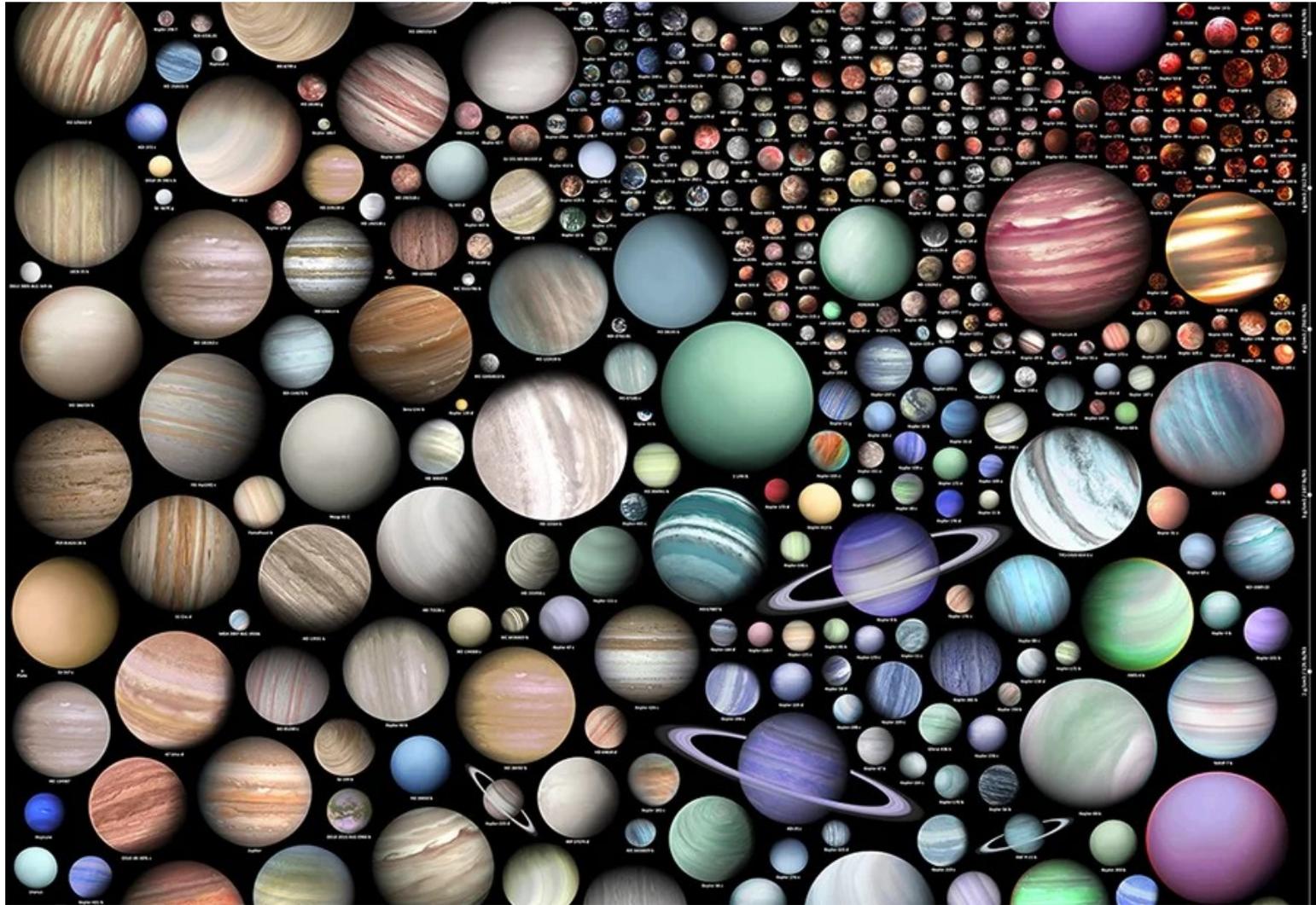


# 13. Exoplanetas: Métodos de detecção



As duas técnicas principais (velocidade radial e trânsito) de detecção de exoplanetas, têm origem no estudo de estrelas binárias (duplas).

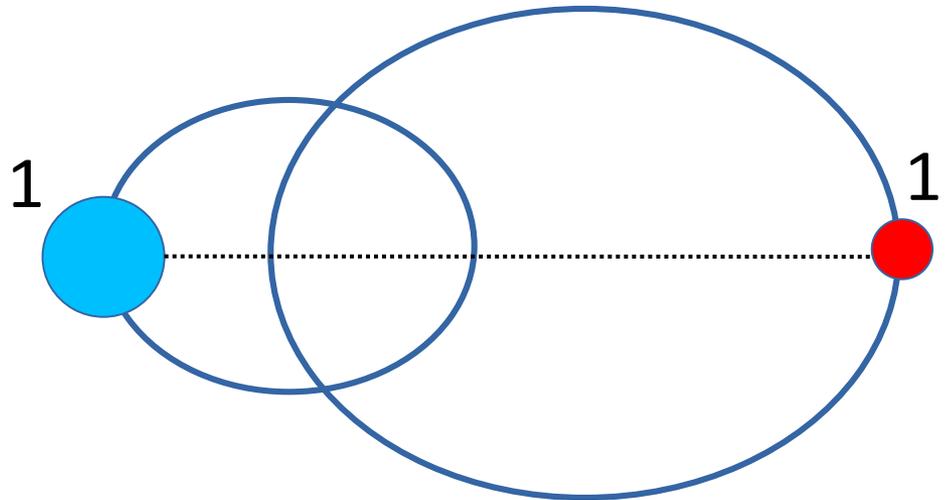
Estudaremos primeiro estrelas binárias e logo a seguir exoplanetas



# Classificação dos Sistemas Binários

- **Binária visual.** Como estão separadas podemos estudar seu movimento individual → são estrelas fisicamente associadas.

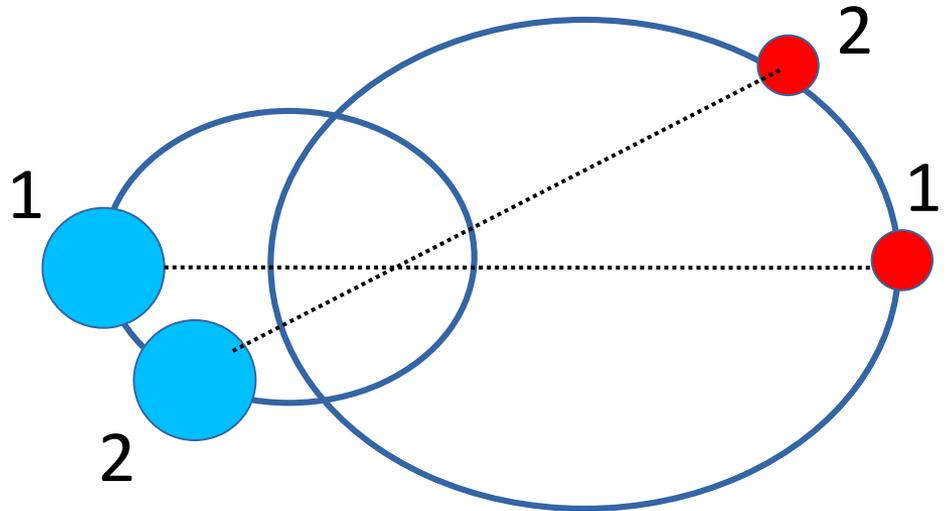
Exemplo de binária visual.  
O período e as estrelas binárias podem ser observados diretamente.



# Classificação dos Sistemas Binários

- **Binária visual.** Como estão separadas podemos estudar seu movimento individual → são estrelas fisicamente associadas.

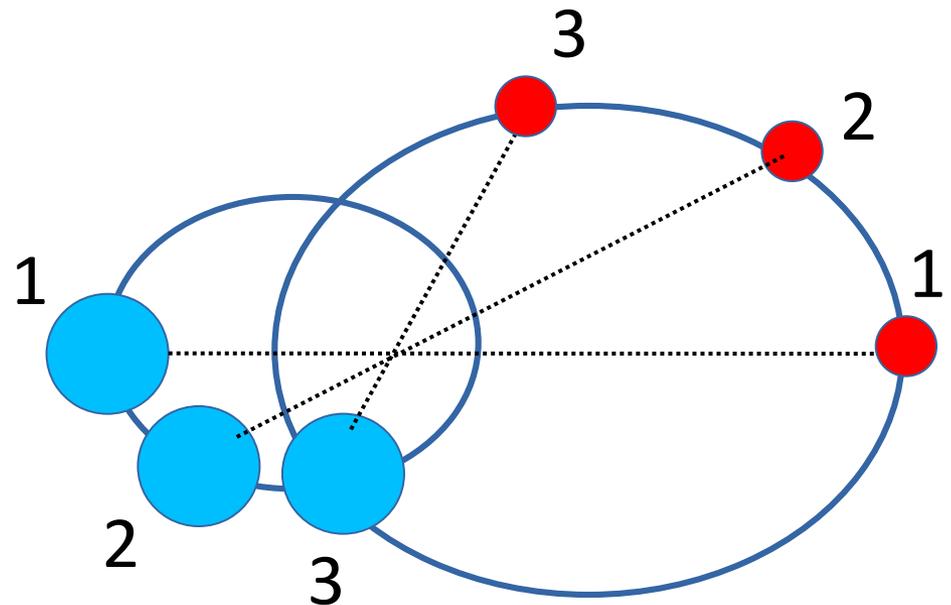
Exemplo de binária visual.  
O período e as estrelas binárias podem ser observados diretamente.



# Classificação dos Sistemas Binários

- **Binária visual.** Como estão separadas podemos estudar seu movimento individual → são estrelas fisicamente associadas.

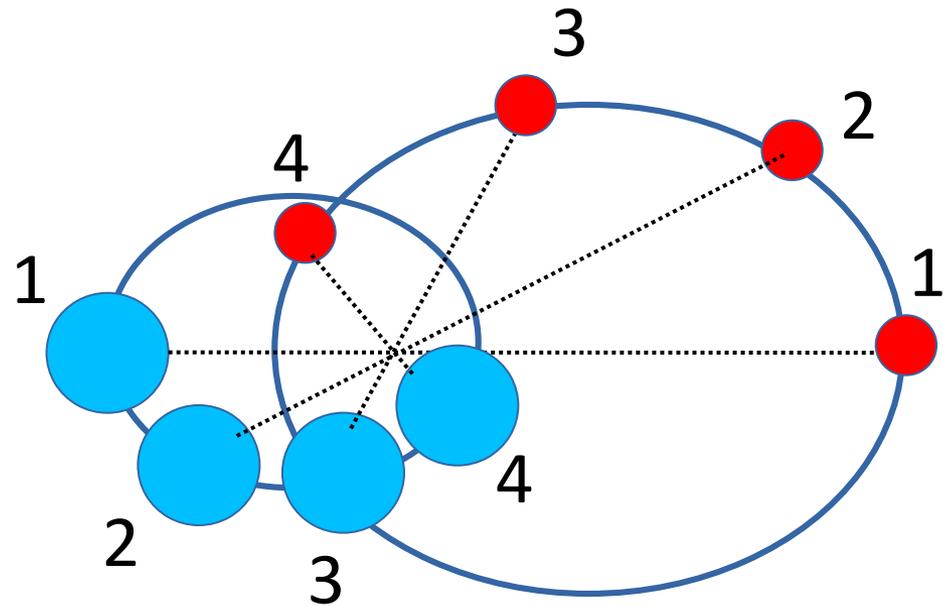
Exemplo de binária visual.  
O período e as estrelas binárias podem ser observados diretamente.



# Classificação dos Sistemas Binários

- **Binária visual.** Como estão separadas podemos estudar seu movimento individual → são estrelas fisicamente associadas.

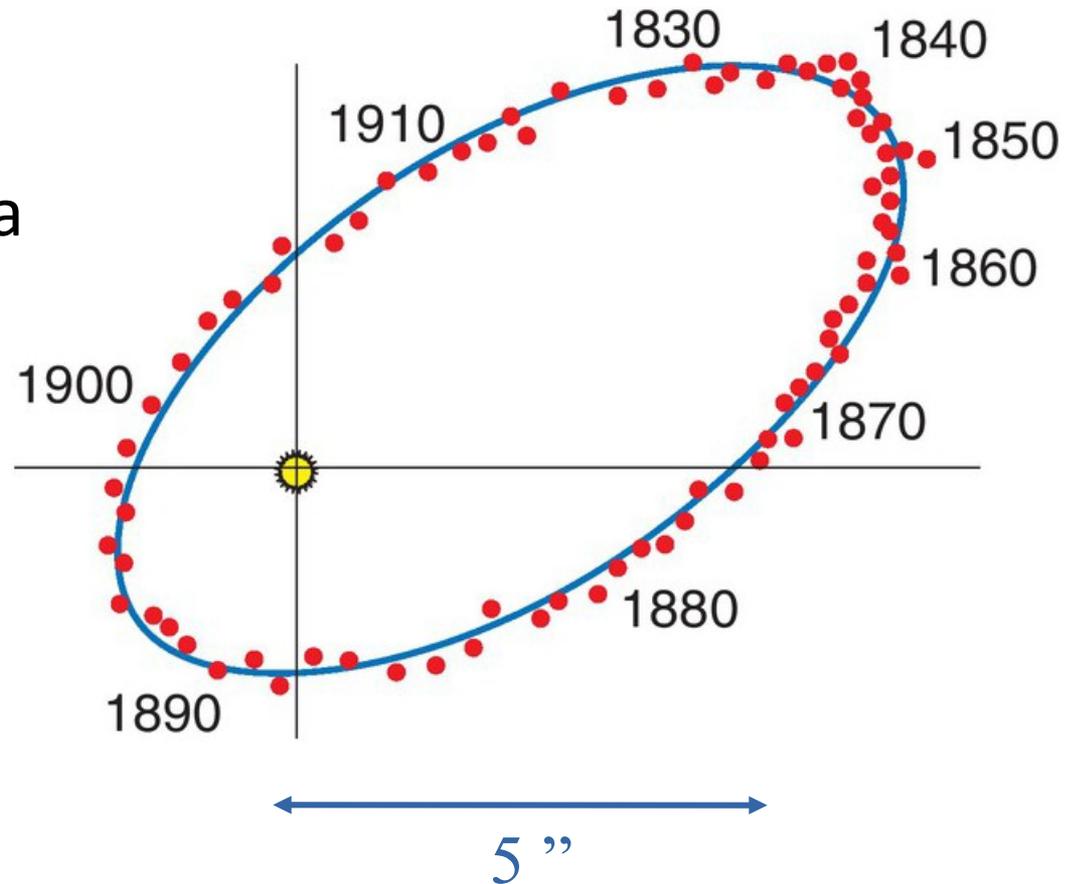
Exemplo de binária visual.  
O período e as estrelas binárias podem ser observados diretamente.



# Binárias Visuais

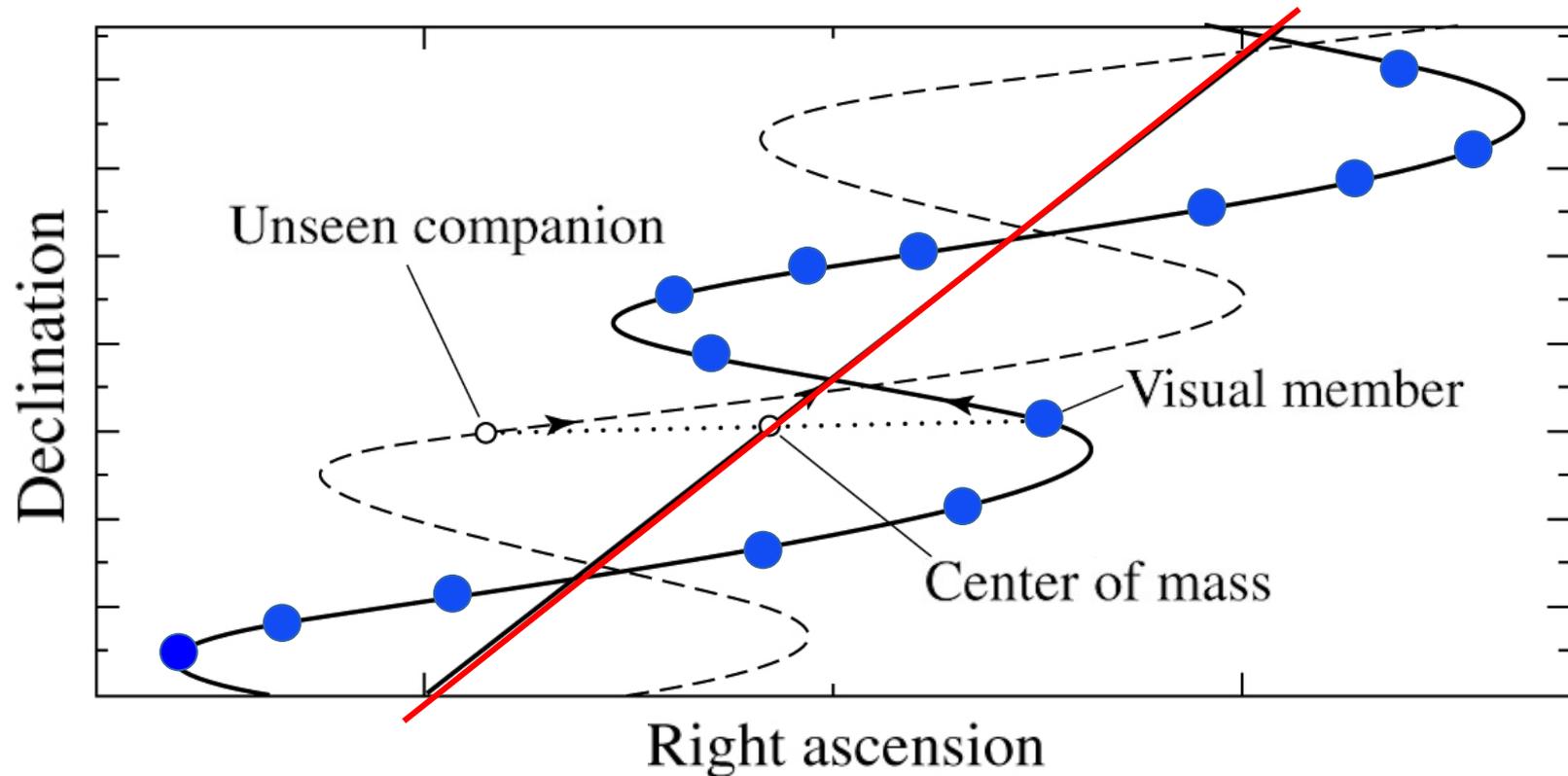
## Exemplo: Sistema binário 70 Ophiuchi

À medida que o tempo passa, a posição relativa entre as estrelas é marcada como um ponto, traçando uma órbita aparente, com período de 88 anos



Separação média de 23 U.A.

- **Binária astrométrica** → apenas uma estrela observada c/ telescópio, mas nota-se um movimento oscilatório devido à influência de companheira



## Sirius: exemplo de binária astrométrica



Sirius A é muito brilhante e ofusca a fraca Sirius B.

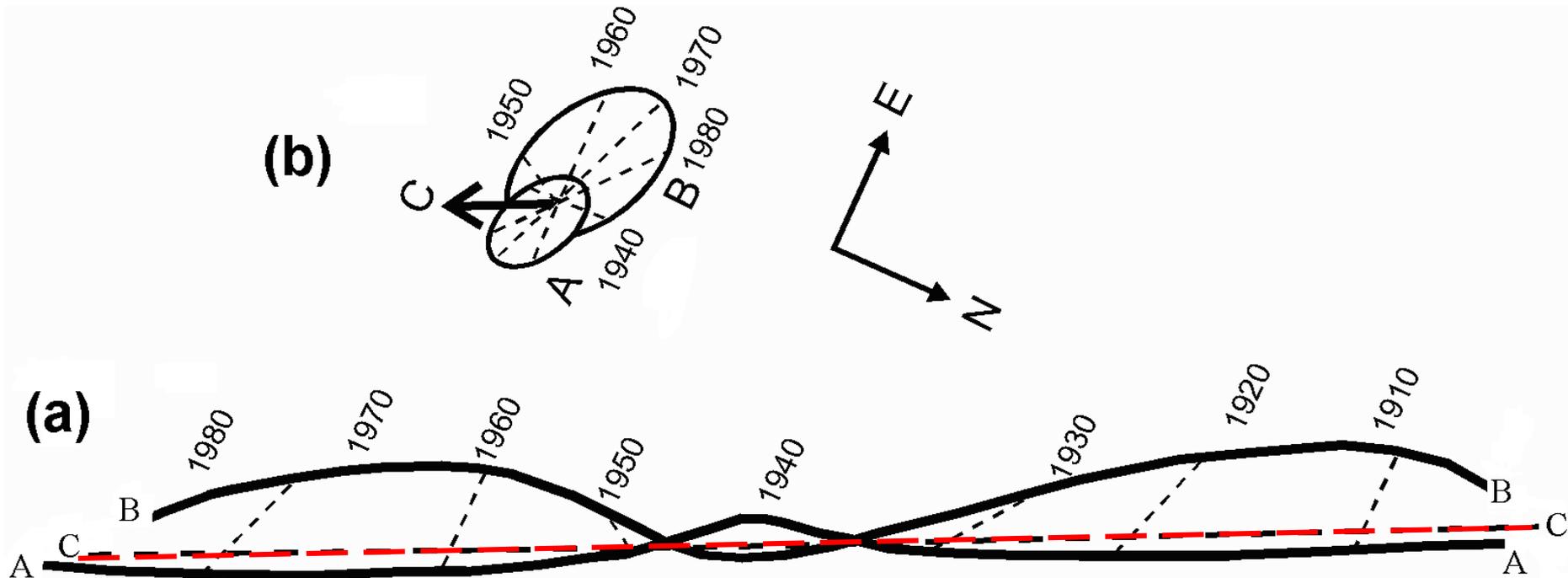
A componente B foi deduzida antes de ser observada, pela alteração causada no movimento próprio de Sirius A.

