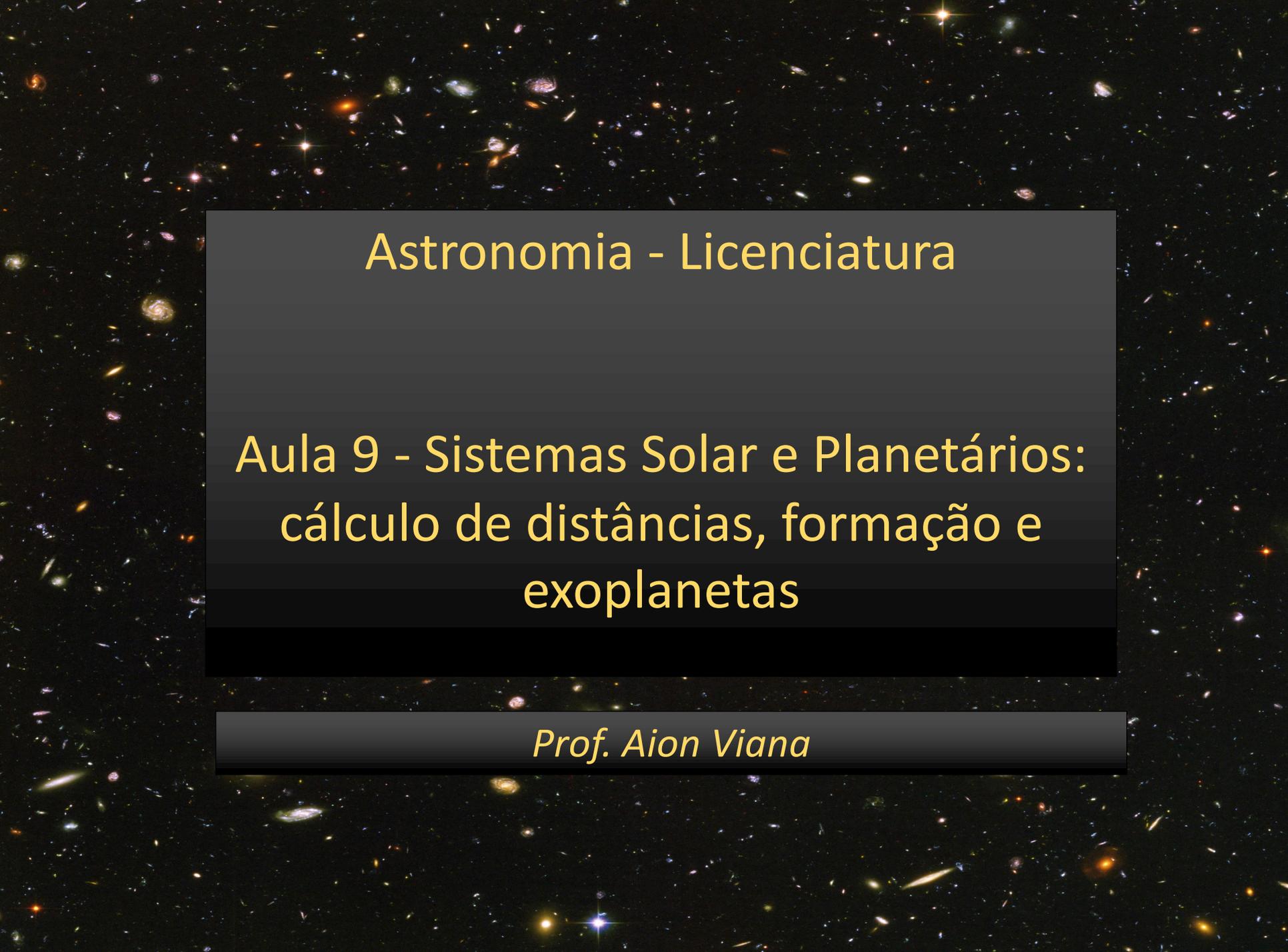


Agradecimentos

Estas aulas contou com o material dos Professores José Abel Hoyos Neto e Valter Líbero do IFSC-USP que teve a colaboração do Professor Roberto Boczko, do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, IAG-USP e da equipe do Centro de Divulgação da Astronomia, CDA



Astronomia - Licenciatura

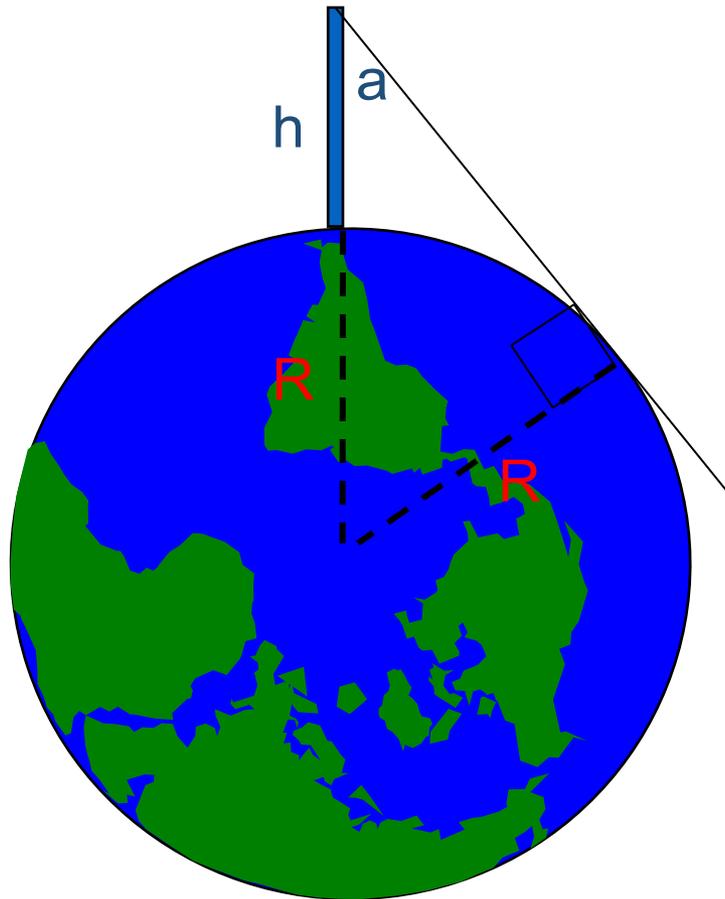
Aula 9 - Sistemas Solar e Planetários: cálculo de distâncias, formação e exoplanetas

Prof. Aion Viana

Distâncias no Sistema solar

Raio da Terra

Tentativa frustrante !



$$\text{sen}(a) = \frac{R}{R + h}$$

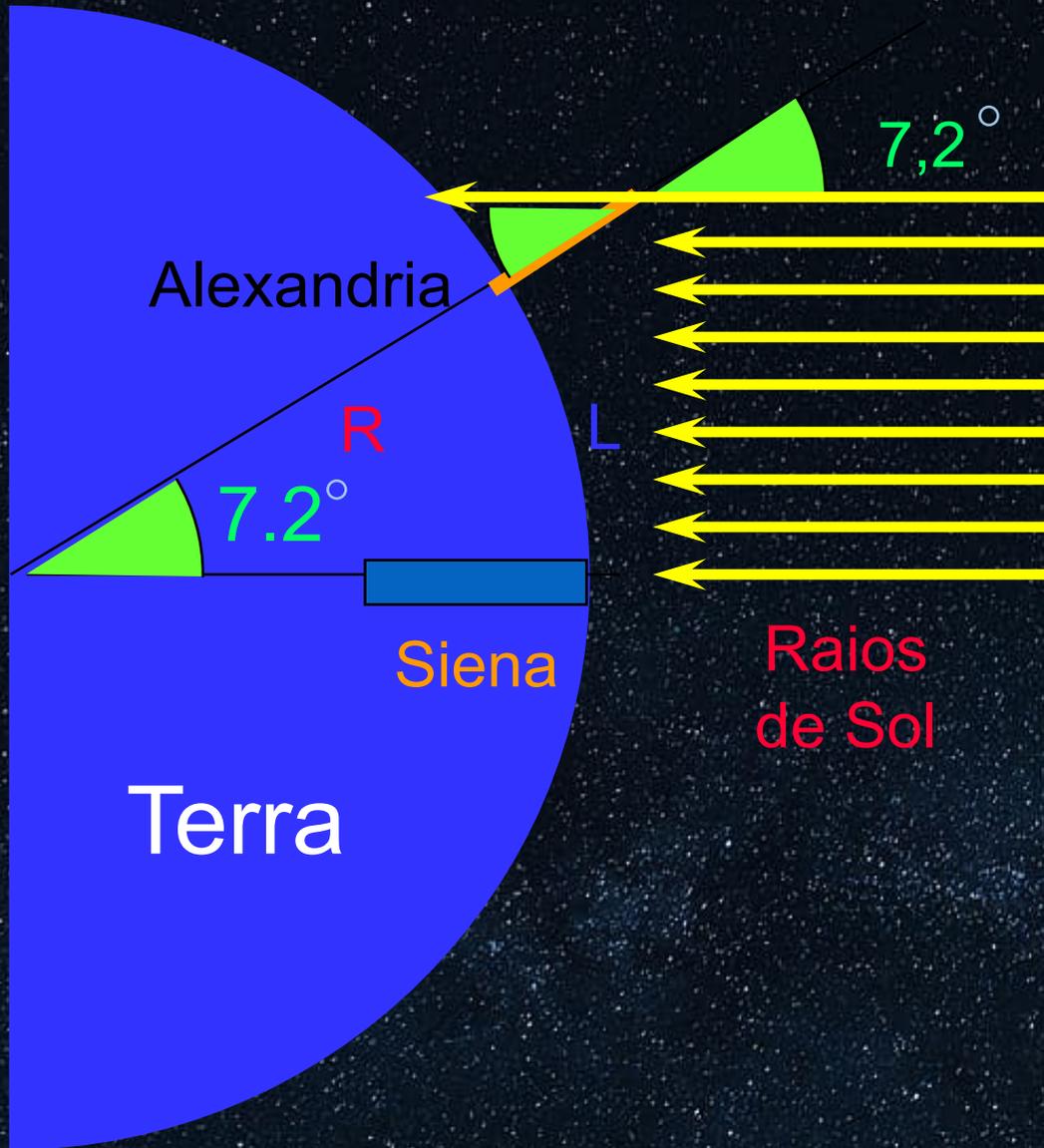
$$R = \frac{h \text{sen}(a)}{1 - \text{sen}(a)}$$

Problema: $a \approx 89.987$ graus !

	a:		R/h:
	89,5	→	26.261
Erro:	89,9	→	656.560
	89.99	→	65.656.126

Raio da Terra

(Eratóstenes, séc. IV a .C.)



Raios entram no poço de Siena,
mas fazem sombra em Alexandria:
Terra esférica

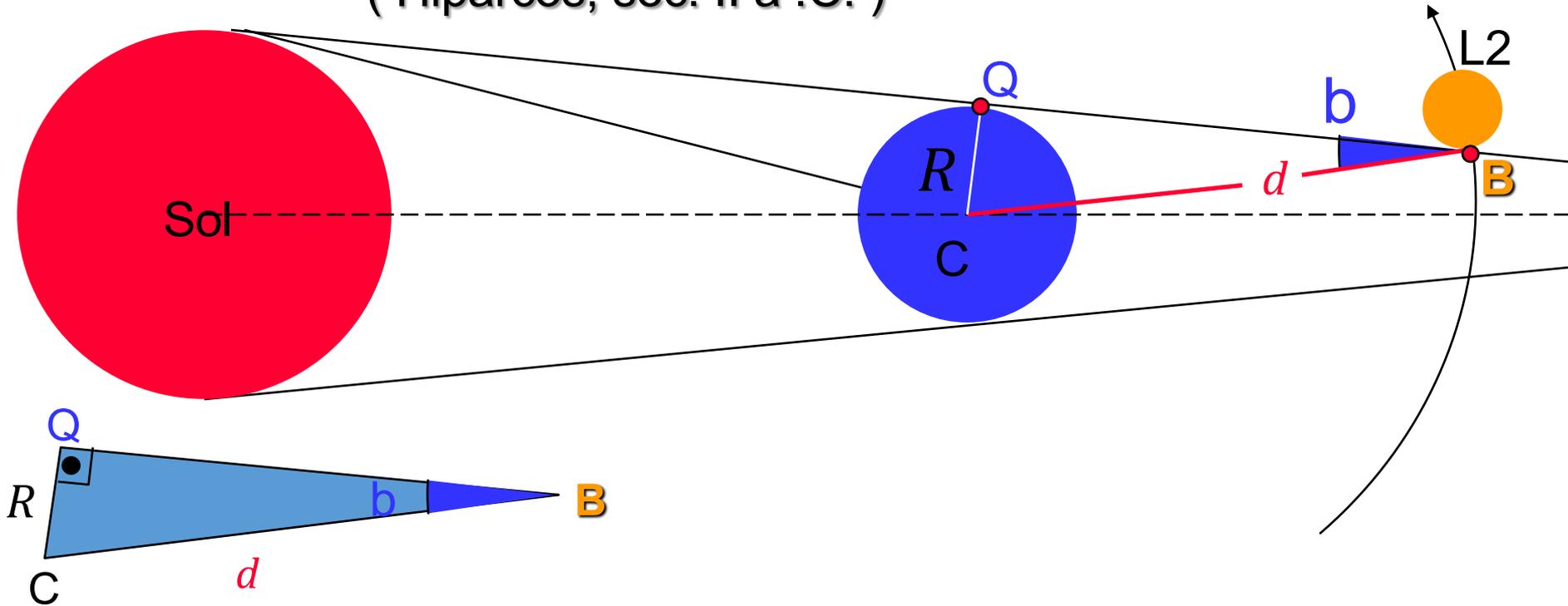
$$\frac{360^\circ}{7,2^\circ} \frac{2\pi R}{L} = 800 \text{ Km}$$



$$R = 6300 \text{ Km}$$

Distância da Terra à Lua e tempo de eclipse

(Hiparcos, séc. II a .C.)



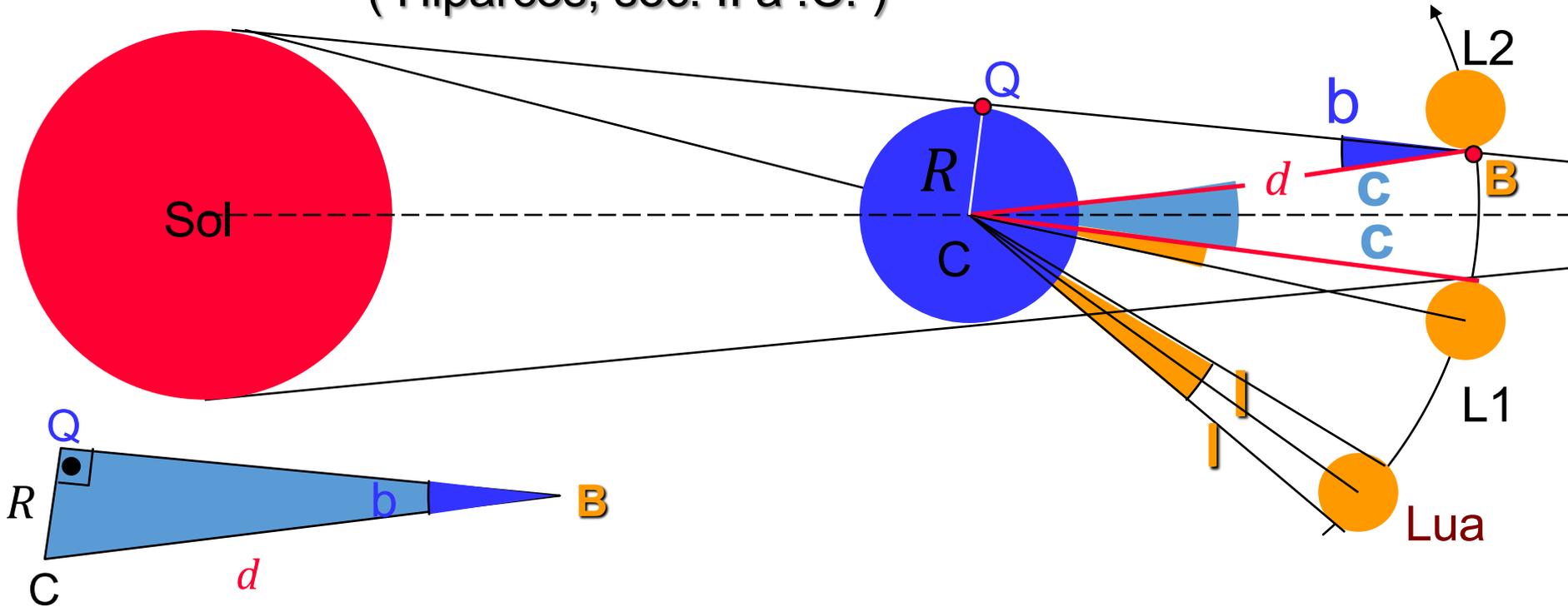
Em BCQ: $\text{sen } b = R / d$

Logo: $d = R / \text{sen } b$

Como determinar o ângulo b ?

Distância da Terra à Lua e tempo de eclipse

(Hiparcos, séc. II a .C.)



