0,19, 0,36 e 0,46 UA.

Os planetas foram formados após a supernova.

Idade: 1 – 3 bilhões de anos



# Química da Vida

Elementos Básicos:

Carbono, Hidrogênio, Oxigênio, Nitrogênio, Fósforo, Enxofre

Moléculas Inter-estelares (nebulosas moleculares – diversas moléculas orgânicas (carbono)):

$\text{HC}_{11}\text{N}$ ,  $\text{HC}_9\text{N}$ ,  $\text{HC}_5\text{N}$

$\text{CH}_3\text{OH}$  (alcool metílico)

$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$ ,  $\text{HCOOCH}_3$

$\text{CH}_4$  (metano),  $\text{NH}_3$  (amoníaco)

$\text{H}_2\text{CO}$  (formol),  $\text{C}_2\text{H}_2$  (acetileno)

$\text{CO}$  (monóxido de Carbono)

$\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{CH}$

$\text{CH}_3\text{NH}_2$ ,  $\text{HNO}$ ,  $\text{CN}$

$\text{OCS}$ ,  $\text{HNCS}$ ,  $\text{SO}_2$

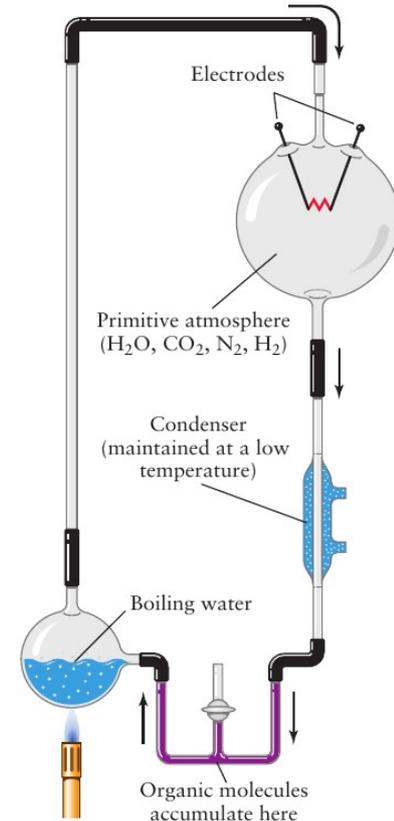
$\text{C}_{60}$  (buckyball) (em 2010)

Glicina (aminoácido) (em 2003)

Solvente facilitador de reações químicas:  
 $\text{H}_2\text{O}$  (água líquida)

Experimento de Miller-Urey:  
Compostos químicos simples podem formar compostos orgânicos na presença de água líquida nas condições da Terra primordial.

Vida em condições extremas:  
*Deinococcus radiodurans*  
Hiper-termófilos  
Tardigrada