11/3/2017

Gabriela e Fábio Carvalho, Observatório OTUS, interior de São Paulo.

<https://www.facebook.com/observatoriootus/>

# Binárias Astrométricas. Exemplo: sistema Sirius

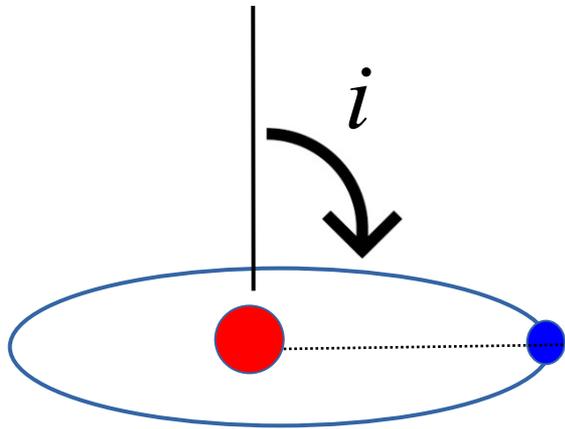


(a) Movimentos aparentes de Sirius A e B, e do centro de massa C, em relação às estrelas de fundo

(b) Movimentos orbitais de Sirius A e B, em relação ao centro de massa

# Binárias Eclipsantes

Ângulo de inclinação  $i$ : ângulo entre o plano orbital e a perpendicular à linha de visada



Se o ângulo de inclinação  $i$  da órbita de um sistema duplo é  $\sim 90^\circ$ , as estrelas podem se eclipsar



# 2 tipos de mínimos na curva de luz de binárias eclipsantes

*We see light from both stars A and B.*



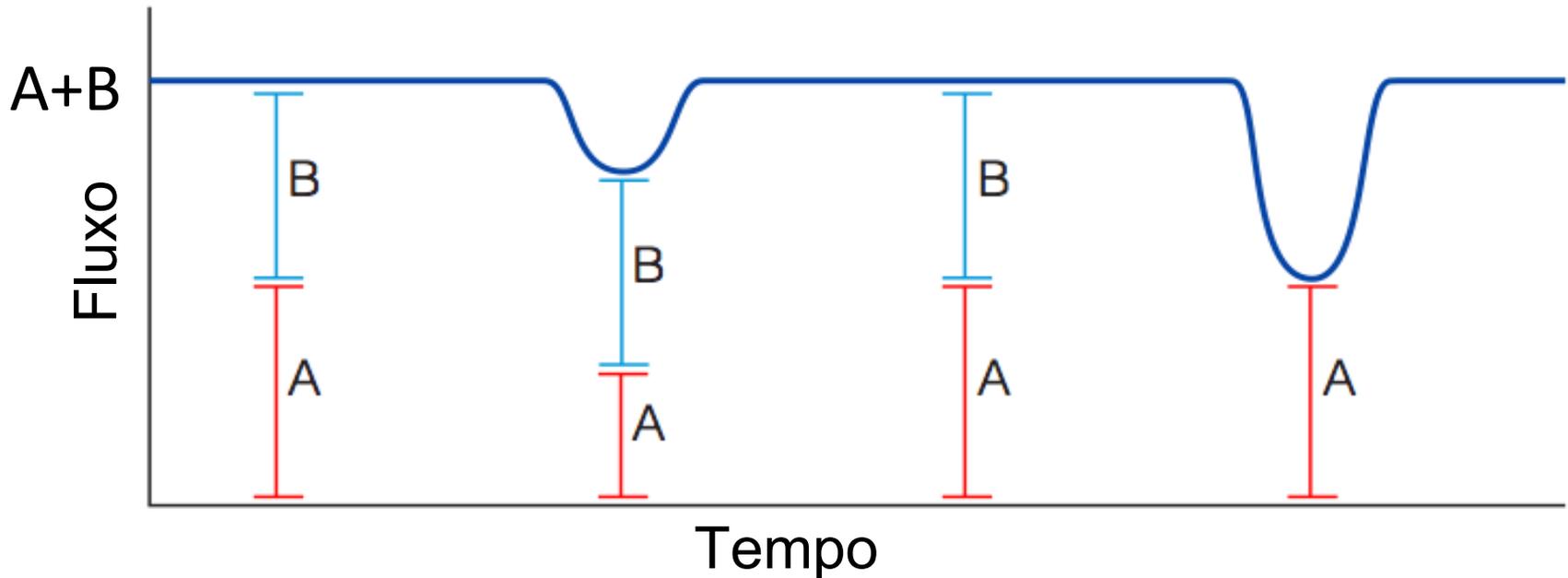
Estrela **quente** passa na frente da **fria** → **eclipse secundário**



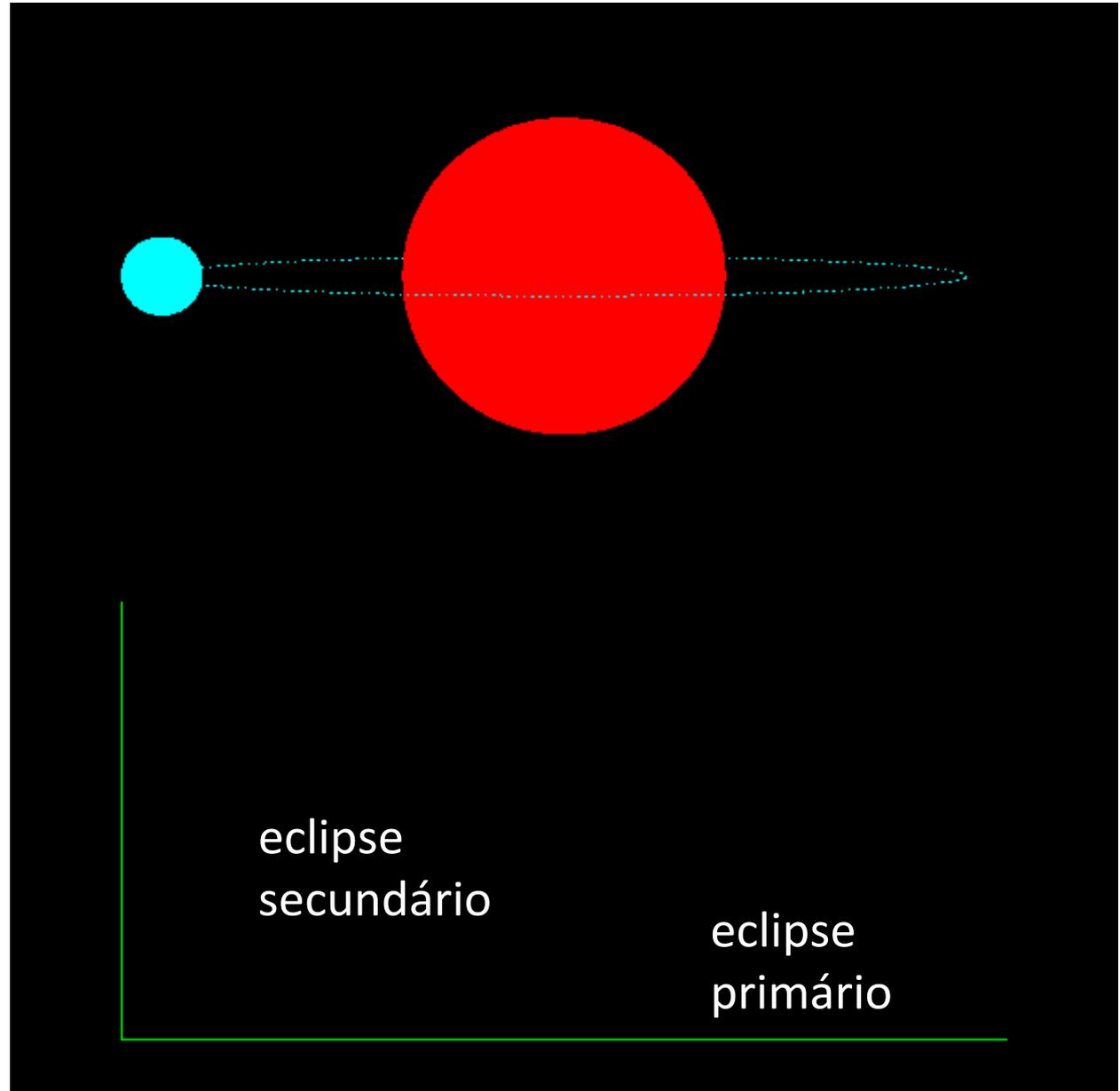
*We see light from both A and B.*



Estrela mais **fria** passa na frente da mais **quente** → **eclipse primário**

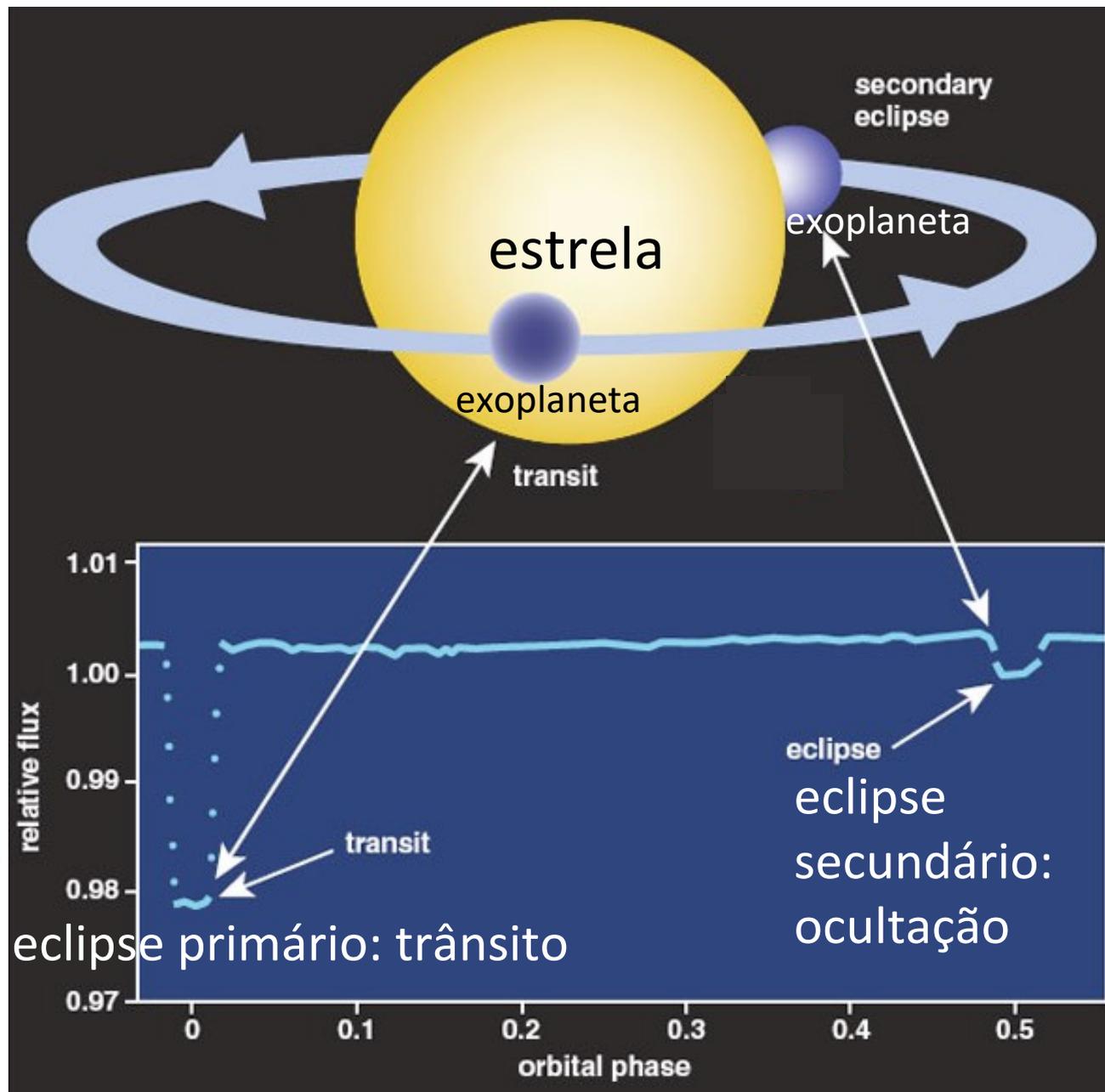


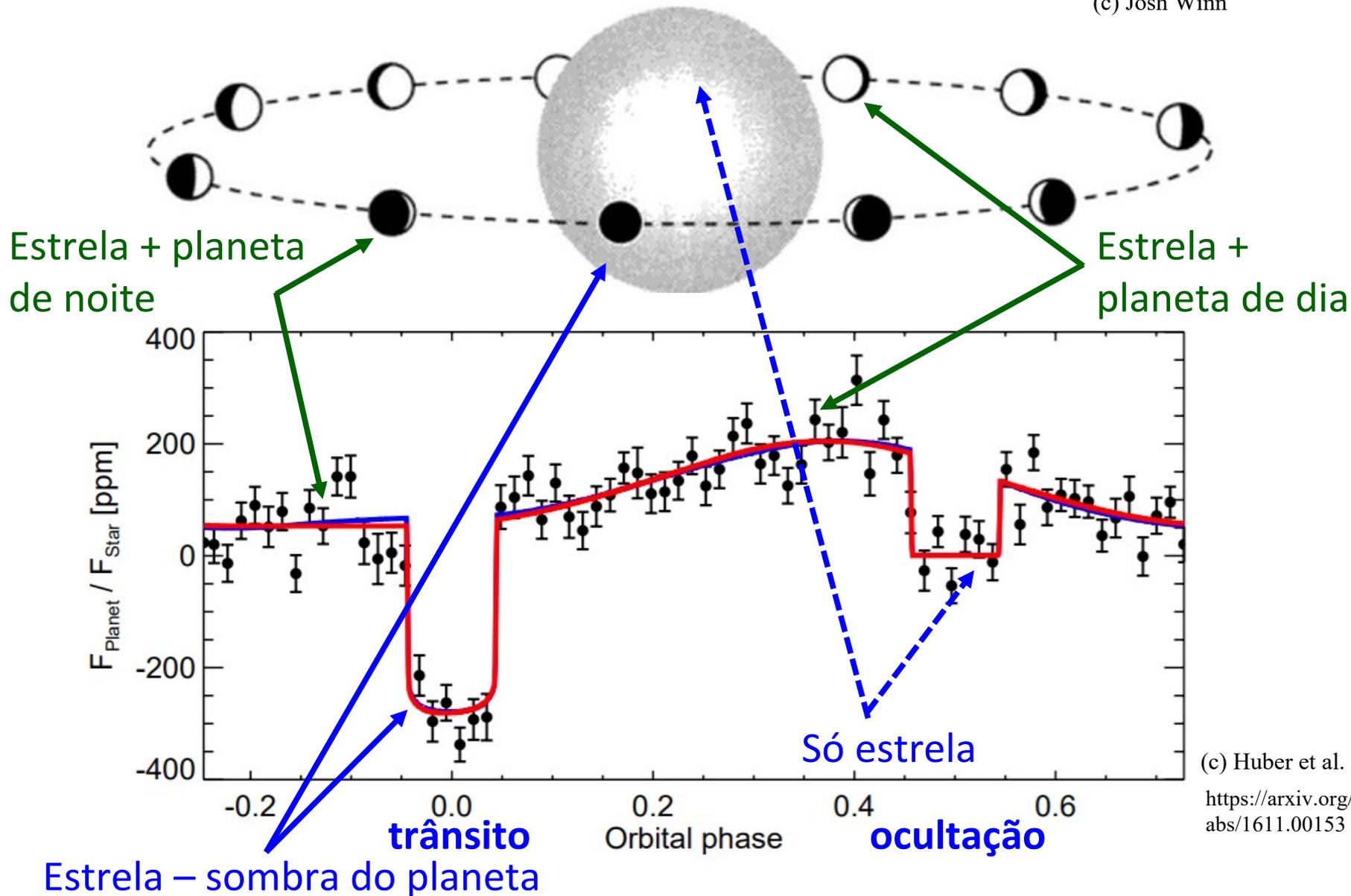
# Curva de luz de binária eclipsante



O método do **trânsito** em **exoplanetas** observa a diminuição do fluxo total (estrela + planeta) no **eclipse primário**, chamado **trânsito**.

Às vezes pode ser observado o **eclipse secundário**





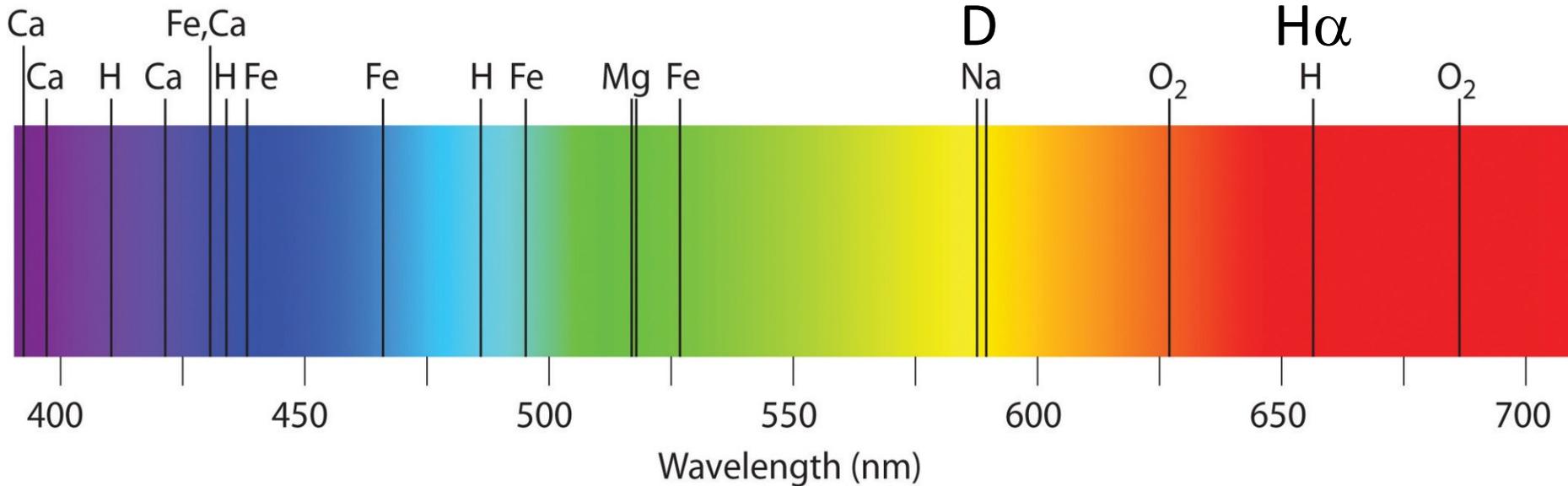
**Figure 1 — 55 Cancri e Spitzer/IRAC 4.5 $\mu\text{m}$  phase curve.** Photometry for all 8 datasets combined and folded on 55 Cancri e's 0.74-day orbital period. Black filled circles are data binned

# Binárias espectroscópicas

Em repouso o comprimento de onda  $\lambda_0$  é fixo.