Em BCQ: $\text{sen } b = R / d$

Logo: $d = R / \text{sen } b$

Para a Lua:

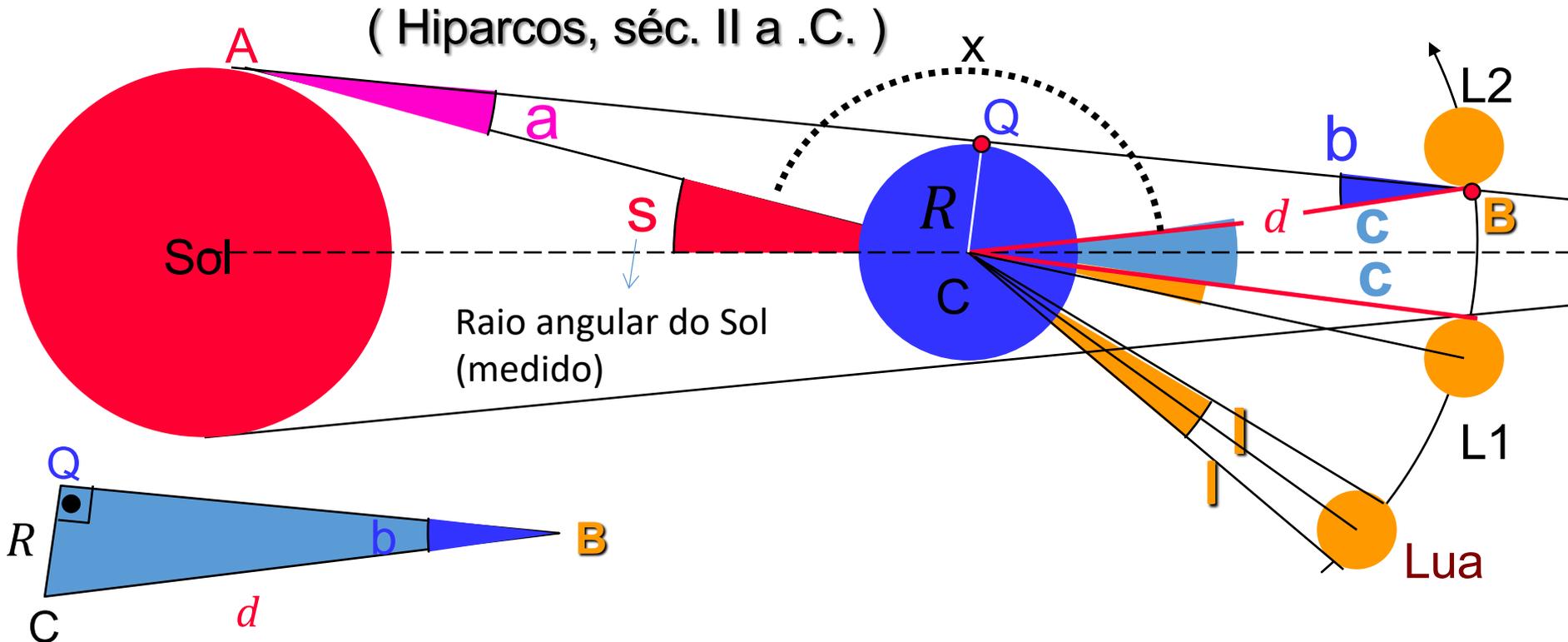
$T \Rightarrow 360^\circ$

$t \Rightarrow 2(c + l)$

$$\left\{ \begin{array}{l} T = \text{Per. sinódico da Lua} = 29,53 \text{ d} \\ l = \text{raio angular da Lua (medido)} = 15' \\ t = \text{tempo de eclipse} \end{array} \right.$$

meço t e $l \Rightarrow$ tenho c

Distância da Terra à Lua e tempo de eclipse



Em BCQ: $\text{sen } b = R / d$
 Logo: $d = R / \text{sen } b$

No triângulo ABC: $a + b + x = 180^\circ$
 Ângulo raso em C: $s + x + c = 180^\circ$

Para a Lua:

$T \Rightarrow 360^\circ$

$t \Rightarrow 2(c + l)$

$a + b + x = s + x + c$

$a + b = s + c$

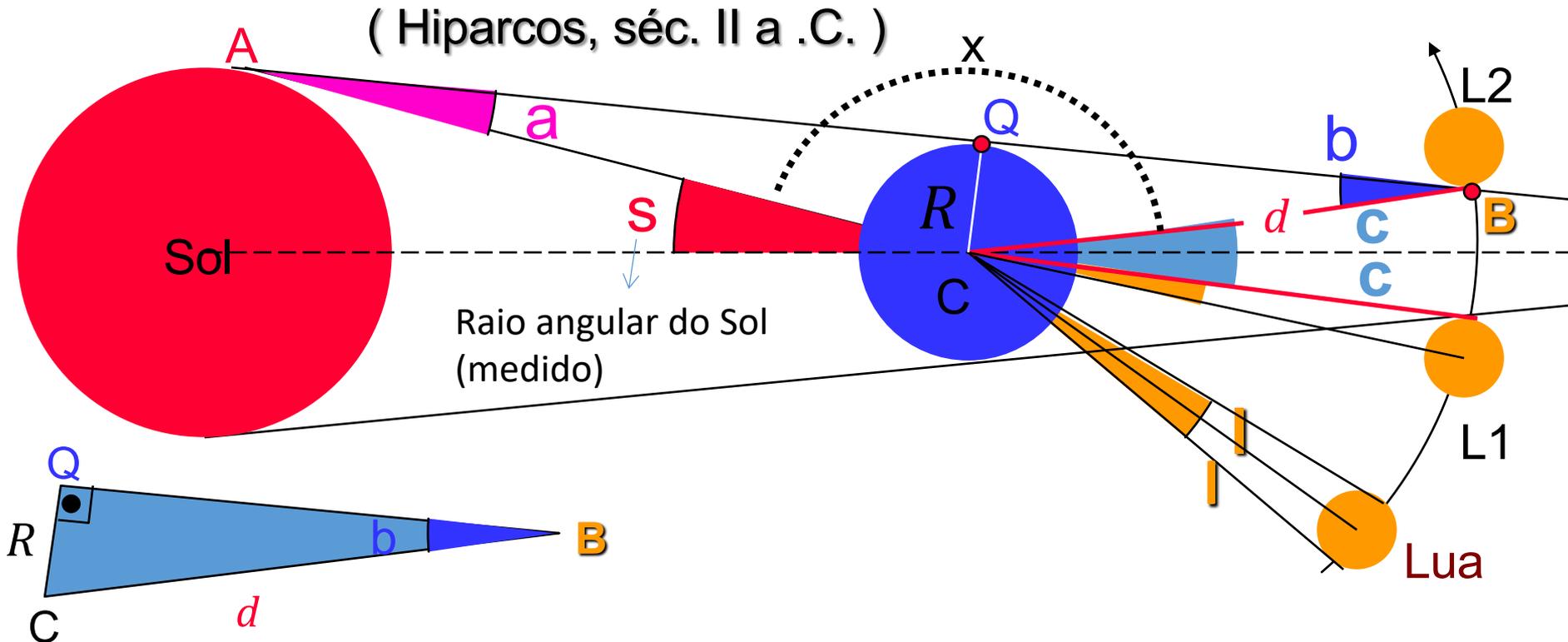
$a \cong 0$

$b \cong s + c$

raio angular da Terra visto do Sol

meço t e l \Rightarrow tenho c

Distância da Terra à Lua e tempo de eclipse



Em BCQ: $\text{sen } b = R / d$
 Logo: $d = R / \text{sen } b$

No triângulo ABC: $a + b + x = 180^\circ$
 Ângulo raso em C: $s + x + c = 180^\circ$

Para a Lua:
 $T \Rightarrow 360^\circ$
 $t \Rightarrow 2(c + l)$

Distância Terra-Lua

$$a + b + x = s + x + c$$

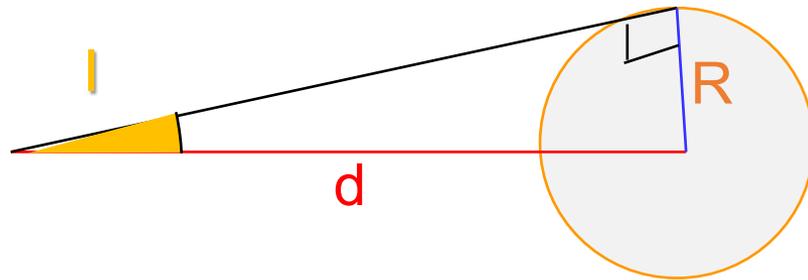
$$b = s + c$$

$b \cong s + c$

raio angular da Terra visto do Sol $\leftarrow a \cong 0$

meço t e $l \Rightarrow$ tenho c

Raio da Lua



Lua cheia $\sim 15'$

$$l \sim \text{sen } l = R/d$$

$$R \sim d/229$$

Distância da Terra ao Sol

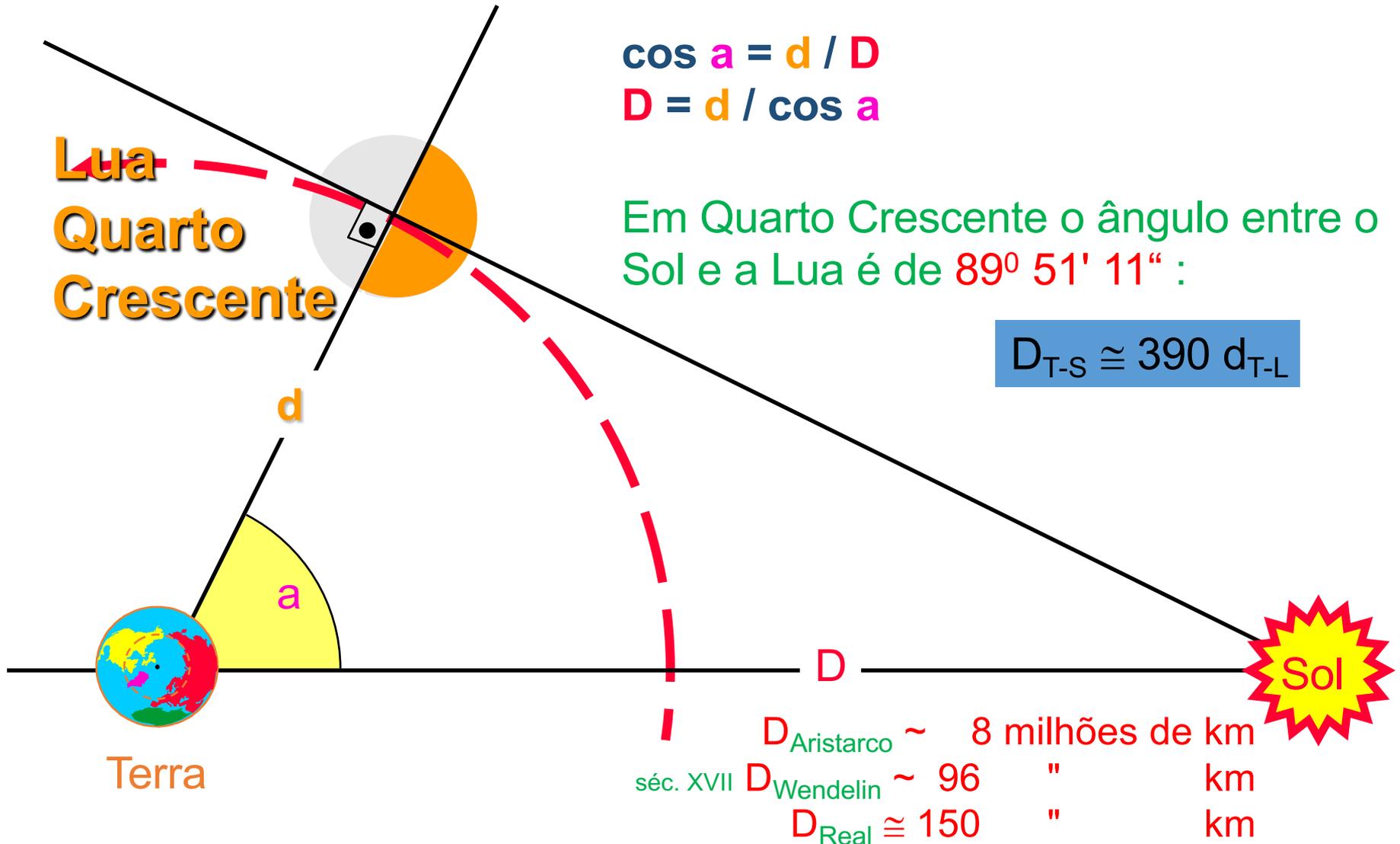
(Aristarco, séc. III a .C.)

$$\cos a = d / D$$

$$D = d / \cos a$$

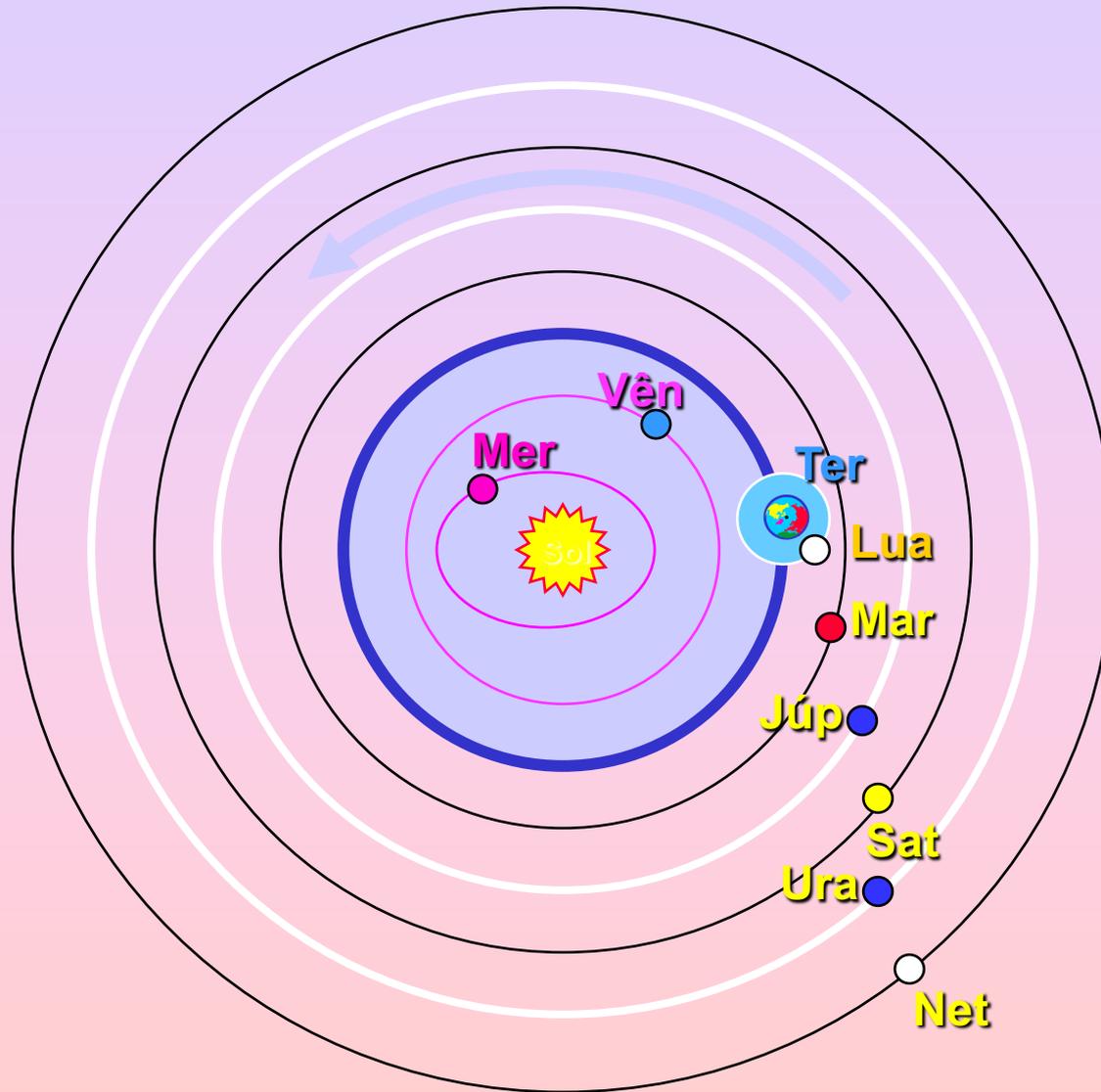
Em Quarto Crescente o ângulo entre o Sol e a Lua é de $89^{\circ} 51' 11''$:

