

Capítulo 7

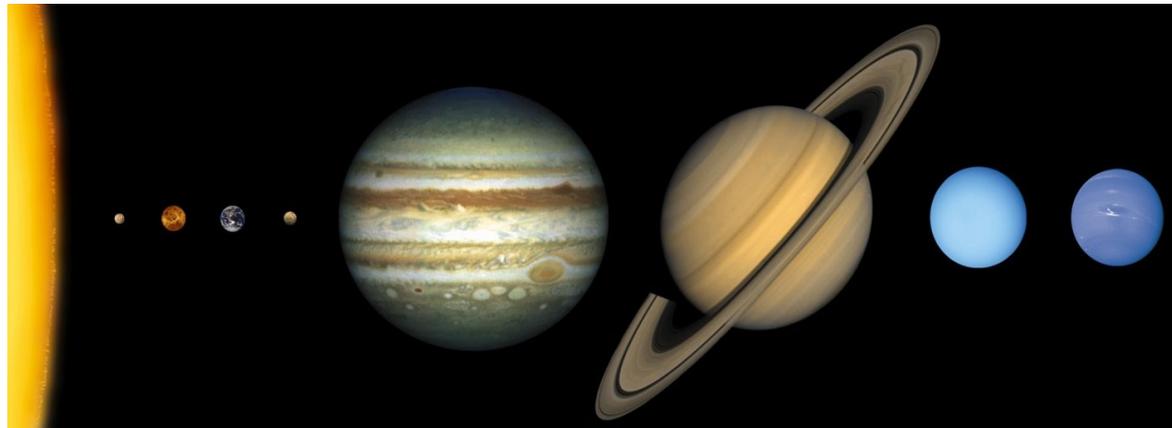
Sistemas Binários e Parâmetros estelares

7.1 Classificação de Sistemas Binários

7.2 Determinação de massa em binárias visuais

7.3 Binárias espectroscópicas eclipsantes

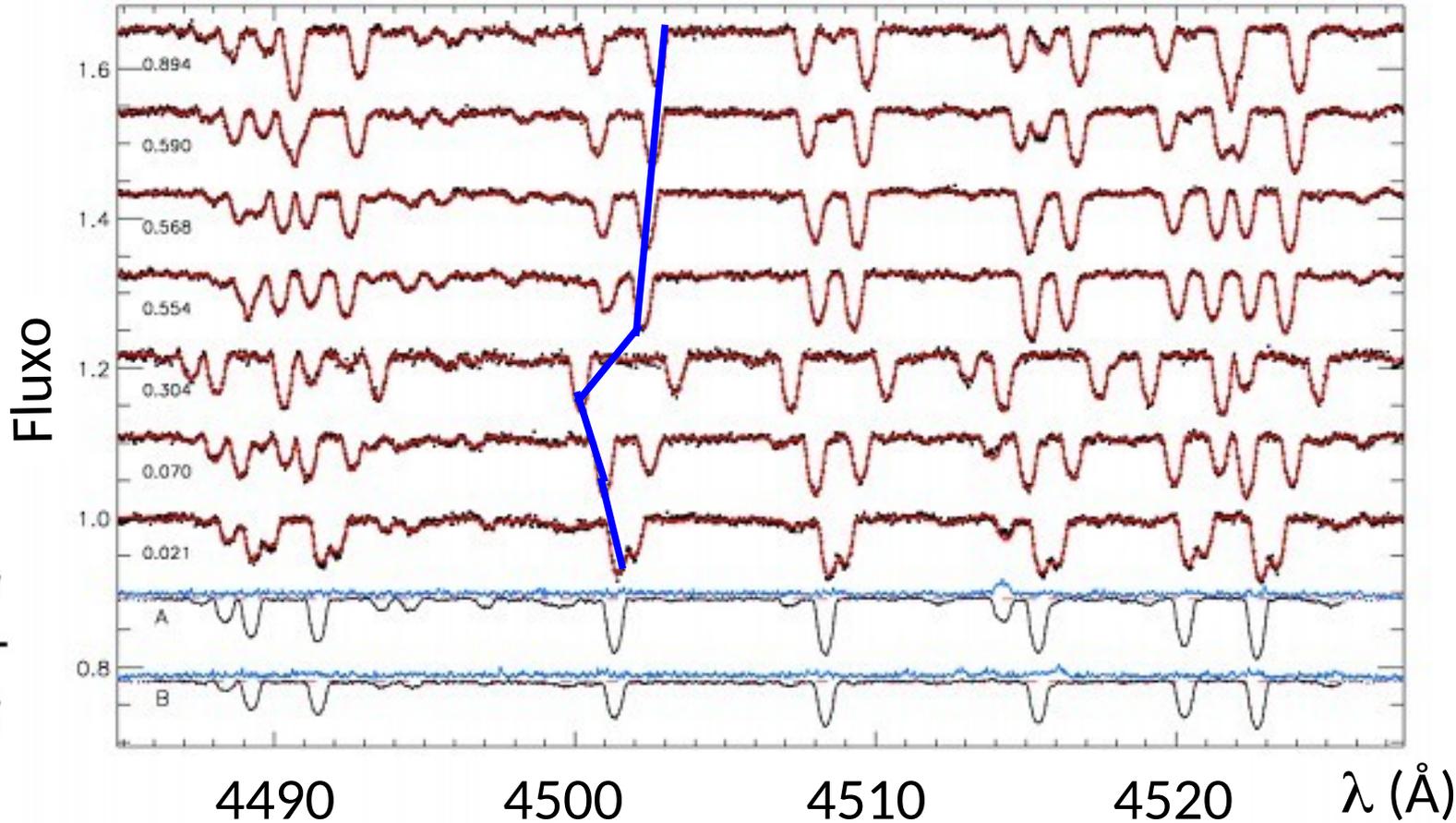
7.4 A busca por planetas extra-solares



Prof. Dr. Jorge Meléndez (IAG-USP)

7.3 Binárias espectroscópicas

Estrelas muito próximas: difícil medir a posição espacial relativa das estrelas → determinar órbitas por espectroscopia



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

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

<https://scienceatyourdoorstep.com/2018/05/11/spectroscopic-binary-stars/>

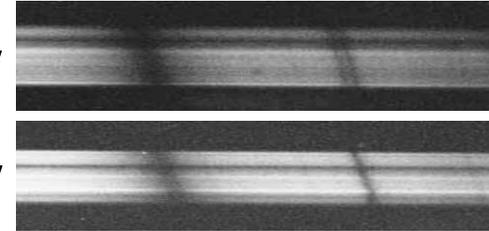
1887: 1a binária espectroscópica, Mizar A (ζ^1 Uma), descoberta por Edward Pickering (Diretor do Observ. Harvard) e analisada por Antonia Caetana de Paiva Pereira Maury. A binária apresenta linhas duplas, com um período de 104 dias.



1889: Antonia Maury descobriu a 2a binária espectroscópica, β Aurigae

27/março/1887

5/abril/1887



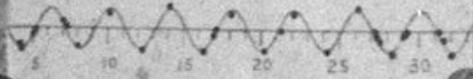
O trabalho foi publicado por Pickering em 1890, com ele como único autor, com menção de apenas 1 linha a Maury:

"um estudo cuidadoso dos resultados foi feito pela Srta. A. Maury".

1891: Antonia Maury deixou Harvard: "I do not think it is fair that I should pass the work into other hands until it can stand as work done by me. I worked out the theory at the cost of much thought and elaborate comparison and I think that I should have full credit for my theory of the relations of the star spectra and also for my theories in regard to Beta Lyrae."



• β AURIGÆ Dec 1889



Efeito da Excentricidade na velocidade radial

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

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

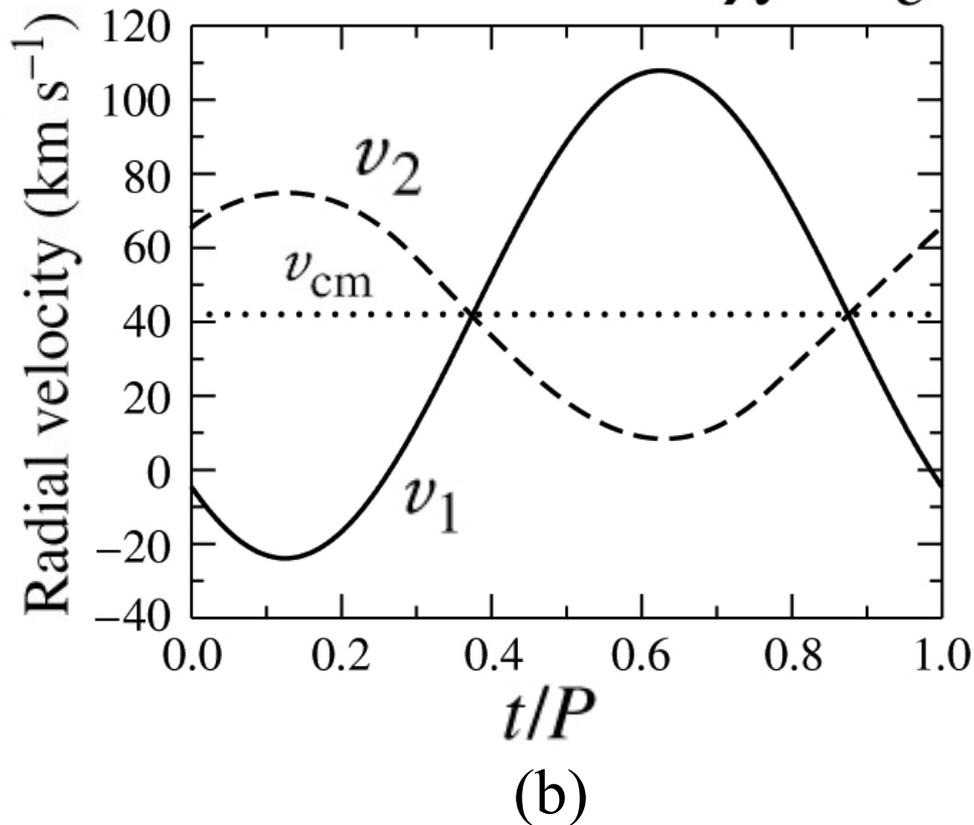
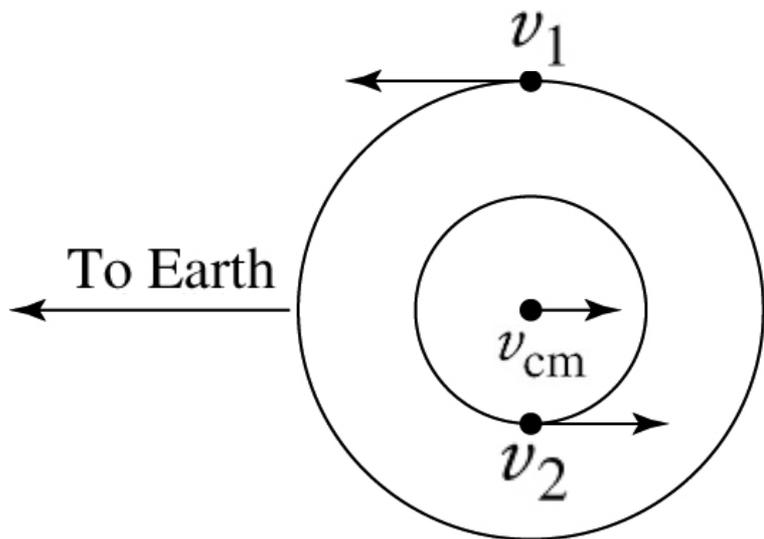
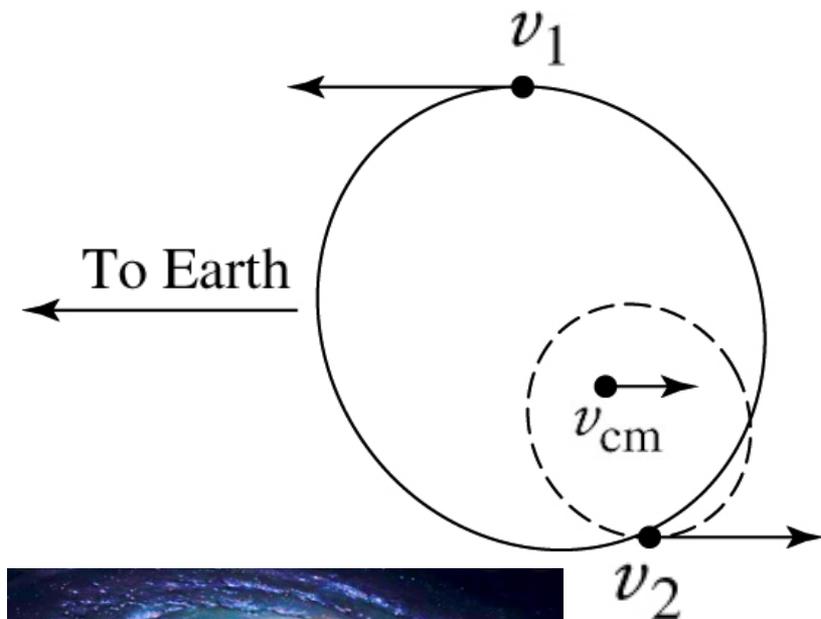