Por exemplo, comprimento de onda da linha de hidrogênio  $H\alpha$  (na região do vermelho) é  $\lambda_0 = 656,281 \text{ nm}$

Linhas D do sódio (amarelo) em  $\lambda_0 = 588,995$  e  $589,592 \text{ nm}$



# Efeito Doppler

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$



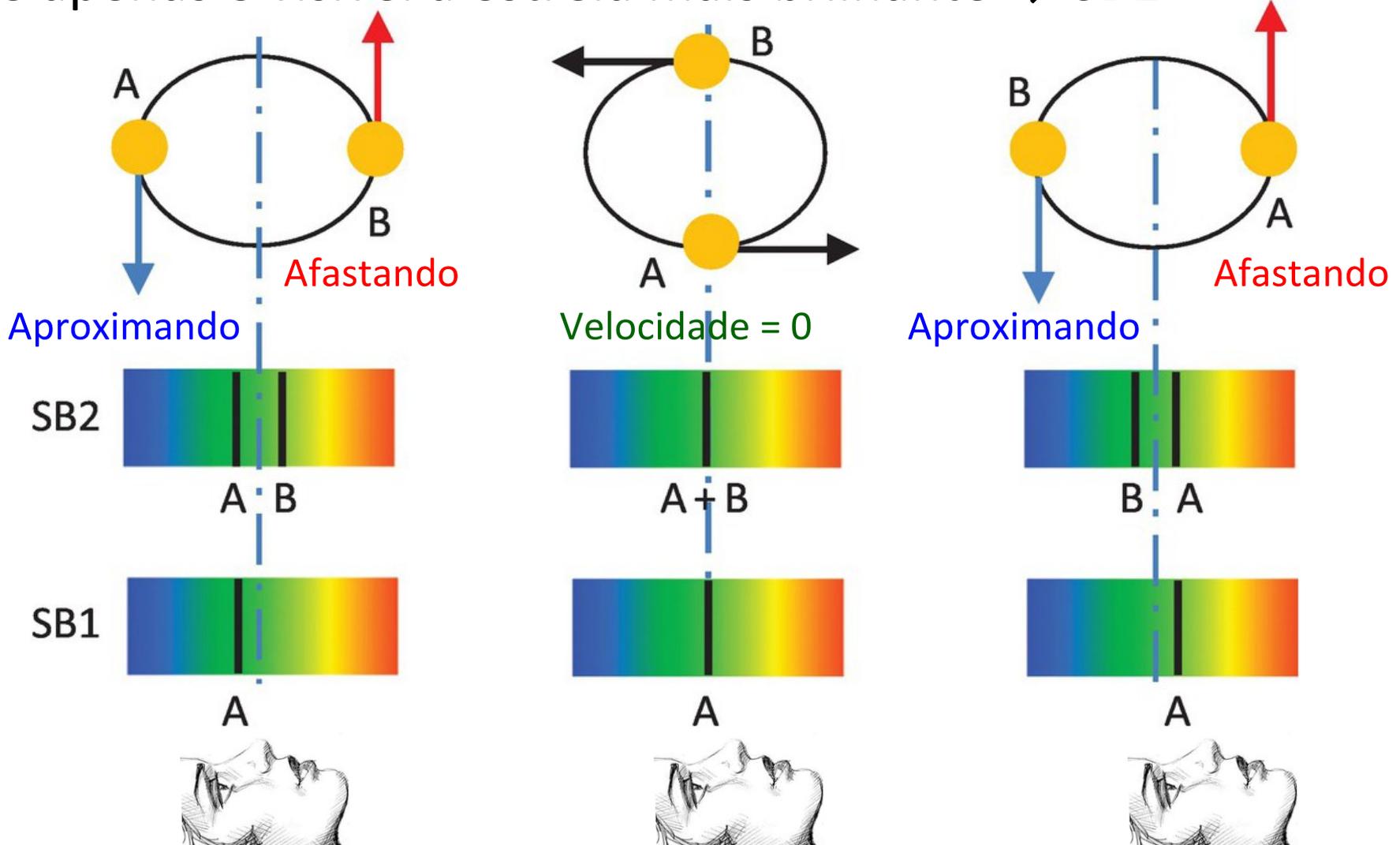
$\lambda$ : observado (estrela)  
 $\lambda_0$ : em repouso (terra)

Estrela se afasta  
( $\lambda > \lambda_0$ ):  
velocidade positiva

Estrela se aproxima ( $\lambda < \lambda_0$ ):  
velocidade negativa

# Binárias espectroscópicas

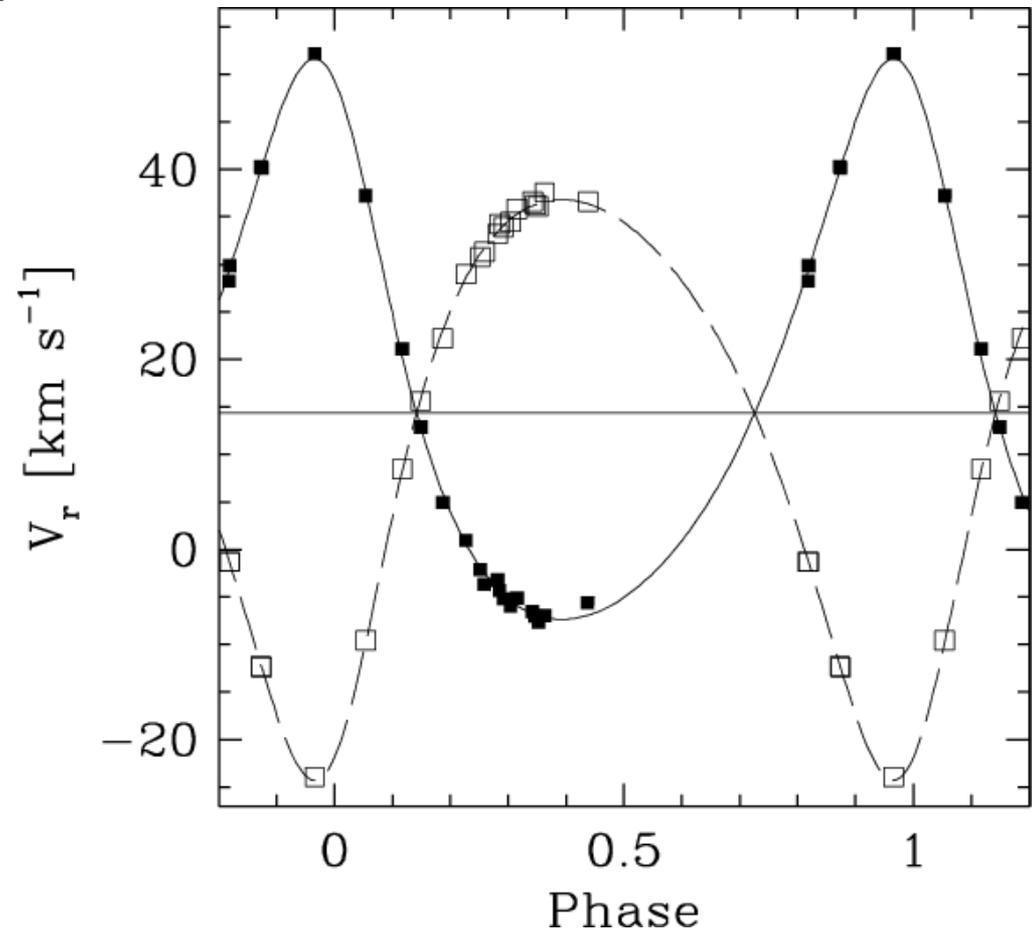
- Se são visíveis linhas de ambas estrelas → SB2
- Se apenas é visível a estrela mais brilhante → SB1



# Binárias Espectroscópicas

- Deslocamento Doppler → movimento radial da estrela.
- No espectro da binária espectroscópica (SB2) os 2 conjuntos de linhas variam periodicamente.
- Linhas duplas se estrelas têm brilhos semelhantes.
- Se a companheira é muito fraca, são detectadas só as linhas da primária (SB1).

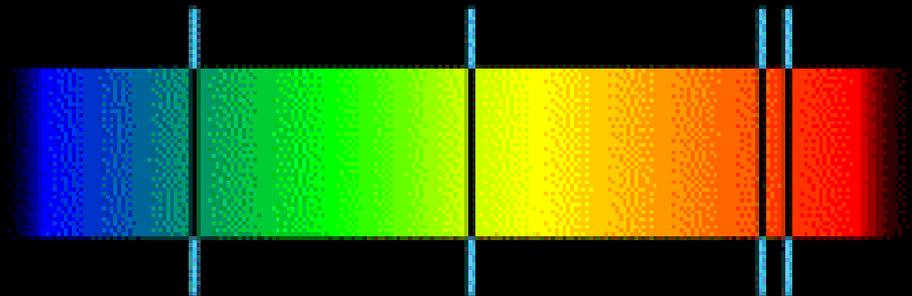
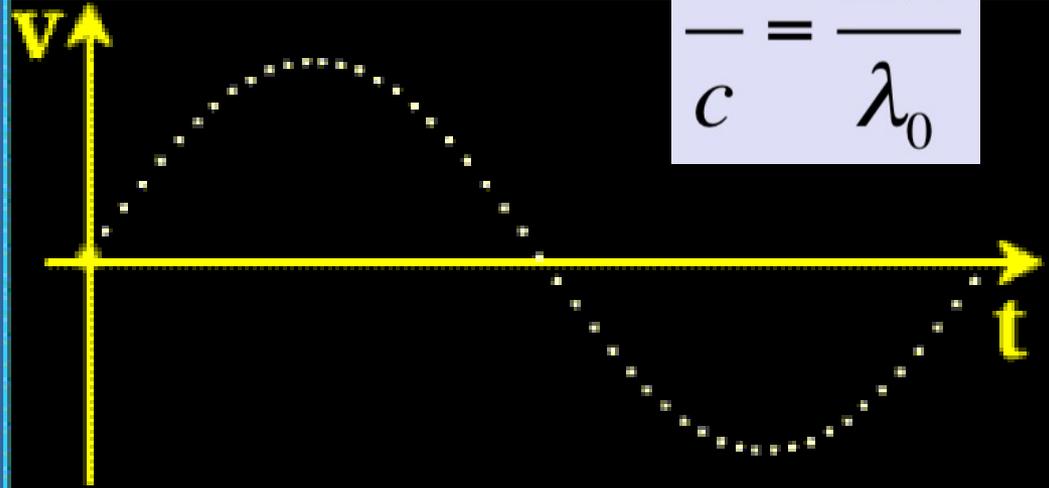
$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$



Platais et al. 2007 A&A 461, 509

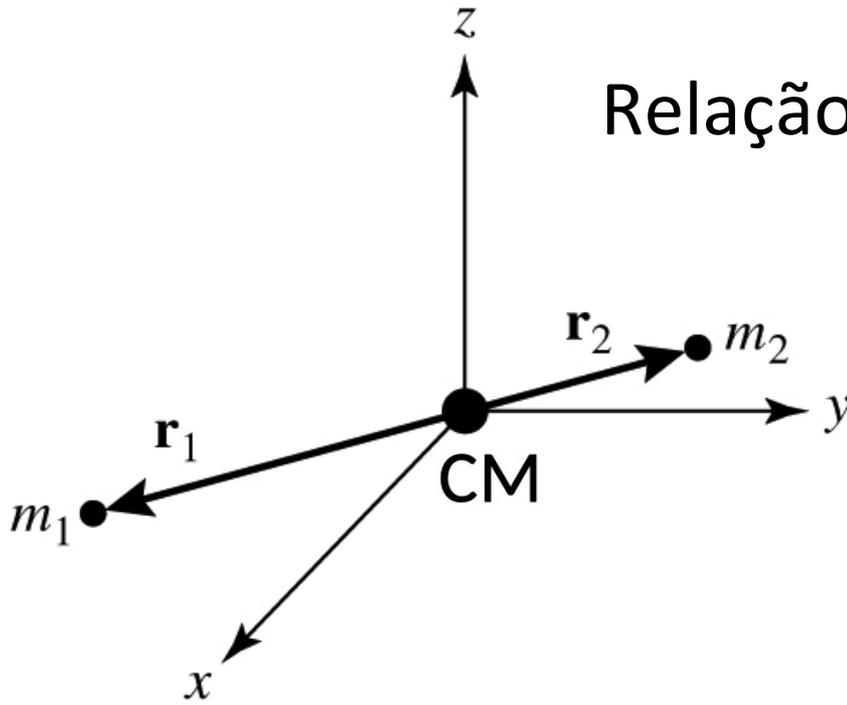
Deslocamento Doppler em binária espectroscópica. É mostrado um sistema em que apenas o espectro da componente mais brilhante é detectado (SB1)

$$\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$



## Determinação de Massas Estelares

- Da observação → medida da separação angular entre a estrela **primária** (a mais brilhante) e a **secundária**.
- Sistema ligado gravitacionalmente → 2 corpos girando em torno de centro de massa comum

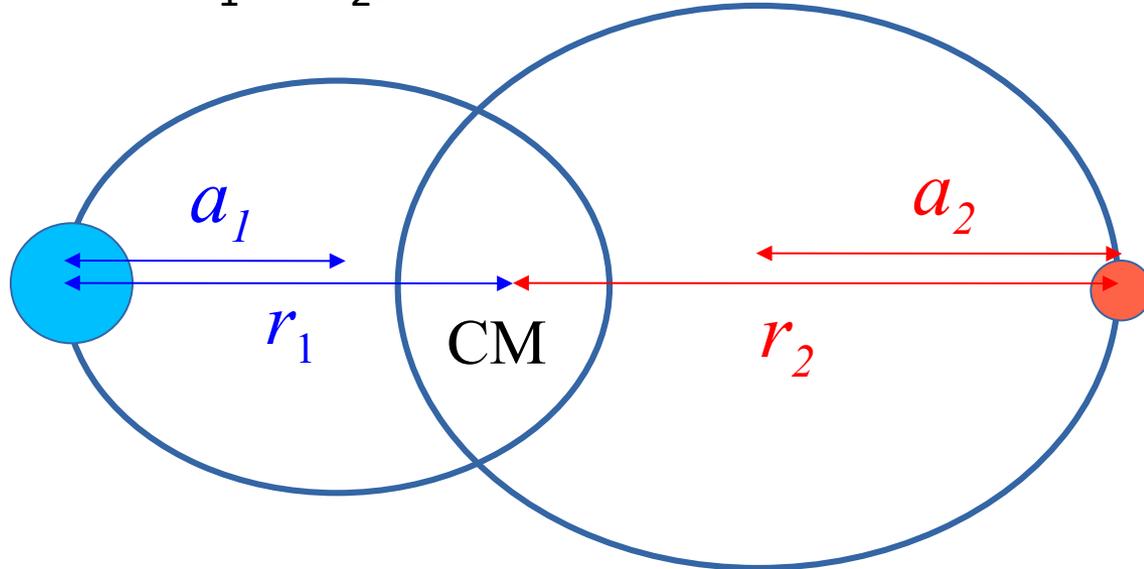


Relação das massas:  $m_1 r_1 = m_2 r_2$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

Separação entre as estrelas:  $a = r_1 + r_2 = a_1 + a_2$

Cada estrela move-se numa órbita elíptica (excentricidade  $e$  e semi-eixo maior  $a_1$  e  $a_2$ ) em torno do centro de massa CM



A relação:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{a_2(1+e)}{a_1(1+e)} = \frac{a_2}{a_1}$$

Forma geral da  
3a lei de Kepler:  $P^2 = \left[ \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} \right] a^3$

$$a = a_1 + a_2$$

Forma simplificada:  $m_1 + m_2 = \frac{a^3}{P^2}$

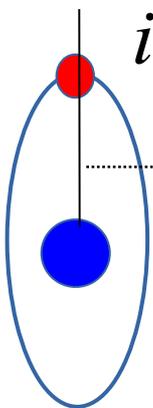
-  $m$  em  $M_{\text{Sol}}$

-  $a$  em UA

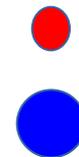
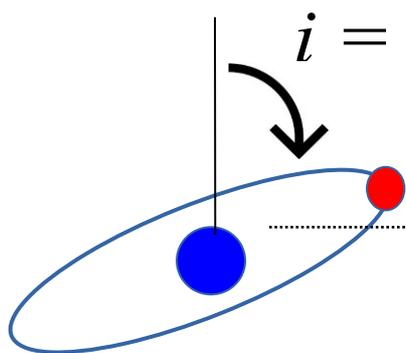
-  $P$  em anos

$i = 0^\circ$

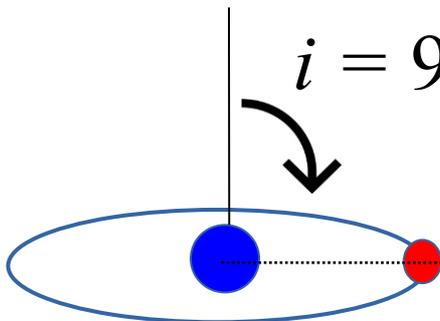
A separação observada depende da inclinação  $i$



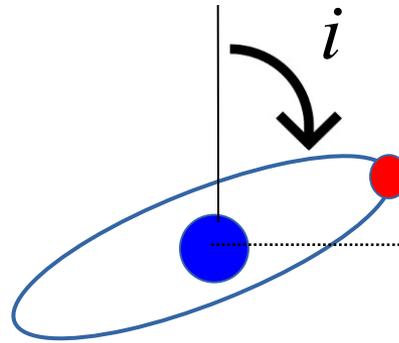
$i = 60^\circ$



$i = 90^\circ$



Considere o **ângulo de inclinação** ( $i$ ) entre o plano de órbita e a perpendicular à linha de visada. O observador não mede diretamente  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , mas sua projeção:



$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\alpha_2 \cos i}{\alpha_1 \cos i} = \frac{\tilde{\alpha}_2}{\tilde{\alpha}_1}$$

Na 3ª lei de Kepler:

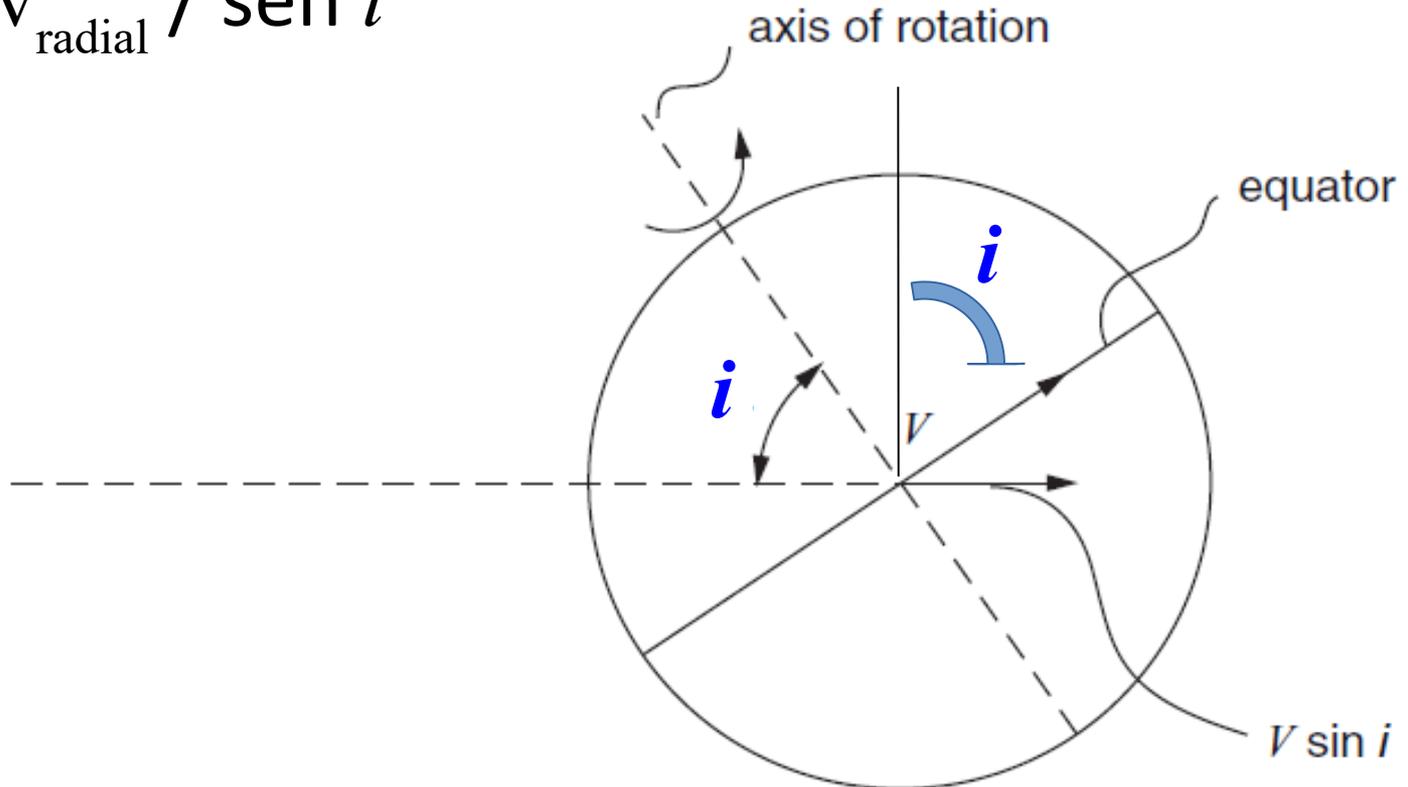
$$m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2 (\alpha d)^3}{G P^2} = \frac{4\pi^2}{G} \left( \frac{d}{\cos i} \right)^3 \frac{\tilde{\alpha}^3}{P^2}$$

onde  $\tilde{\alpha} = \tilde{\alpha}_1 + \tilde{\alpha}_2$

# Ângulo de inclinação $i$ afeta a velocidade radial

velocidade máxima observada:  $v_{\text{radial}} = v \sin i$

$$\rightarrow v = v_{\text{radial}} / \sin i$$



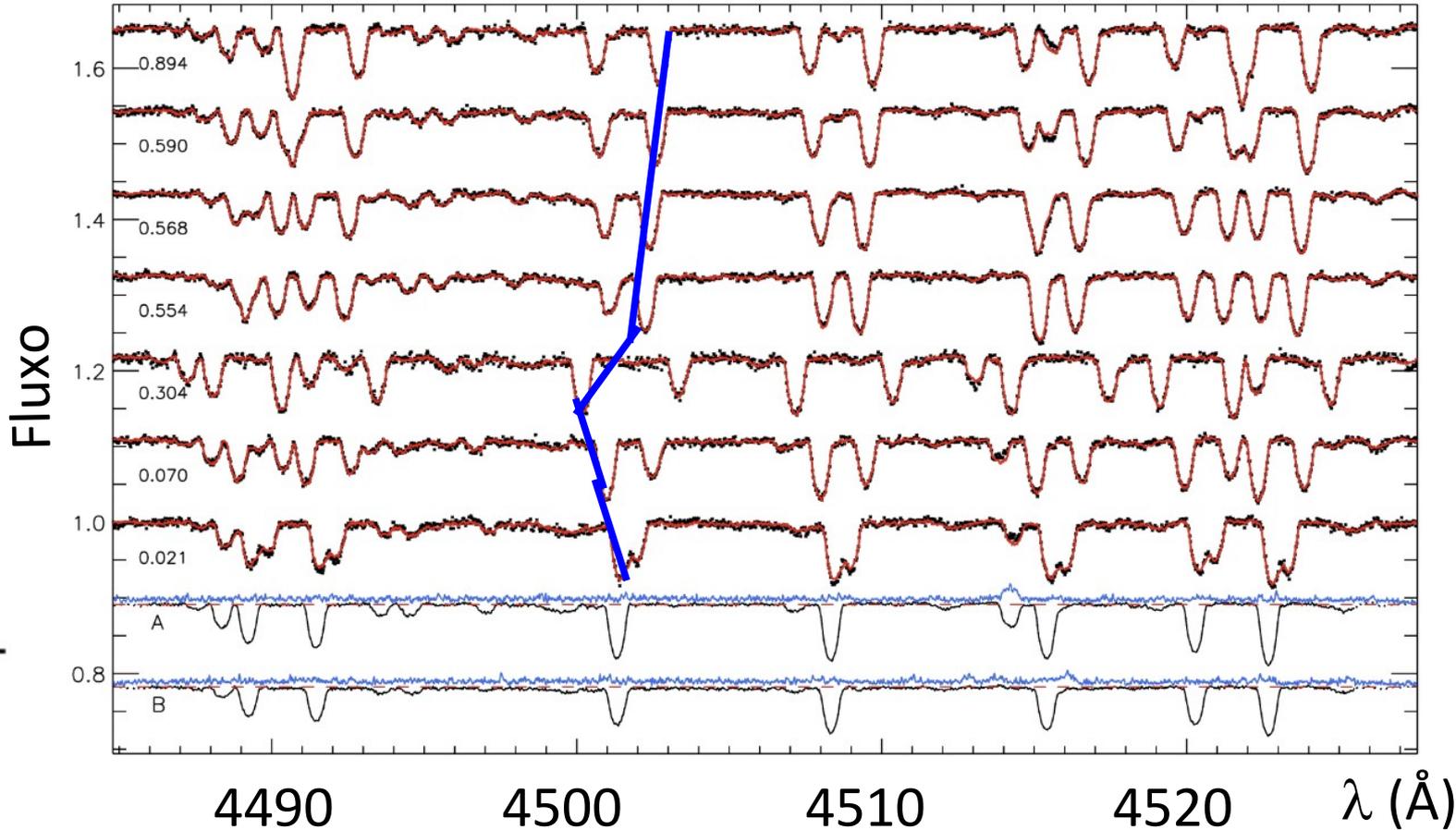
# Binárias espectroscópicas

São estrelas muito próximas → difícil medir a órbita pela posição espacial → determinar órbitas por espectroscopia