$$D_{T-S} \cong 390 d_{T-L}$$



Distâncias aos demais planetas

Planetas interiores e exteriores



Interiores

- Mercúrio
- Vênus

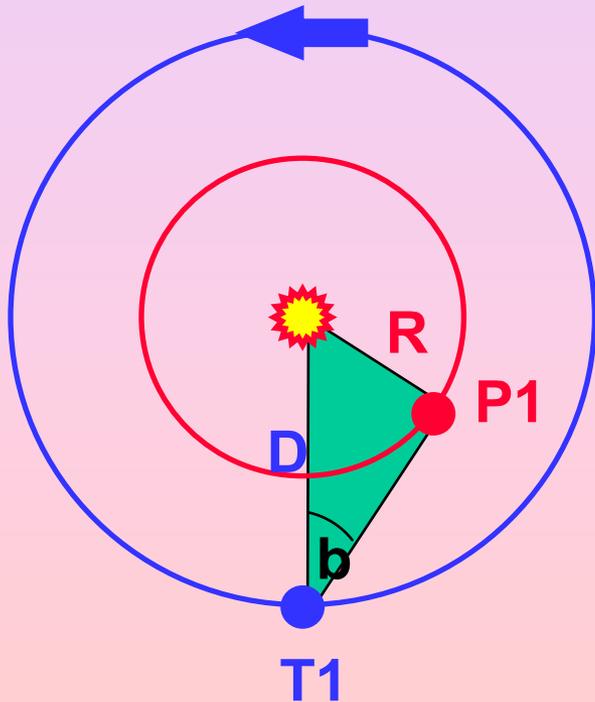
Exteriores

- Marte
- Júpiter
- Saturno
- Urano
- Netuno

Raio orbital de planeta interior

Máxima elongação de Mercúrio: 18 a 28°

Máxima elongação de Vênus: 45 a 47°



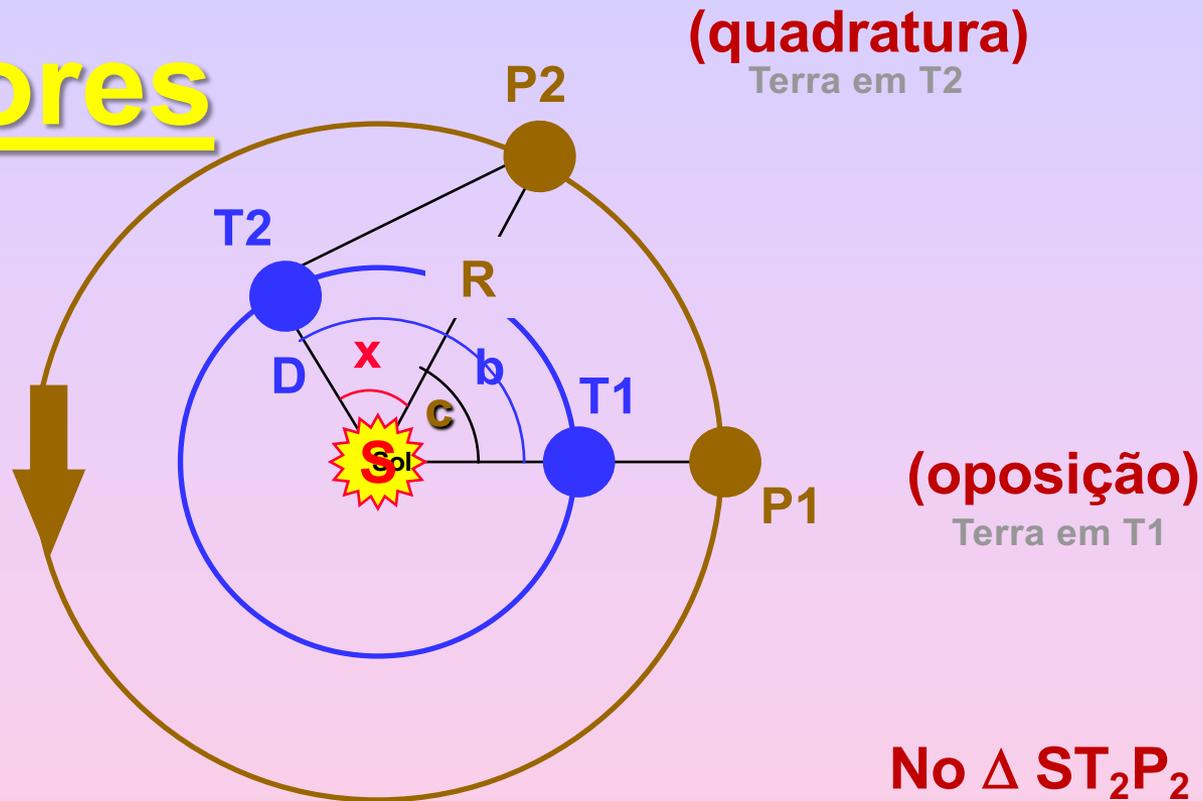
$$b = 47^\circ$$

$$D = 1 \text{ UA (Sol-Terra)}$$

$$R = D \text{ sen } b = 1 \text{ sen } 47^\circ$$

$$R \approx 0,73 \text{ UA} = 109.500.000 \text{ Km}$$

Planetas Exteriores



A: período de um ano na Terra
 t : tempo entre oposição e quadratura
 P: período orbital do planeta

Terra

$$A \Rightarrow 360^\circ$$

$$t \Rightarrow b$$

Planeta

$$P \Rightarrow 360^\circ$$

$$t \Rightarrow c$$

No ΔST_2P_2 :

$$x = b - c$$

$$\cos x = D / R$$

$$\underline{R = D / \cos x}$$

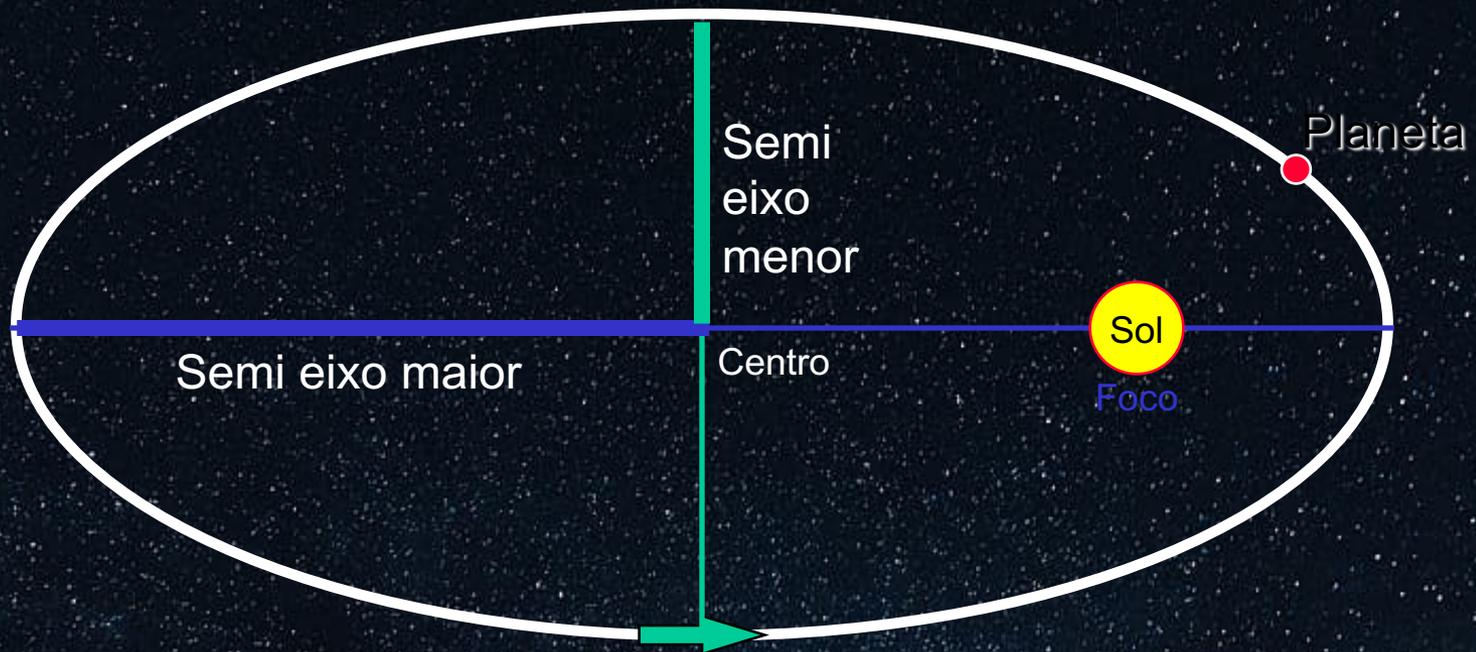
Leis de Kepler



Johannes Kepler (1571 - 1630)

Copérnico (1473-1543)
Tycho Brahe (1546-1601)
Galileu (1564-1642)
Newton (1643-1727)

Primeira lei de Kepler

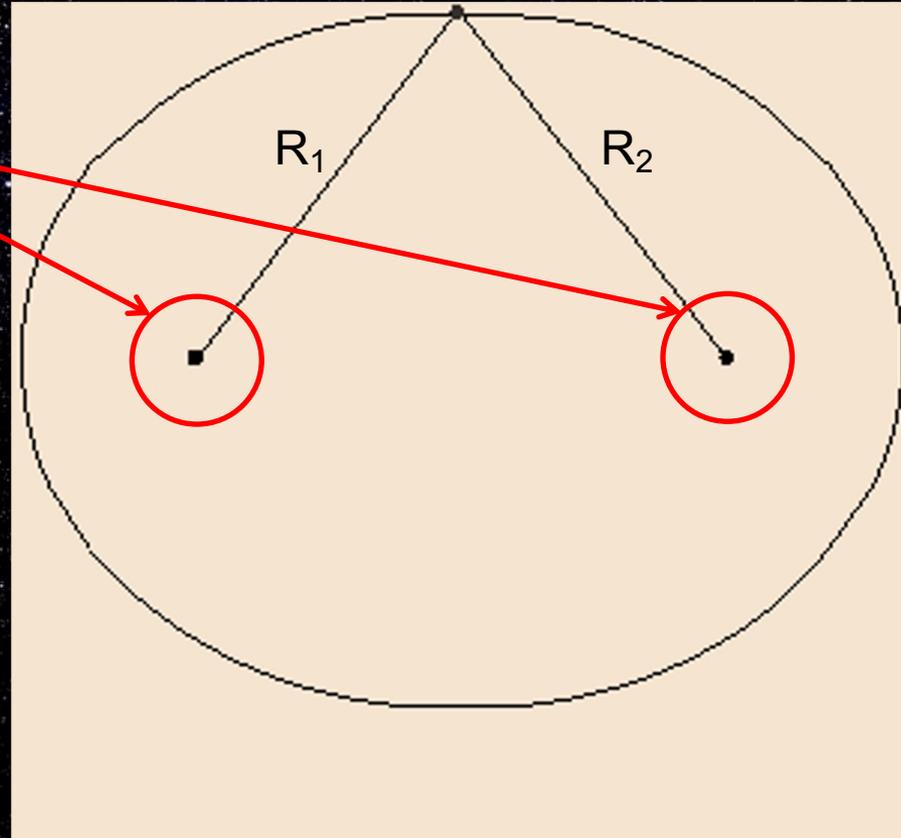
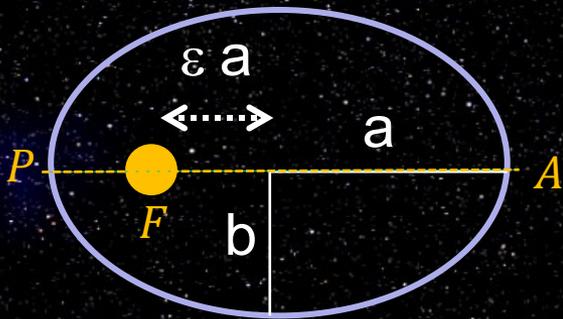


Um planeta gira em torno do Sol numa órbita elíptica, sendo que o Sol ocupa um dos focos da elipse.

Elipse

$$R_1 + R_2 = \text{cte} = 2a$$

Focos da elipse



a: semi eixo maior
b: semi eixo menor
ε: excentricidade

$$b^2 = a^2(1 - \varepsilon^2)$$

Vênus: 0.007

Terra: 0.017

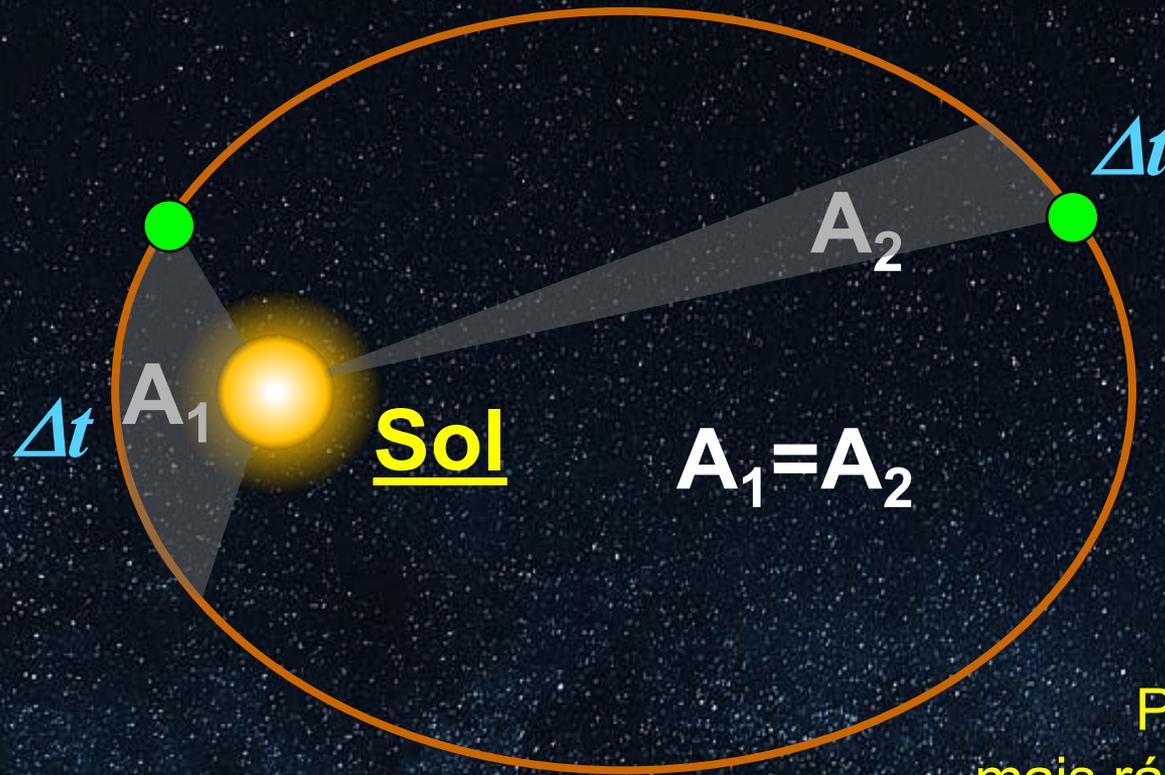
Marte: 0.093

Mercúrio: 0.206

$$\text{Periélio } (\overline{FP}) = a(1 - \varepsilon)$$

$$\text{Afélio } (\overline{FA}) = a(1 + \varepsilon)$$

Primeira e Segunda leis de Kepler



Órbita elítica,
com Sol no foco

Conservação
do
momento angular

Planeta é
mais rápido no periélio
e mais lento no afélio

Terceira lei de Kepler

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM} = \text{cte}$$

T: período de translação em torno do Sol
a: semi eixo maior (raio, se for órbita circular)

$$\frac{T^2}{a^3} = 1 \quad \text{Se T em anos e a em U.A.}$$

Exemplo da terceira lei

Júpiter em translação ao redor do Sol:

$T \approx 11,86$ anos

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{(11,86)^2}{a^3} = 1 \longrightarrow a \approx 5,2 \text{ UA}$$

Exemplo da terceira lei

Terra em translação ao redor do Sol:

$$T \approx 1 \text{ ano} \approx 365 \text{ dias} \approx 31.536.000 \text{ s}$$

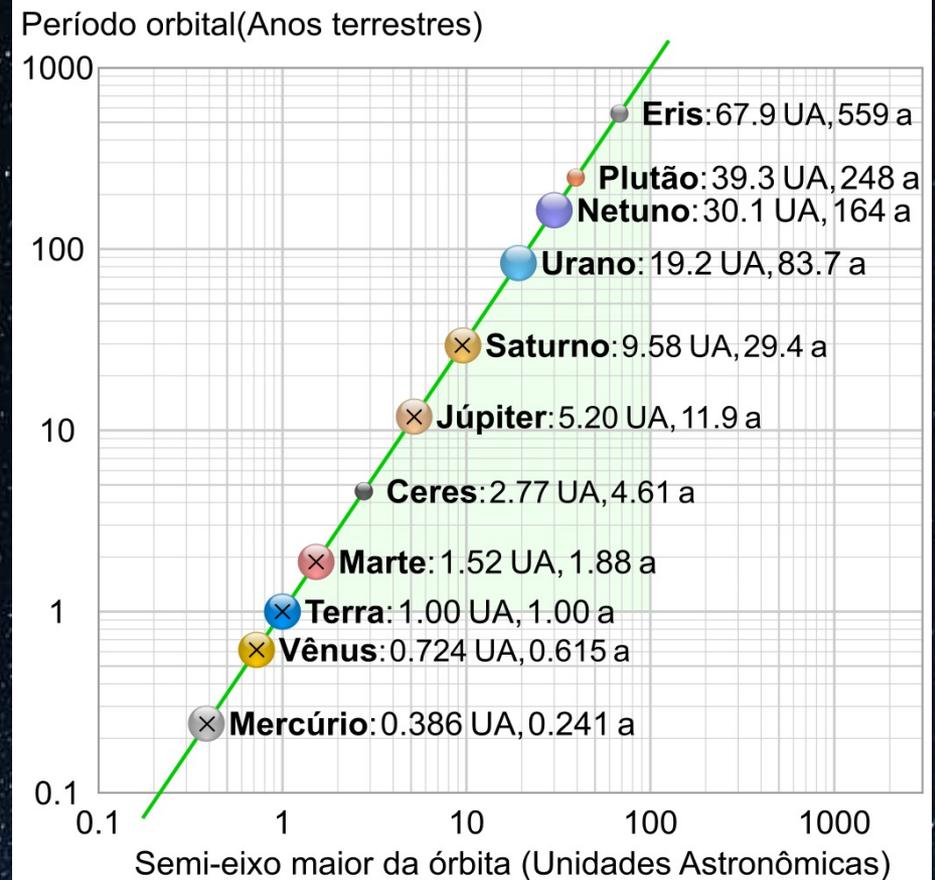
$$a \approx 1 \text{ UA} \approx 150.000.000.000 \text{ m}$$

$$G \approx 6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{Kg-s}^2$$

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4 \pi^2}{GM} \longrightarrow M \approx 1,98 \times 10^{30} \text{ Kg}$$