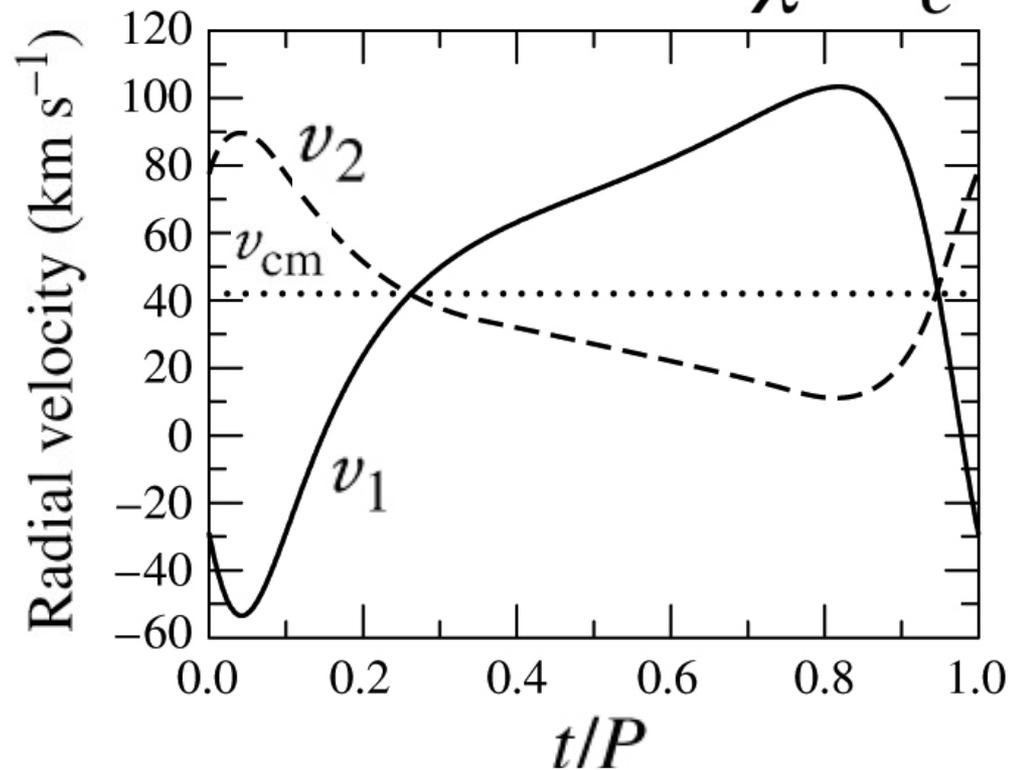
FIGURE 7.5 The orbital paths and radial velocities of two stars in circular orbits ($e = 0$). In this example, $M_1 = 1 M_\odot$, $M_2 = 2 M_\odot$, the orbital period is $P = 30$ d, and the radial velocity of the center of mass is $v_{cm} = 42 \text{ km s}^{-1}$. v_1 , v_2 , and v_{cm} are the velocities 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°

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



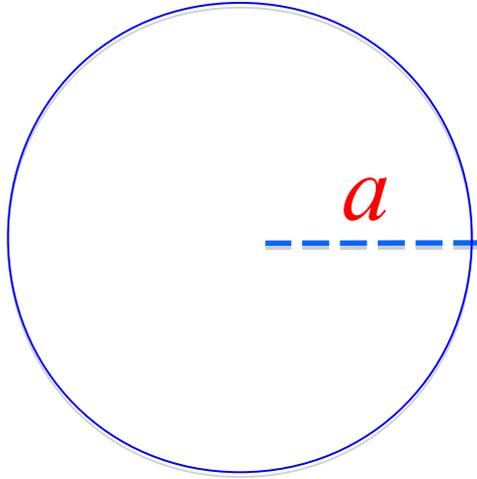
(a)



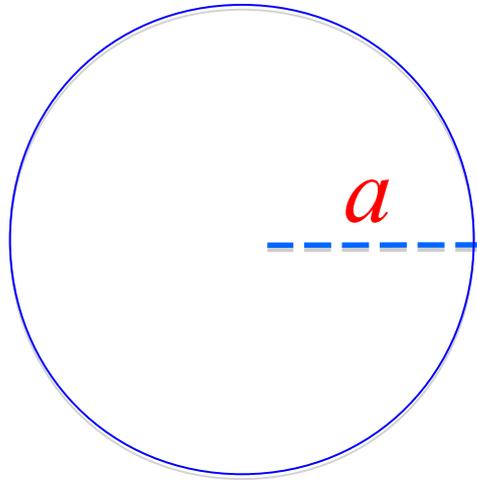
(b)

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° . 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 orbits lies along the line of sight of the observer. (b) The observed radial velocity curves.

Qual a velocidade v de uma estrela em uma órbita circular com **semi-eixo** a e período P ?

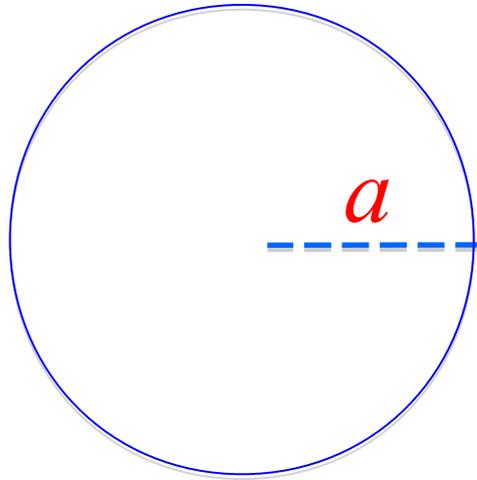


Qual a velocidade v de uma estrela em uma órbita circular com **semi-eixo** a e período P ?



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

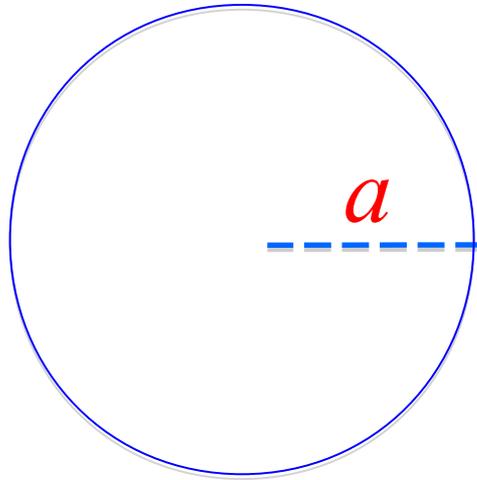
Qual a velocidade v de uma estrela em uma órbita circular com **semi-eixo** a e período P ?



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

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

Qual a velocidade v de uma estrela em uma órbita circular com **semi-eixo** a e período P ?

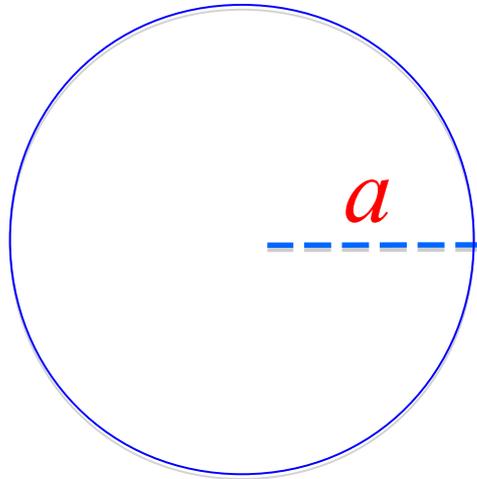


$$v = \frac{2\pi}{P} a$$

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

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

Qual a velocidade v de uma estrela em uma órbita circular com **semi-eixo** a e período P ?