Exemplo sistema SB2

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$



$$v_{1r}^{\max} = v_1 \sin i \quad \text{and} \quad v_{2r}^{\max} = v_2 \sin i$$

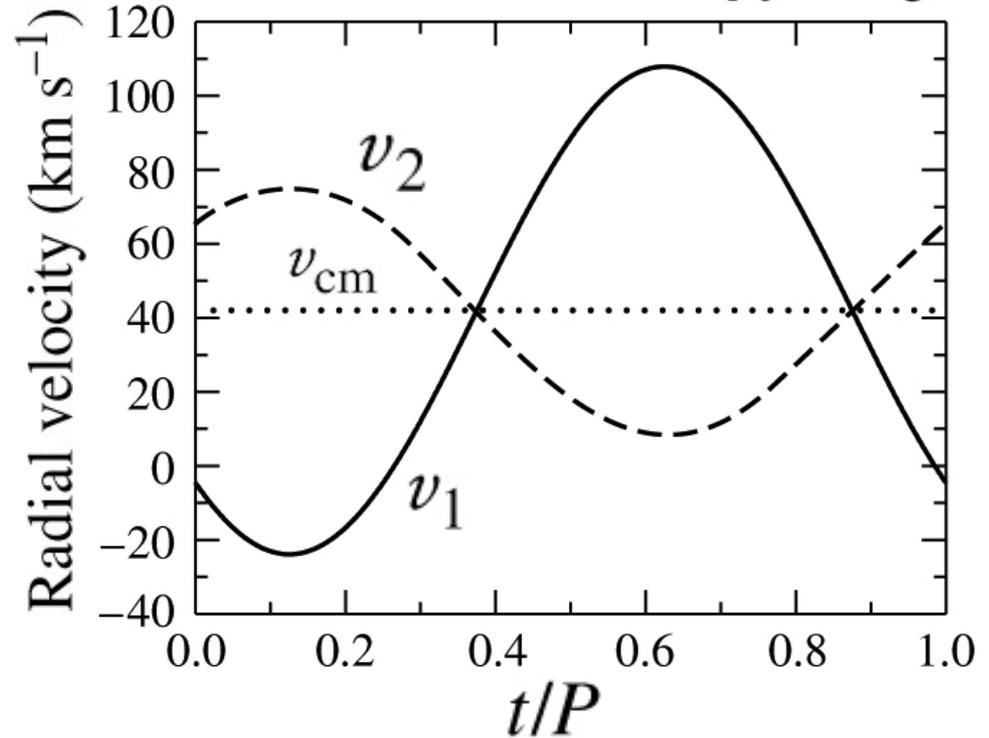
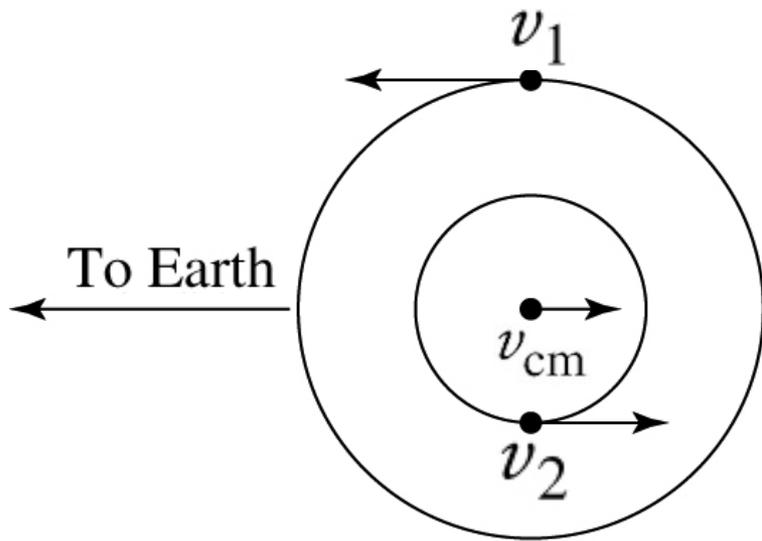
eclipsing binary star **AR Aur**

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2010MNRAS.407.2383F>

# Efeito da Excentricidade na velocidade radial

$e = 0$ , inclination  $i = 90^\circ$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$



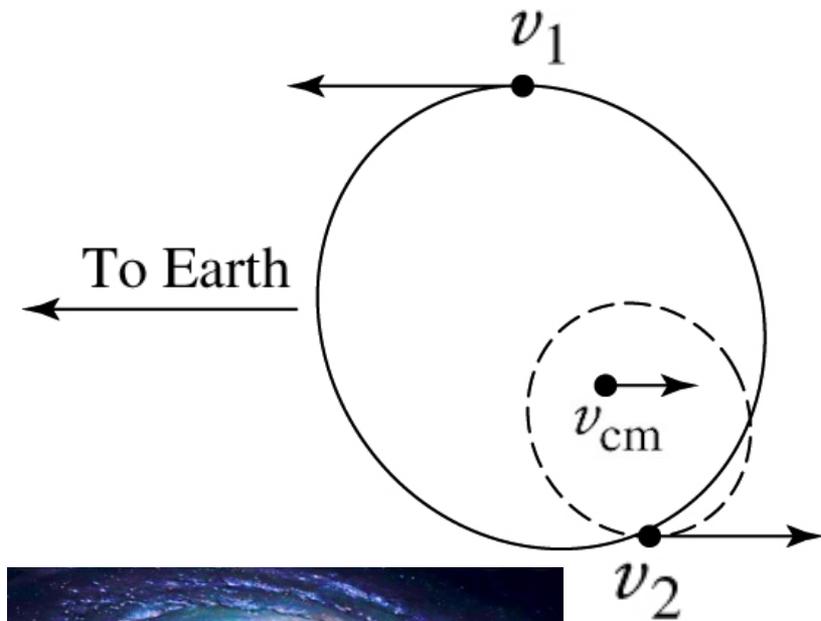
(a)

(b)

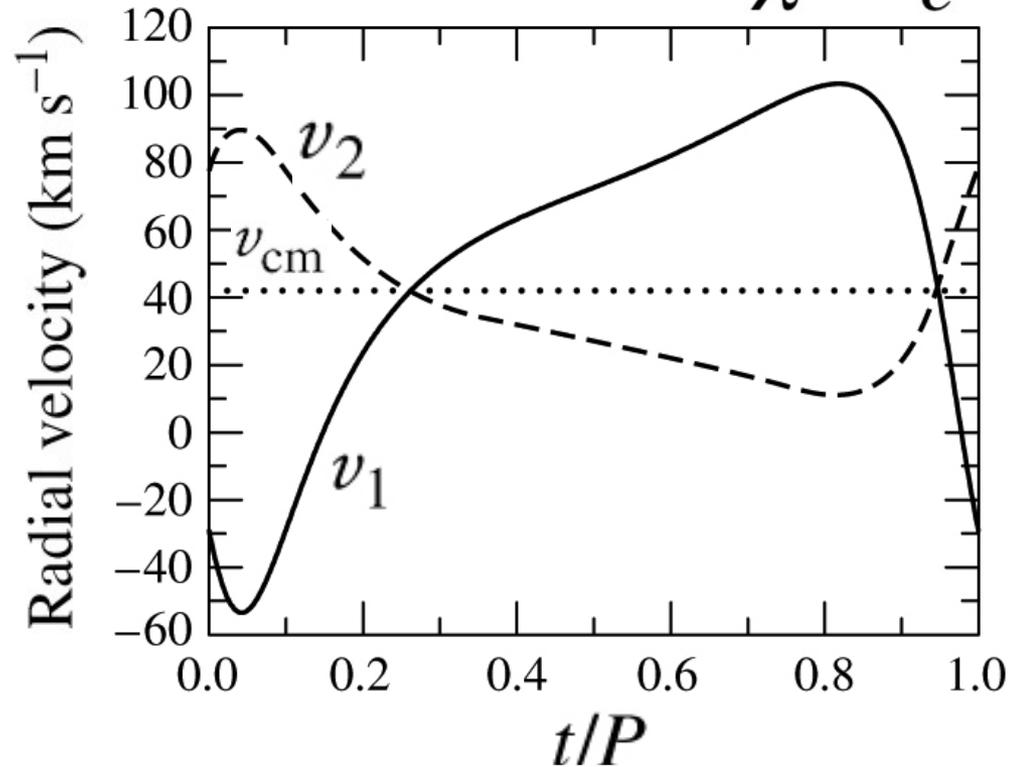
**FIGURE 7.5** The orbital paths and radial velocities of two stars in circular orbits ( $e = 0$ ). In this example,  $M_1 = 1 M_\odot$ ,  $M_2 = 2 M_\odot$ , the orbital period is  $P = 30$  d, and the radial velocity of the center of mass is  $v_{cm} = 42$  km s<sup>-1</sup>.  $v_1$ ,  $v_2$ , and  $v_{cm}$  are the velocities of Star 1, Star 2, and the center of mass, respectively. (a) The plane of the circular orbits lies along the line of sight of the observer. (b) The observed radial velocity curves.

$e = 0,4$ ; orientation of periastron =  $45^\circ$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$



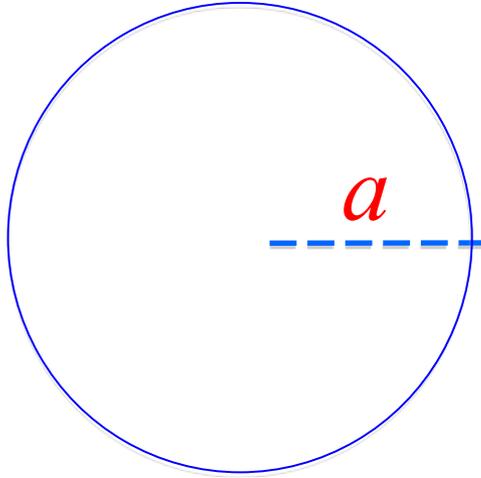
(a)



(b)

**FIGURE 7.6** The orbital paths and radial velocities of two stars in elliptical orbits ( $e = 0.4$ ). As in Fig. 7.5,  $M_1 = 1 M_\odot$ ,  $M_2 = 2 M_\odot$ , the orbital period is  $P = 30$  d, and the radial velocity of the center of mass is  $v_{\text{cm}} = 42 \text{ km s}^{-1}$ . In addition, the orientation of periastron is  $45^\circ$ .  $v_1$ ,  $v_2$ , and  $v_{\text{cm}}$  are the velocities of Star 1, Star 2, and the center of mass, respectively. (a) The plane of the orbits lies along the line of sight of the observer. (b) The observed radial velocity curves.

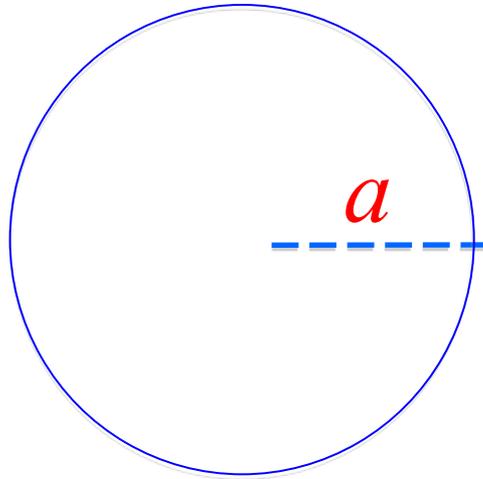
Velocidade  $v$  de uma estrela em uma órbita circular com **semi-eixo  $a$**  e período  $P$



$$v = \frac{2\pi}{P} a$$

$$v_{1r} = v_1 \sin i$$
$$v_{2r} = v_2 \sin i$$

Velocidade  $v$  de uma estrela em uma órbita circular com **semi-eixo  $a$**  e período  $P$



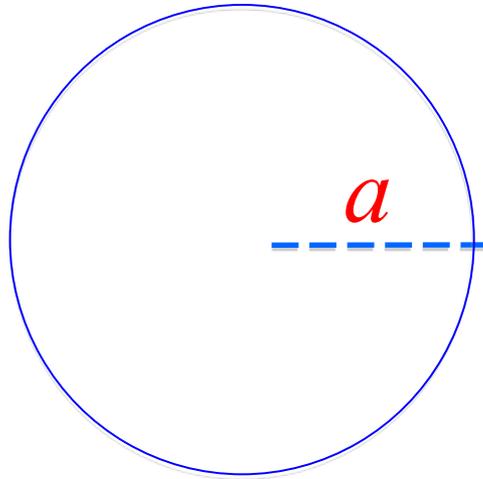
$$v = \frac{2\pi}{P} a$$

$$v_{1r} = v_1 \sin i$$

$$v_{2r} = v_2 \sin i$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} \quad \rightarrow \quad \frac{m_1}{m_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

Velocidade  $v$  de uma estrela em uma órbita circular com **semi-eixo  $a$**  e período  $P$



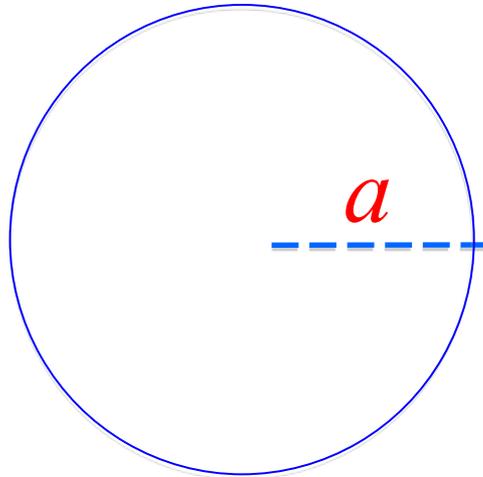
$$v = \frac{2\pi}{P} a$$

$$v_{1r} = v_1 \sin i$$

$$v_{2r} = v_2 \sin i$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} \quad \rightarrow \quad \frac{m_1}{m_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{v_{2r} / \sin i}{v_{1r} / \sin i} = \frac{v_{2r}}{v_{1r}}$$

# Velocidade $v$ de uma estrela em uma órbita circular com semi-eixo $a$ e período $P$



$$v = \frac{2\pi}{P} a$$

$$v_{1r} = v_1 \sin i$$

$$v_{2r} = v_2 \sin i$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} \quad \rightarrow \quad \frac{m_1}{m_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_{2r} / \sin i}{V_{1r} / \sin i} = \frac{V_{2r}}{V_{1r}}$$

$$\boxed{\frac{m_1}{m_2} = \frac{V_{2r}}{V_{1r}}}$$

Não precisamos  $i$  para a razão de massas 😊

Para avaliar a soma das massas em função da velocidade, trocamos  $a$  por  $v$  na 3a lei de Kepler:

$$P^2 = \left[ \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} \right] a^3 \quad a = a_1 + a_2 = \frac{P}{2\pi} (v_1 + v_2)$$

Para avaliar a soma das massas em função da velocidade, trocamos  $a$  por  $v$  na 3a lei de Kepler:

$$P^2 = \left[ \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} \right] a^3 \quad a = a_1 + a_2 = \frac{P}{2\pi} (v_1 + v_2)$$

$$m_1 + m_2 = \frac{P}{2\pi G} \frac{(v_{1r} + v_{2r})^3}{\text{sen}^3 i}$$

$$v_{1r} = v_1 \sin i$$

$$v_{2r} = v_2 \sin i$$

Para avaliar a soma das massas em função da velocidade, trocamos  $a$  por  $v$  na 3ª lei de Kepler:

$$P^2 = \left[ \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} \right] a^3 \quad a = a_1 + a_2 = \frac{P}{2\pi} (v_1 + v_2)$$

$$m_1 + m_2 = \frac{P}{2\pi G} \frac{(v_{1r} + v_{2r})^3}{\text{sen}^3 i} \quad \begin{aligned} v_{1r} &= v_1 \sin i \\ v_{2r} &= v_2 \sin i \end{aligned}$$

Se uma das estrelas não é visível, podemos usar:  $m_1/m_2 = v_{2r}/v_{1r}$

$$m_1 + m_2 = \frac{P}{2\pi G} \frac{v_{1r}^3}{\text{sen}^3 i} \left( 1 + \frac{m_1}{m_2} \right)^3$$

# Função de massa

$$m_1 + m_2 = \frac{P}{2\pi G} \frac{v_{1r}^3}{\sin^3 i} \left( 1 + \frac{m_1}{m_2} \right)^3$$

$$\frac{m_2^3}{(m_1 + m_2)^2} \sin^3 i = \underbrace{\frac{P}{2\pi G} v_{1r}^3}_{\text{função de massa}}$$

função de massa

Estatisticamente:  $\langle \sin^3 i \rangle \simeq 2/3$

Para Exoplanetas  $m_1 \gg m_2$

$$\frac{m_2^3}{(m_1 + m_2)^2} \operatorname{sen}^3 i = \frac{P}{2\pi G} v_{\text{lr}}^3$$

Sol:  $1,989 \times 10^{30}$  kg

Júpiter:  $1,898 \times 10^{27}$  kg

Terra:  $5,972 \times 10^{24}$  kg

Para Exoplanetas  $m_1 \gg m_2$

$$\frac{m_2^3}{(m_1 + m_2)^2} \operatorname{sen}^3 i = \frac{P}{2\pi G} v_{\text{lr}}^3$$

$$m_2^3 \operatorname{sen}^3 i = m_1^2 \frac{P}{2\pi G} v_{\text{lr}}^3$$

Sol:  $1,989 \times 10^{30}$  kg

Júpiter:  $1,898 \times 10^{27}$  kg

Terra:  $5,972 \times 10^{24}$  kg

Para Exoplanetas  $m_1 \gg m_2$

Sol:  $1,989 \times 10^{30}$  kg

Júpiter:  $1,898 \times 10^{27}$  kg

Terra:  $5,972 \times 10^{24}$  kg

$$\frac{m_2^3}{(m_1 + m_2)^2} \operatorname{sen}^3 i = \frac{P}{2\pi G} v_{1r}^3$$

$$m_2^3 \operatorname{sen}^3 i = m_1^2 \frac{P}{2\pi G} v_{1r}^3$$

$$m_{\text{Planet}}^3 \operatorname{sen}^3 i = m_{\star}^2 \frac{P}{2\pi G} v_{\star r}^3$$

Para Exoplanetas  $m_1 \gg m_2$

Sol:  $1,989 \times 10^{30}$  kg

Júpiter:  $1,898 \times 10^{27}$  kg

Terra:  $5,972 \times 10^{24}$  kg

$$\frac{m_2^3}{(m_1 + m_2)^2} \operatorname{sen}^3 i = \frac{P}{2\pi G} v_{1r}^3$$

$$m_2^3 \operatorname{sen}^3 i = m_1^2 \frac{P}{2\pi G} v_{1r}^3$$

$$m_{\text{Planet}}^3 \operatorname{sen}^3 i = m_{\star}^2 \frac{P}{2\pi G} v_{\star r}^3$$

$$m_{\text{Planet}} \operatorname{sen} i = \sqrt[3]{m_{\star}^2 \frac{P}{2\pi G} v_{\star r}^3}$$

$$m_{Planet} \sin i = \sqrt[3]{m_{\star}^2 \frac{P}{2\pi G}} v_{*r}$$
$$v_{*r} = K = m_{Planet} \sin i / \sqrt[3]{m_{\star}^2 \frac{P}{2\pi G}}$$