Exemplo da terceira lei

Planeta	Semi-eixo maior (UA)	Período (dia)	$\frac{a^3}{T^2}$ (10^{-6} UA ³ /dia ²)
Mercúrio	0.38710	87.9693	7.496
Vênus	0.72333	224.7008	7.496
Terra	1	365.2564	7.496
Marte	1.52366	686.9796	7.495
Júpiter	5.20336	4332.8201	7.504
Saturno	9.53707	10775.599	7.498
Urano	19.1913	30687.153	7.506
Netuno	30.0690	60190.03	7.504



Formação do Sistema Solar

Formação do Sistema Solar

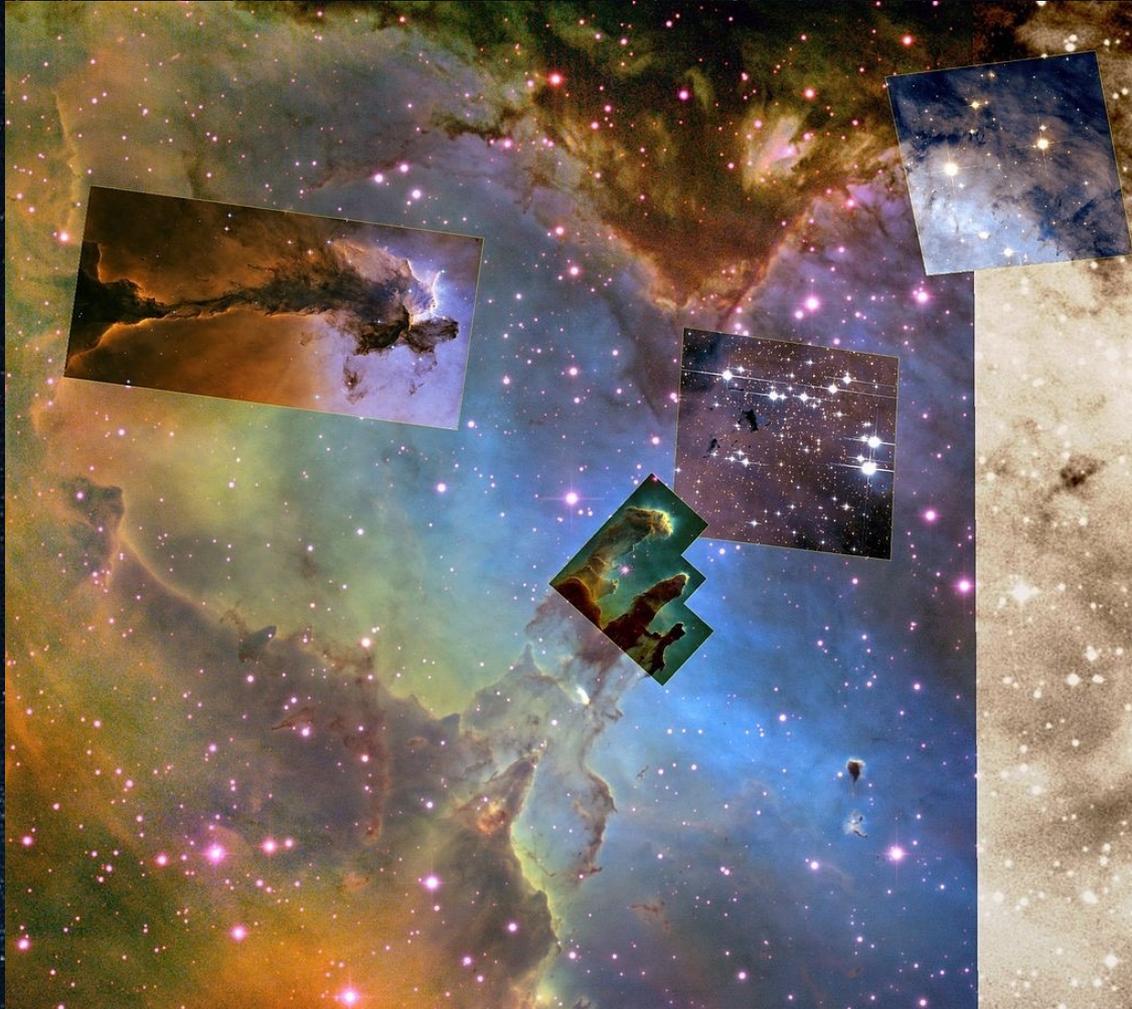
Sistemas solares são formados nos “pequenos” fragmentos de nuvens de gás e poeira interestelares.



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
água em
Serpente

Formação do Sistema Solar

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



Pilares da
criação no
visível

Formação do Sistema Solar

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



Pilares da criação no infravermelho

Formação do Sistema Solar

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

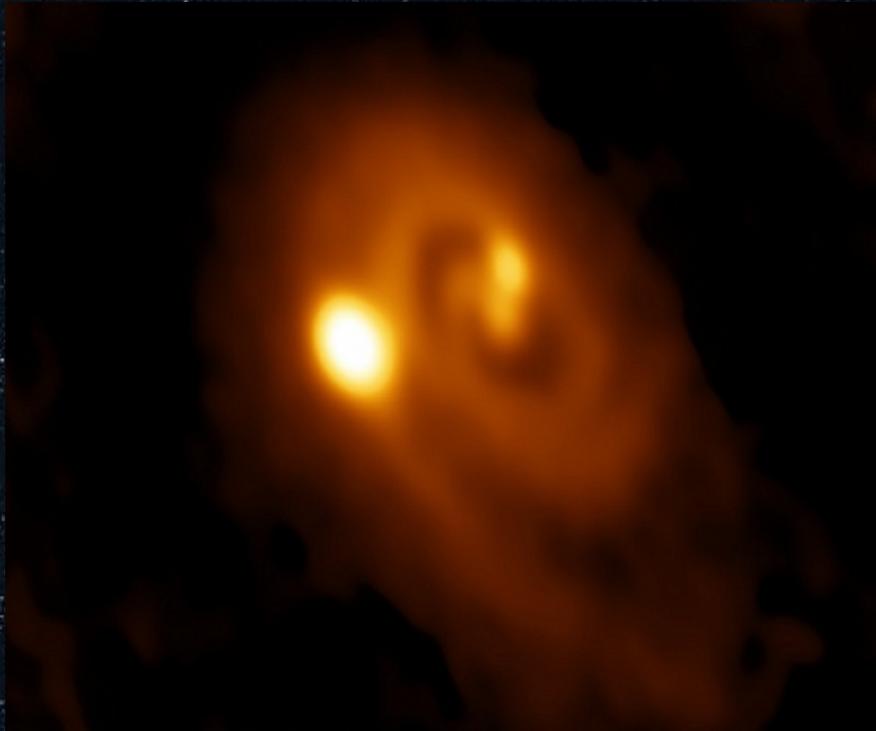


Image Credit: WISE, IRSA, NASA;
Processing & Copyright: Francesco Antonucci

“Tadpoles” em Auriga

Formação do Sistema Solar

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



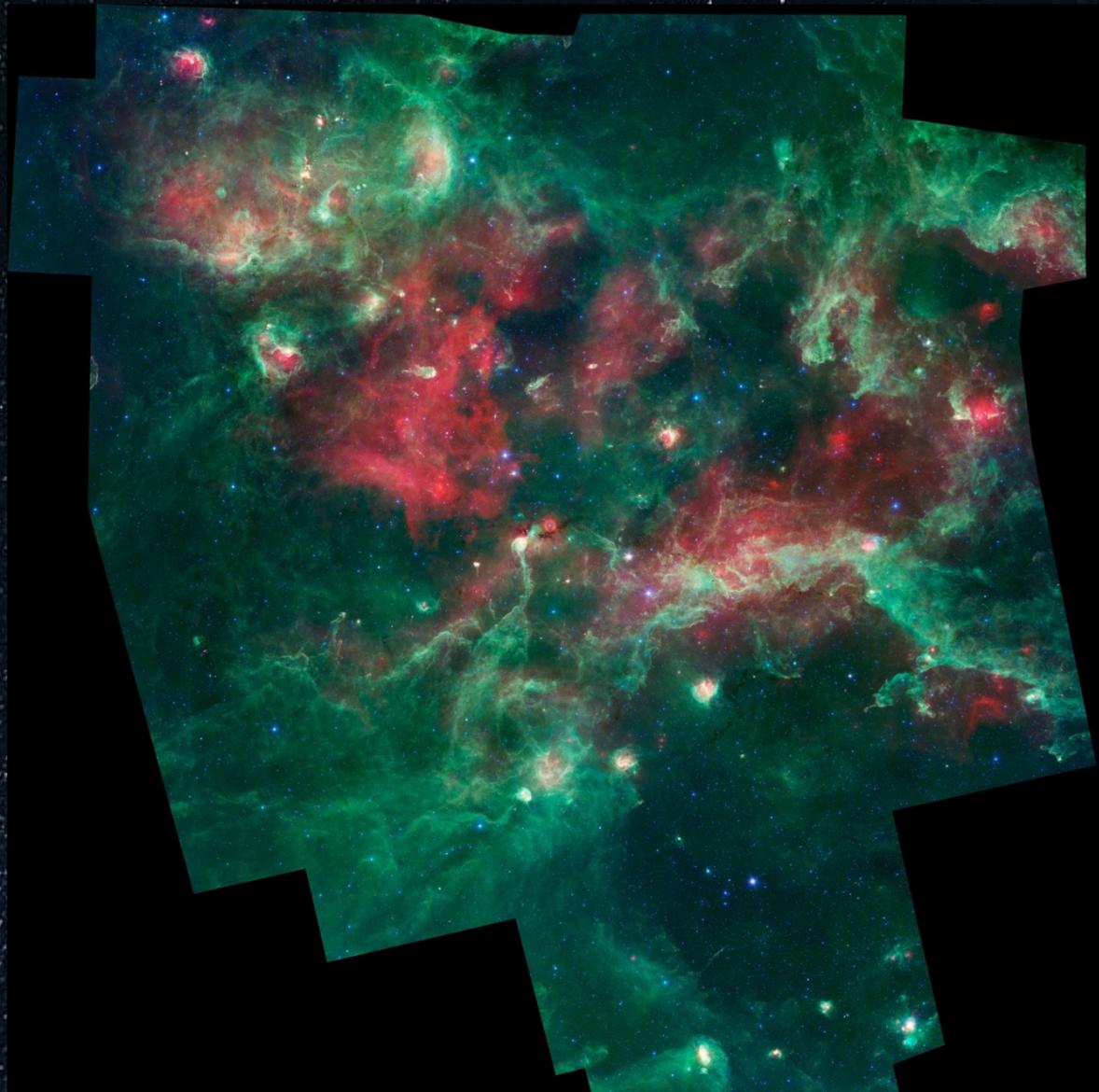
Sistema tri-estelar
em Perseus



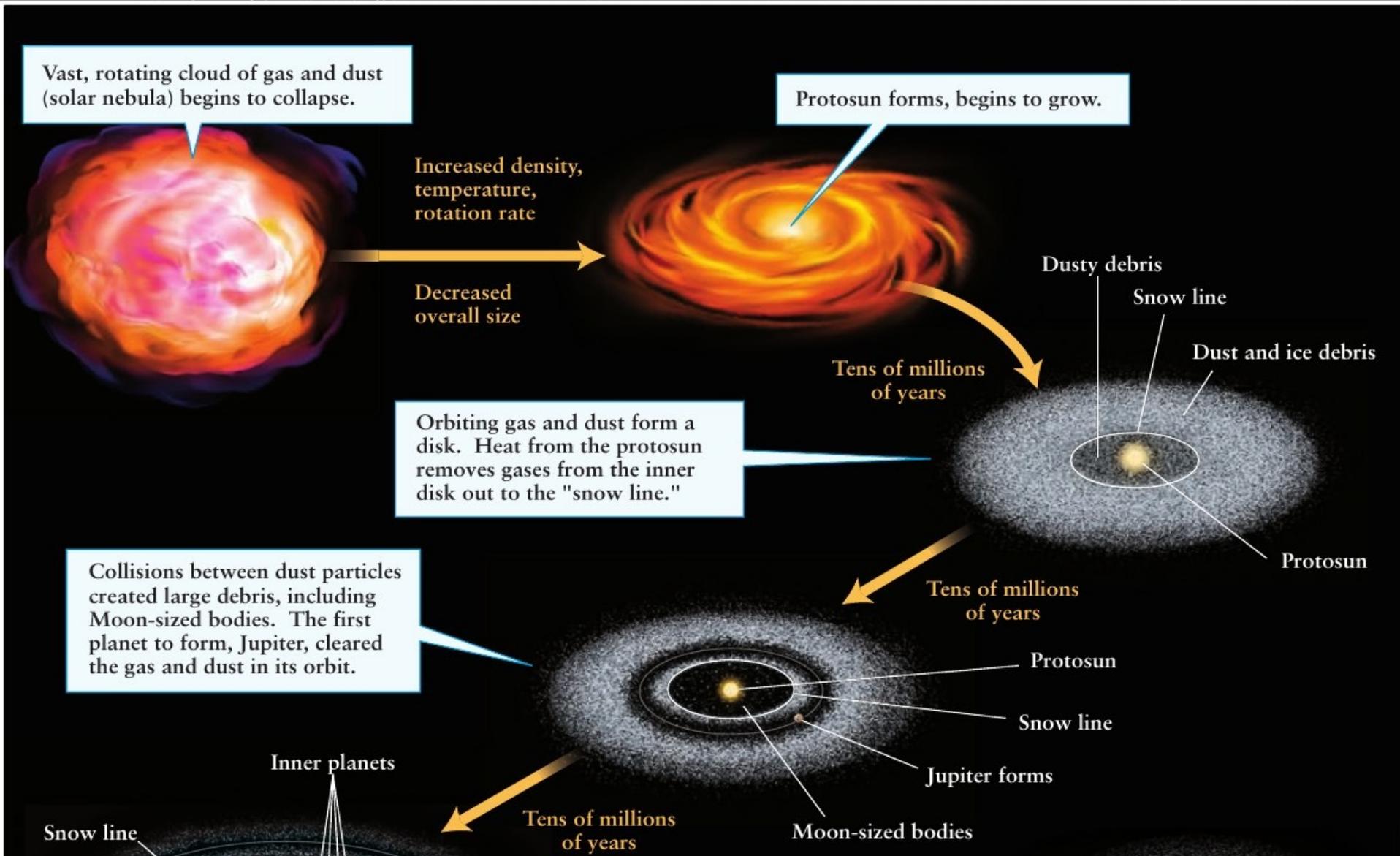
Destino incerto em Cisne

Formação do Sistema Solar

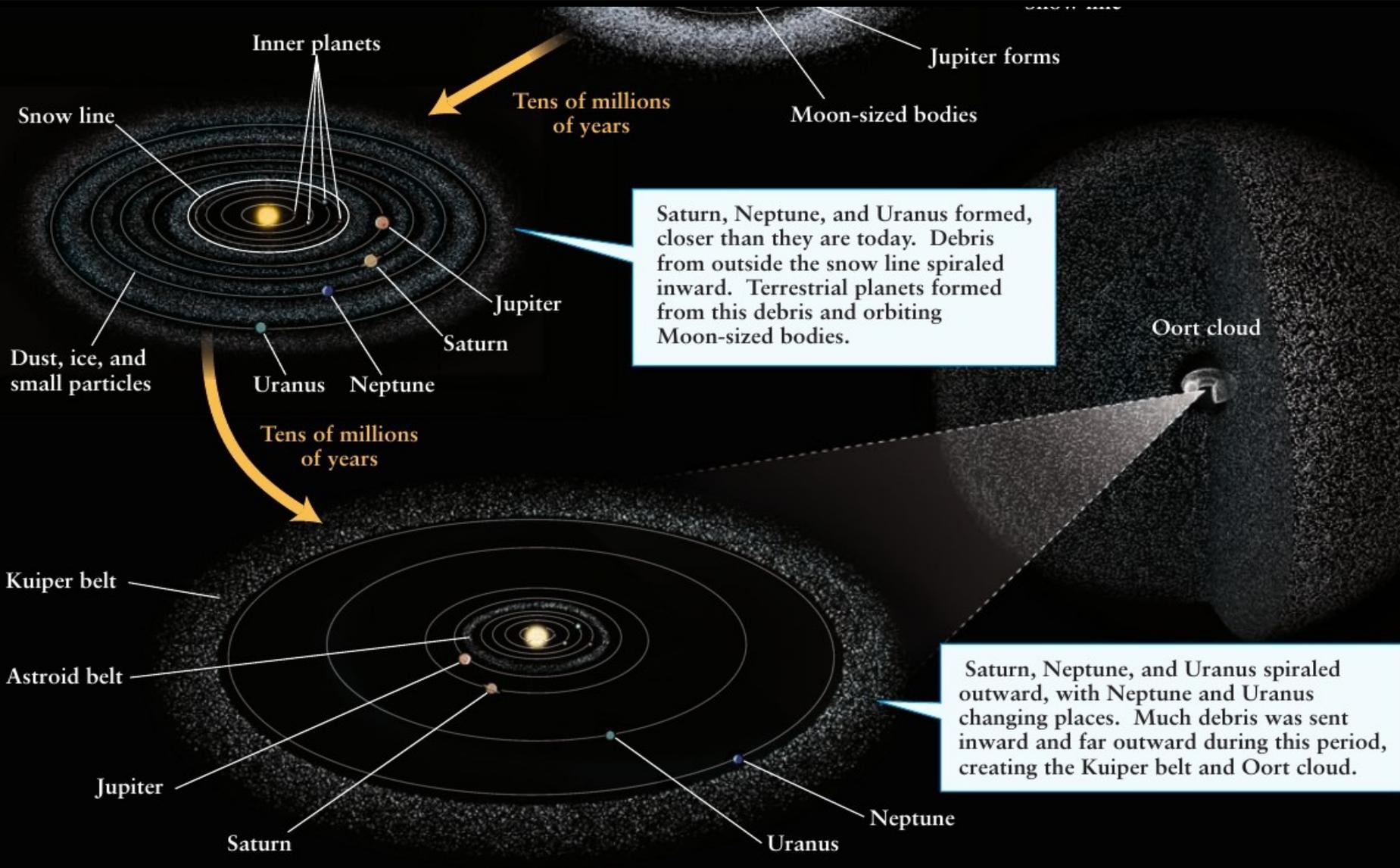
Cygnus X (na constelação do Cisne) a 4.500 anos-luz de distância (visto pelo telescópio espacial Spitzer em infravermelho ao lado) é uma das regiões mais ativas em formação de estrelas na nossa galáxia.