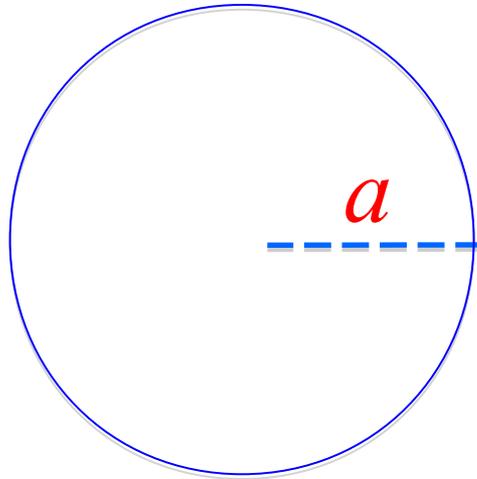
$$v = \frac{2\pi}{P} a$$

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

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

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

Qual a 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

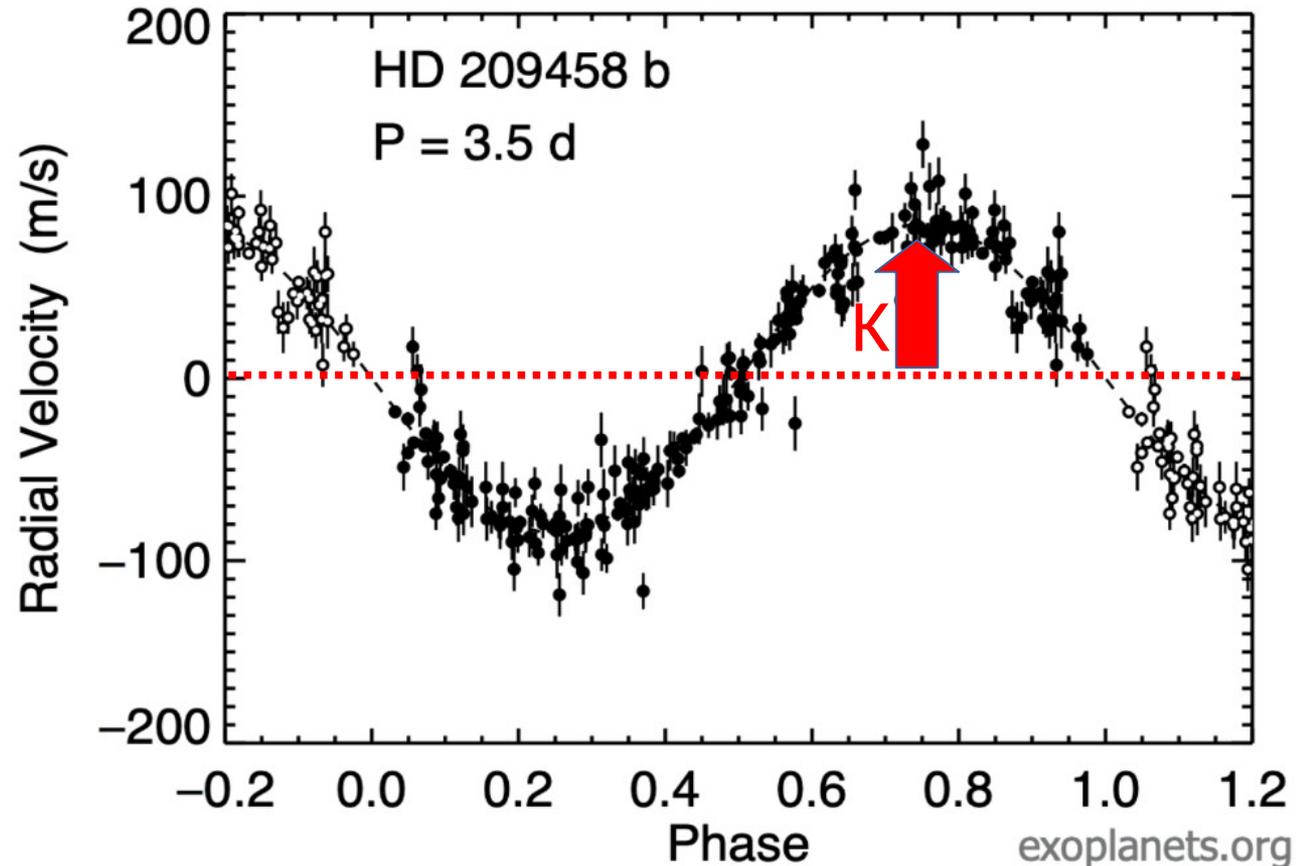
K = 84 m/s

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

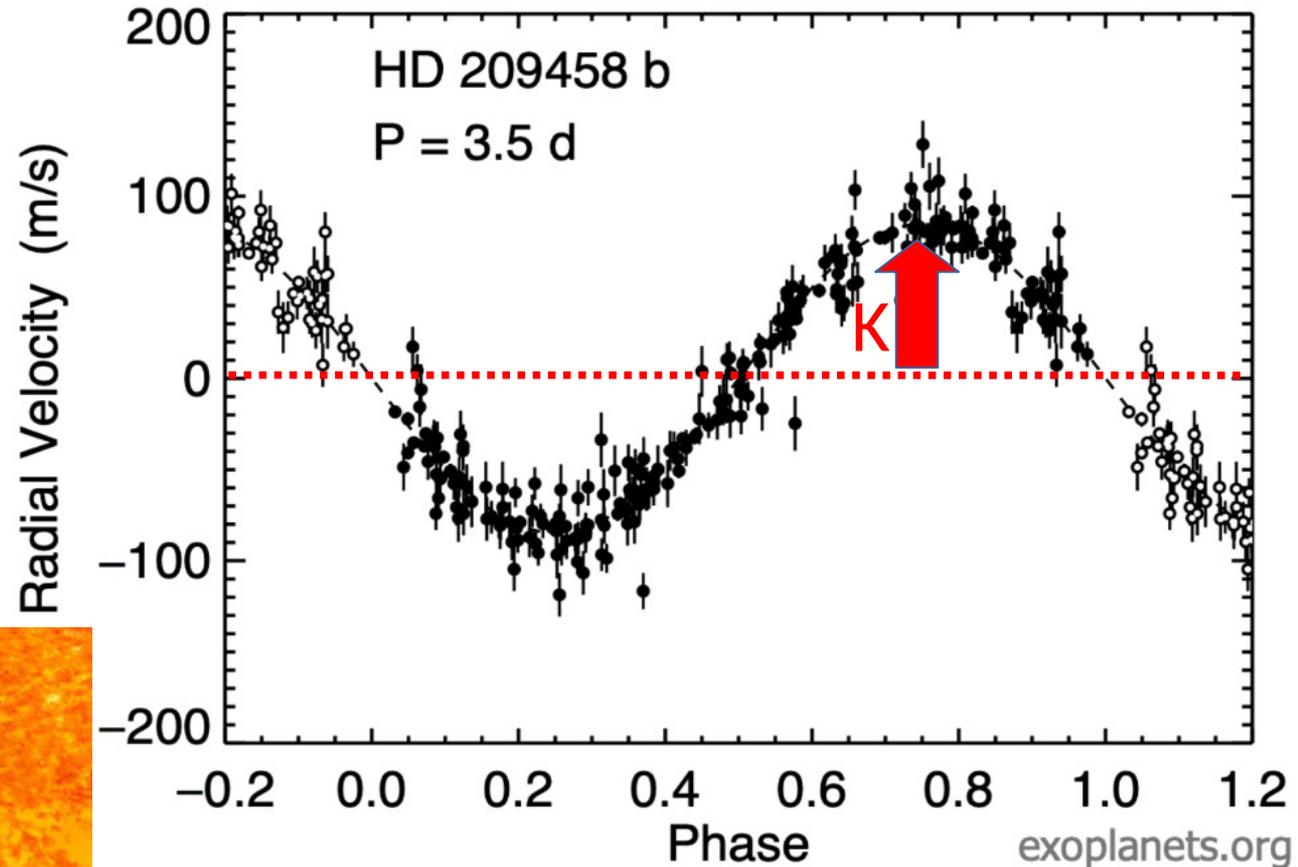
K = 84 m/s

e = 0,01

P = 3,52 dias

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

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



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

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

K: semi-amplitude da velocidade radial

K = 84 m/s

e = 0,01

P = 3,52 dias

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

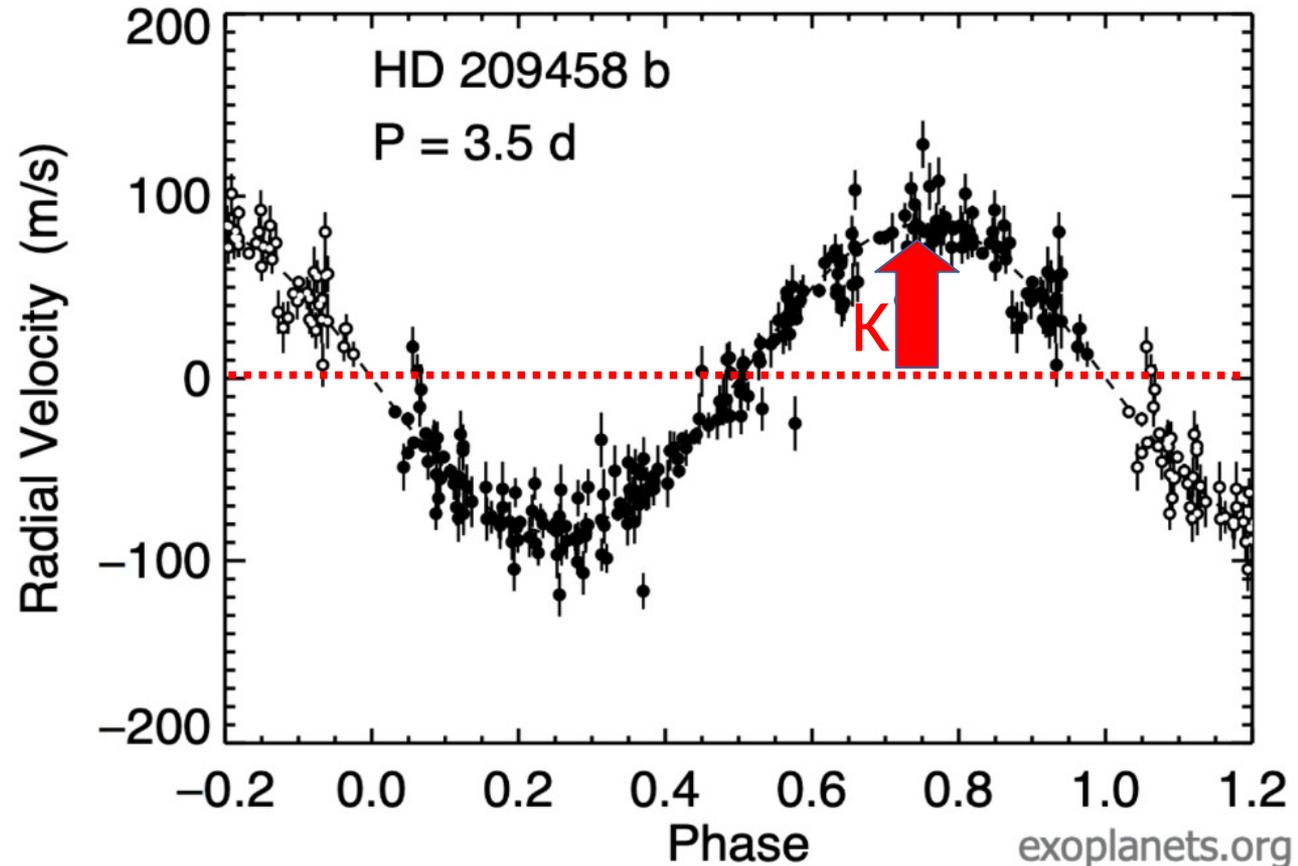
$m_{\star} = 1,15 M_{Sol}$

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

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

1 dia = 86400 s

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



$i = 86^\circ$

Relação Massa-Luminosidade

- O Estudo de binárias permite estimar suas massas.
- O fluxo e a distância \rightarrow luminosidade das estrelas

Quando colocamos num gráfico as massas e as luminosidades dos sistemas binários, temos uma correlação bem definida, chamada **relação Massa-Luminosidade** (M-L).

Eddington (1924) sugeriu que a relação M - L das estrelas é dada por:

$$\frac{L}{L_{sol}} = \left(\frac{M}{M_{sol}} \right)^\alpha$$

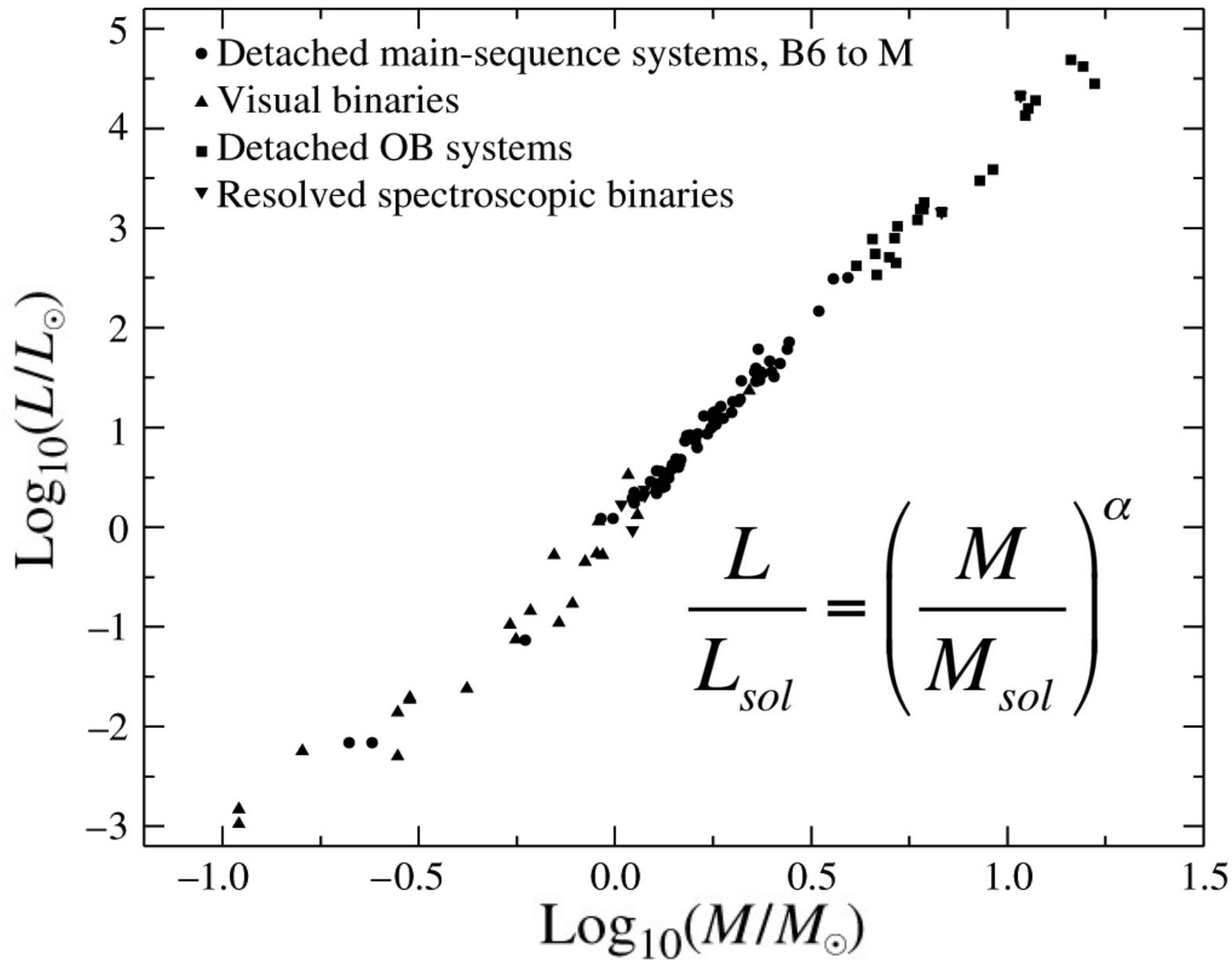
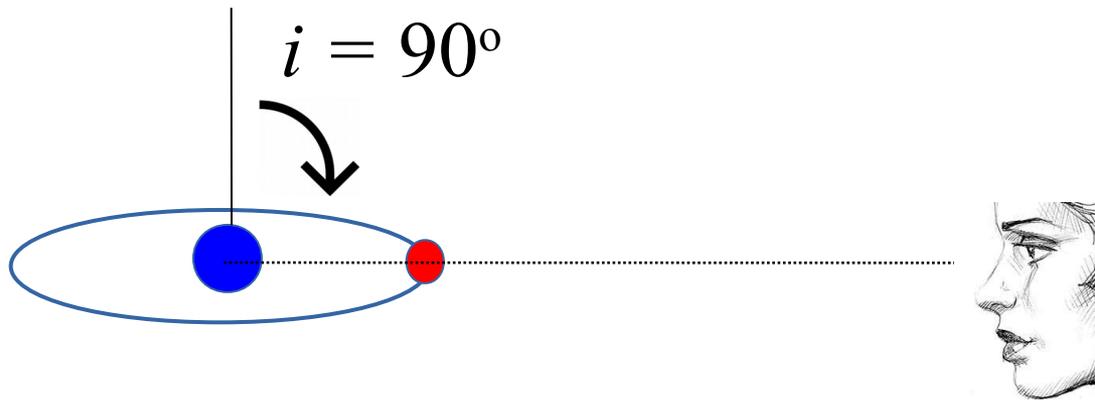


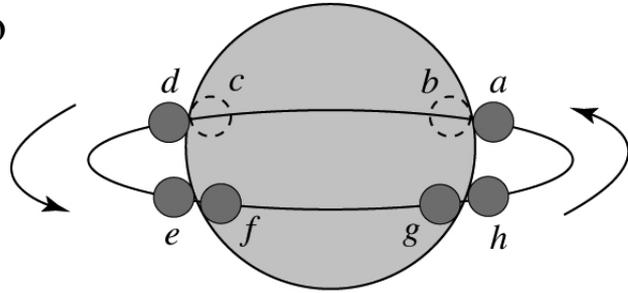
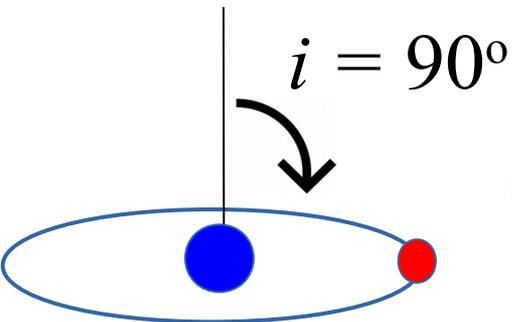
FIGURE 7.7 The mass–luminosity relation. (Data from Popper, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 18, 115, 1980.)