# Zona Habitável Galáctica

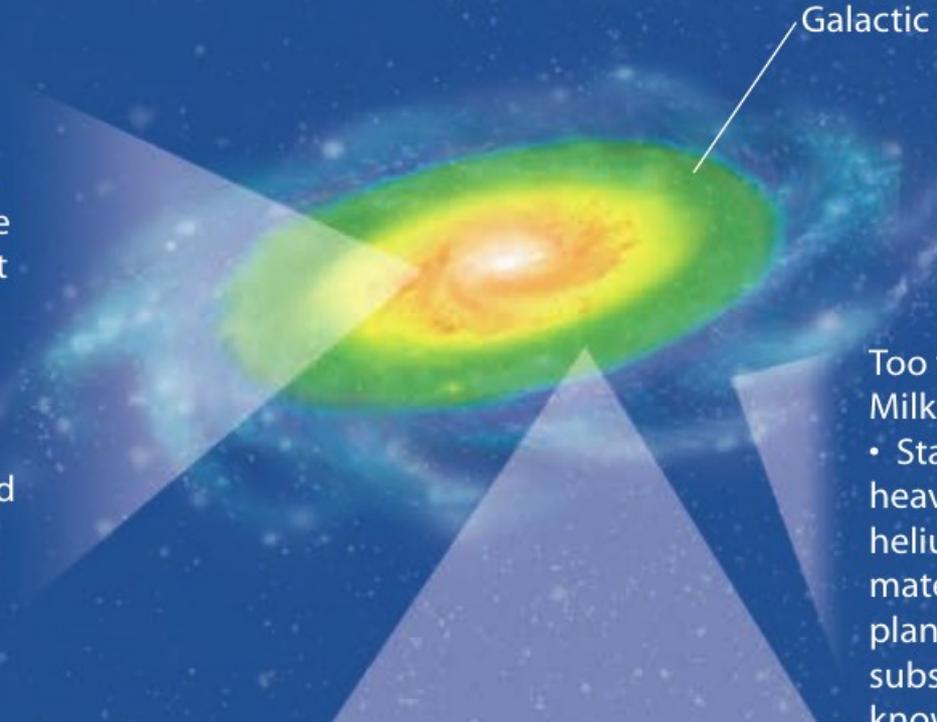
Intelligent civilizations in our Milky Way Galaxy can evolve only in a certain region called the galactic **habitable** zone. In that zone, a suitable planet must lie within the planetary habitable zone of its parent star. (From C. H. Lineweaver, Y. Fenner, and B. K. Gibson)

## Habitable Zones for Life

Too close to the center of the Milky Way Galaxy:

- The distances between stars are small, so there can be close encounters between stars that would disrupt a planetary system.
- There are also frequent outbursts of potentially lethal radiation from supernovae and from the supermassive black hole at the very center of the Galaxy.

Galactic habitable zone



Too far from the center of the Milky Way Galaxy:

- Stars are deficient in elements heavier than hydrogen and helium, so they lack both the materials needed to form Earthlike planets and the chemical substances required for life as we know it.