História da formação do Sistema Solar



História da formação do Sistema Solar



Formação do Sistema Solar

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

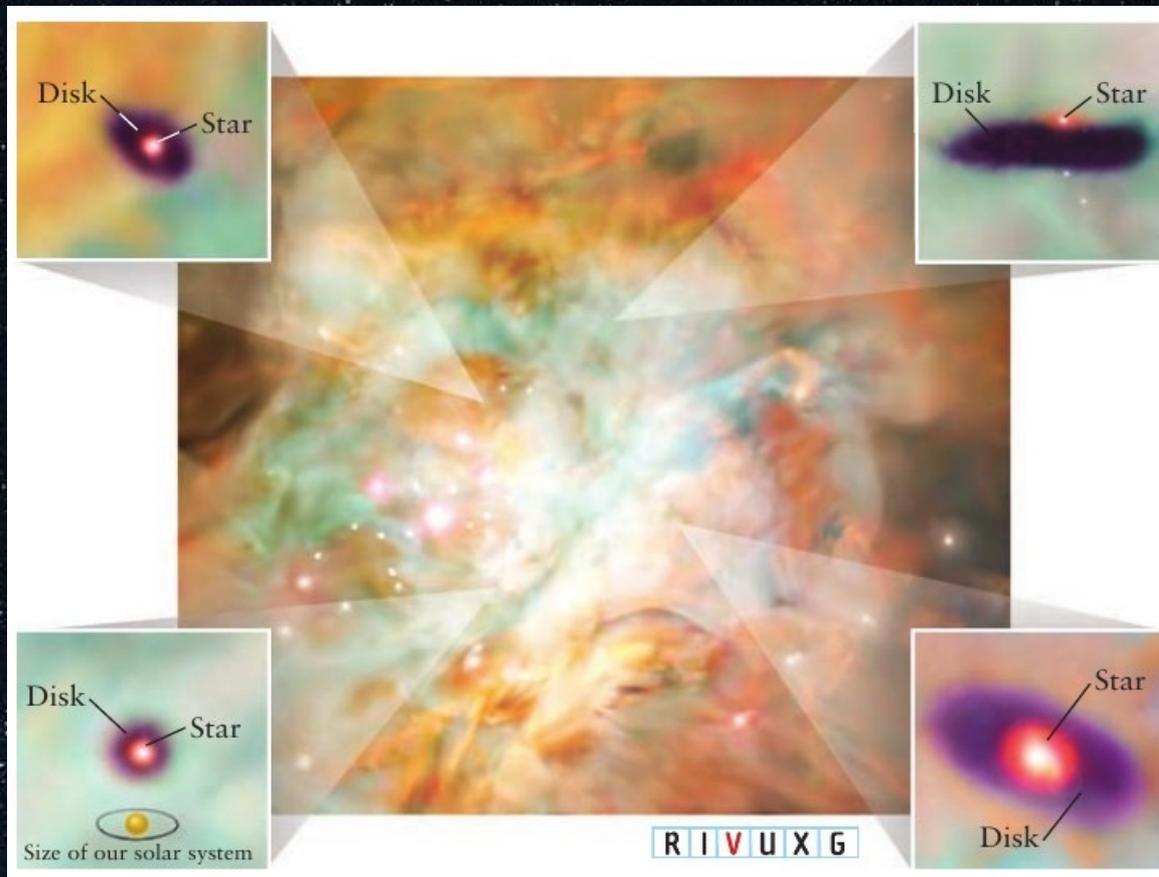


FIGURE 5-4 Young Circumstellar Disks of Matter

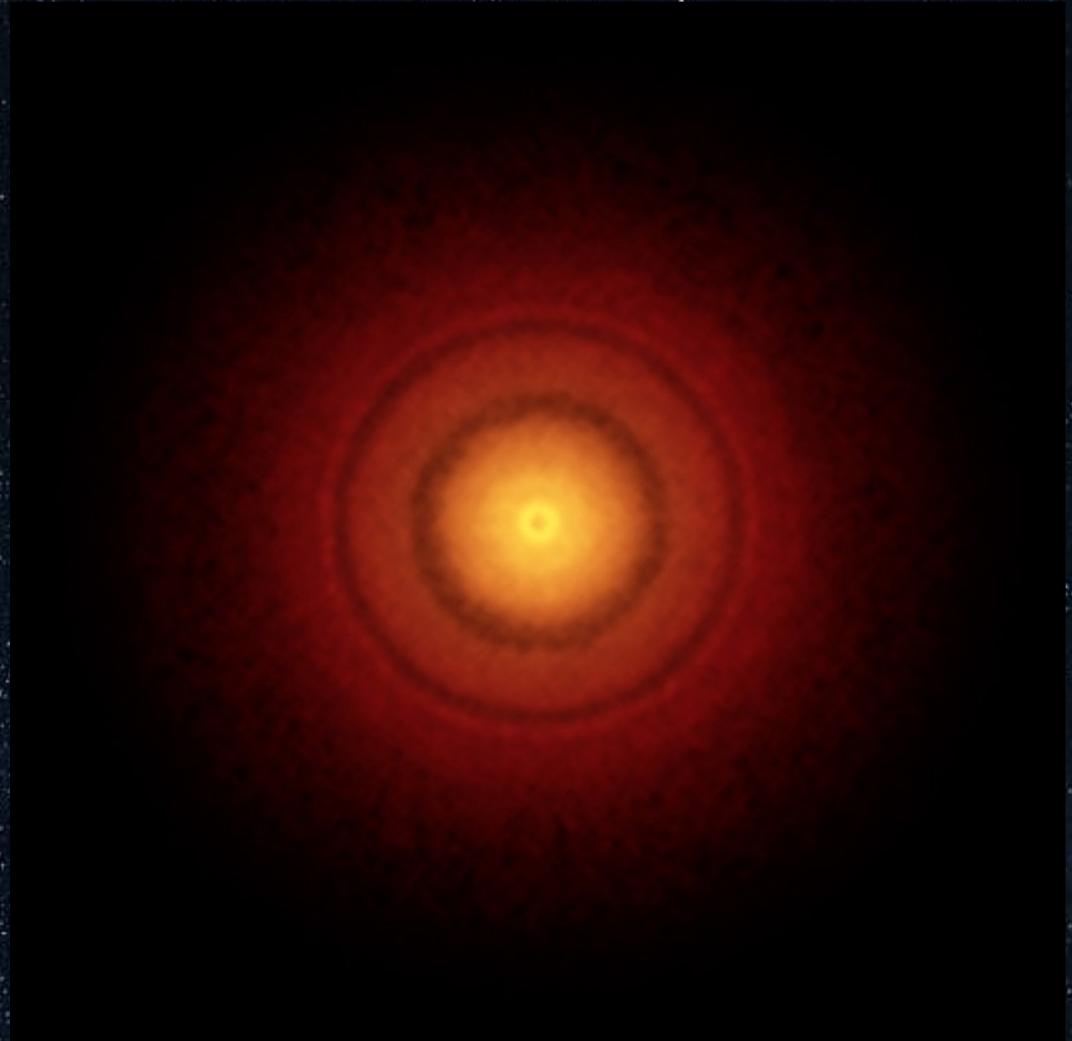
The heart of the Orion Nebula as seen through the Hubble Space Telescope. The four insets are false-color images of protoplanetary disks within the nebula. A recently formed star is at the center of each disk. The disk in the upper right is seen nearly edge-on. Our solar system is drawn to scale in the 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.

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

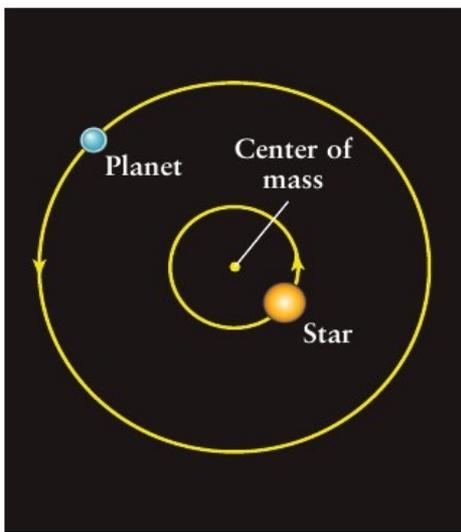


Formação do Sistema Solar

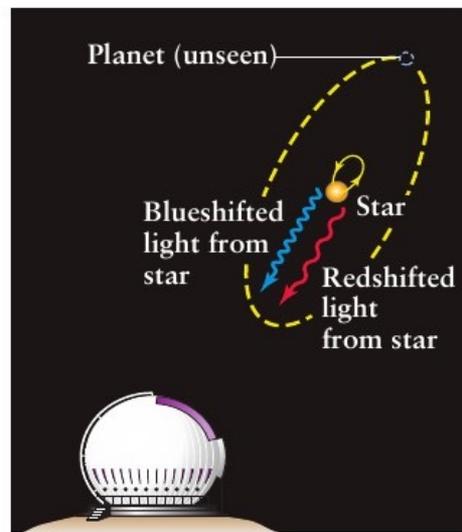
- Formou-se a $\sim 4,6$ bilhões de anos atrás (datação radiométrica) de uma nuvem achatada e girante de gás, gelo e poeira (nebulosa solar).
- O Sol se forma e evapora o gelo e os gases leves (H e He): linha do gelo.
- Planetesimais ($\sim 0,1$ – 100 Km) se formam a partir de colisões dando início a 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 (\sim 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.

Exoplanetas

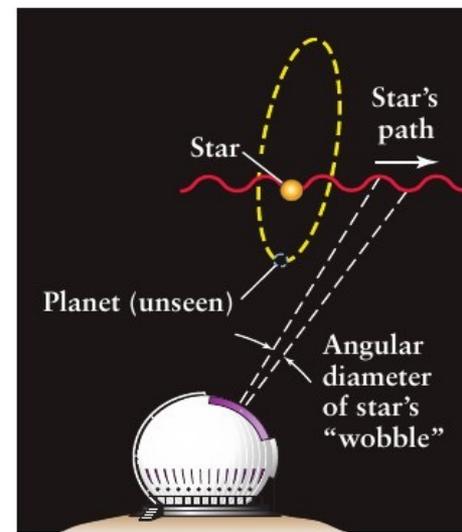
Exoplanetas: como detectá-los?



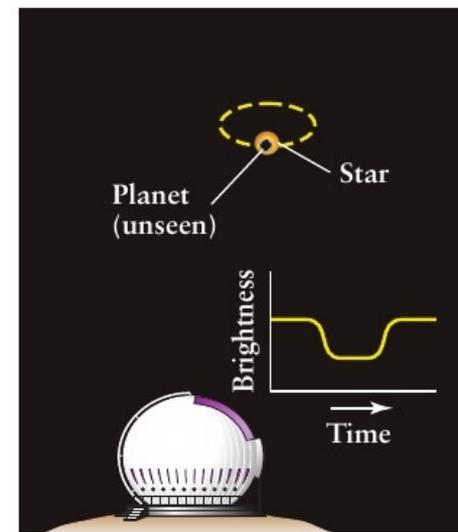
a A star and its planet



b The radial velocity method



c The astrometric method

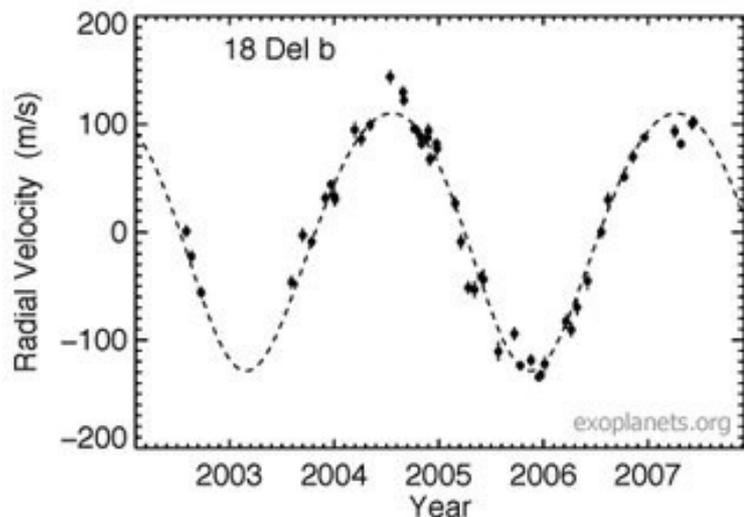


d The transit method

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



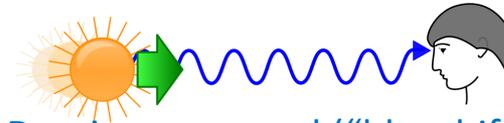
Com as técnicas de espectroscopia Doppler atuais, consegue-se resoluções de até 4 Km/h na velocidade das estrelas.

Júpiter sobre o Sol: 46.8 km/h
Terra sobre o Sol: 0.324 km/h

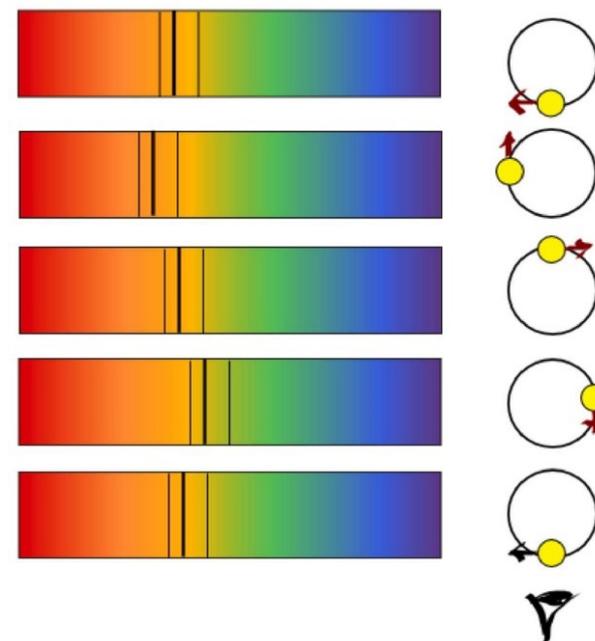
Efeito Doppler para luz ou Doppler relativístico



Desvio para o vermelho ("redshift")



Desvio para o azul ("blueshift")



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

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

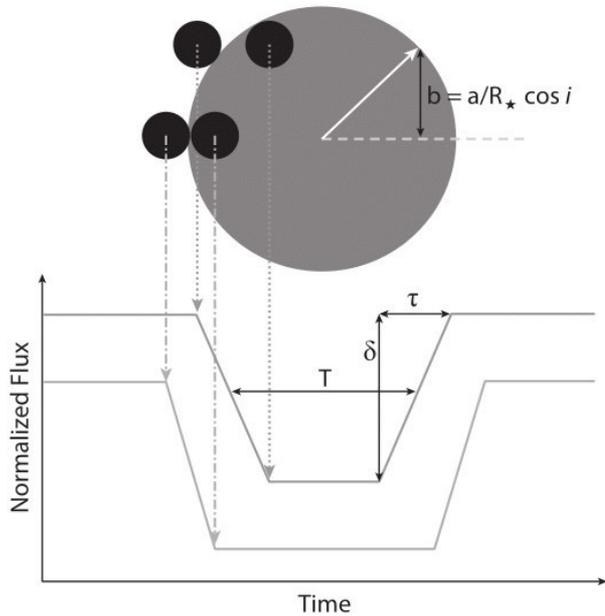
Desvantagens:

Requer alta precisão (apenas para estrelas próximas)