Determinação de raios e razões de temperatura por meio de eclipses

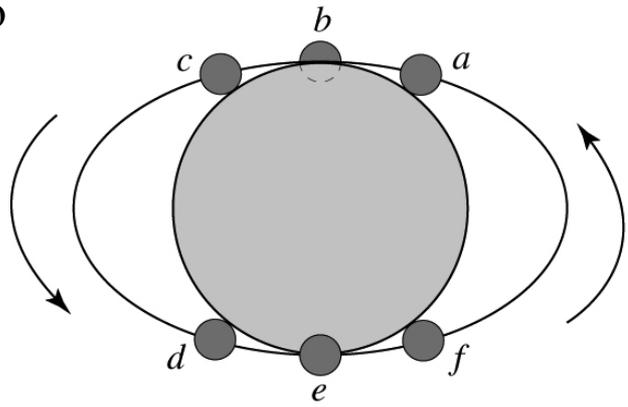
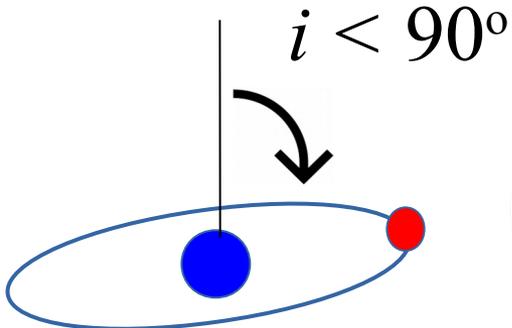
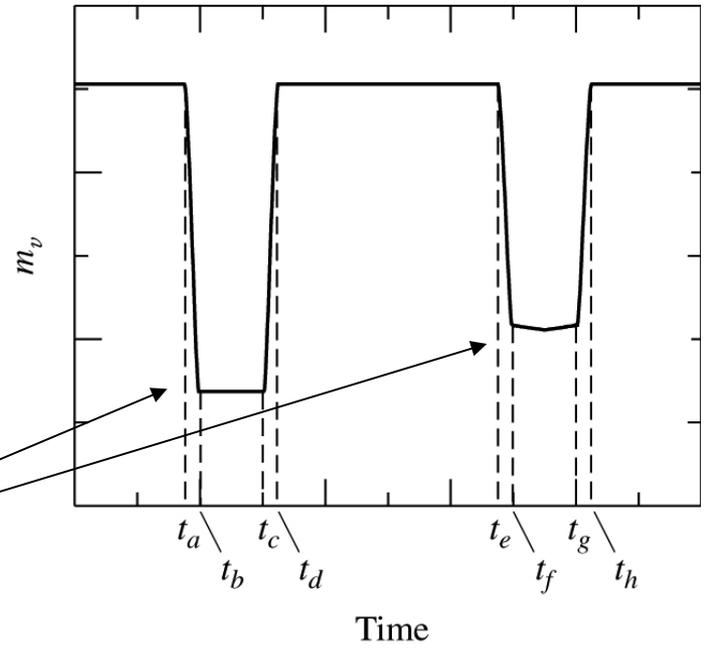


Para termos eclipses, o ângulo de inclinação $i \sim 90^0$

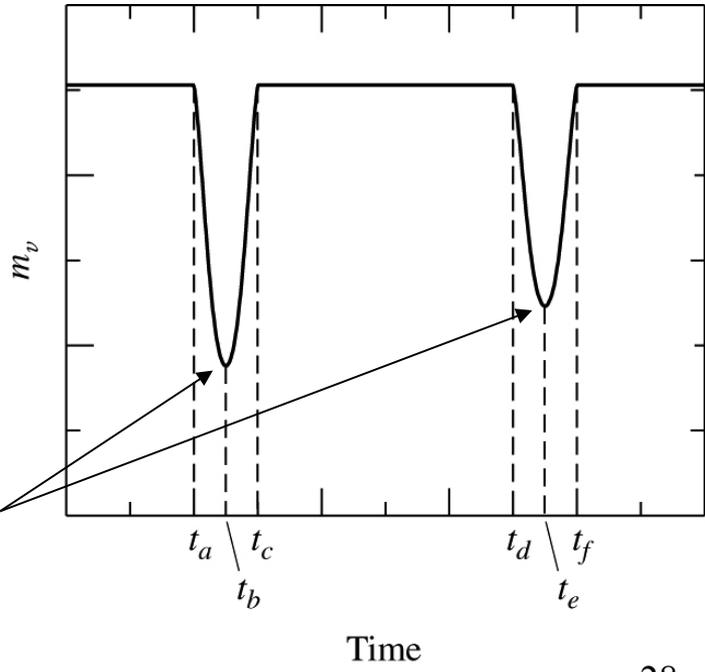
Se $i = 75^0$ ao invés de $i = 90^0$, erro em $m_1 + m_2$ de apenas 10% devido ao fator $(\sin i)^3$



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



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



$$i = 90^\circ$$

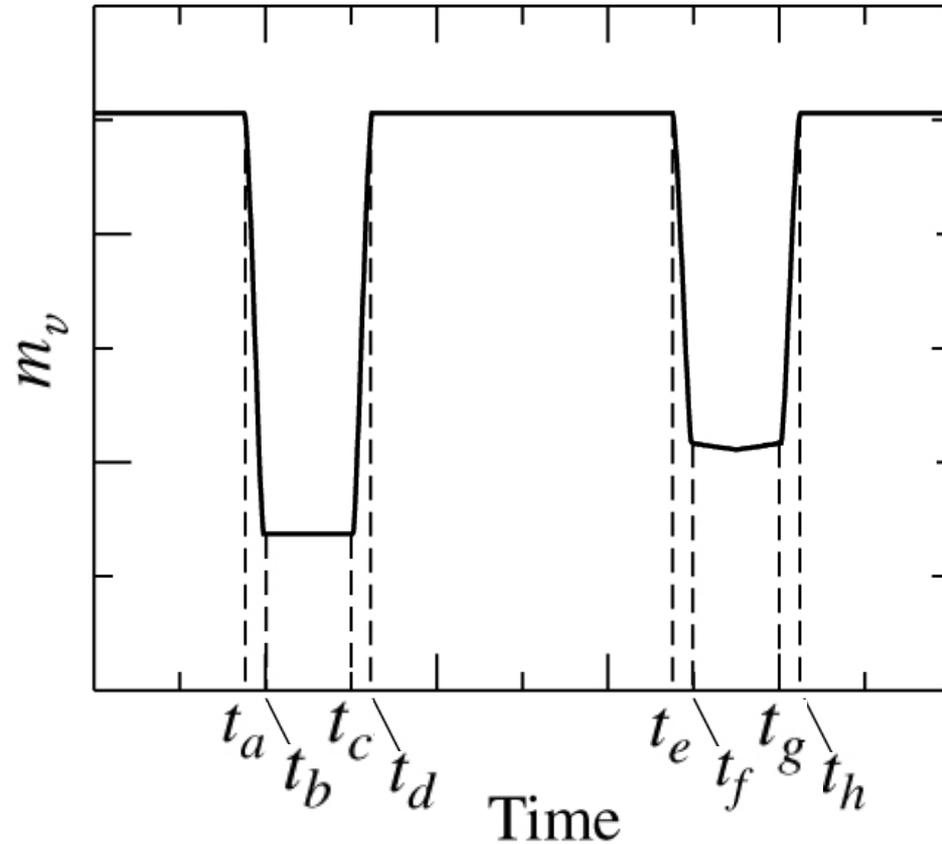
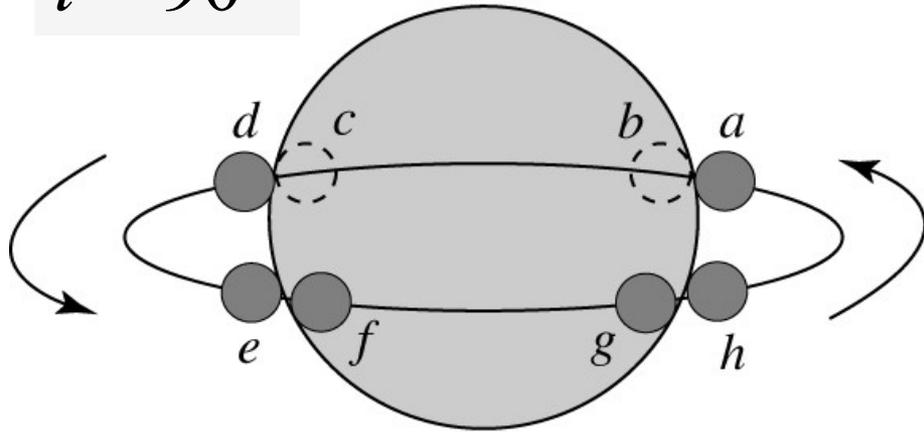


FIGURE 7.9 The light curve of an eclipsing binary for which $i = 90^\circ$. The times indicated on the light curve correspond to the positions of the smaller star relative to its larger companion. It is assumed in this example that the smaller star is hotter than the larger one.