K: semi-amplitude  
da velocidade radial

$$m_{Planet} \sin i = \sqrt[3]{m_{\star}^2 \frac{P}{2\pi G}} v_{\star r}$$

$$v_{\star r} = K = m_{Planet} \sin i / \sqrt[3]{m_{\star}^2 \frac{P}{2\pi G}}$$

K: semi-amplitude da velocidade radial

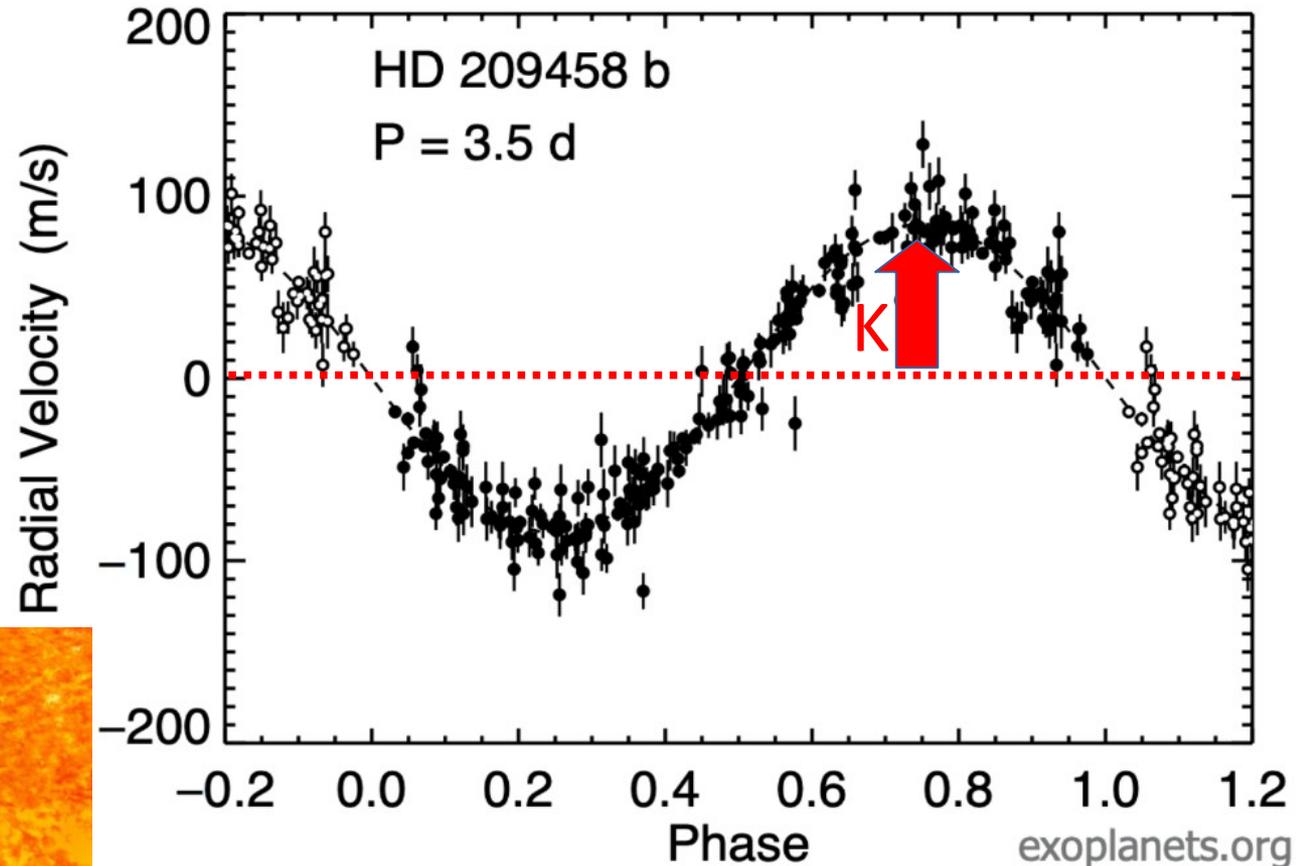
K = 84 m/s

e = 0,01

P = 3,52 dias

$m_{Planet} = 0,7 M_{Jup} / \sin i$

$m_{\star} = 1,15 M_{Sol}$



$$m_{Planet} \sin i = \sqrt[3]{m_{\star}^2 \frac{P}{2\pi G}} v_{\star r}$$

$$v_{\star r} = K = m_{Planet} \sin i / \sqrt[3]{m_{\star}^2 \frac{P}{2\pi G}}$$

K: semi-amplitude da velocidade radial

K = 84 m/s

e = 0,01

P = 3,52 dias

$m_{Planet} = 0,7 M_{Jup} / \sin i$

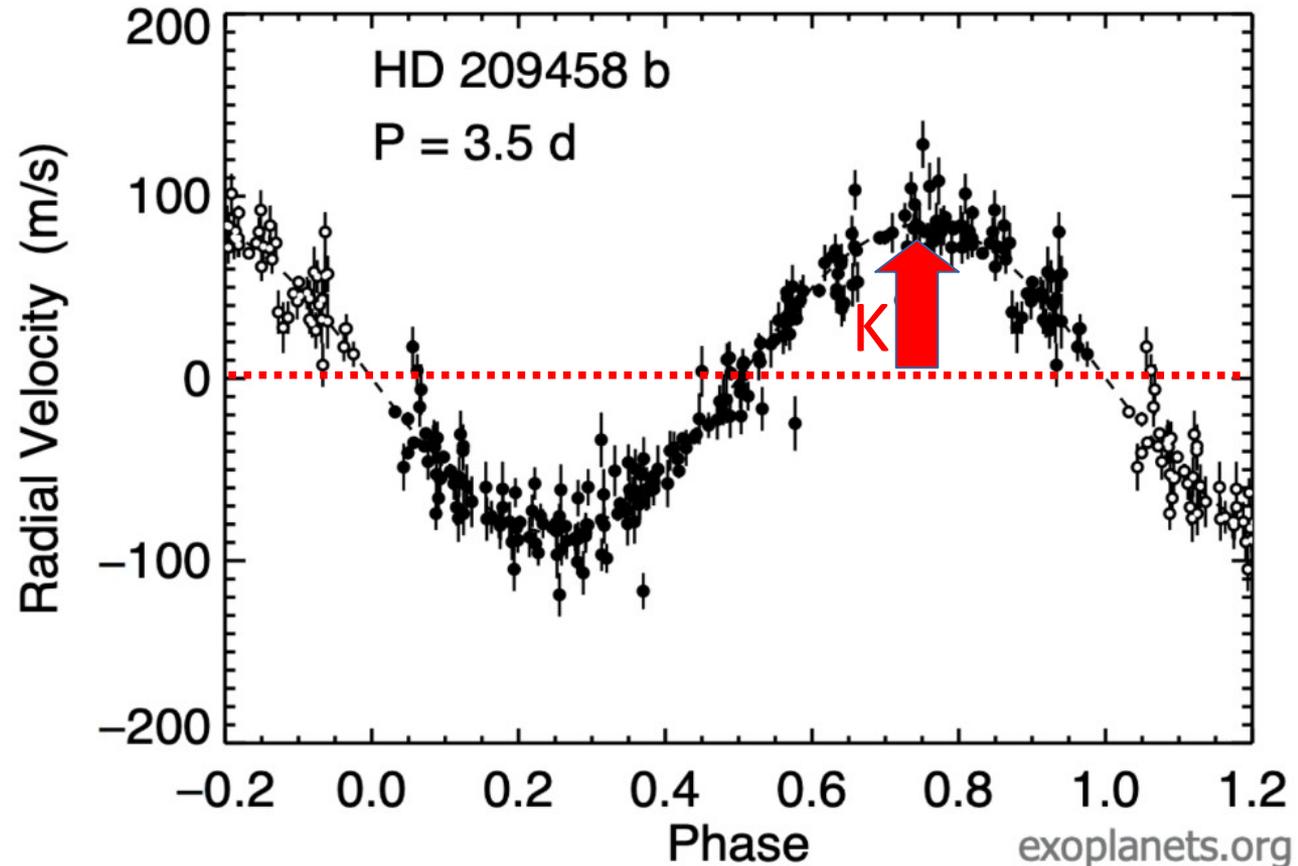
$m_{\star} = 1,15 M_{Sol}$

$M_{Sol} = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$

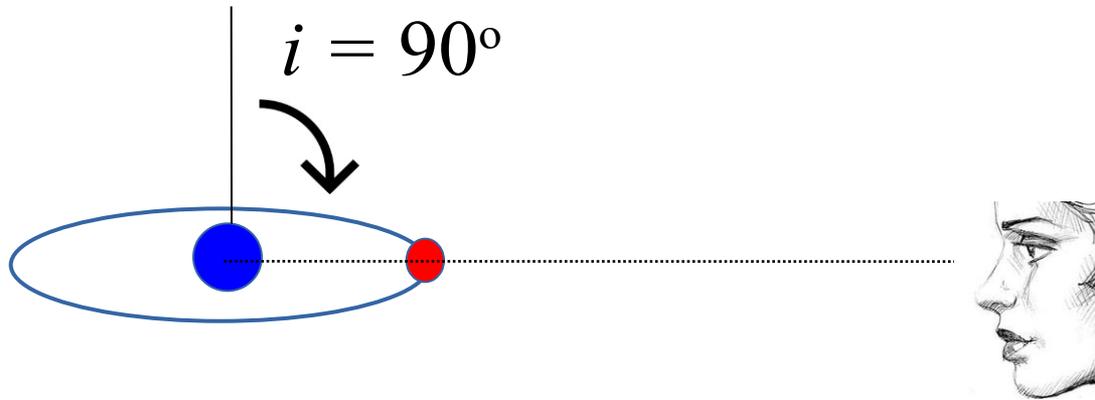
$M_{Jup} = 1,898 \times 10^{27} \text{ kg}$

1 dia = 86400 s

$G = 6,6742 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$



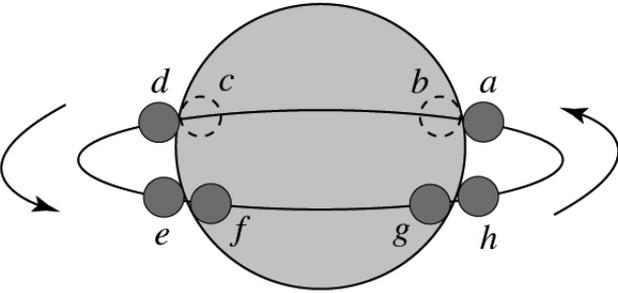
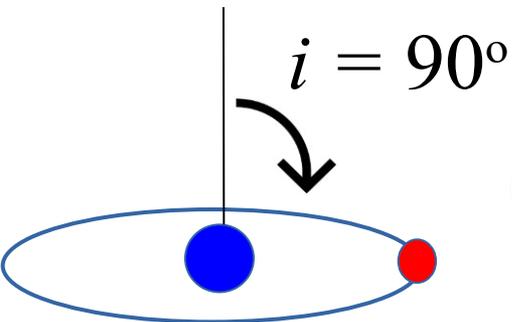
$i = 86^{\circ} \rightarrow \sin i = 0,998$



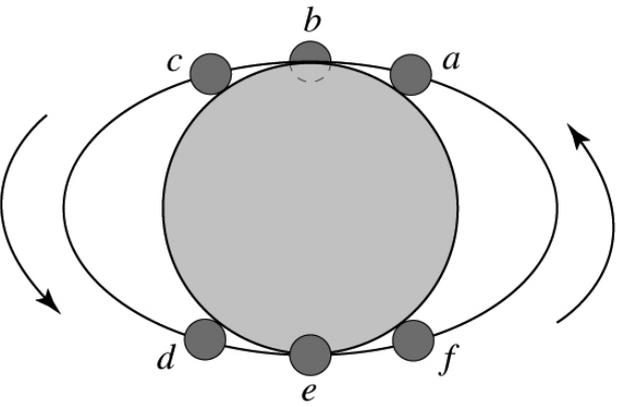
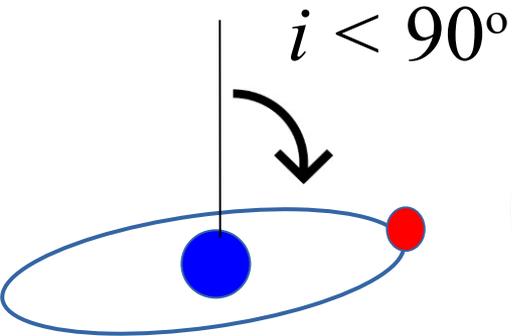
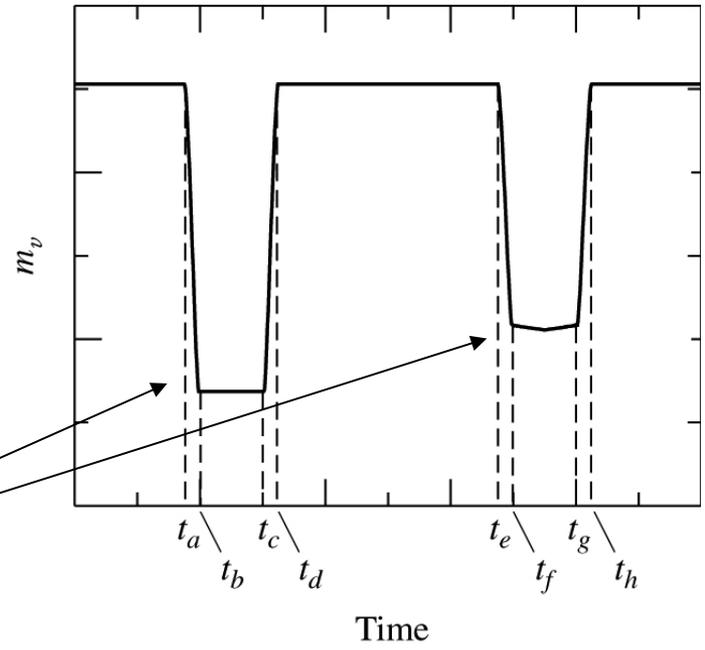
Para termos eclipses, o ângulo de inclinação  $i \sim 90^0$

Se  $i = 80^0$  ao invés de  $i = 90^0$ , erro em  $m_1 + m_2$  de apenas 4,5%, devido ao fator  $(\sin i)^3$

$(\sin 80^0)^3 = 0,955$ , ao invés de 1,0

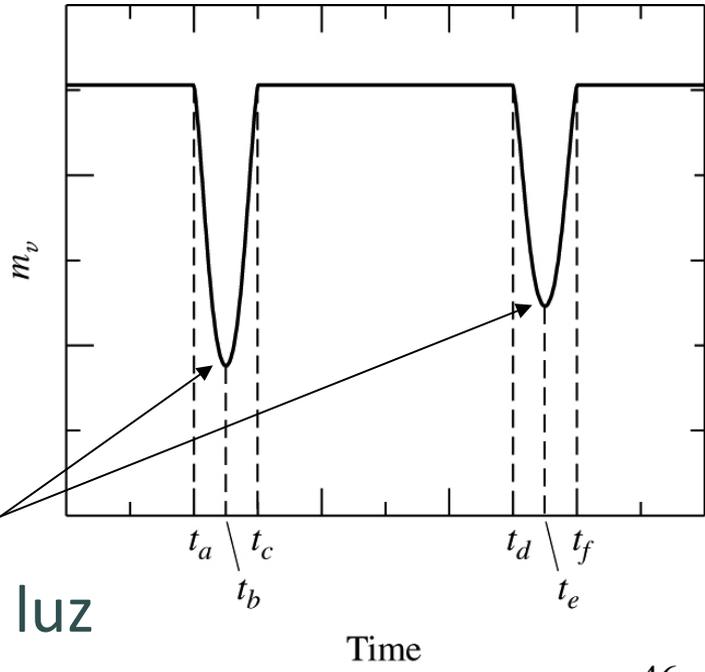


Binária eclipsante ( $i \sim 90^\circ$ ):  
mínimo constante

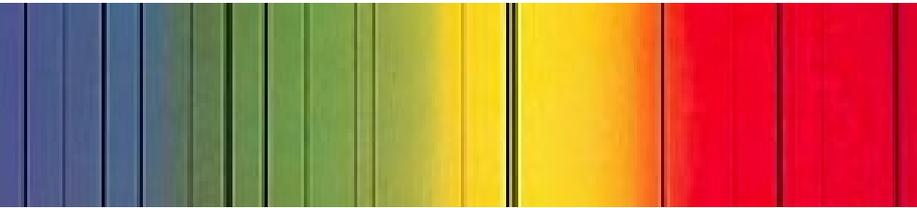


Eclipse parcial ( $i < 90^\circ$ ): sem mínimo

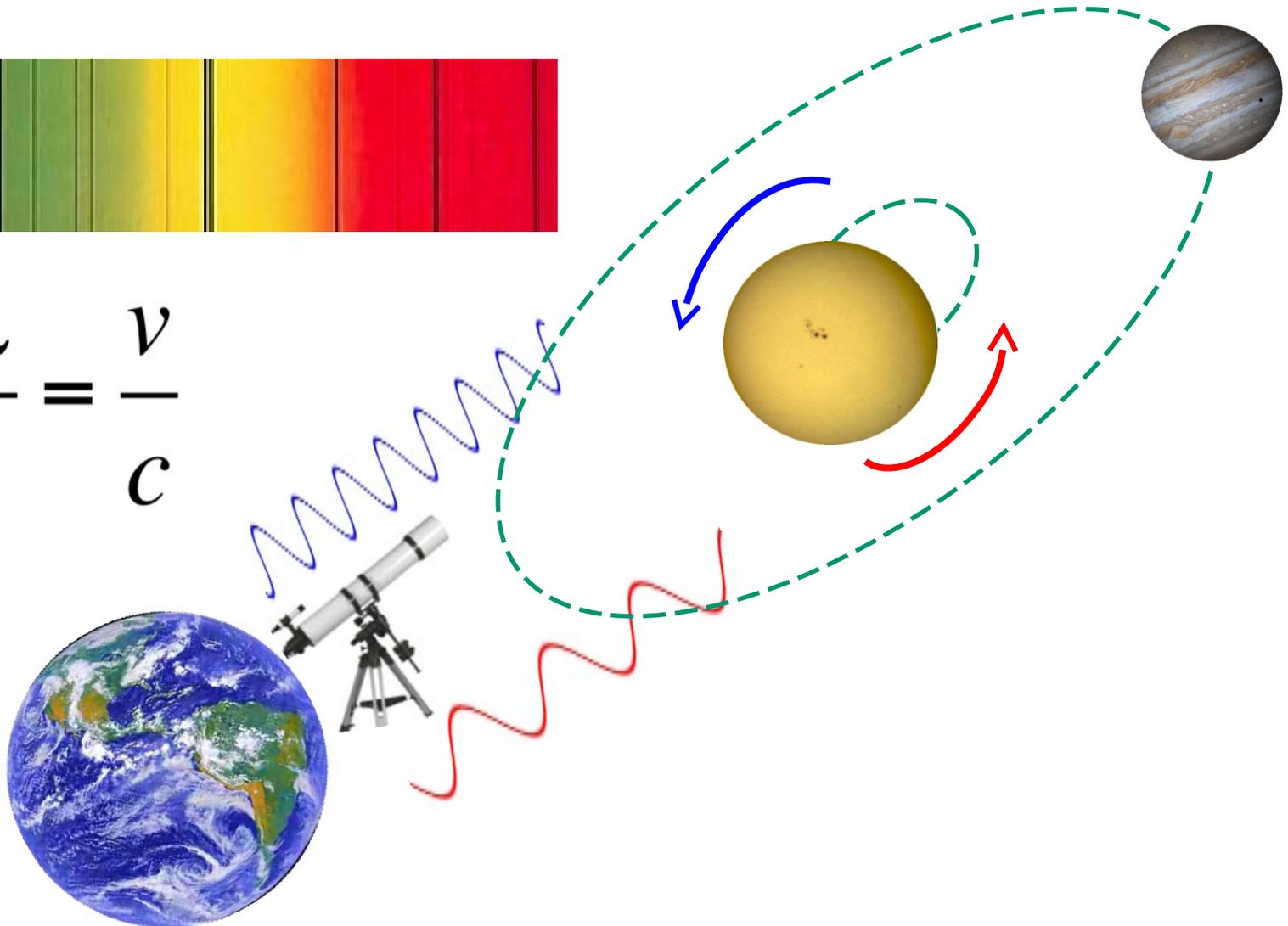
A inclinação pode ser obtida da curva de luz