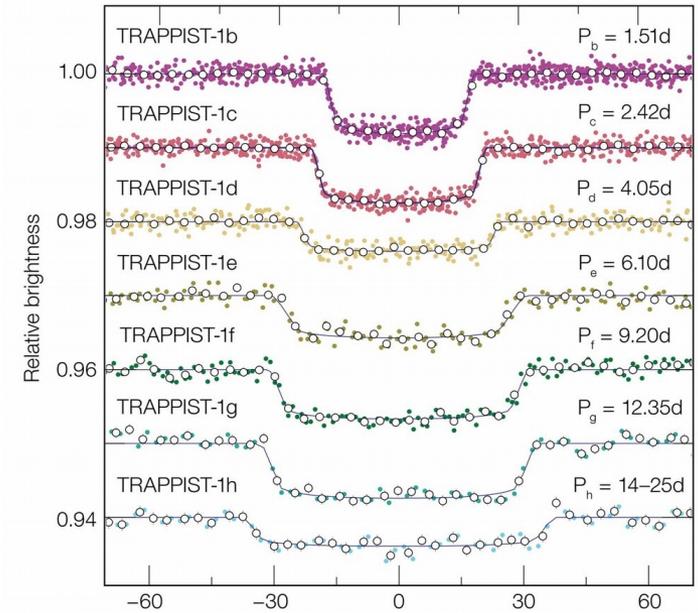
Requer longo período de observação para determinar a oscilação da trajetória

(Até 2021, não há nenhum registro de um exoplaneta descoberto por essa técnica. Houveram várias propostas, mas todas refutadas)

Exoplanetas: fotometria de trânsito



Sistema Trappist 1

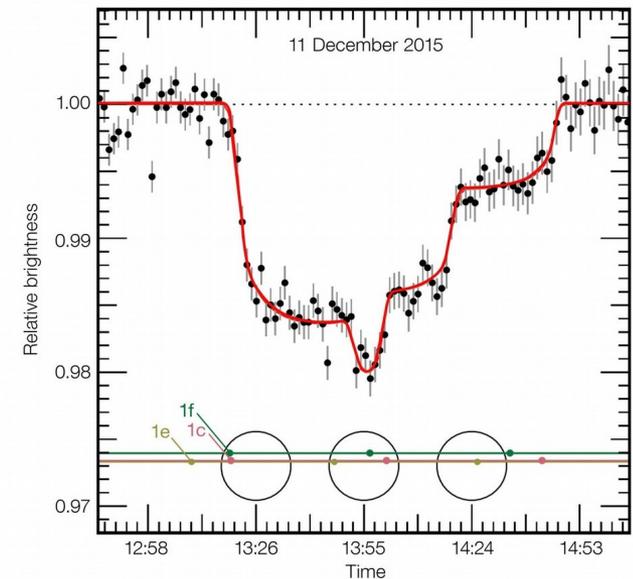


Vantagens:

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)



Exoplanetas: microlente gravitacional

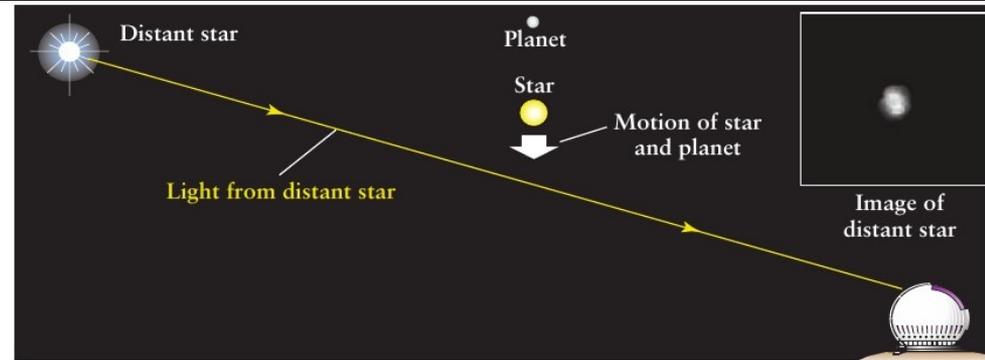
Vantagens:

- Maior sensibilidade para planetas distantes (1-10 UA)
- Sensível para planetas tão massivos quanto Marte
- Aplicável para estrelas distantes

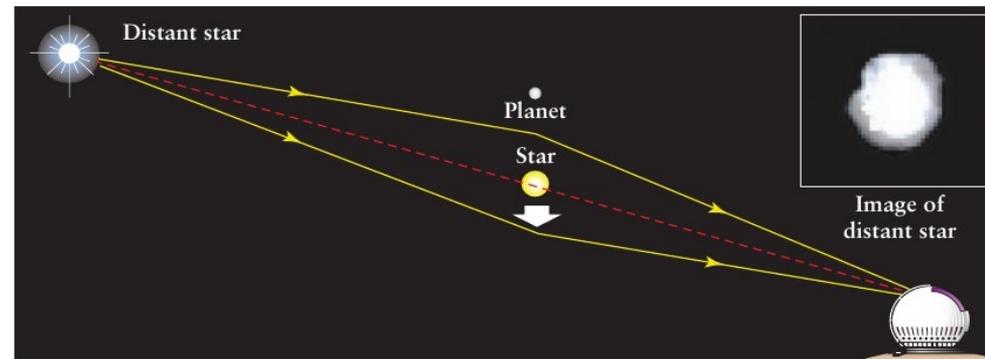
Desvantagens:

- Não pode ser repetido
- Precisa-se do eclipse (sistemas entre a Terra e o centro galáctico)

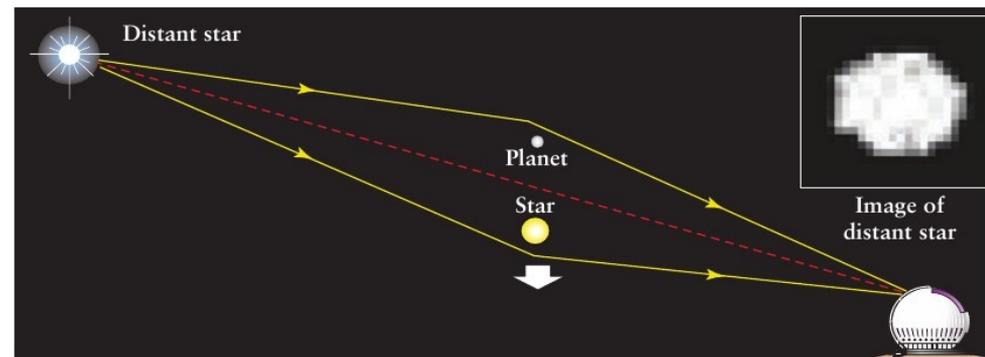
Mais de 1000 observações feitas até 2020.



a No microlensing



b Microlensing by star



c Microlensing by star and planet

Exoplanetas: imageamento direto

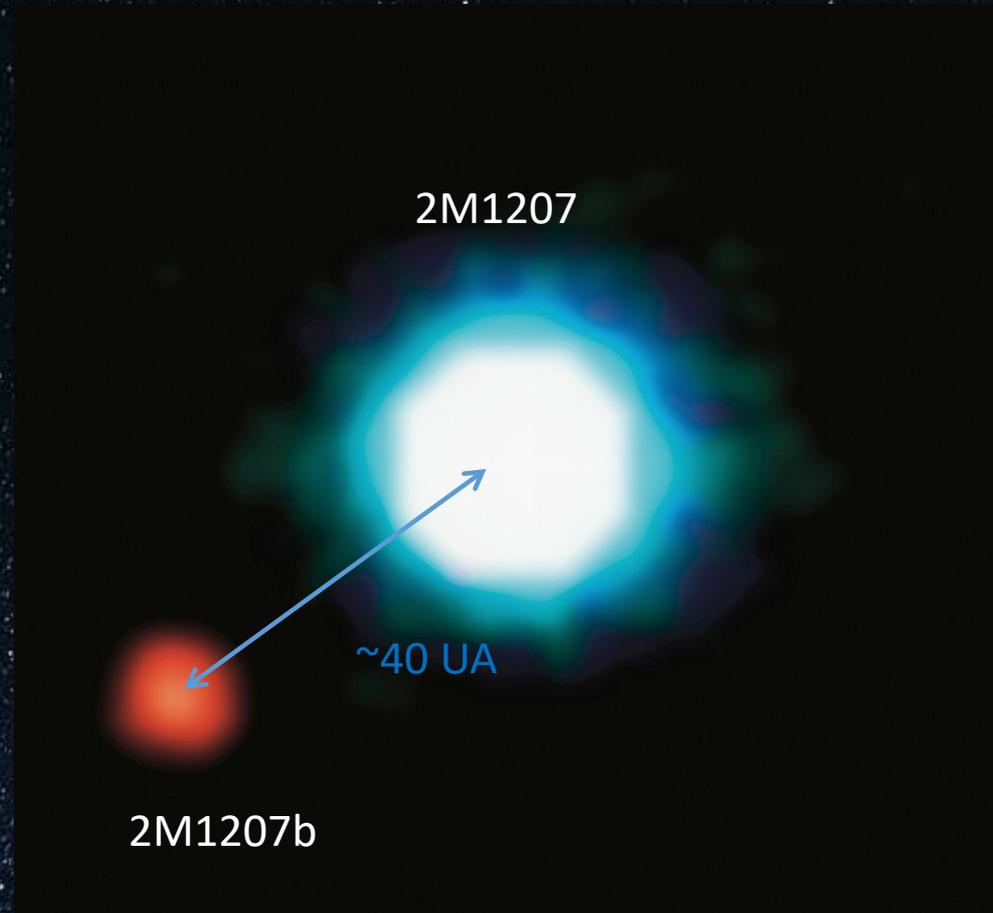
Imagem direta no visível praticamente impossível.

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: $\sim 0,024 M_{\odot} = 25 M_{J}$
(Muito pequena para proporcionar fusão de H; precisa-se de $\sim 0,08 M_{\odot} = 84 M_{J}$)

O objeto-companheiro 2M1207b tem de 3 a 10 M_{J} .



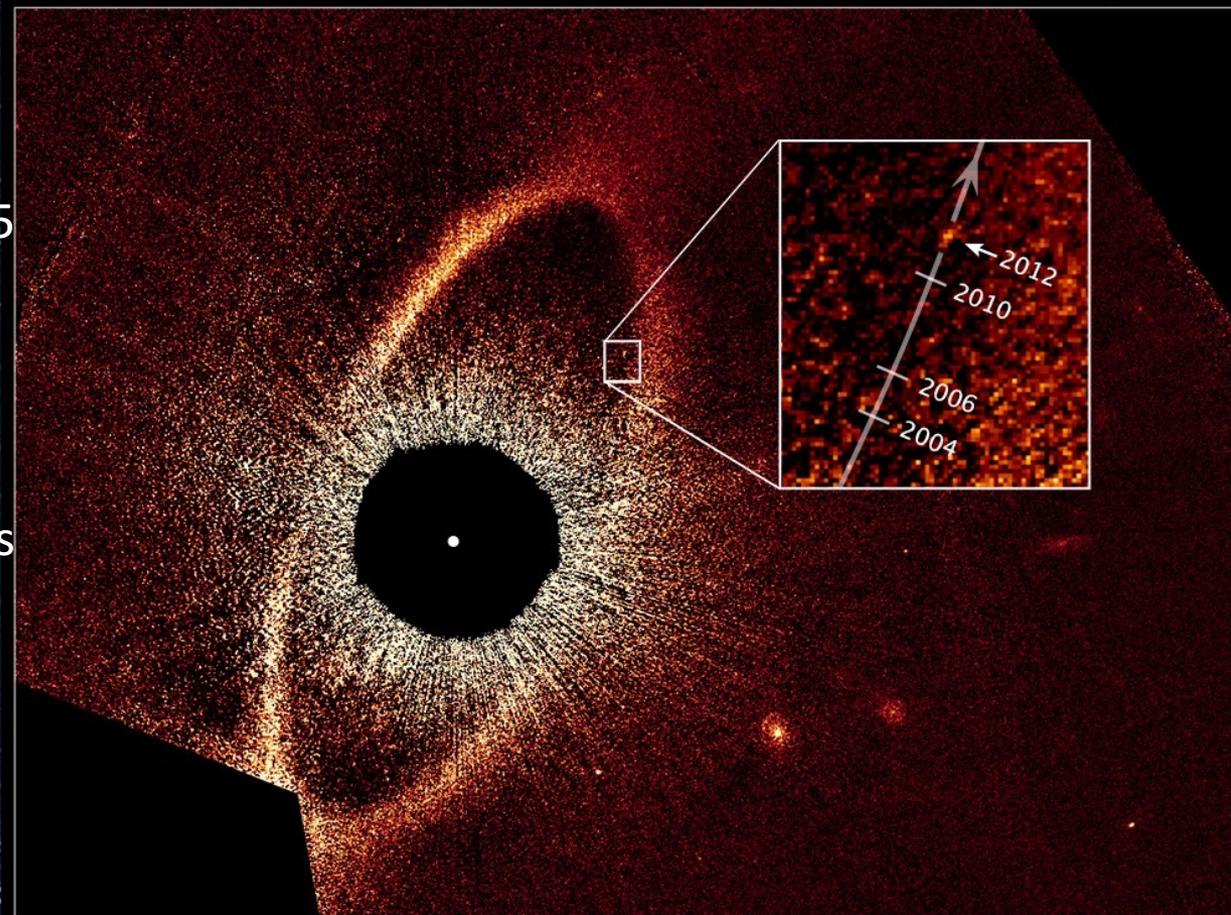
Exoplanetas: imageamento direto

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.

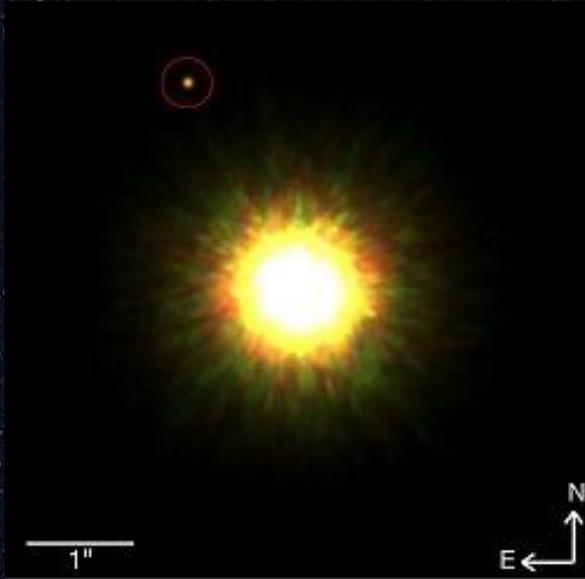
Período da órbita: ~ 1.700 anos
Periastro: ~ 50 UA
Apoastro: ~ 300 UA

Fomalhaut System

Hubble Space Telescope • STIS



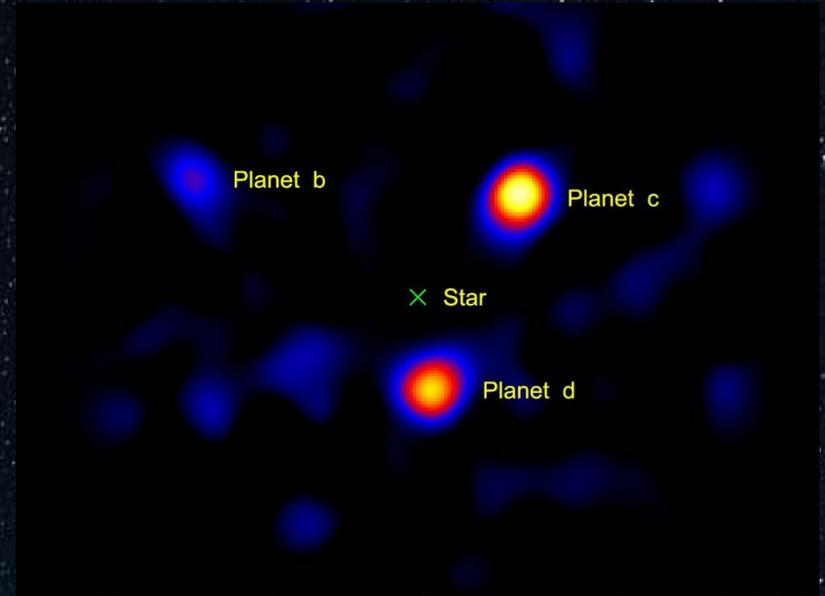
Exoplanetas: imageamento direto



1RXS 1609

~ 460 al em Escorpião

~ 330 UA



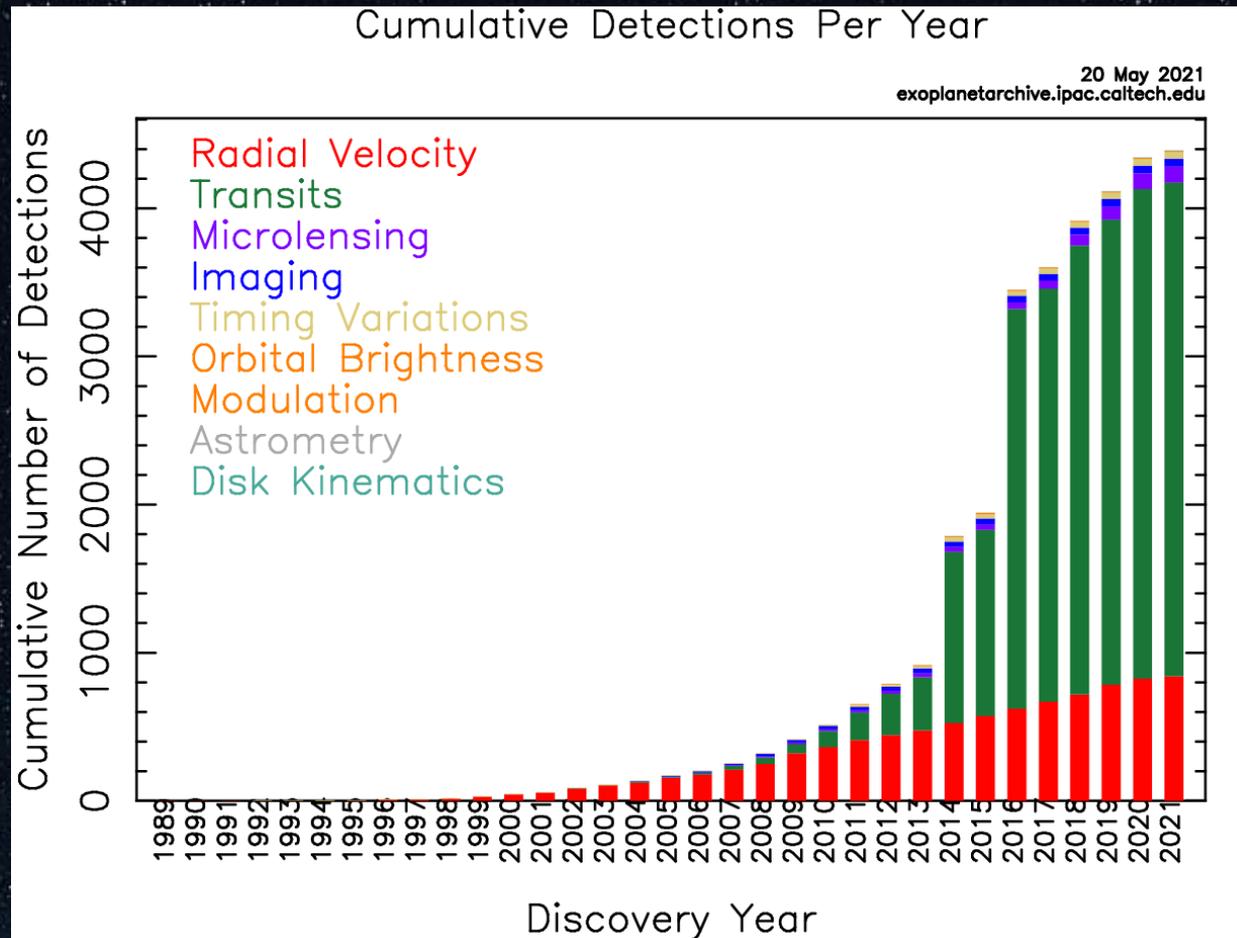
HR8789

~ 133 al em Pégasus

~ 24, 38 e 68 UA

São maiores que Júpiter
e mais um planeta mais
interno foi descoberto

Número de exoplanetas



Até 2021, 4.864 exoplanetas descobertos (por pelo menos 2 métodos) em 3.595 sistemas estelares.