Velocidade relativa entre as 2 estrelas $v = v_s + v_l$

$i = 90^\circ$

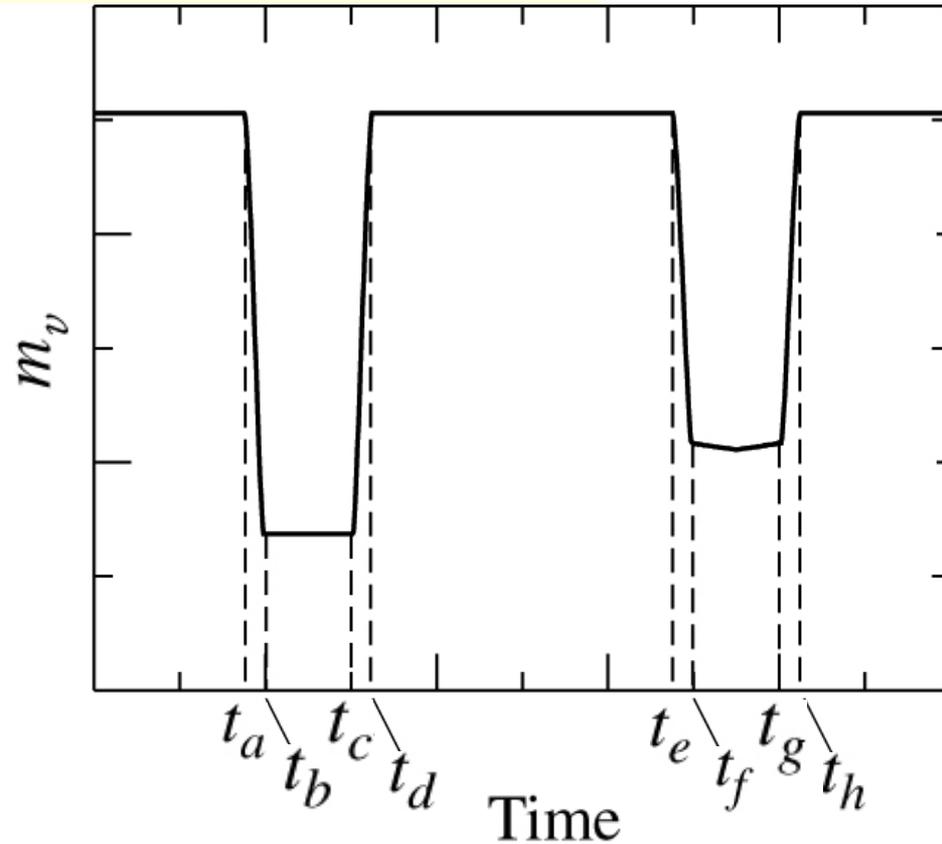
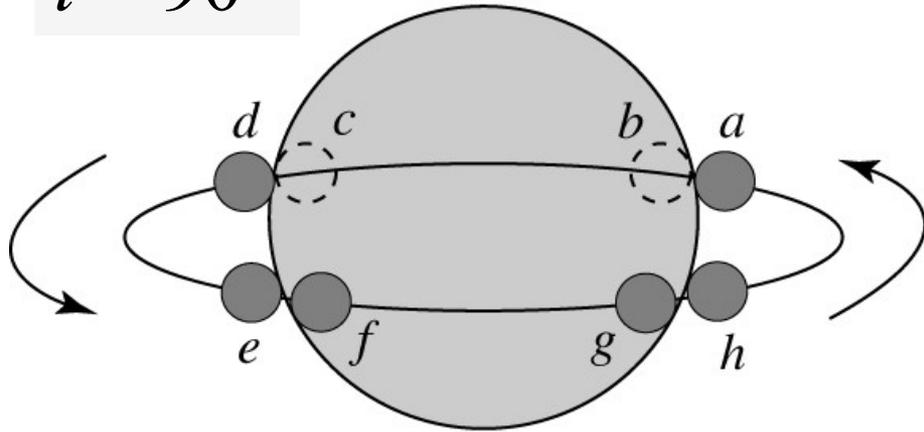
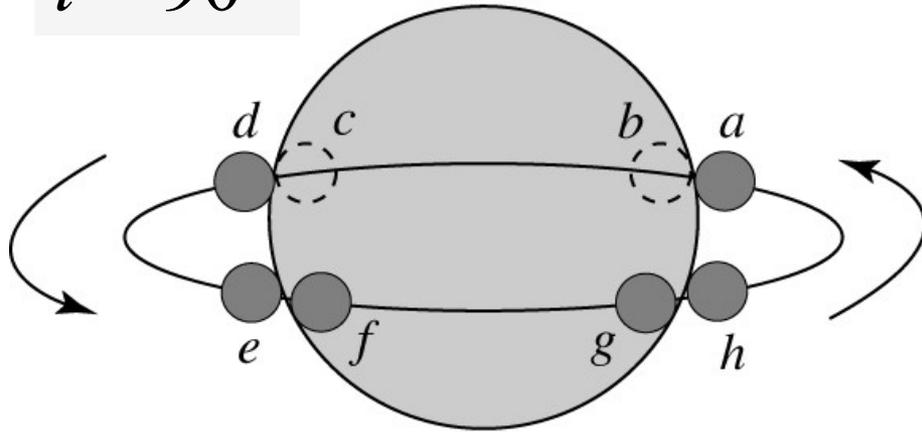


FIGURE 7.9 The light curve of an eclipsing binary for which $i = 90^\circ$. The times indicated on the light curve correspond to the positions of the smaller star relative to its larger companion. It is assumed in this example that the smaller star is hotter than the larger one.

Velocidade relativa entre as 2 estrelas $v = v_s + v_l$

$i = 90^\circ$



Diâmetro da
estrela pequena: $d_s = v (t_b - t_a)$

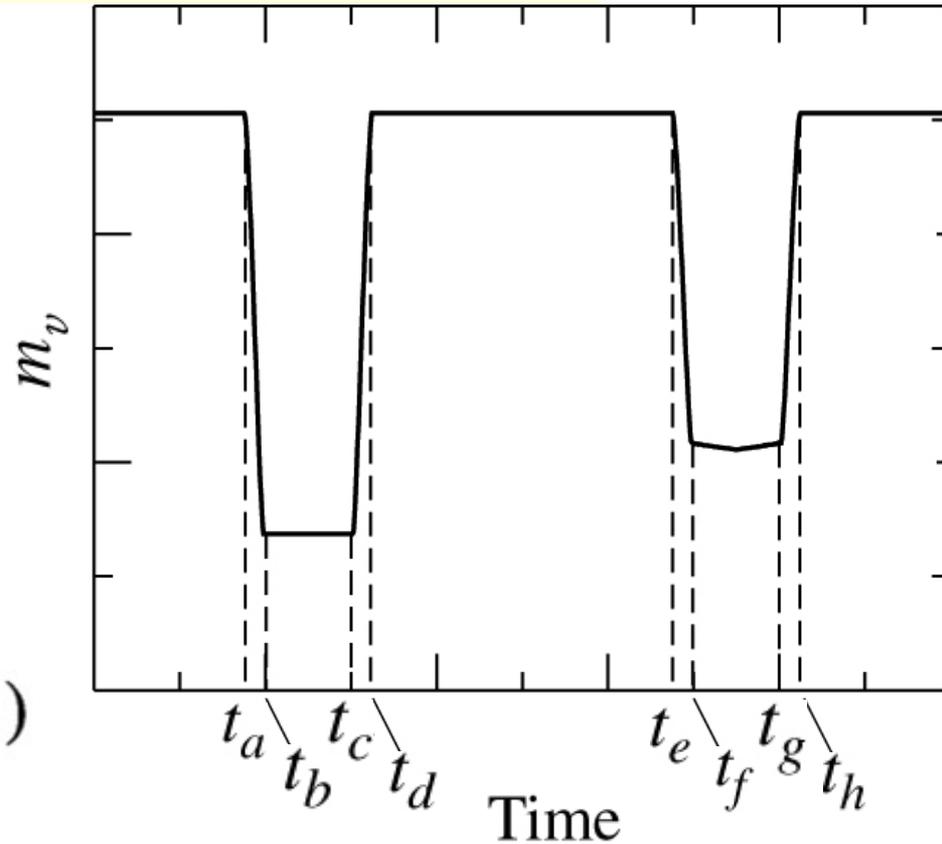
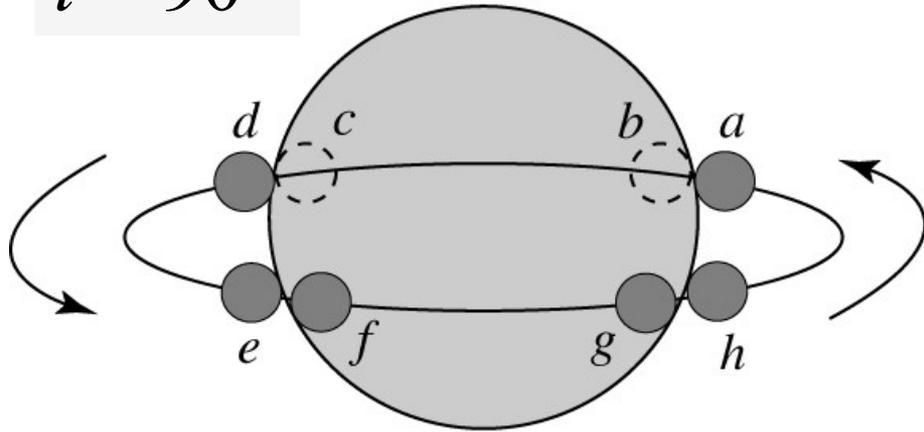


FIGURE 7.9 The light curve of an eclipsing binary for which $i = 90^\circ$. The times indicated on the light curve correspond to the positions of the smaller star relative to its larger companion. It is assumed in this example that the smaller star is hotter than the larger one.

Velocidade relativa entre as 2 estrelas $v = v_s + v_l$

$i = 90^\circ$



Raio da estrela
pequena (small): $r_s = \frac{v}{2} (t_b - t_a)$

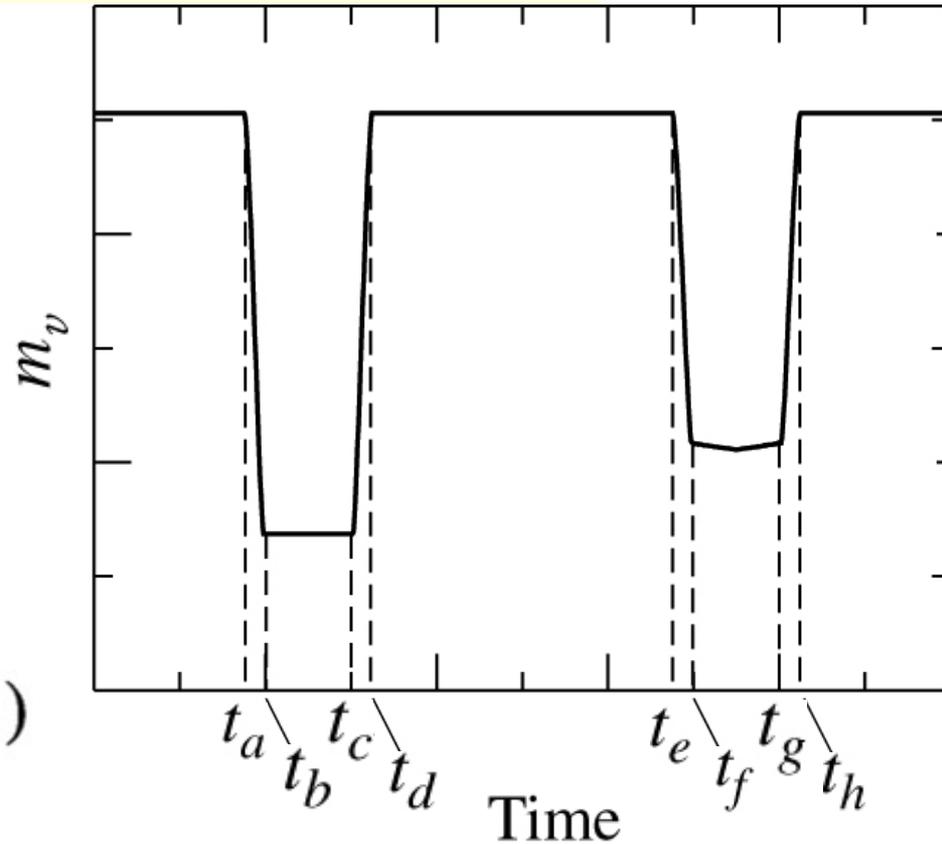
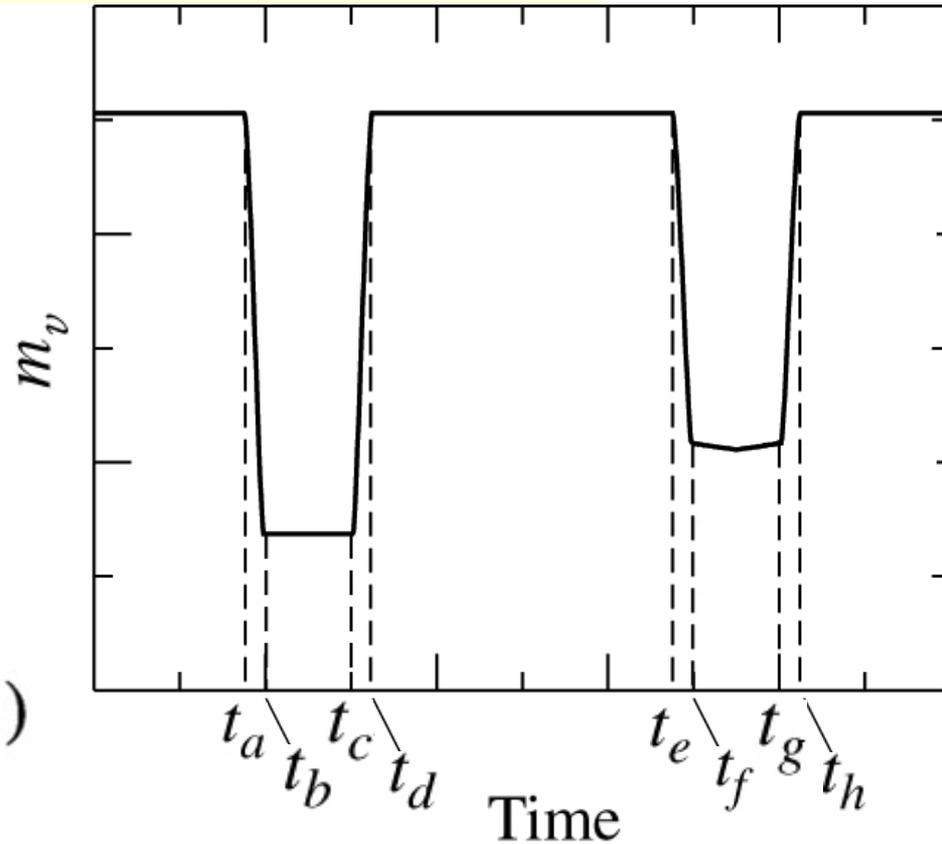
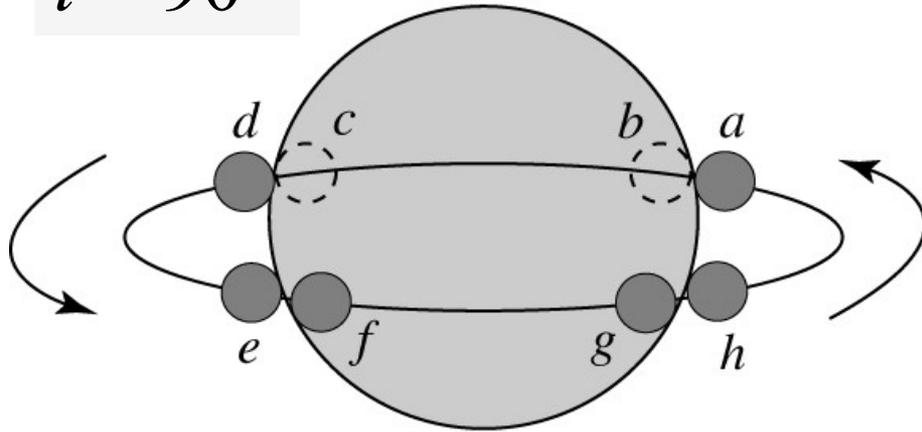


FIGURE 7.9 The light curve of an eclipsing binary for which $i = 90^\circ$. The times indicated on the light curve correspond to the positions of the smaller star relative to its larger companion. It is assumed in this example that the smaller star is hotter than the larger one.