# Detecção de exoplanetas pelo efeito Doppler

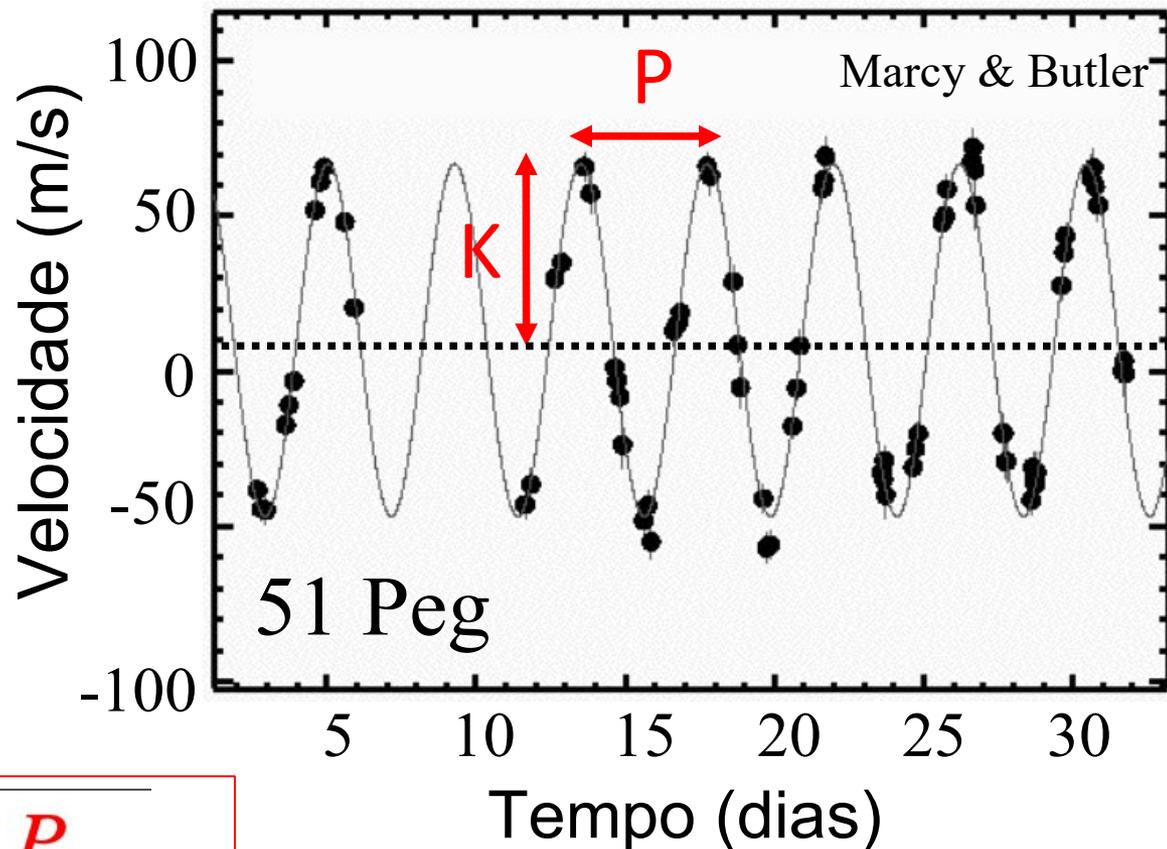


$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$





1o exoplaneta:  
Mayor & Queloz (1995)



$$m_{Planet} \sin i = \sqrt[3]{m_{\star}^2 \frac{P}{2\pi G} K}$$

$$m_{51 Peg b} \sin i = 0,46 M_{Jup}$$

$$e = 0,007$$

$$K = 55,6 \text{ m/s}$$

$$P = 4,2 \text{ d}$$

$$m_{\star} = 1,1 M_{\odot}$$

$$a = 0,05 \text{ UA}$$

# Sistema Planetário Solar

Mercúrio



Vênus



Terra



Marte



Júpiter



$a = 5,2 \text{ UA}$

# Sistema Planetário 51 Peg

51 Peg

b

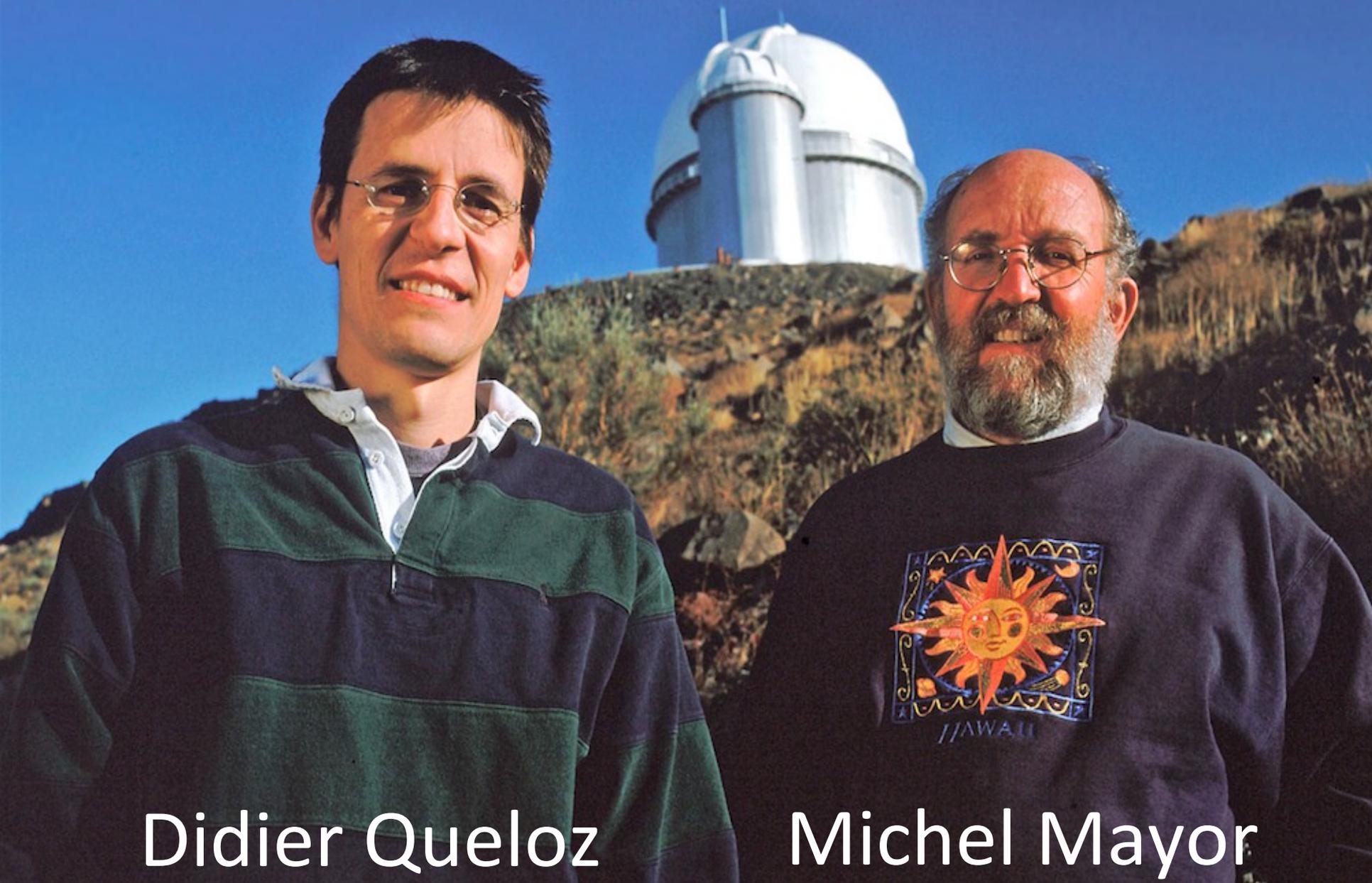
$a = 0,05 \text{ UA}$

1995: primeiro exoplaneta em estrela de tipo solar  
(Michel Mayor & Didier Queloz 1995)

2022/11/17: 5277 planetas e 3896 sistemas planet.

2023/11/09: 5535 planetas e 4080 sistemas planet.

# Nobel de Física 2019



Didier Queloz

Michel Mayor

Exemplo. O exoplaneta 51 Peg b induz na sua estrela  $K = 55,6 \text{ m/s}$ . Qual a **velocidade no Sol devida a Júpiter?**  
 $P = 11,86$  anos, semi-eixo maior  $a = 5,2 \text{ AU}$ ,  $m = 0,00095 M_{\odot}$

Assumindo uma orbita circular (Júpiter tem  $e = 0,0489$ ):

$$v_J = 2\pi a / P = 13.1 \text{ km s}^{-1}$$

Usando:  $m_1 / m_2 = v_{2r} / v_{1r}$

A velocidade do Sol devida a Júpiter:  $v_{\odot} = \frac{m_J}{M_{\odot}} v_J = 12.5 \text{ m s}^{-1}$



# Procura de planetas em gêmeas do Sol, no Observatório **ESO La Silla: 100 noites** (88+12)

Projeto internacional liderado pela USP  
(Prof. Jorge Melendez).  
Brasil, EUA, Alemanha, Austrália

**HARPS, precisão de 1m/s**



# The Solar Twin Planet Search

## II. A Jupiter twin around a solar twin<sup>★</sup>

M. Bedell<sup>1,★★</sup>, J. Meléndez<sup>2</sup>, J. L. Bean<sup>1</sup>, I. Ramírez<sup>3</sup>, M. Asplund<sup>4</sup>, A. Alves-Brito<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Department of Astronomy and Astrophysics, University of Chicago, 5640 S. Ellis Ave, Chicago, IL 60637, USA  
e-mail: mbedell@oddjob.uchicago.edu

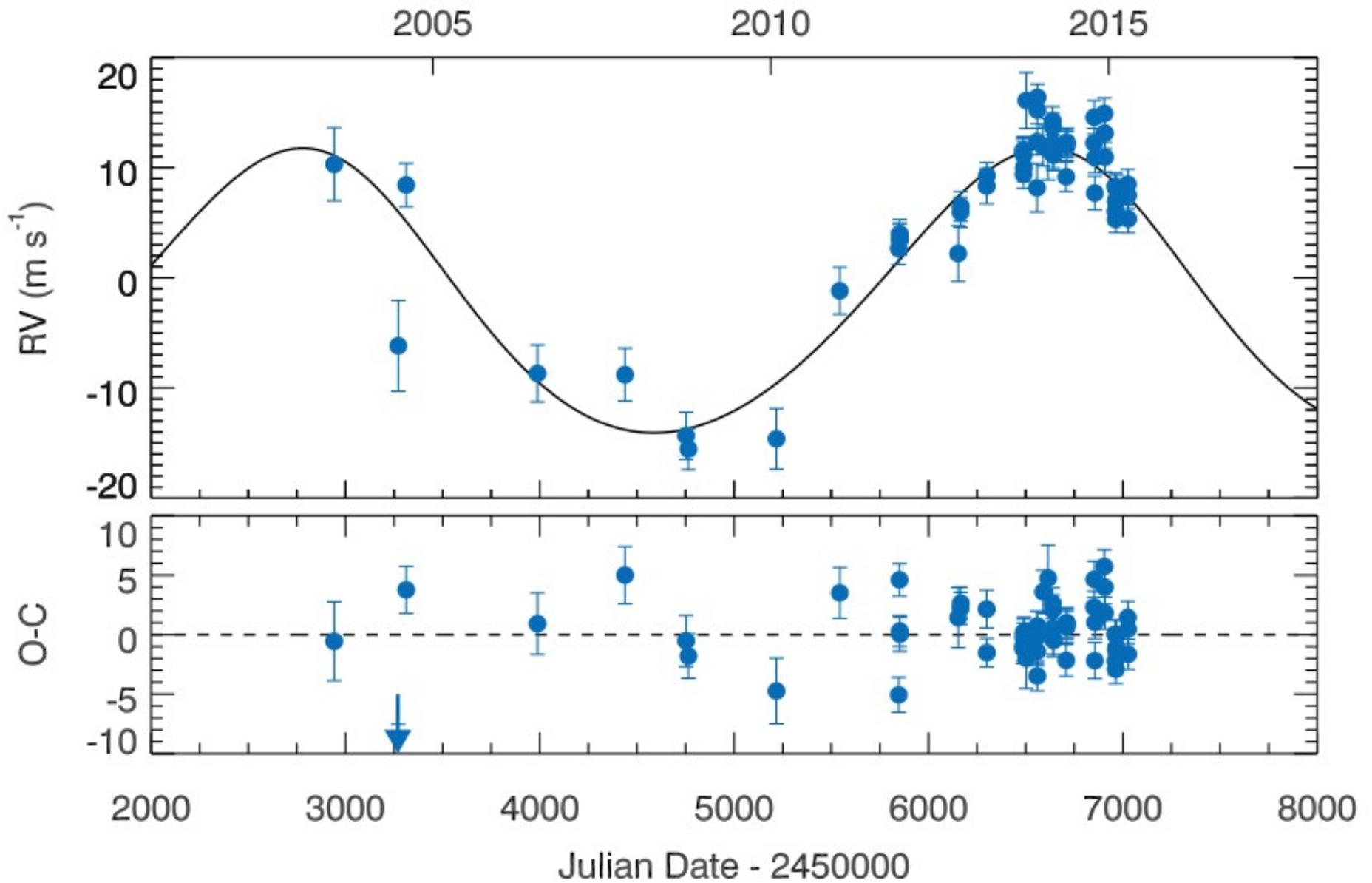
<sup>2</sup> Departamento de Astronomia do IAG/USP, Universidade de São Paulo, Rua do Matão 1226, Cidade Universitária, 05508-900 São Paulo, SP, Brazil

<sup>3</sup> McDonald Observatory and Department of Astronomy,

<sup>4</sup> Research School of Astronomy and Astrophysics, The

<sup>5</sup> Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande

Parameter		Value
$P$	[days]	3830
$K$	[m s <sup>-1</sup> ]	12.9
$e$		0.10
$\omega + M_0$	[rad]	3.0
$\omega - M_0$	[rad]	2.4
$\alpha$	[m s <sup>-1</sup> (unit $S_{HK}$ ) <sup>-1</sup> ]	160
$C$	[m s <sup>-1</sup> ]	-11.0
$\sigma_J$	[m s <sup>-1</sup> ]	1.8
$m_p \sin(i)$	[ $M_{Jup}$ ]	0.99
$a$	[AU]	4.8





Mercúrio



Vênus



Terra



Marte



# Sistema Solar

Júpiter



# Sistema planetário HIP 11915

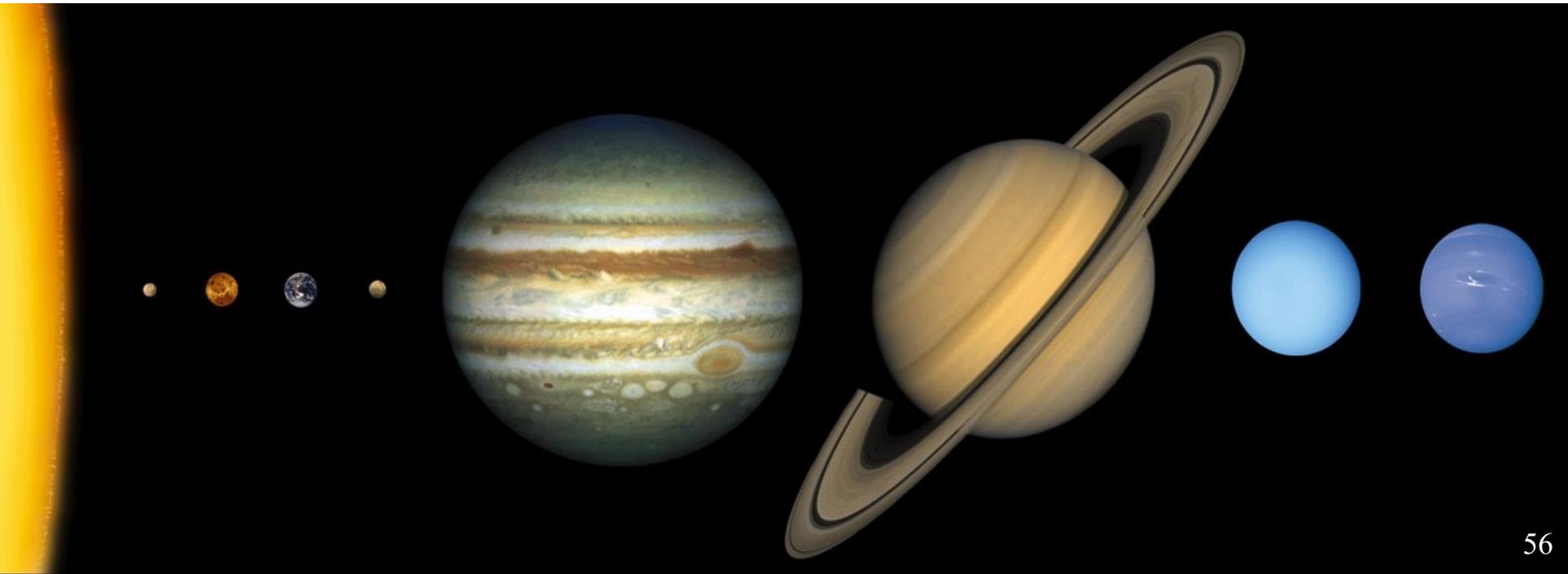
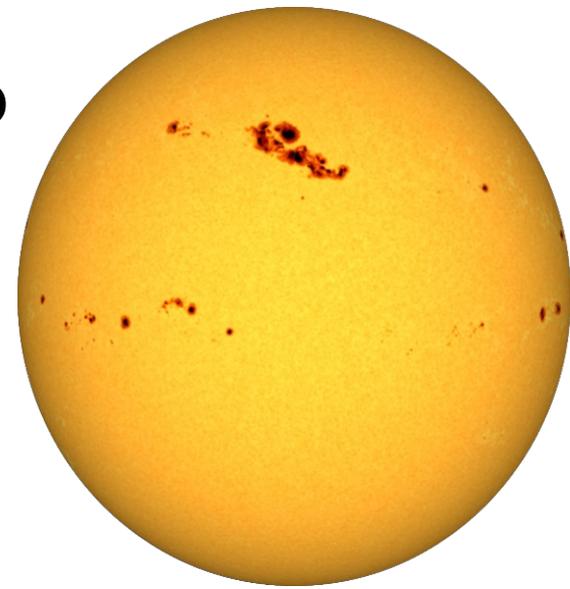
HIP11915b



Primeiro planeta “brasileiro”

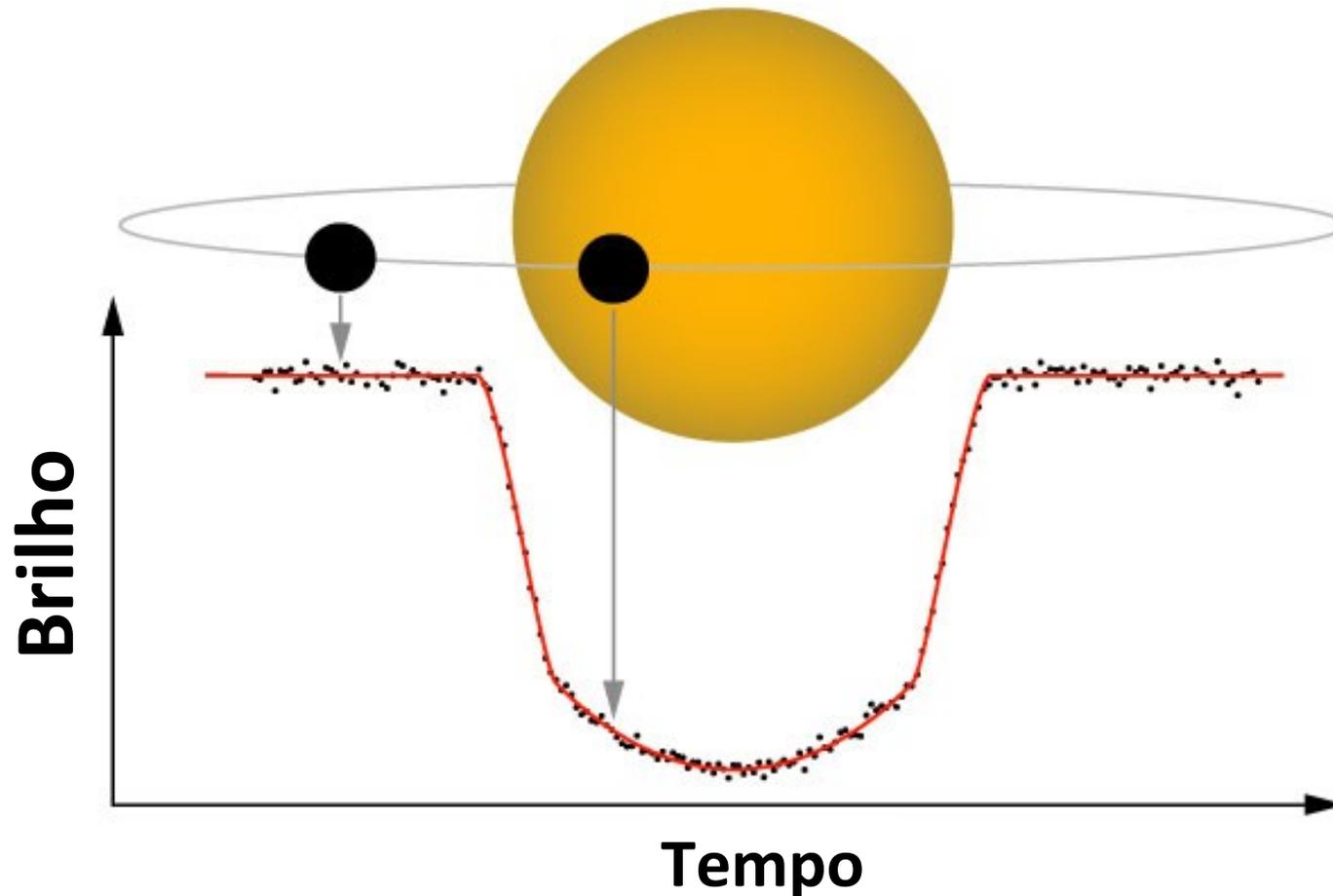
# Como detectar a Terra 2.0?