Sistema TRAPPIST 1

Anã vermelha

~39 anos-luz

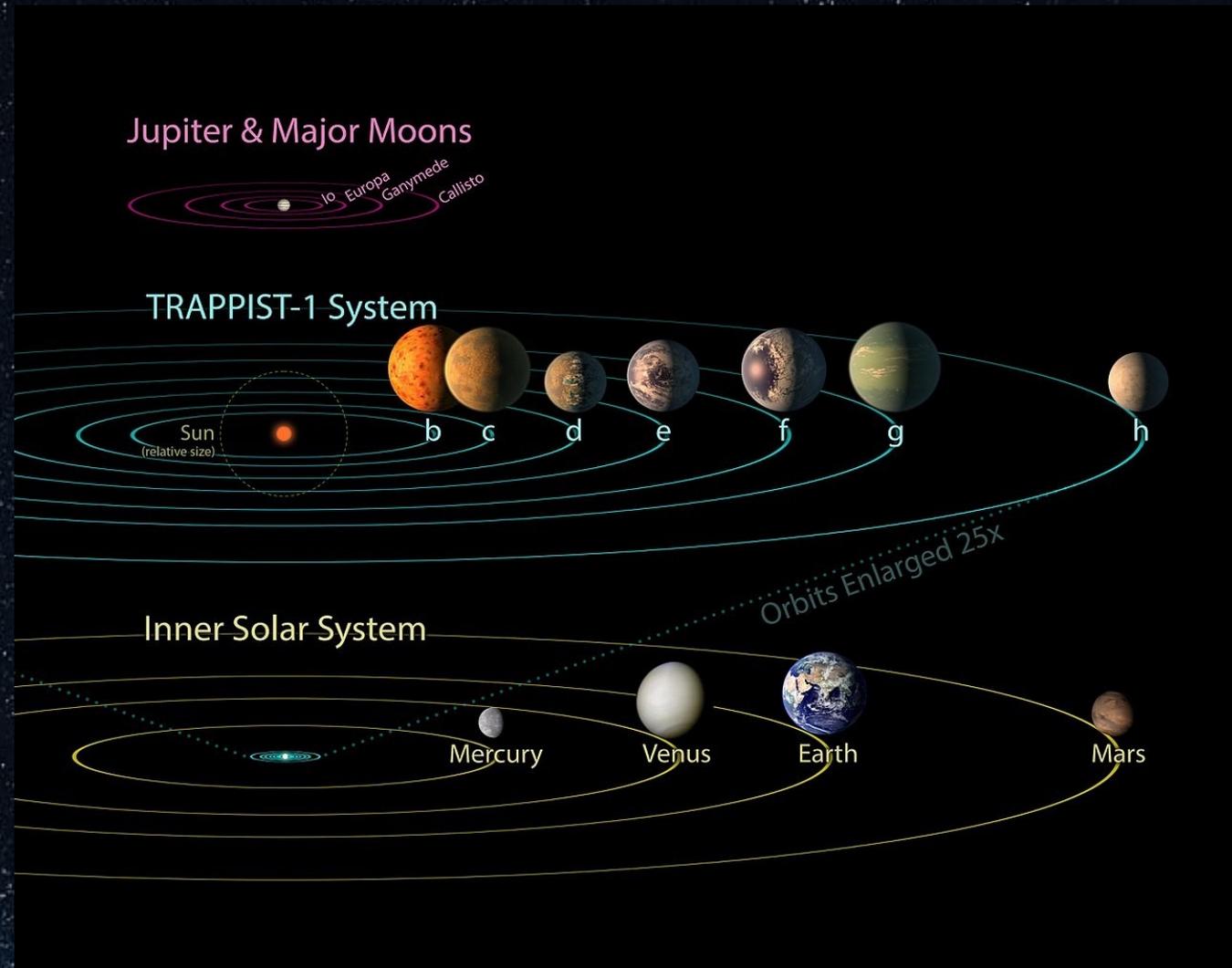
(Aquário)

0,08 M_{\odot}

Maior número de planetas semelhantes à

Terra: 7

Possibilidade de água líquida



Sistema Kepler-11

Semelhante ao Sol

~2.150 anos-luz

(Cisne)

1,04 M_{\odot}

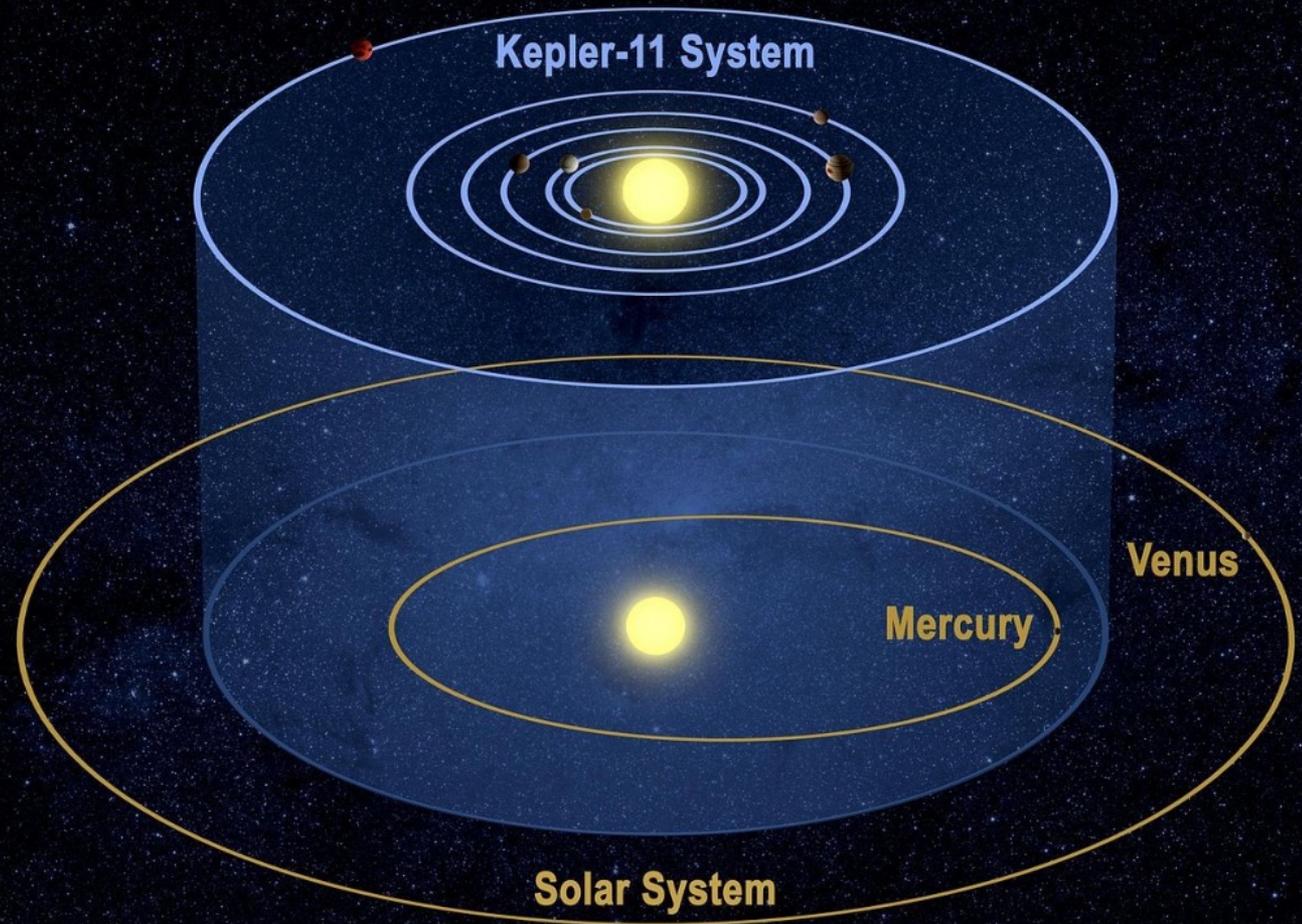
6 planetas tipo

Super-Terra (2,5 -

10 M_{Ter})

Idade: 3,2 bilhões

de anos

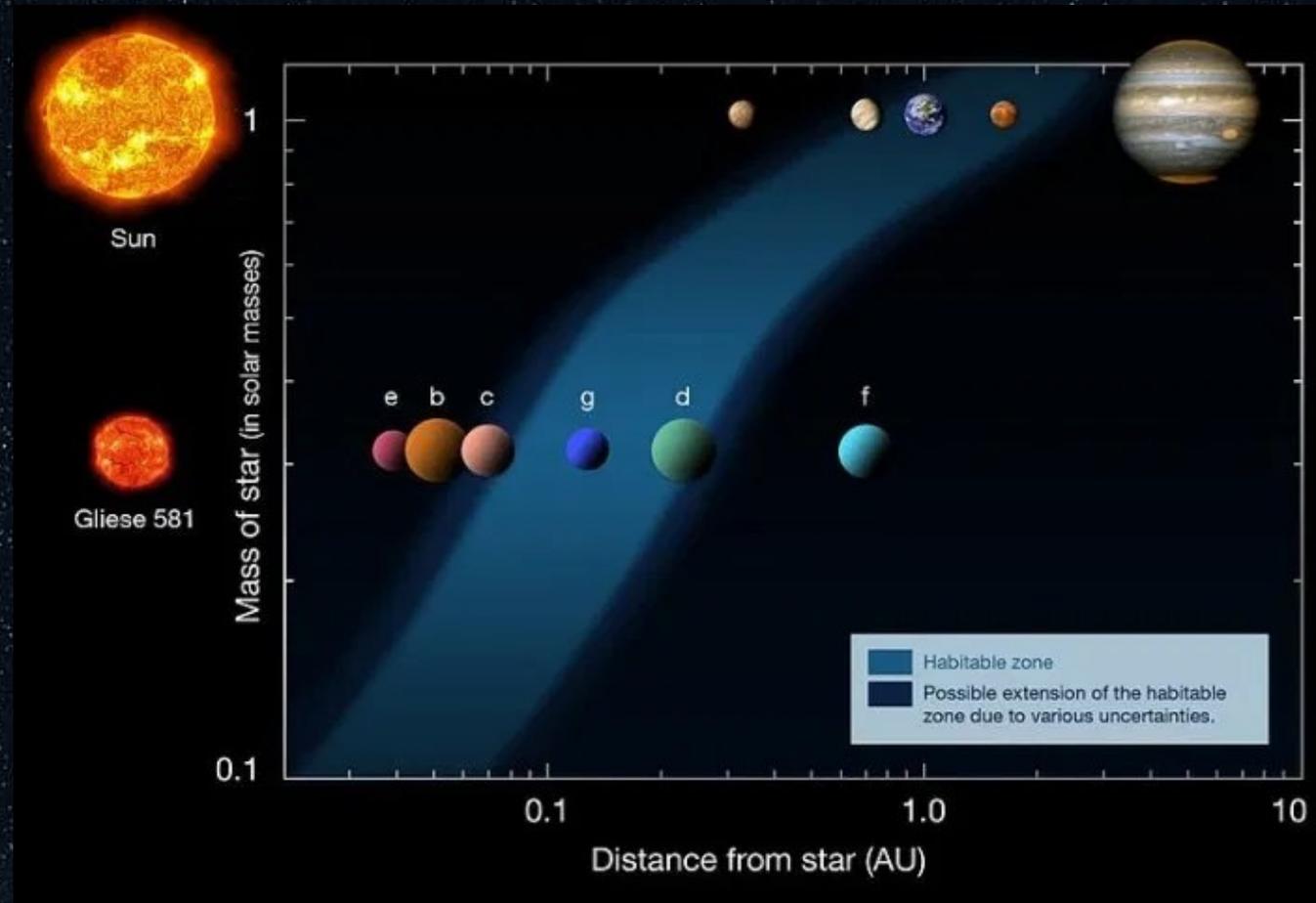


Sistema Gliese 581

Anã-Vermelha
~20,56 anos-luz
(Libra)
0,31 M_{\odot}

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

Idade: 7 – 11
bilhões de anos

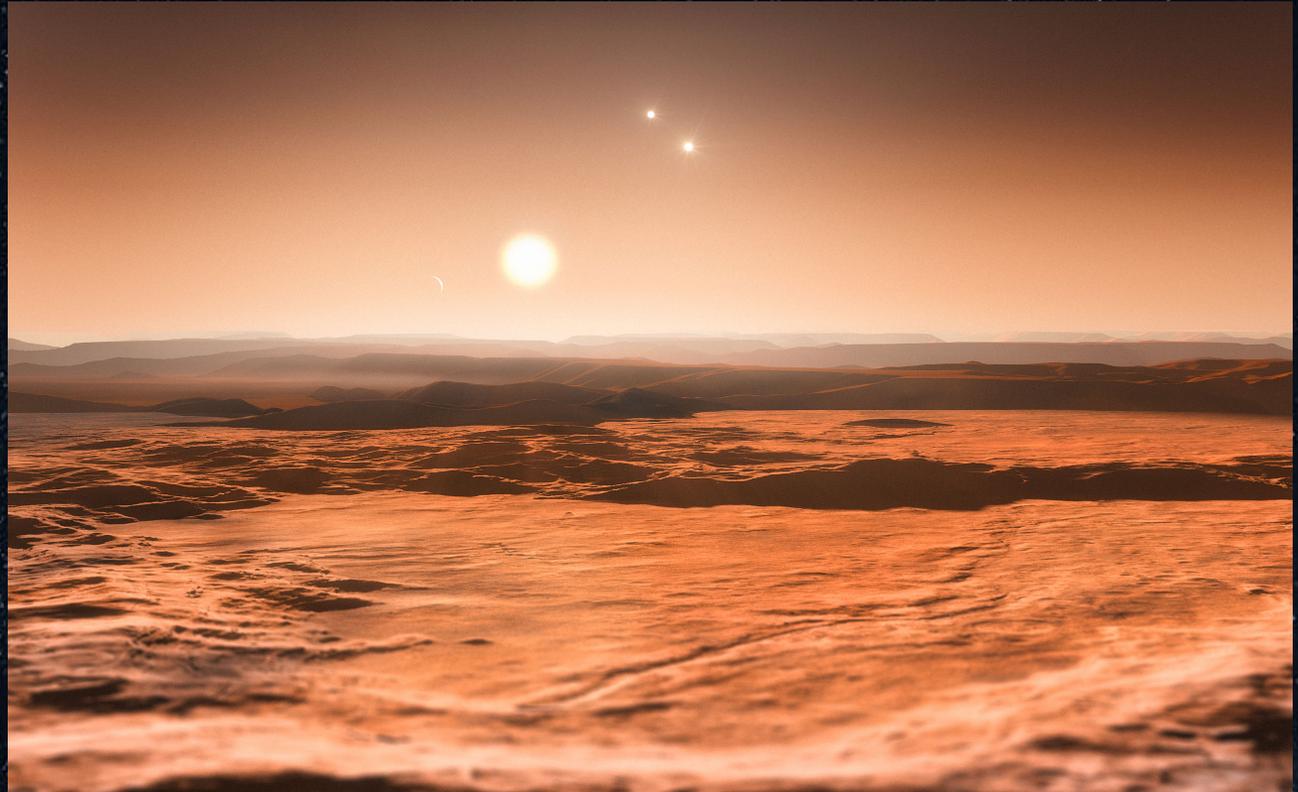


Gliese 667

Sistema estelar triplo
(constelação de
Escorpião)