Velocidade relativa entre as 2 estrelas $v = v_s + v_l$

$i = 90^\circ$



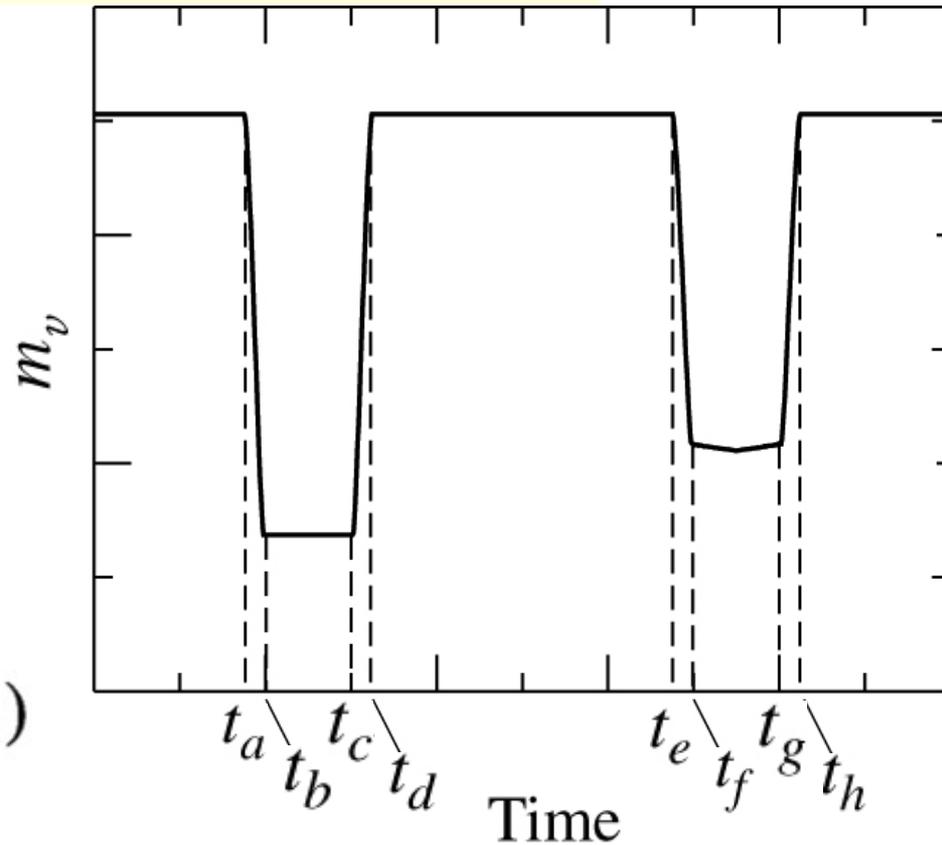
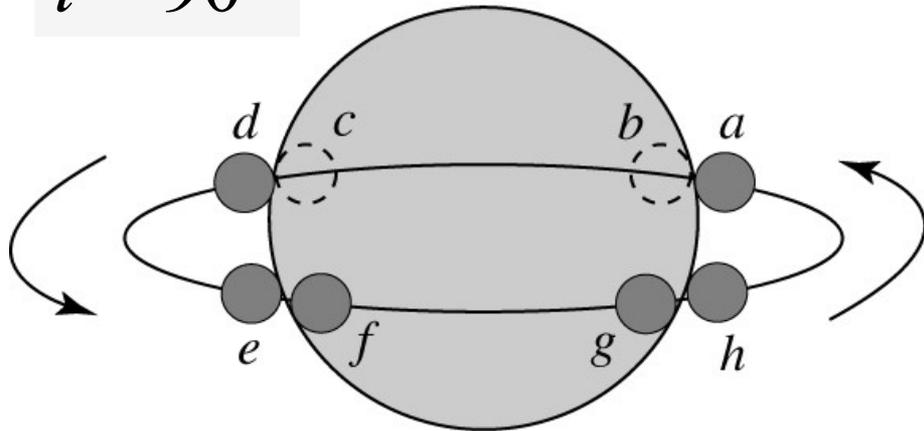
Raio da estrela pequena (small): $r_s = \frac{v}{2} (t_b - t_a)$

Raio da estrela grande (large): $r_l = \frac{v}{2} (t_c - t_a)$

FIGURE 7.9 The light curve of an eclipsing binary for which $i = 90^\circ$. The times indicated on the light curve correspond to the positions of the smaller star relative to its larger companion. It is assumed in this example that the smaller star is hotter than the larger one.

Velocidade relativa entre as 2 estrelas $v = v_s + v_l$

$i = 90^\circ$



Raio da estrela pequena (small): $r_s = \frac{v}{2} (t_b - t_a)$

Raio da estrela grande (large): $r_l = \frac{v}{2} (t_c - t_a) = r_s + \frac{v}{2} (t_c - t_b)$

FIGURE 7.9 The light curve of an eclipsing binary for which $i = 90^\circ$. The times indicated on the light curve correspond to the positions of the smaller star relative to its larger companion. It is assumed in this example that the smaller star is hotter than the larger one.

Exemplo 7.3.1. Calcular as massas de sistema binário usando observações de uma binária espectroscópica eclipsante.

A análise do espectro de binária eclipsante de linhas duplas, resulta em $P = 8,6$ anos. O máximo deslocamento Doppler da linha $H\alpha$ (656,281nm) é $\Delta\lambda_s = 0,072\text{nm}$ e $\Delta\lambda_l = 0,0068\text{nm}$, para a estrela menor (*s: small*) e maior (*l: large*), respectivamente. Pela forma sinusoidal da curva de velocidade $\rightarrow e \sim 0$.

Exemplo 7.3.1. Calcular as massas de sistema binário usando observações de uma binária espectroscópica eclipsante.

A análise do espectro de binária eclipsante de linhas duplas, resulta em $P = 8,6$ anos. O máximo deslocamento Doppler da linha $H\alpha$ (656,281nm) é $\Delta\lambda_s = 0,072\text{nm}$ e $\Delta\lambda_l = 0,0068\text{nm}$, para a estrela menor (*s: small*) e maior (*l: large*), respectivamente. Pela forma sinusoidal da curva de velocidade $\rightarrow e \sim 0$.

Razão de
massas,
Eq. (7.5):

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

Exemplo 7.3.1. Calcular as massas de sistema binário usando observações de uma binária espectroscópica eclipsante.

A análise do espectro de binária eclipsante de linhas duplas, resulta em $P = 8,6$ anos. O máximo deslocamento Doppler da linha $H\alpha$ (656,281nm) é $\Delta\lambda_s = 0,072\text{nm}$ e $\Delta\lambda_l = 0,0068\text{nm}$, para a estrela menor (*s: small*) e maior (*l: large*), respectivamente. Pela forma sinusoidal da curva de velocidade $\rightarrow e \sim 0$.

Eq. (4.39):

Razão de
massas,
Eq. (7.5):

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

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{rest}}} \simeq \frac{v_r}{c}$$

Exemplo 7.3.1. Calcular as massas de sistema binário usando observações de uma binária espectroscópica eclipsante.

A análise do espectro de binária eclipsante de linhas duplas, resulta em $P = 8,6$ anos. O máximo deslocamento Doppler da linha $H\alpha$ (656,281nm) é $\Delta\lambda_s = 0,072\text{nm}$ e $\Delta\lambda_l = 0,0068\text{nm}$, para a estrela menor (*s: small*) e maior (*l: large*), respectivamente. Pela forma sinusoidal da curva de velocidade $\rightarrow e \sim 0$.

Eq. (4.39):

Razão de
massas,
Eq. (7.5):

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

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{rest}}} \simeq \frac{v_r}{c}$$



$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta\lambda_1}$$

Exemplo 7.3.1. Calcular as massas de sistema binário usando observações de uma binária espectroscópica eclipsante.

A análise do espectro de binária eclipsante de linhas duplas, resulta em $P = 8,6$ anos. O máximo deslocamento Doppler da linha $H\alpha$ (656,281nm) é $\Delta\lambda_s = 0,072\text{nm}$ e $\Delta\lambda_l = 0,0068\text{nm}$, para a estrela menor (s : *small*) e maior (l : *large*), respectivamente. Pela forma sinusoidal da curva de velocidade $\rightarrow e \sim 0$.

Eq. (4.39):

Razão de massas, Eq. (7.5):

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

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{rest}}} \simeq \frac{v_r}{c}$$

$$\Rightarrow \frac{m_1}{m_2} = \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta\lambda_1}$$

Razão de massas: $\Rightarrow \frac{m_l}{m_s} = \frac{v_{rs}}{v_{rl}} = \frac{\Delta\lambda_s}{\Delta\lambda_l} = 10.6$

Dados: $P = 8,6$ anos. Máximo deslocamento Doppler em $H\alpha$ (656,281nm): $\Delta\lambda_s = 0,072\text{nm}$ e $\Delta\lambda_\ell = 0,0068\text{nm}$. Órbita circular ($e \sim 0$)

Razão de massas:  $\frac{m_\ell}{m_s} = \frac{v_{rs}}{v_{r\ell}} = \frac{\Delta\lambda_s}{\Delta\lambda_\ell} = 10.6$

Precisamos do semi-eixo maior total para a 3a. Lei de Kepler

$$m_s + m_\ell = a^3 / P^2$$

Dados: $P = 8,6$ anos. Máximo deslocamento Doppler em $H\alpha$ (656,281nm): $\Delta\lambda_s = 0,072\text{nm}$ e $\Delta\lambda_l = 0,0068\text{nm}$. Órbita circular ($e \sim 0$)

Razão de massas:  $\frac{m_l}{m_s} = \frac{v_{rs}}{v_{rl}} = \frac{\Delta\lambda_s}{\Delta\lambda_l} = 10.6$

Precisamos do semi-eixo maior total para a 3a. Lei de Kepler

Se $i = 90^\circ \rightarrow v_{rs} = \frac{\Delta\lambda_s}{\lambda} c = 33 \text{ km s}^{-1}$

Raio da órbita: $a_s = \frac{v_{rs} P}{2\pi} = 1.42 \times 10^{12} \text{ m} = 9.5 \text{ AU}$

Dados: $P = 8,6$ anos. Máximo deslocamento Doppler em $H\alpha$ (656,281nm): $\Delta\lambda_s = 0,072\text{nm}$ e $\Delta\lambda_l = 0,0068\text{nm}$. Órbita circular ($e \sim 0$)

Razão de massas: $\Rightarrow \frac{m_l}{m_s} = \frac{v_{rs}}{v_{rl}} = \frac{\Delta\lambda_s}{\Delta\lambda_l} = 10.6$

Precisamos do semi-eixo maior total para a 3a. Lei de Kepler

Se $i = 90^\circ \rightarrow v_{rs} = \frac{\Delta\lambda_s}{\lambda} c = 33 \text{ km s}^{-1}$

Raio da órbita: $a_s = \frac{v_{rs} P}{2\pi} = 1.42 \times 10^{12} \text{ m} = 9.5 \text{ AU}$