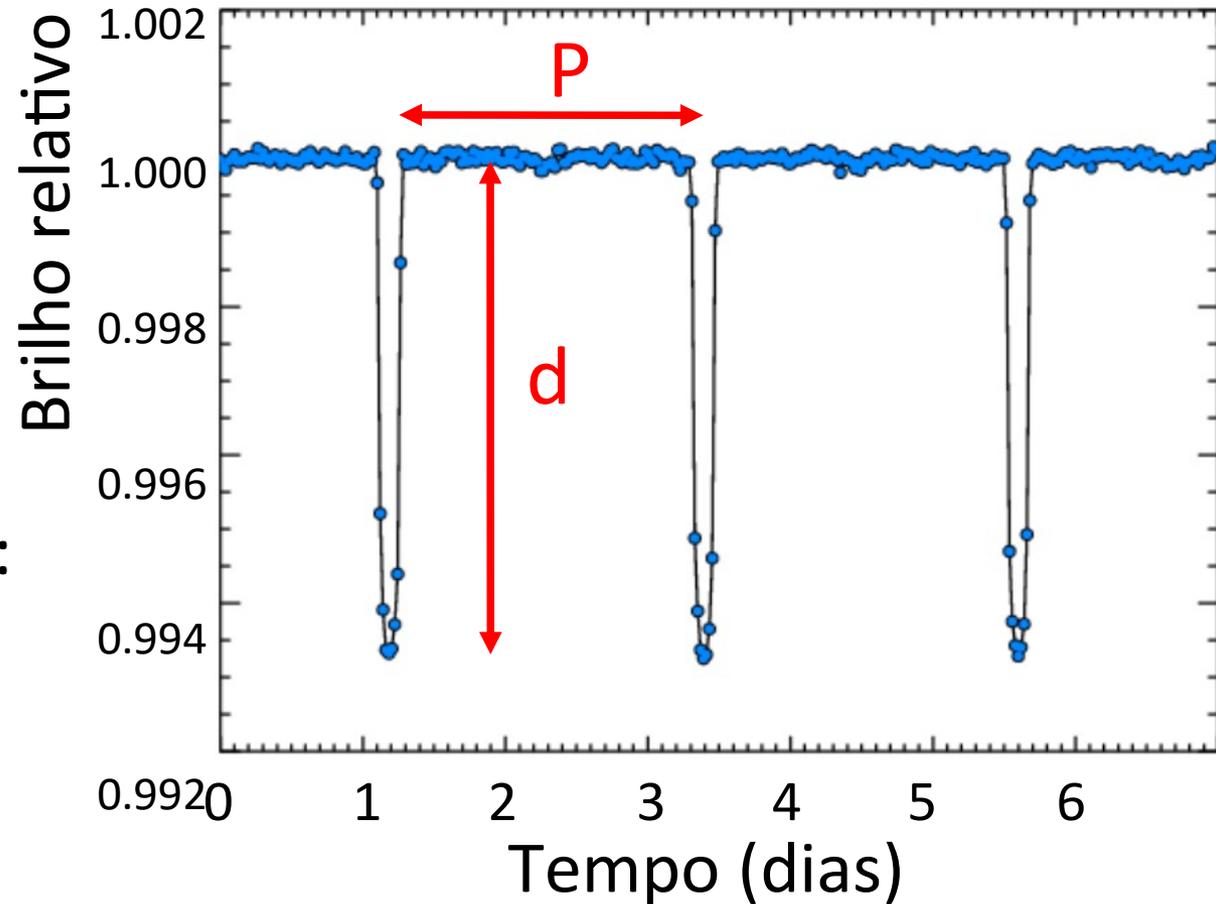
- Veloc. Sol devido à Terra: 9 cm/s
- **Desafio:** instrumentação  $\sim 50\text{cm/s}$
- **Desafio:** “ruído” estelar  
(atividade magnética)  $\sim 1\text{m/s}$



# Detecção de planetas: método de trânsito

Exoplaneta pode ser detectado pelo bloqueio da luz da estrela na sua passagem diante desta, causando uma diminuição no brilho





Método de trânsito:

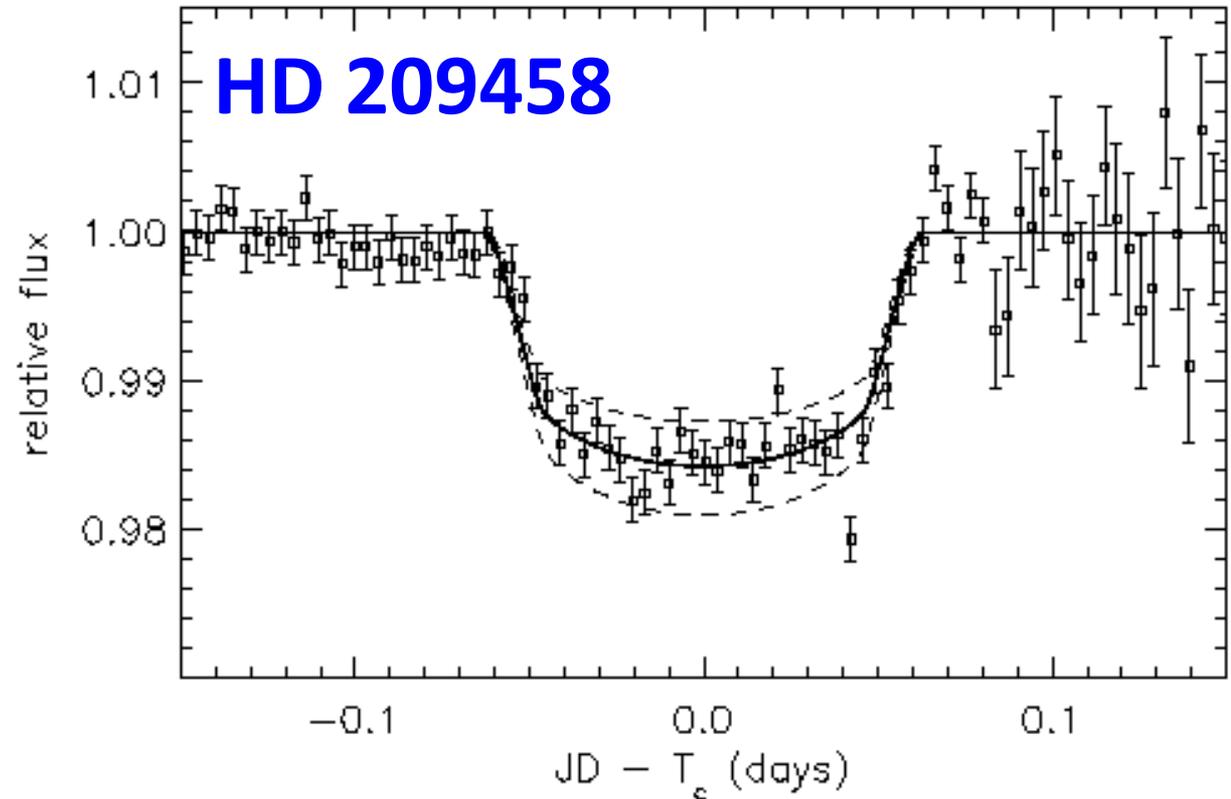
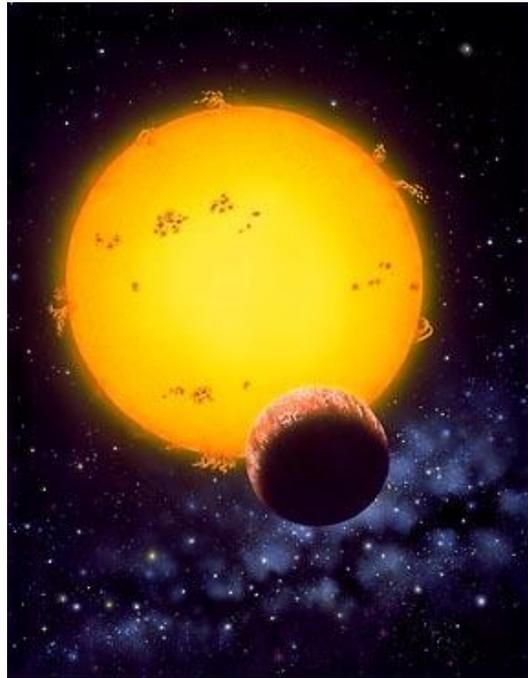
- período orbital  $P$
- raio do planeta  $R_p$

$$R_p = R_* \sqrt{d}$$

Exemplo: da curva de luz,  $d = 1,000 - 0,994 = 0,006$ .

Se raio da estrela é  $R_* = 2 R_\odot \rightarrow R_p = 2R_\odot \sqrt{0,006} \sim 1,5 R_{\text{Júpiter}}$

# Primeira detecção de trânsito de exoplaneta



The Astrophysical Journal, 529:L45-L48, 2000 January 20

## Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star

David Charbonneau,<sup>1,2</sup> Timothy M. Brown,<sup>2</sup> David W. Latham,<sup>1</sup> & Michel Mayor<sup>3</sup>

# Trânsito observado do espaço com o Hubble

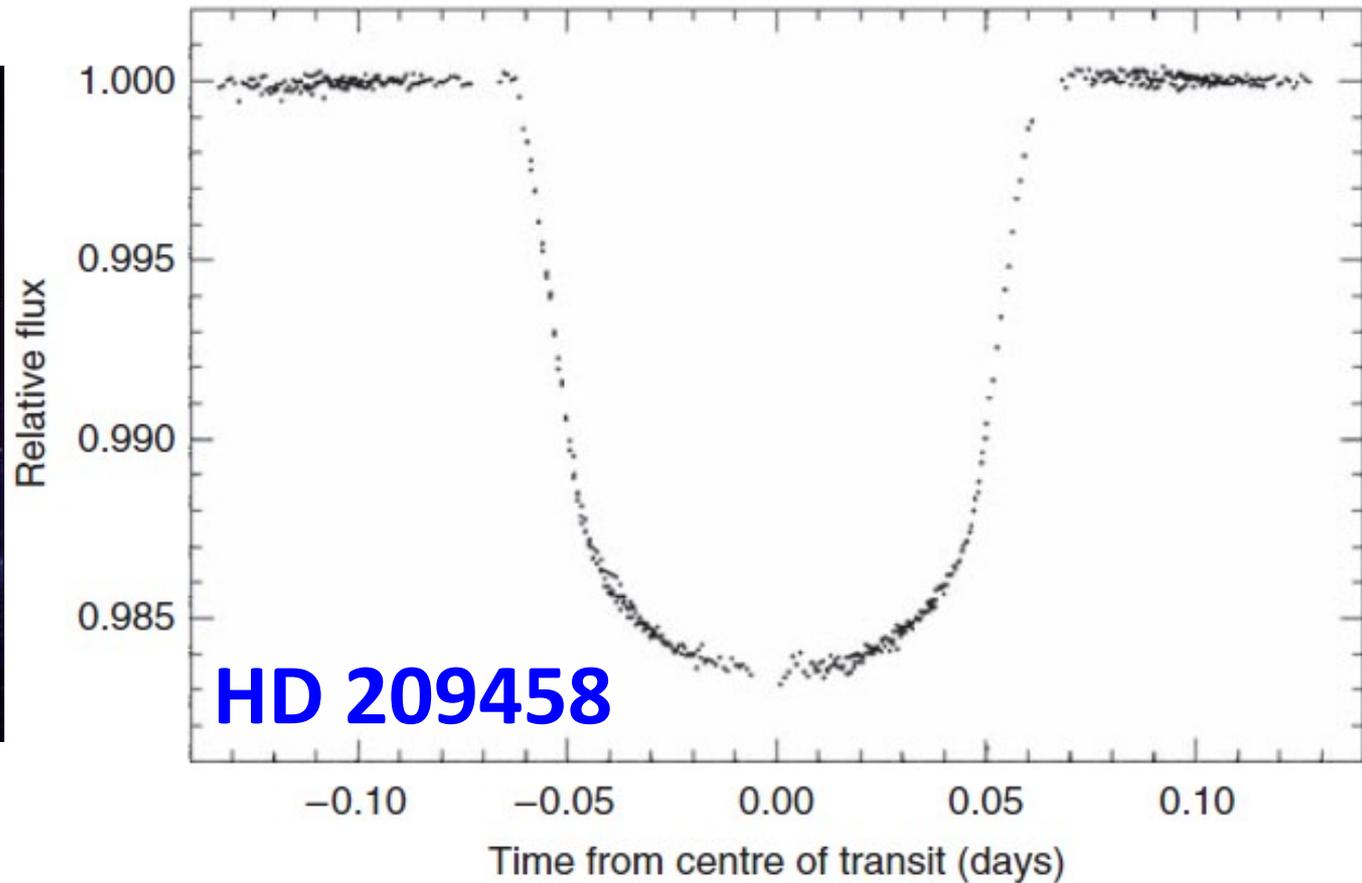
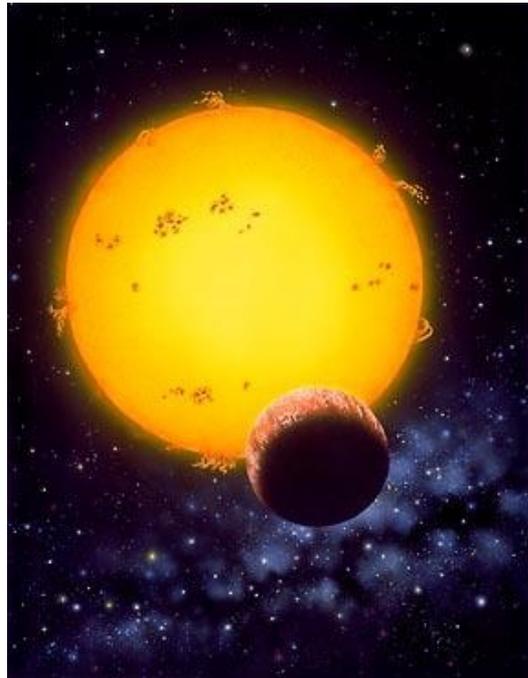
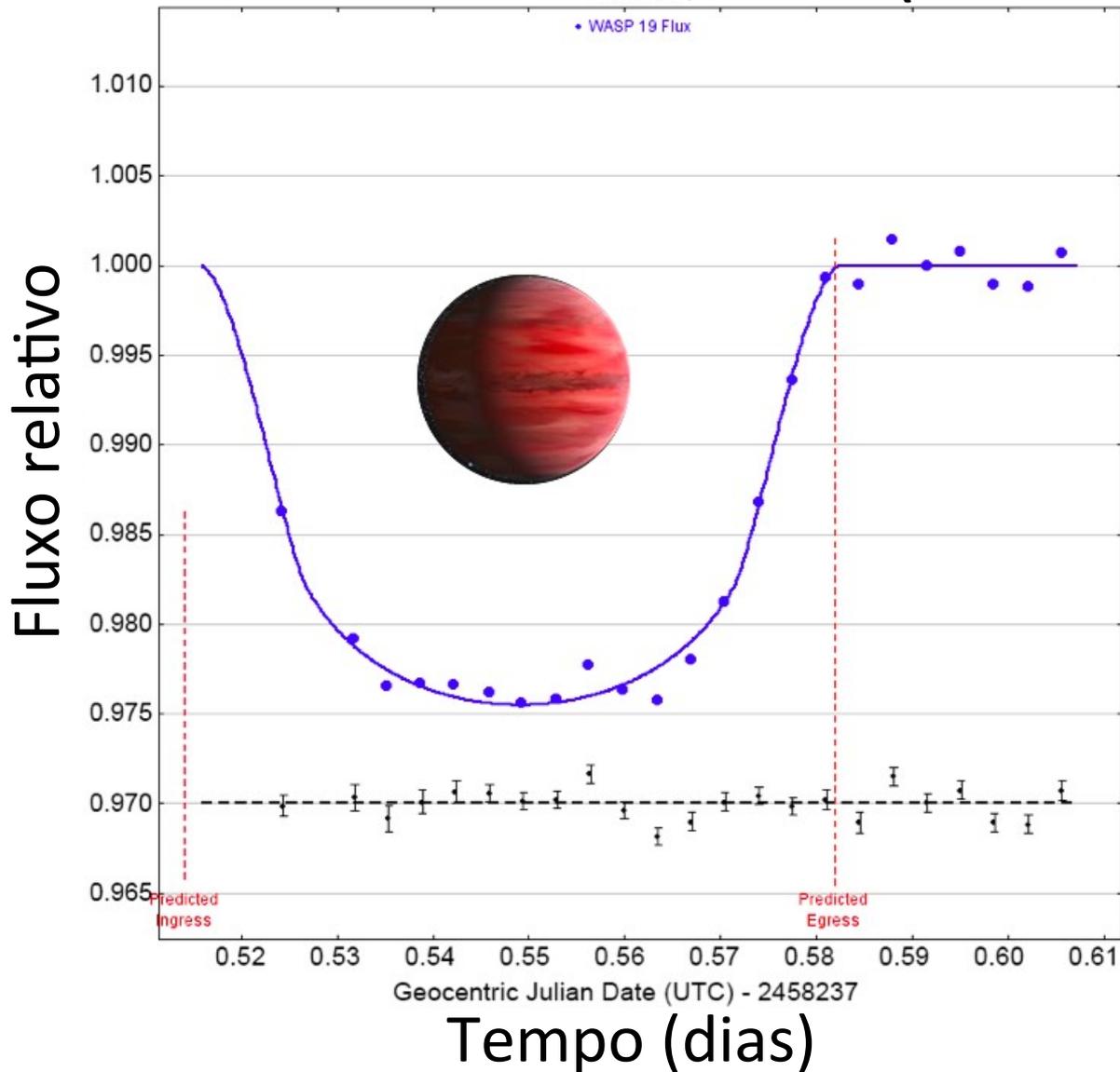


Figure 1.1 Eclipse of HD 209458 by its low-mass, presumed planetary, companion. The light curve has been combined from four separate recordings in April and May 2000 using the Imaging Spectrograph of the Hubble Space Telescope integrating over a yellow–orange region of the spectrum. Individual points are accurate to an estimated 1 part in 10 000. (From T. M. Brown *et al.*, 2001.)

# Trânsito no OPD/LNA (Brazópolis)



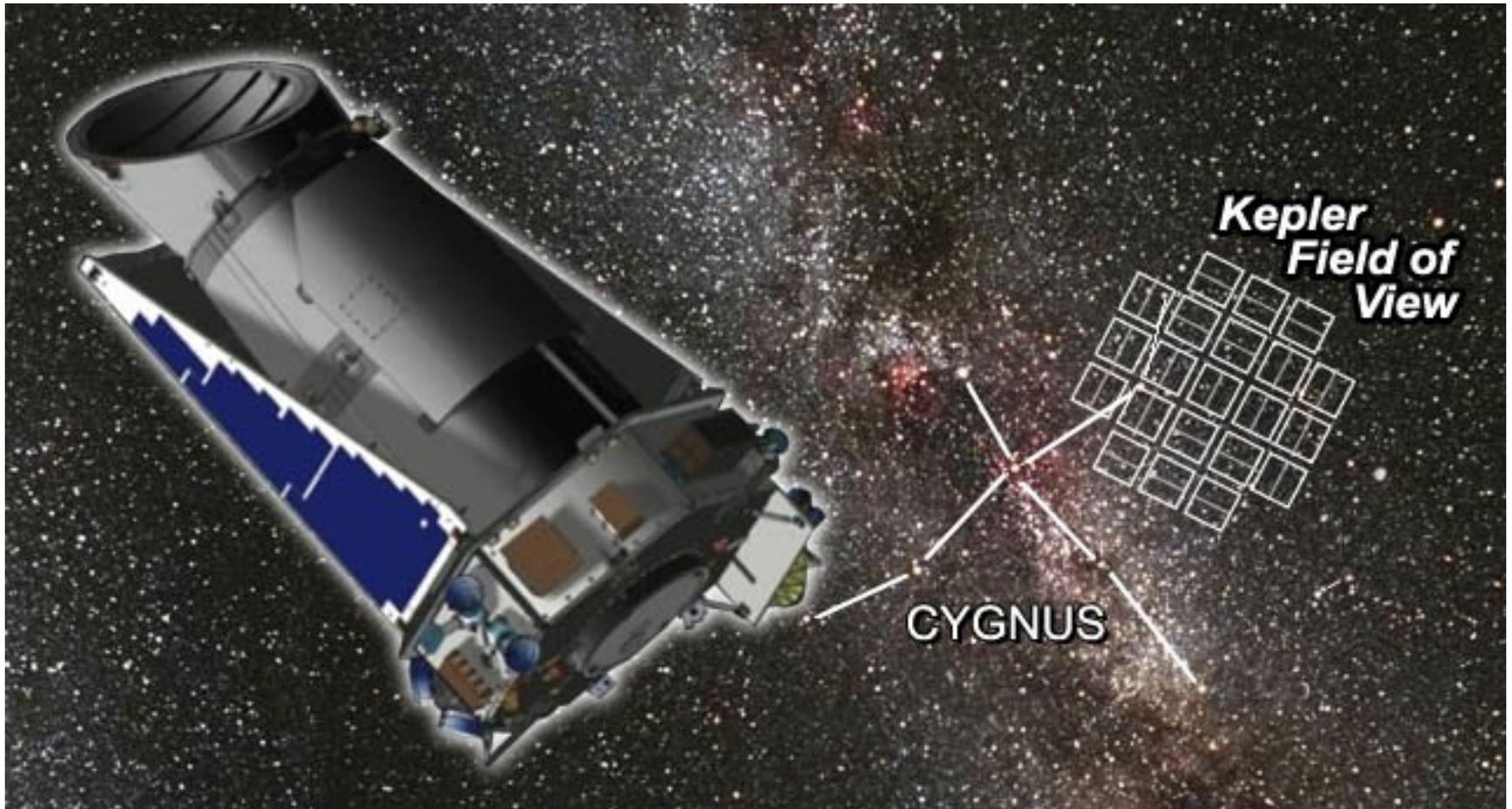
Exoplaneta conhecido, WASP 19 b

Curva de luz usando o telescópio IAG/USP (60cm) no OPD.