23,6 anos-luz (7,2
parsecs) da Terra

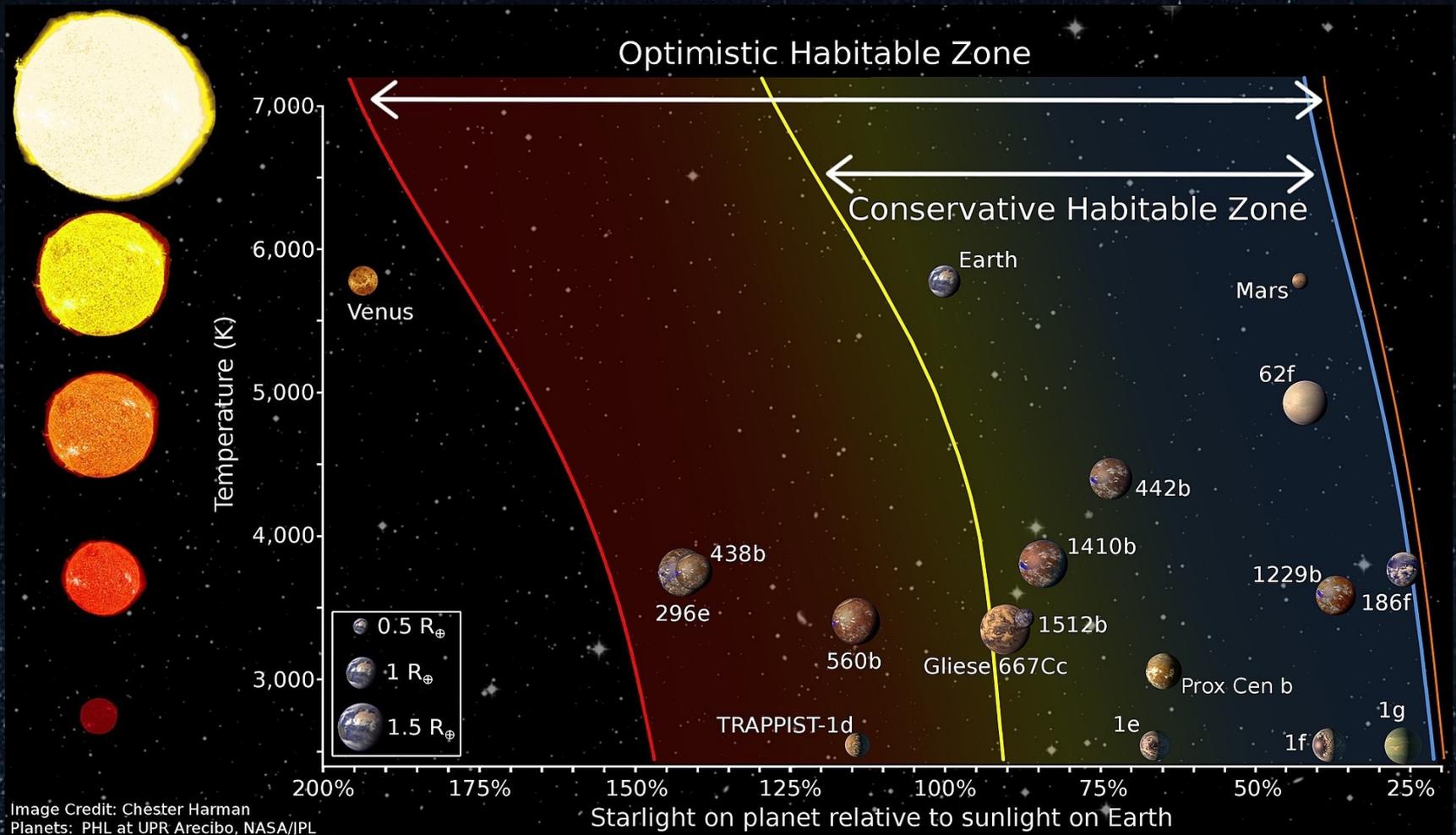
Duas estrelas mais
brilhantes são um
par de anãs laranjas



A terceira estrela do sistema Gliese 667C tem sistema planetário com 7 planetas, incluindo três super-Terras na zona habitável.

Zona habitável planetária

- O planeta precisa ser terrestre com superfície sólida
- Massa suficiente para que a gravidade retenha uma atmosfera
- Estar a uma distância da estrela para ter água líquida na sua superfície
- Órbita relativamente circular para não haver muitas variações de temperaturas



Zona Habitável Galáctica

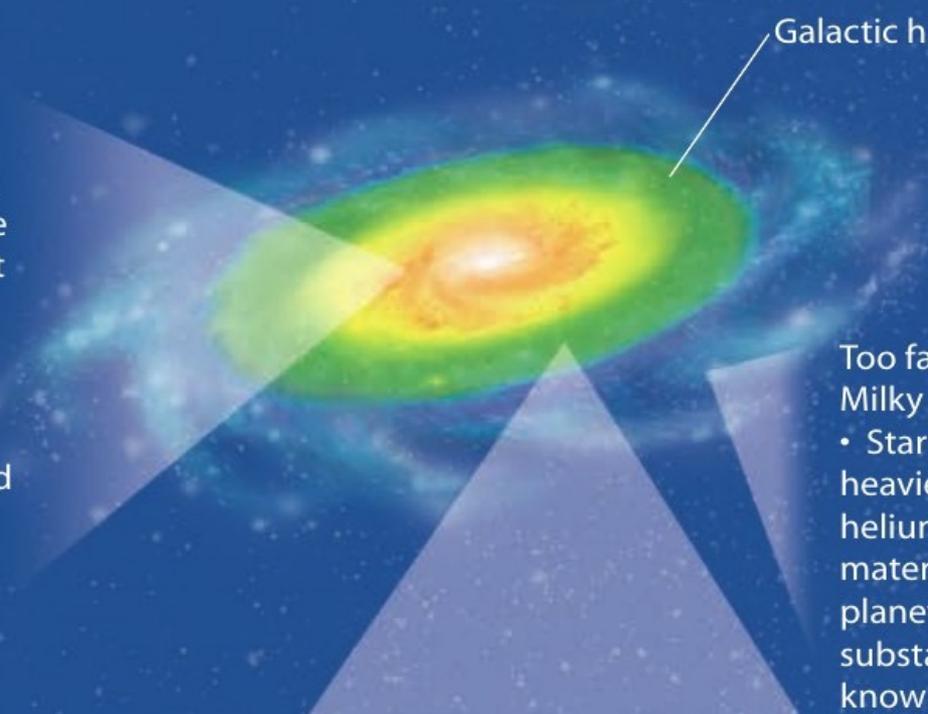
Intelligent civilizations in our Milky Way Galaxy can evolve only in a certain region called the galactic **habitable** zone. In that zone, a suitable planet must lie within the planetary habitable zone of its parent star. (From C. H. Lineweaver, Y. Fenner, and B. K. Gibson)

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.

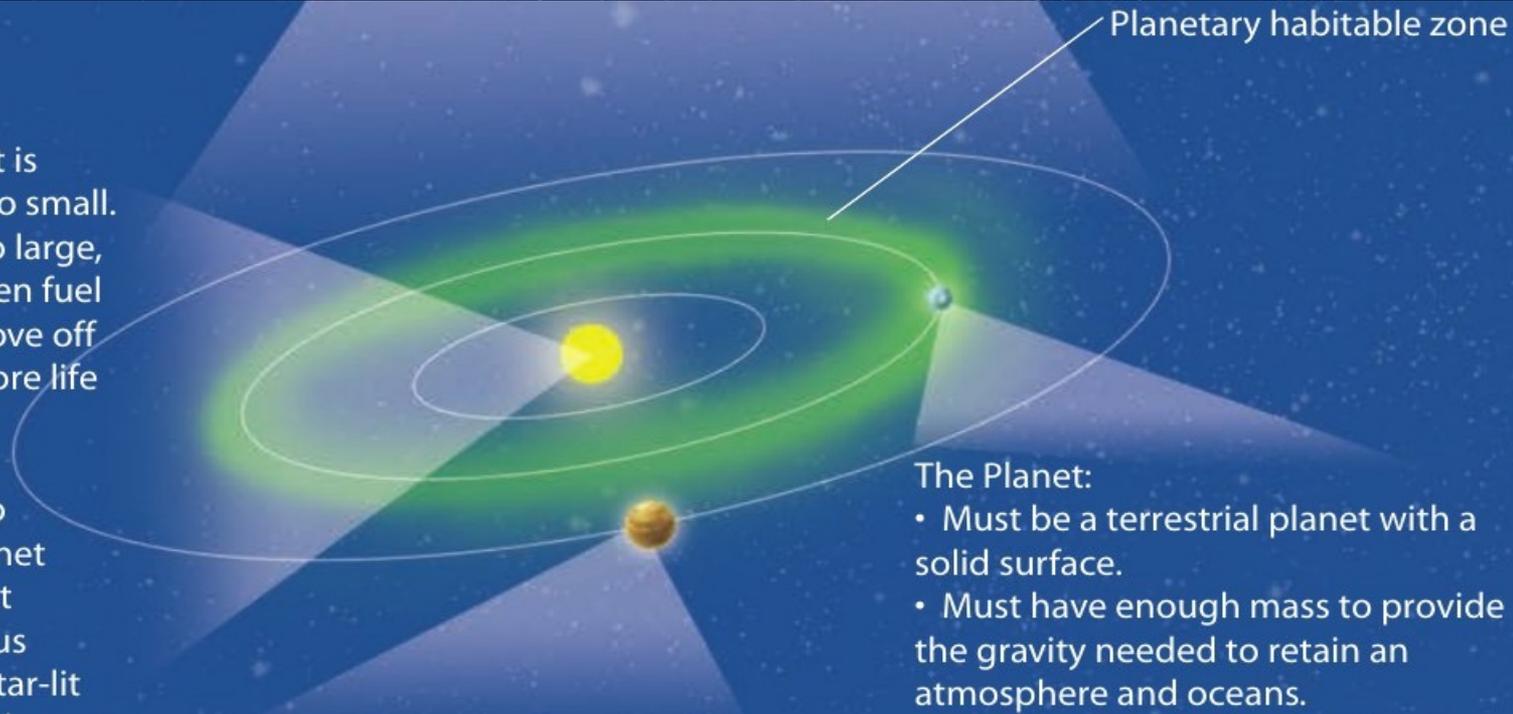
Galactic habitable zone



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.)

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

$$\Rightarrow N = 100$$

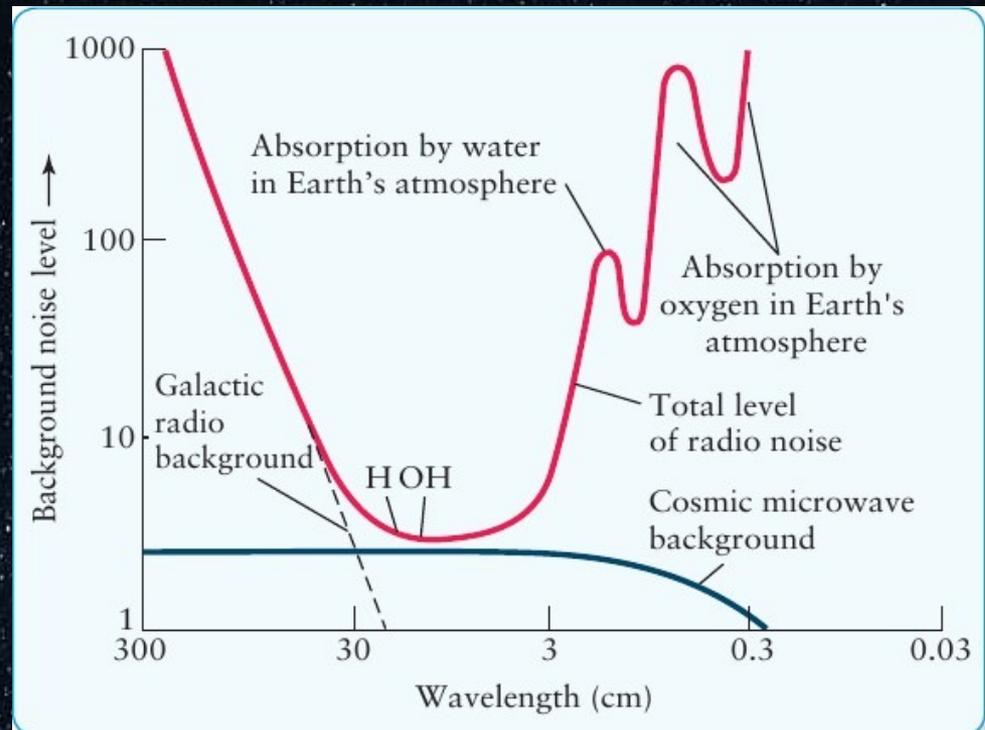
$$V_G = \pi \times 50000^2 \times 1000 \text{ al}^3$$

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

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.



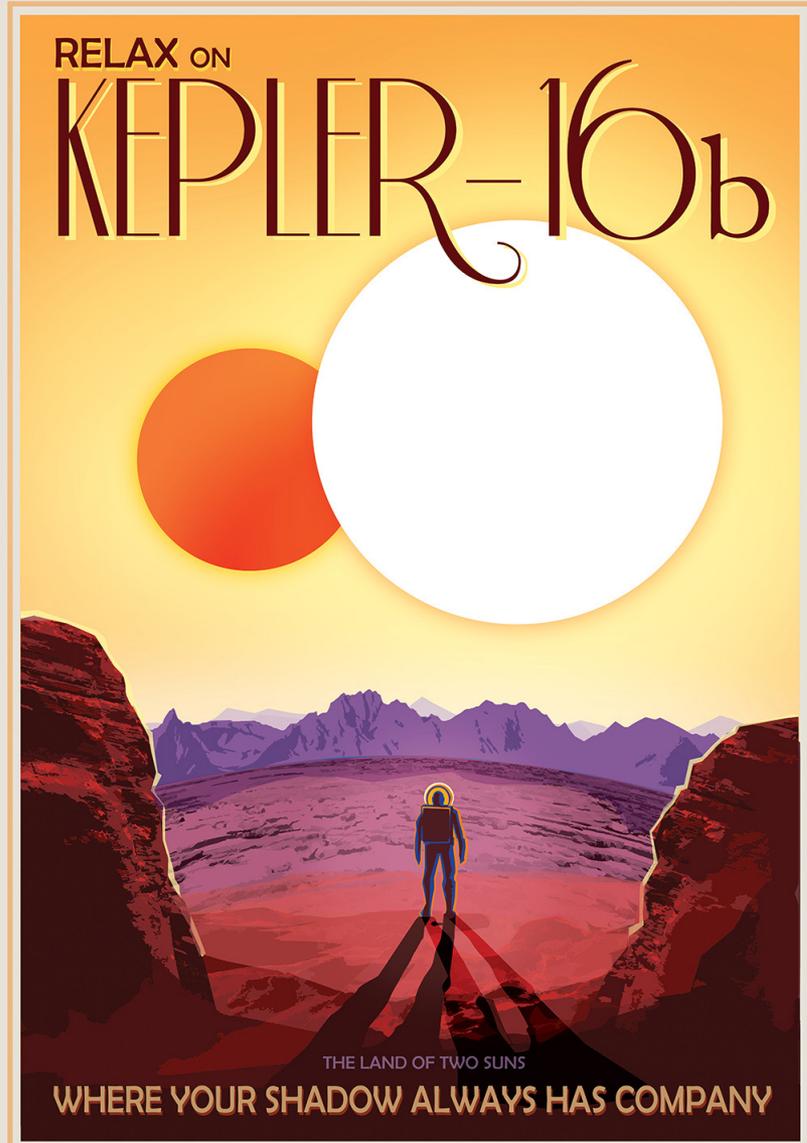


PLANET HOP FROM
TRAPPIST-1e



VOTED BEST "HAB ZONE" VACATION WITHIN 12 PARSECS OF EARTH

Some 40 light-years from Earth, a planet called TRAPPIST-1e offers a heart-stopping view: brilliant objects in a red sky, looming like the larger and smaller versions of our own moon. But these are no moons. They are other Earth-sized planets in a spectacular planetary system outside our own. These seven rocky worlds huddle around their small, dim, red star, like a family around a campfire. Any of them could harbor liquid water, but the planet shown here, fourth from the TRAPPIST-1 star, is in the habitable zone, the area around the star where liquid water is most likely to be detected. This system was revealed by the TRAnsiting Planets and Planetesimals Small Telescope (TRAPPIST) and NASA's Spitzer Space Telescope. The planets also are excellent targets for NASA's James Webb Space Telescope. Take a planet-hopping excursion through the TRAPPIST-1 system.



RELAX ON
KEPLER-16b

THE LAND OF TWO SUNS

WHERE YOUR SHADOW ALWAYS HAS COMPANY

Like Luke Skywalker's planet "Tatooine" in Star Wars, Kepler-16b orbits a pair of stars. Depicted here as a terrestrial planet, Kepler-16b might also be a gas giant like Saturn. Prospects for life on this unusual world aren't good, as it has a temperature similar to that of dry ice. But the discovery indicates that the movie's iconic double-sunset is anything but science fiction.