# Zona Habitável Planetária

Planetary habitable zone

## The Star:

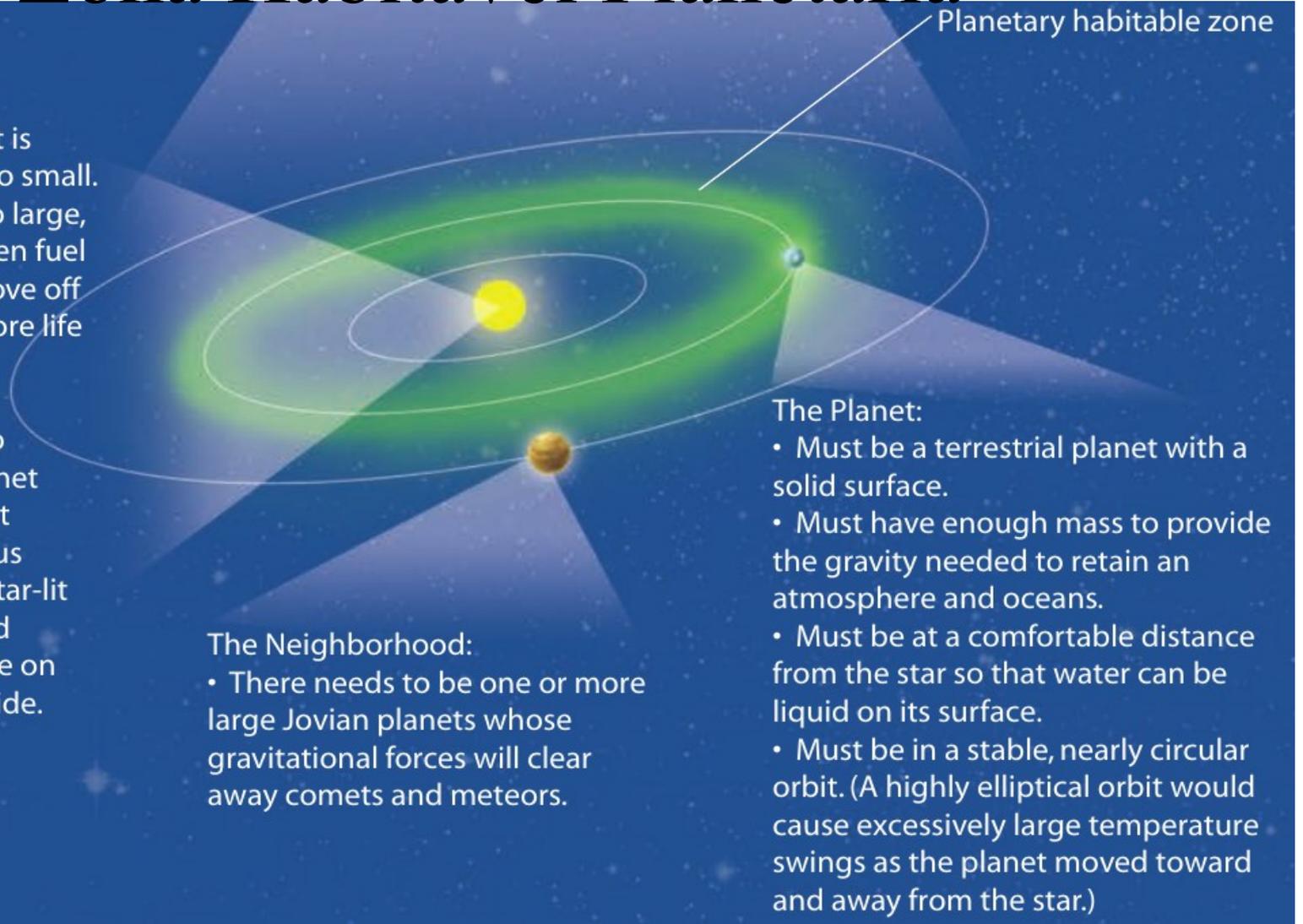
- Must have a mass that is neither too large nor too small.
- If the star's mass is too large, it will use up its hydrogen fuel so rapidly that it will move off the main sequence before life can evolve on any of its planets.
- If the star's mass is too small, the habitable planet would be so close that it would be in synchronous rotation. Water on the star-lit side would vaporize and become locked up as ice on the permanently dark side.