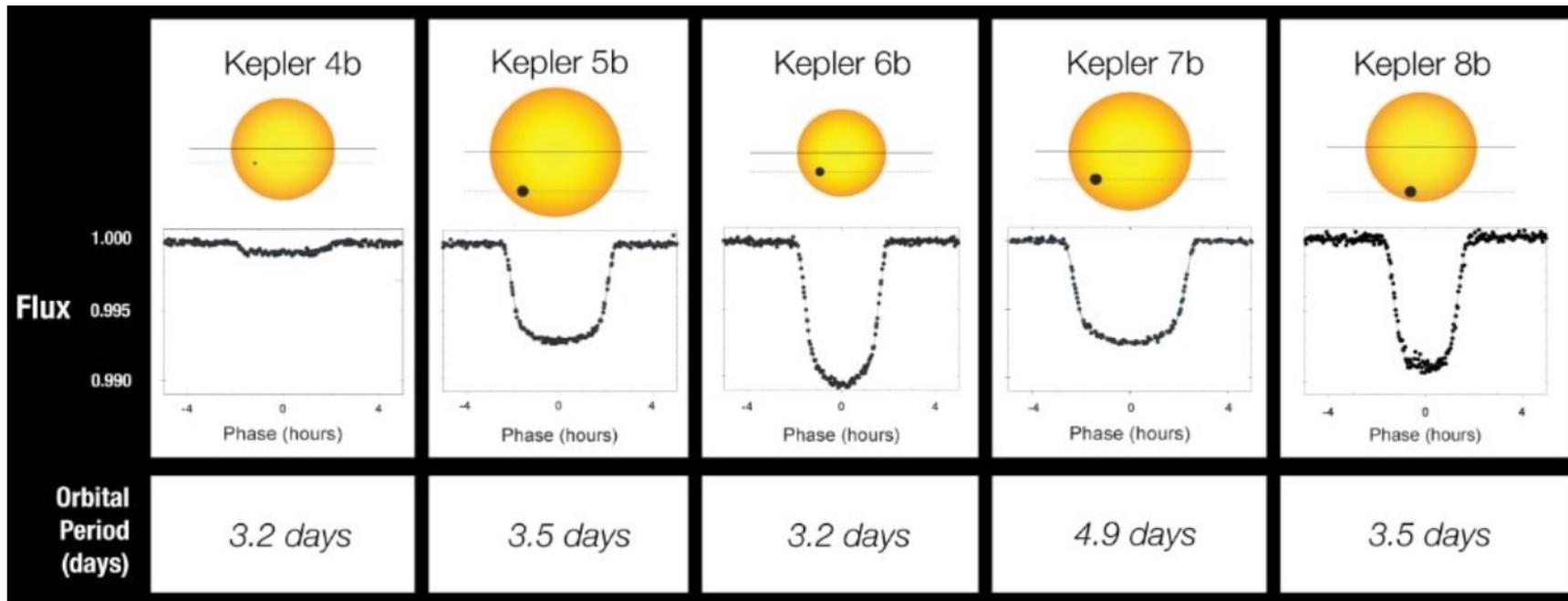
Aluno Erik Lima  
(disciplina de Astrofísica Observacional, IAG/USP,  
Prof. Jorge Meléndez

# Telescópio espacial Kepler (0,95 m)

Observou mais de 100 000 estrelas na constelação Cygnus (2009 a 2013) e depois outros campos (até 10/2018)

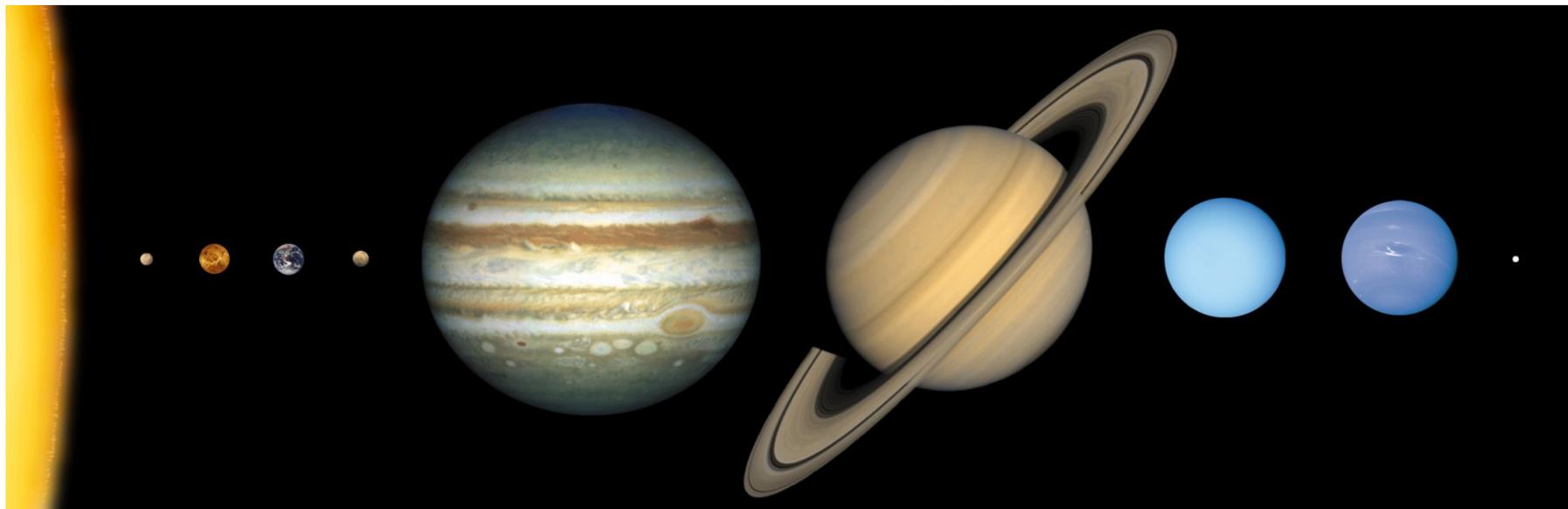


# Primeiros exoplanetas descobertos pelo Kepler



Netuno

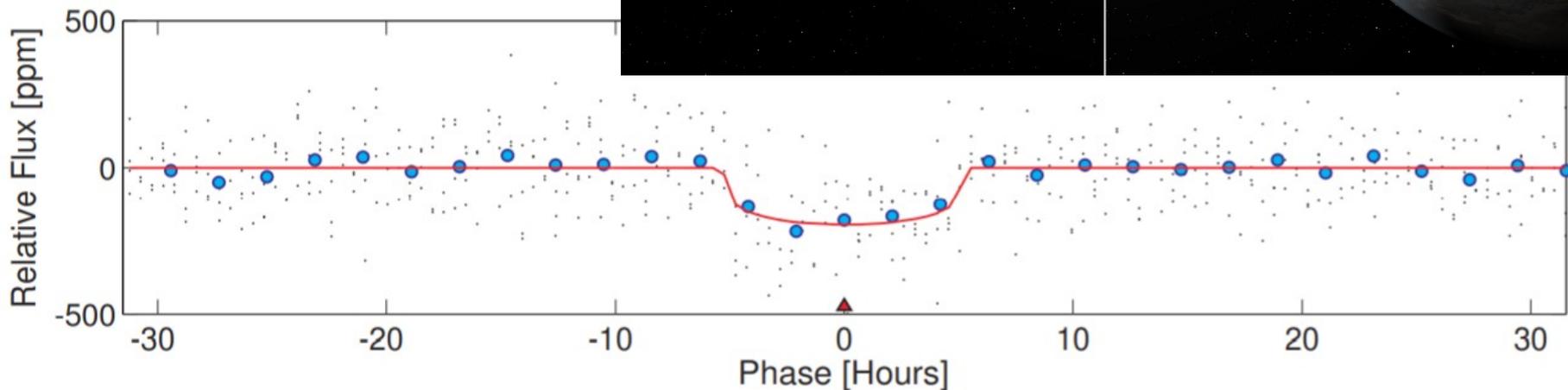
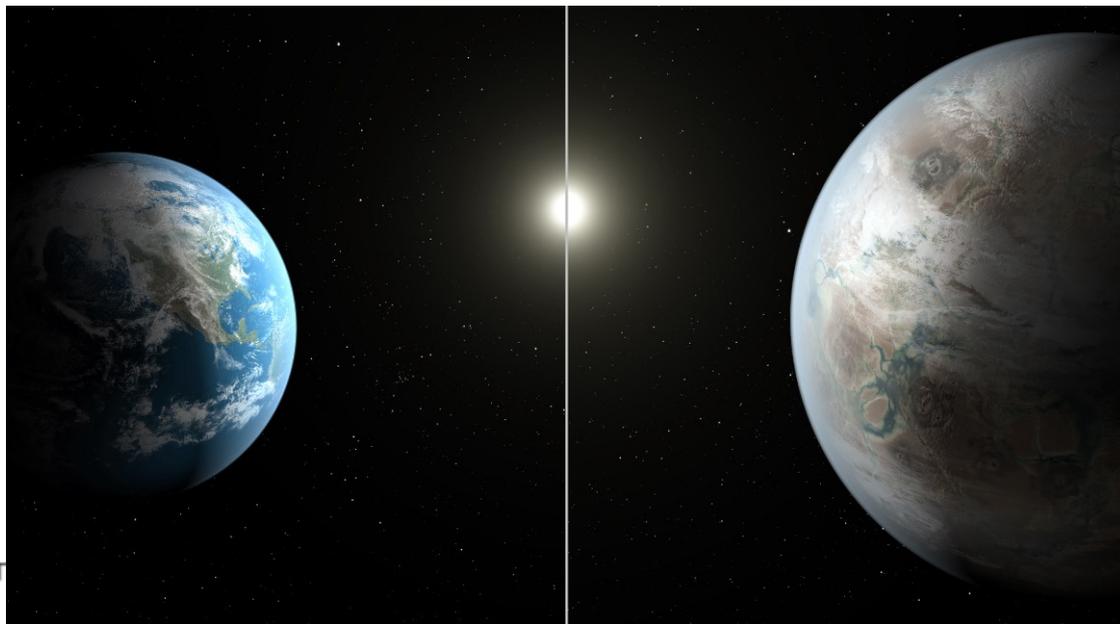
Júpiter



u  
e  
l  
u  
o  
o  
/  
A  
o  
S  
.  
e  
S  
e  
u  
.  
M  
M  
M  
/  
/  
:  
s  
d  
l  
l  
u

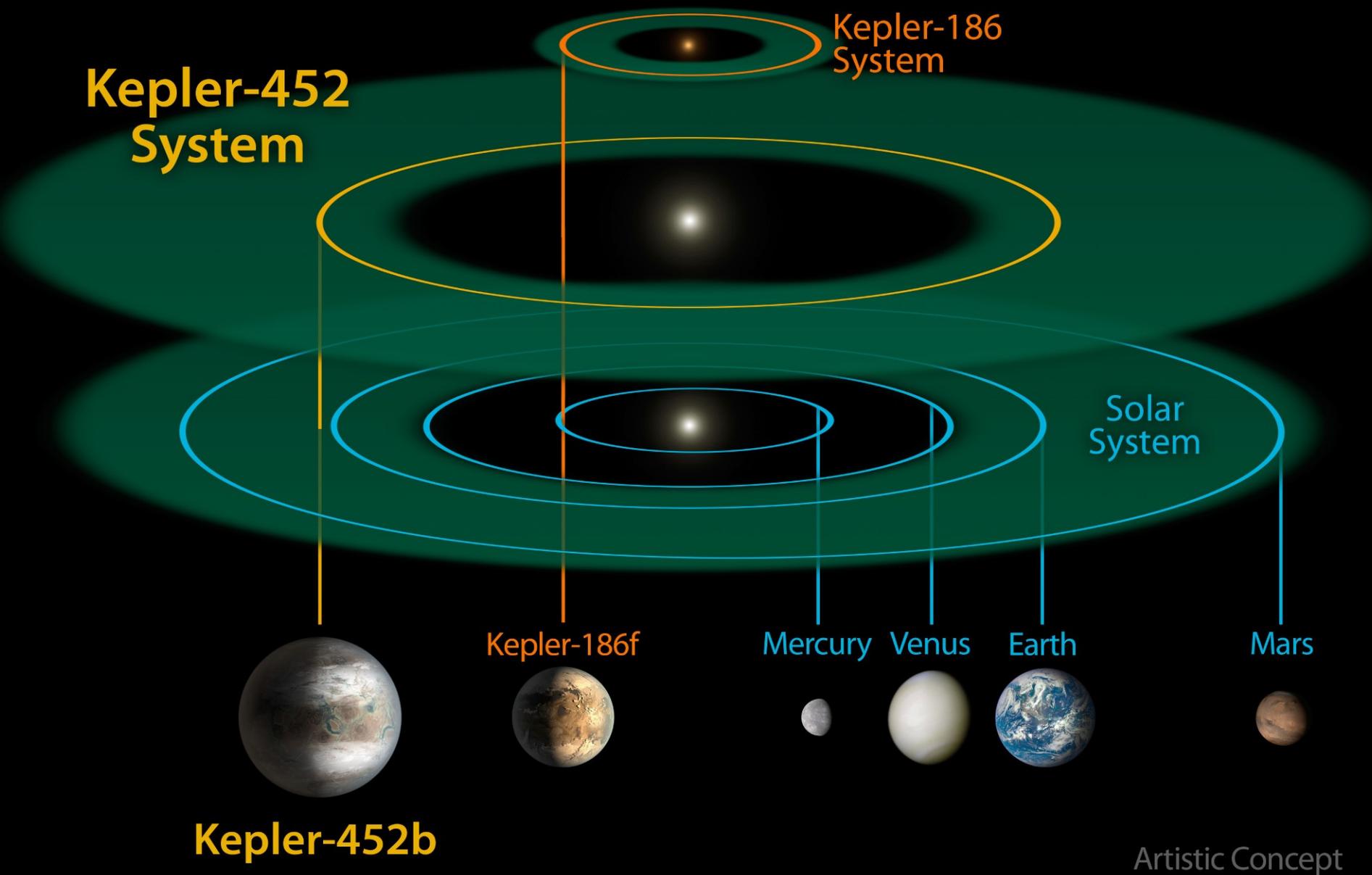
# NASA's Kepler Mission Discovers Bigger, Older Cousin to Earth

Kepler-452b:  $1,5 R_{\text{Terra}}$ .  
Talvez rochoso  
( $5M_{\text{Terra}}$ ) e orbitando  
estrela de tipo solar



**Figure 2.** Phase-folded, detrended flux time series for Kepler-452 versus phase in hours. The flux time series plotted here is the same as that of Figure 1, except that it has been phase folded at the period of the planet, 384.84 days. The triangle symbol indicates the location of the four transits at zero phase. The full resolution data are represented by black dots. The cyan filled circles represent the results of binning the data in phase with a bin width of  $1/5$  of the DV-fitted duration of the transit, 10.5 hr.

# Kepler-452b: “primo” da Terra na zona habitável de



Artistic Concept

# TESS

Missão atual da NASA para procura de exoplanetas de período curto ao redor de estrelas brilhantes



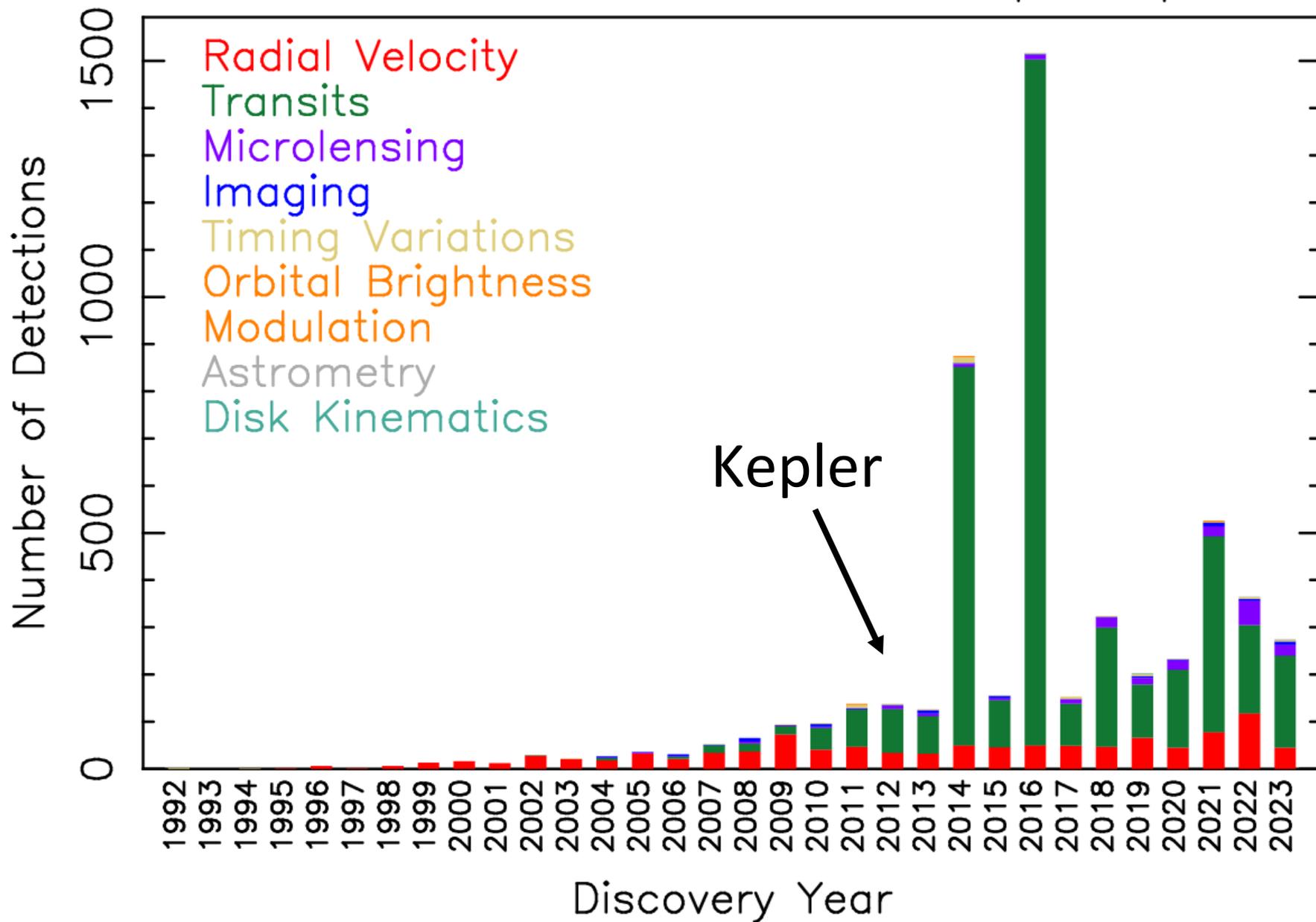
Em 4/Jul/2020 finalizou missão inicial de 2 anos. Já detectou 66 novos exoplanetas e 2100 candidatos.

Aprovada missão estendida até setembro de 2022

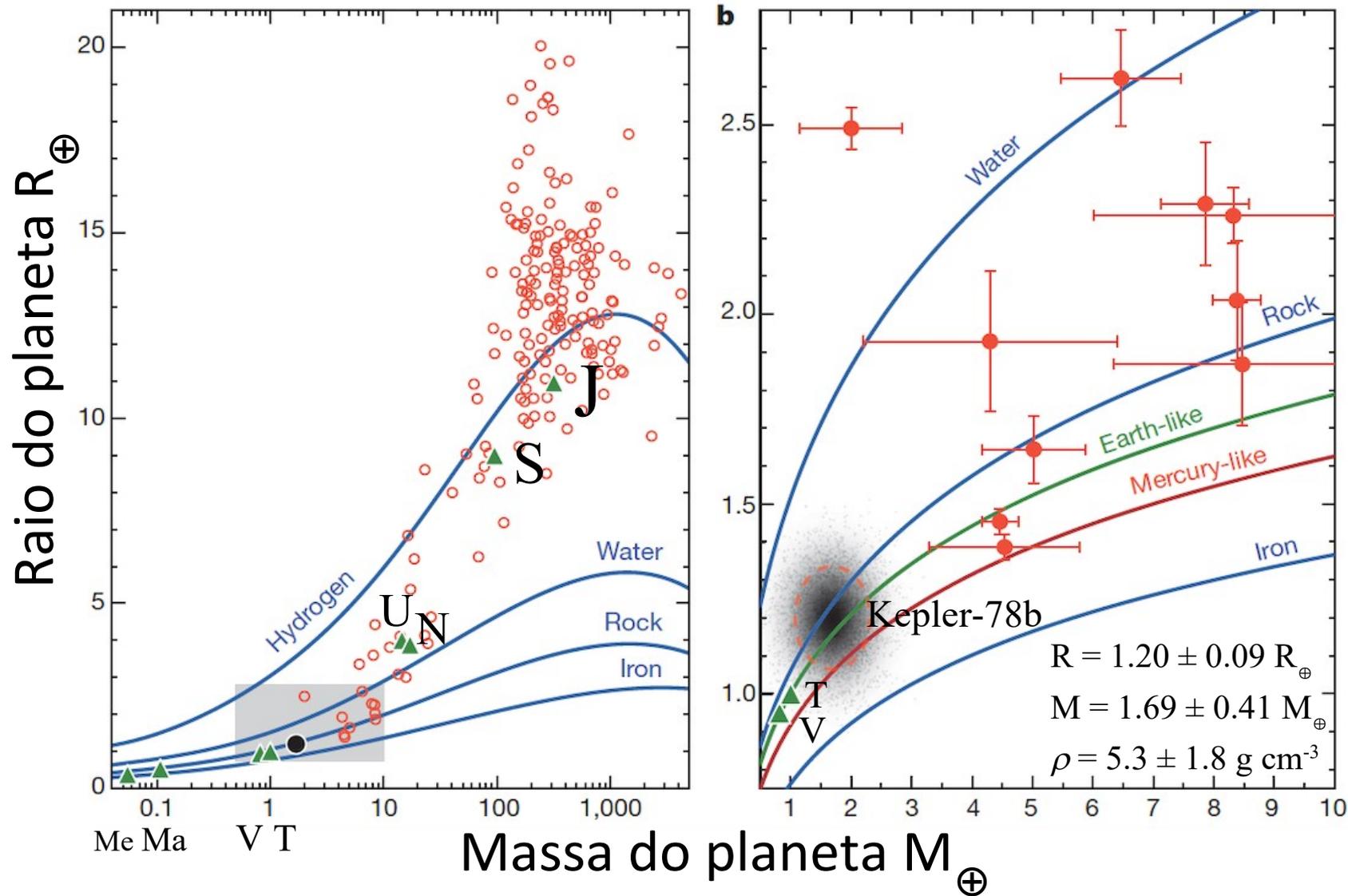
Também útil para estudar Astrofísica Estelar. Aluno Jhon Yana Galarza (grupo SAMPA do IAG-USP) já teve projetos aprovados pela NASA para estudo de gêmeas solares

# Detections Per Year

09 Nov 2023  
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu



Para saber qual o tipo de exoplaneta (rochoso ou gasoso), precisamos de ambos métodos: trânsito (raio) e velocidade radial (massa)



$$\rho (\text{Terra}) = 5.52 \text{ g cm}^{-3}$$

(c) J. Meléndez, adaptado de: Howard et al. 2013, Nature, 503, 381