## The Neighborhood:

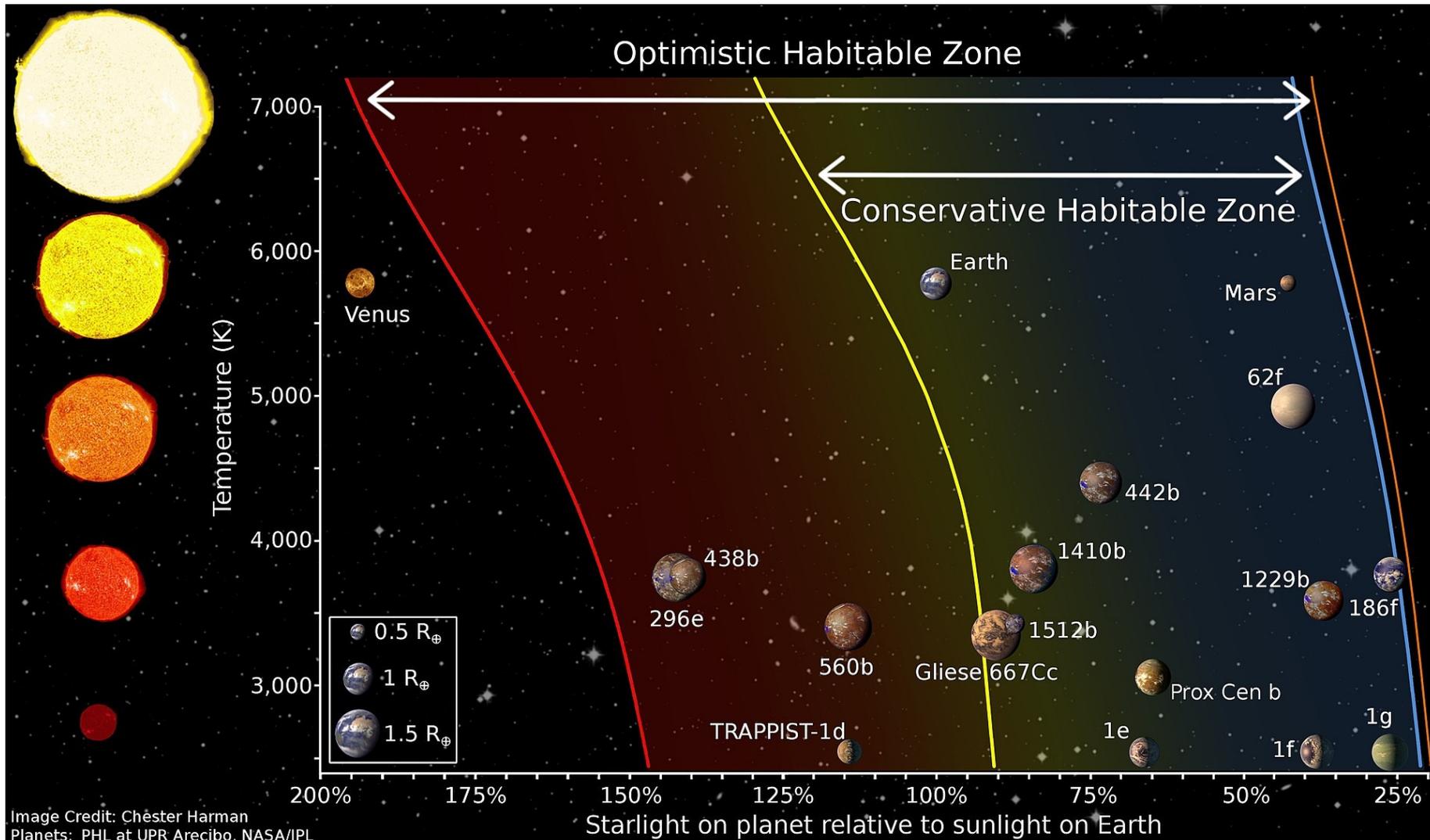
- There needs to be one or more large Jovian planets whose gravitational forces will clear away comets and meteors.

## The Planet:

- Must be a terrestrial planet with a solid surface.
- Must have enough mass to provide the gravity needed to retain an atmosphere and oceans.
- Must be at a comfortable distance from the star so that water can be liquid on its surface.
- Must be in a stable, nearly circular orbit. (A highly elliptical orbit would cause excessively large temperature swings as the planet moved toward and away from the star.)



# Zona Habitável: vários candidatos



# Equação de Drake

Quantas civilizações possivelmente existem na Galáxia?

$$N = R^* f_p n_e f_l f_i f_c L$$

$R^*$  = taxa de formação de estrelas que abrigam zona habitáveis (tipo-Sol)

$f_p$  = fração dessas estrelas que abrigam planetas

$n_e$  = nr. de planetas por sistema solar adequado à vida

$f_l$  = fração desses planetas em que a vida surge

$f_i$  = fração dessas formas de vida que evoluem para espécies inteligentes

$f_c$  = fração dessas espécies que desenvolvem tecnologia para mandar mensagens inter-estelares

$L$  = tempo de vida dessas civilizações

Dados observacionais:

$R^* = 1$  estrela (tipo Sol)/ano

$f_p = 1$

Estimativa:

$n_e = 0.2$

$f_l = f_i = f_c = 1$

$L = 500$  anos

$$\Rightarrow N = 100$$

$$V_G = \pi \times 50000^2 \times 1000 \text{ al}^3$$

$$d_c = \left( \frac{V_G}{N} \right)^{\frac{1}{3}} \sim 4300 \text{ al}$$

# Comunicação entre civilizações?

Qual seria a maneira mais eficiente?

Argumenta-se que usar ondas de comprimento entre 3 a 30 cm, na “janela da água”, seria mais apropriado.