Para a estrela maior (l): $v_{rl} = 3.1 \text{ km/s}$, $a_l = 0.90 \text{ AU}$

Dados: $P = 8,6$ anos. Máximo deslocamento Doppler em $H\alpha$ (656,281nm): $\Delta\lambda_s = 0,072\text{nm}$ e $\Delta\lambda_l = 0,0068\text{nm}$. Órbita circular ($e \sim 0$)

Razão de massas:  $\frac{m_l}{m_s} = \frac{v_{rs}}{v_{rl}} = \frac{\Delta\lambda_s}{\Delta\lambda_l} = 10.6$

Precisamos do semi-eixo maior total para a 3a. Lei de Kepler

Se $i = 90^\circ \rightarrow v_{rs} = \frac{\Delta\lambda_s}{\lambda} c = 33 \text{ km s}^{-1}$

Raio da órbita: $a_s = \frac{v_{rs} P}{2\pi} = 1.42 \times 10^{12} \text{ m} = 9.5 \text{ AU}$

Para a estrela maior (l): $v_{rl} = 3.1 \text{ km/s}$, $a_l = 0.90 \text{ AU}$

\rightarrow semi-eixo maior da massa reduzida: $a = a_s + a_l = 10.4 \text{ AU}$

Dados: $P = 8,6$ anos. Máximo deslocamento Doppler em $H\alpha$ (656,281nm): $\Delta\lambda_s = 0,072\text{nm}$ e $\Delta\lambda_l = 0,0068\text{nm}$. Órbita circular ($e \sim 0$)

Razão de massas:  $\frac{m_l}{m_s} = \frac{v_{rs}}{v_{rl}} = \frac{\Delta\lambda_s}{\Delta\lambda_l} = 10.6$

Semi-eixo maior da massa reduzida: $a = a_s + a_l = 10.4$ AU

Dados: $P = 8,6$ anos. Máximo deslocamento Doppler em $H\alpha$ (656,281nm): $\Delta\lambda_s = 0,072\text{nm}$ e $\Delta\lambda_l = 0,0068\text{nm}$. Órbita circular ($e \sim 0$)

Razão de massas:  $\frac{m_l}{m_s} = \frac{v_{rs}}{v_{rl}} = \frac{\Delta\lambda_s}{\Delta\lambda_l} = 10.6$

Semi-eixo maior da massa reduzida: $a = a_s + a_l = 10.4$ AU

A soma das massas é obtida pela 3a. lei de Kepler:

$$m_s + m_l = a^3 / P^2 = 15.2 M_{\odot}$$

Dados: $P = 8,6$ anos. Máximo deslocamento Doppler em $H\alpha$ (656,281nm): $\Delta\lambda_s = 0,072\text{nm}$ e $\Delta\lambda_l = 0,0068\text{nm}$. Órbita circular ($e \sim 0$)

Razão de massas: $\Rightarrow \frac{m_\ell}{m_s} = \frac{v_{rs}}{v_{rl}} = \frac{\Delta\lambda_s}{\Delta\lambda_\ell} = 10.6$

Semi-eixo maior da massa reduzida: $a = a_s + a_l = 10.4$ AU

A soma das massas é obtida pela 3a. lei de Kepler:

$$m_s + m_\ell = a^3 / P^2 = 15.2 M_\odot$$

Massas resultantes:

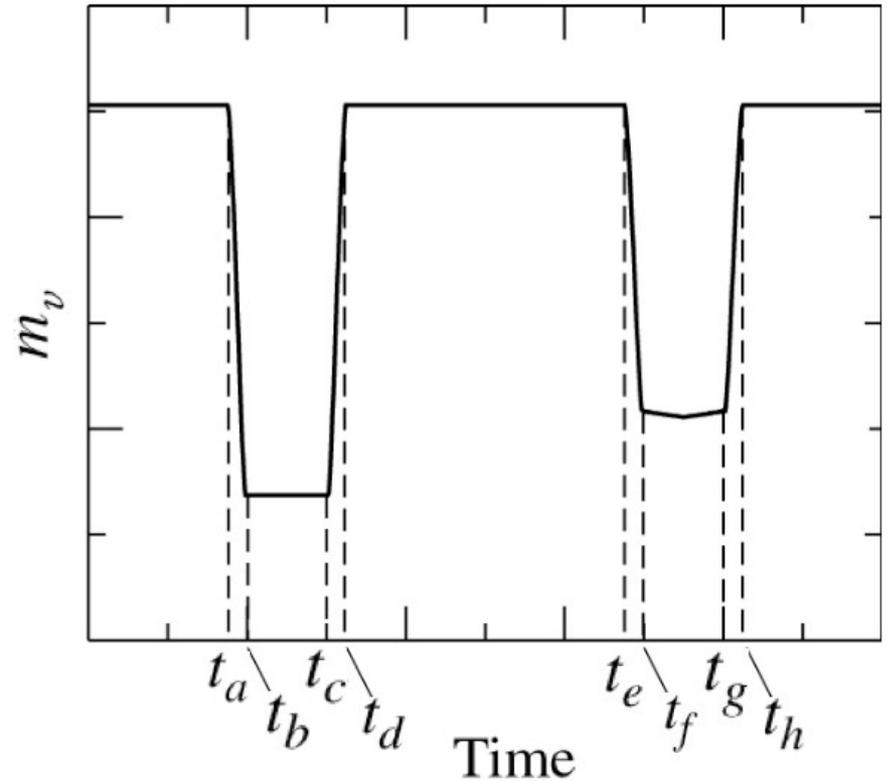
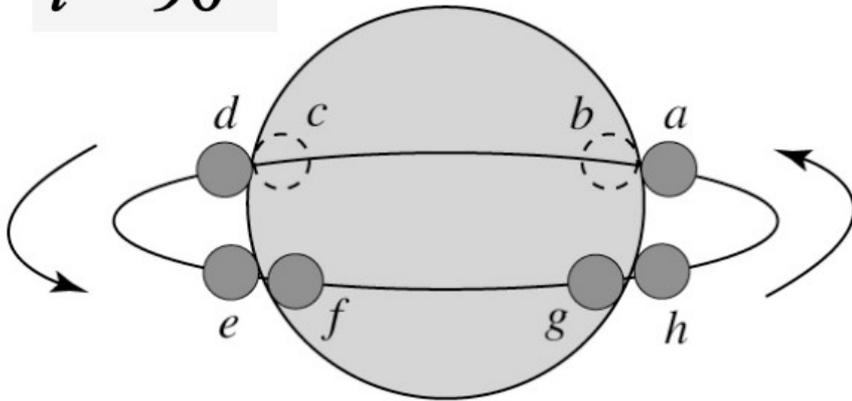
$$\begin{aligned} m_s &= 1.3 M_\odot \\ m_\ell &= 13.9 M_\odot \end{aligned}$$

Exemplo 7.3.1, segunda parte. Calcular os raios das 2 estrelas, sabendo que da análise da curva de luz:

$$t_b - t_a = 11,7 \text{ horas e}$$

$$t_c - t_b = 164 \text{ horas}$$

$$i = 90^\circ$$



Exemplo 7.3.1, segunda parte. Calcular os raios das 2 estrelas, sabendo que da análise da curva de luz:

$$t_b - t_a = 11,7 \text{ horas e}$$
$$t_c - t_b = 164 \text{ horas}$$

Usando a eq. (7.8) para a estrela *small*:

$$r_s = \frac{(v_{rs} + v_{rl})}{2} (t_b - t_a) = 7.6 \times 10^8 \text{ m} = 1.1 R_{\odot}$$

$$v_{rs} = 33 \text{ km/s e } v_{rl} = 3.1 \text{ km/s}$$

Exemplo 7.3.1, segunda parte. Calcular os raios das 2 estrelas, sabendo que da análise da curva de luz:

$$t_b - t_a = 11,7 \text{ horas e}$$
$$t_c - t_b = 164 \text{ horas}$$

Usando a eq. (7.8) para a estrela *small*:

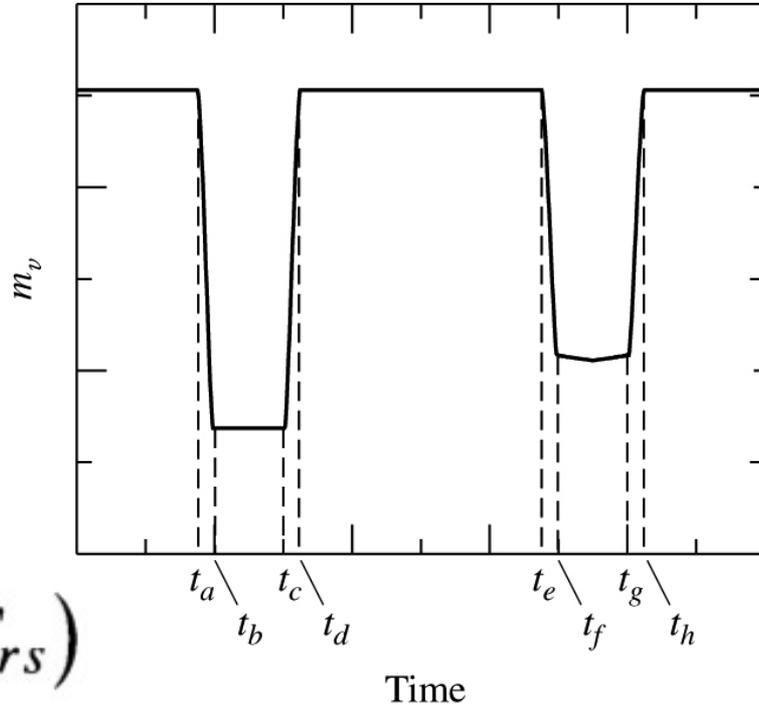
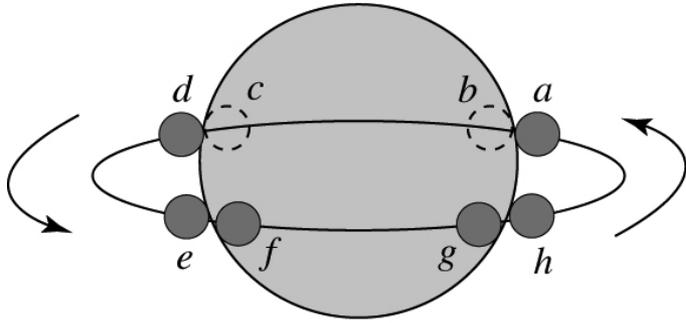
$$r_s = \frac{(v_{rs} + v_{rl})}{2} (t_b - t_a) = 7.6 \times 10^8 \text{ m} = 1.1 R_{\odot}$$

$$v_{rs} = 33 \text{ km/s e } v_{rl} = 3.1 \text{ km/s}$$

E a eq. (7.9) para a estrela *large*:

$$r_{\ell} = \frac{v}{2} (t_c - t_a) = r_s + \frac{v}{2} (t_c - t_b) \rightarrow r_{\ell} = 369 R_{\odot}$$

Determinação de razões de temperatura por meio de eclipses



$$F_r = F_{\text{surf}} = \sigma T_e^4$$

$$B_0 = k (\pi r_\ell^2 F_{r\ell} + \pi r_s^2 F_{rs})$$

Eclipse Primário: $B_p = k\pi r_\ell^2 F_{r\ell}$

s: small, *l*: large

Secundário: $B_s = k (\pi r_\ell^2 - \pi r_s^2) F_{r\ell} + k\pi r_s^2 F_{rs}$

$$\frac{B_0 - B_p}{B_0 - B_s} = \frac{F_{rs}}{F_{r\ell}}$$

$$\frac{B_0 - B_p}{B_0 - B_s} = \left(\frac{T_s}{T_\ell} \right)^4$$

Example 7.3.2. Further examination of the light curve of the binary system discussed in Example 7.3.1 provides information on the relative temperatures of the two stars. Photometric observations show that at maximum light the bolometric magnitude is $m_{\text{bol},0} = 6.3$, at the primary minimum $m_{\text{bol},p} = 9.6$, and at the secondary minimum $m_{\text{bol},s} = 6.6$. From Eq. (3.3), the ratio of brightnesses between the primary minimum and maximum light is

$$\frac{B_p}{B_0} = 100^{(m_{\text{bol},0} - m_{\text{bol},p})/5} = 0.048$$

Similarly, the ratio of brightnesses between the secondary minimum and maximum light is

$$\frac{B_s}{B_0} = 100^{(m_{\text{bol},0} - m_{\text{bol},s})/5} = 0.76$$

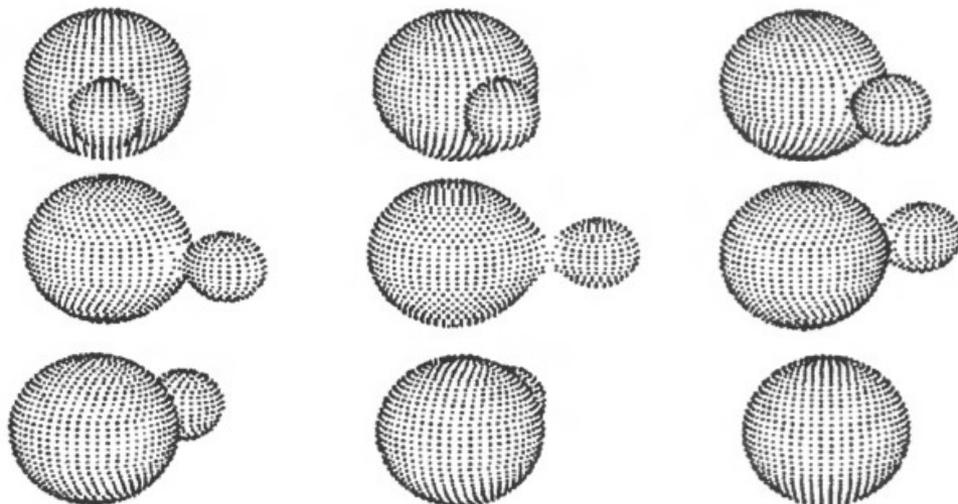
Now, by rewriting Eq. (7.10), we find that the ratio of the radiative fluxes is

$$\frac{F_{rs}}{F_{r\ell}} = \frac{1 - B_p/B_0}{1 - B_s/B_0} = 3.97$$

Finally, from Eq. (3.18),

$$\frac{T_s}{T_\ell} = \left(\frac{F_{rs}}{F_{r\ell}} \right)^{1/4} = 1.41$$

Modelagem de binárias por computador



Programas do livro:

[http://wps.aw.com/
aw_carroll_ostlie_astro_2e/
48/12319/3153834.cw/index.html](http://wps.aw.com/aw_carroll_ostlie_astro_2e/48/12319/3153834.cw/index.html)

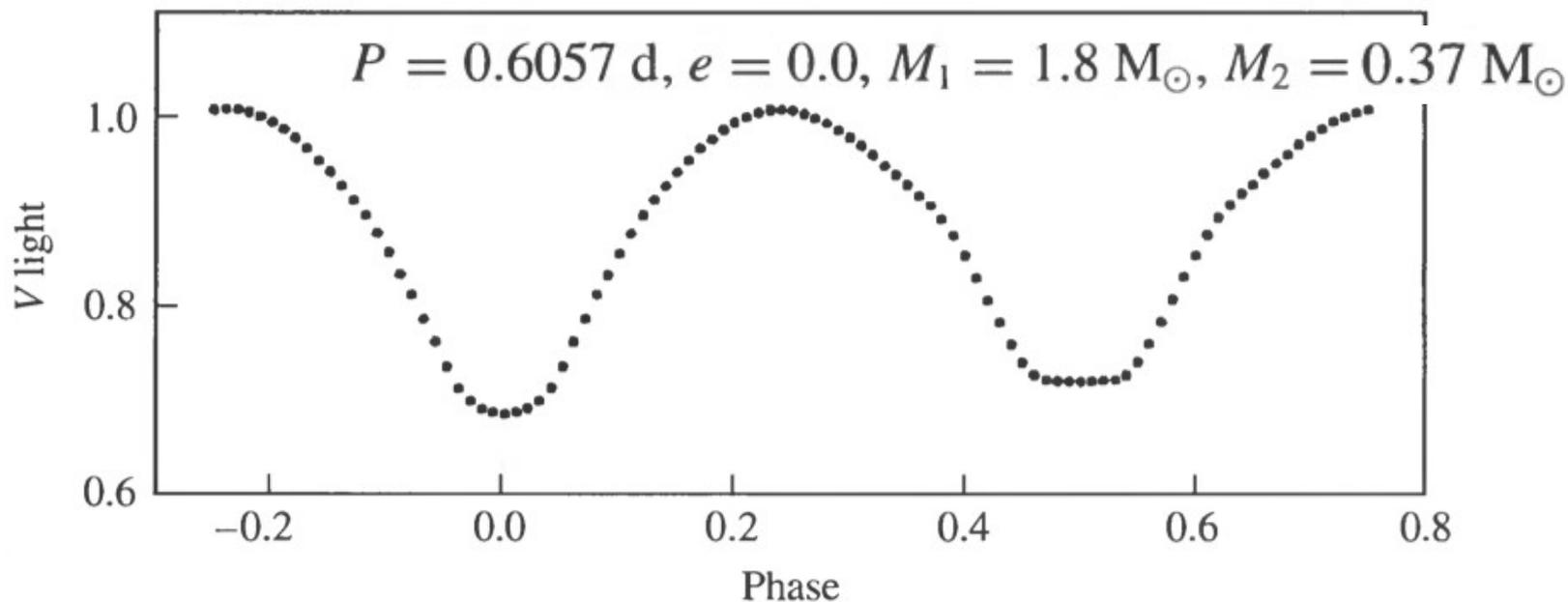
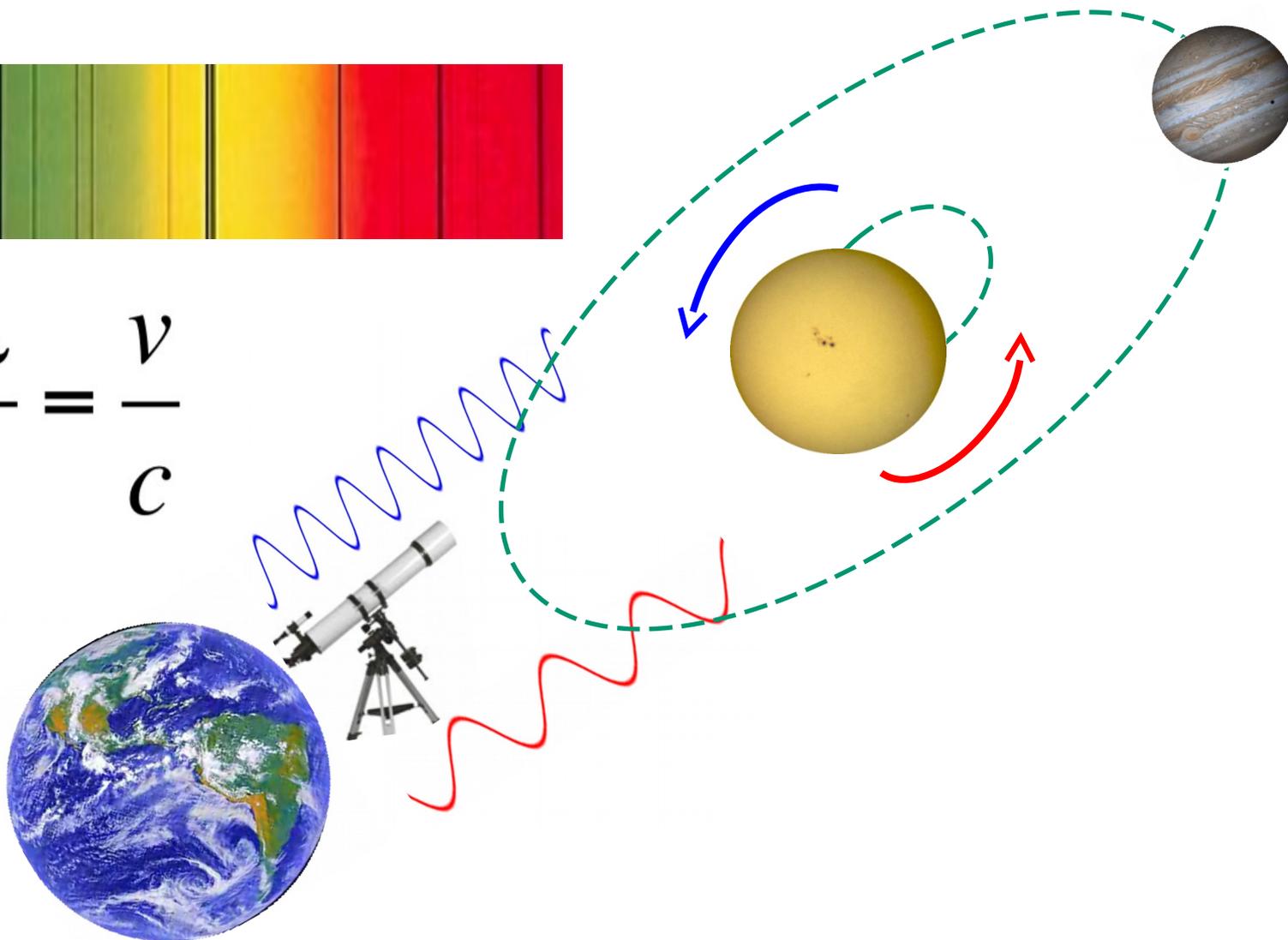


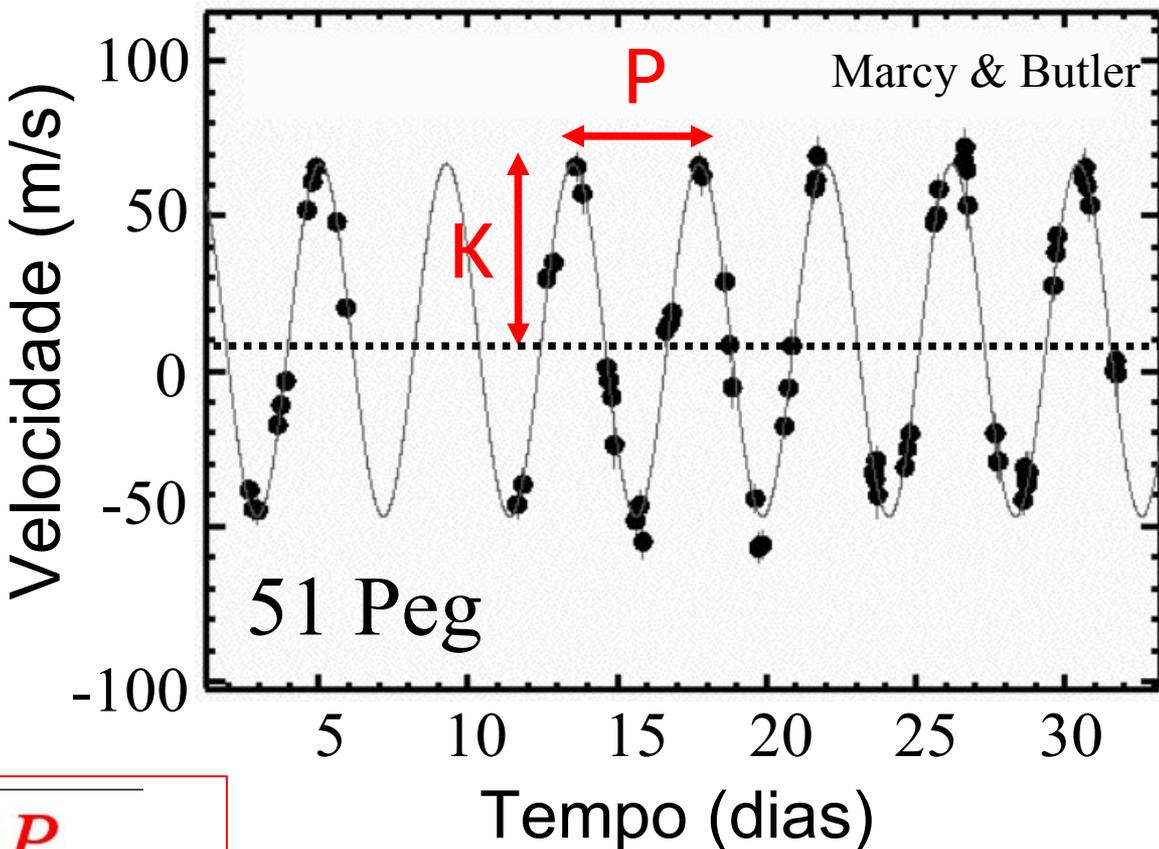
FIGURE 7.11 A synthetic light curve of RR Centauri, an eclipsing binary star system for which the two components are in close contact.

7.4. A busca por exoplanetas. Detecção de planetas pelo efeito Doppler



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





1o exoplaneta:
Mayor & Queloz (1995)

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

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

$$e = 0,007$$

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

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

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

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

Exemplo 7.4.1. Velocidade devida a Júpiter.

$P = 11,86$ anos, semi-eixo maior $a = 5,2$ 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: $v_{\odot} = \frac{m_J}{M_{\odot}} v_J = 12.5 \text{ m s}^{-1}$



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[★]

M. Bedell^{1,★★}, J. Meléndez², J. L. Bean¹, I. Ramírez³, M. Asplund⁴, A. Alves-Brito⁵

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

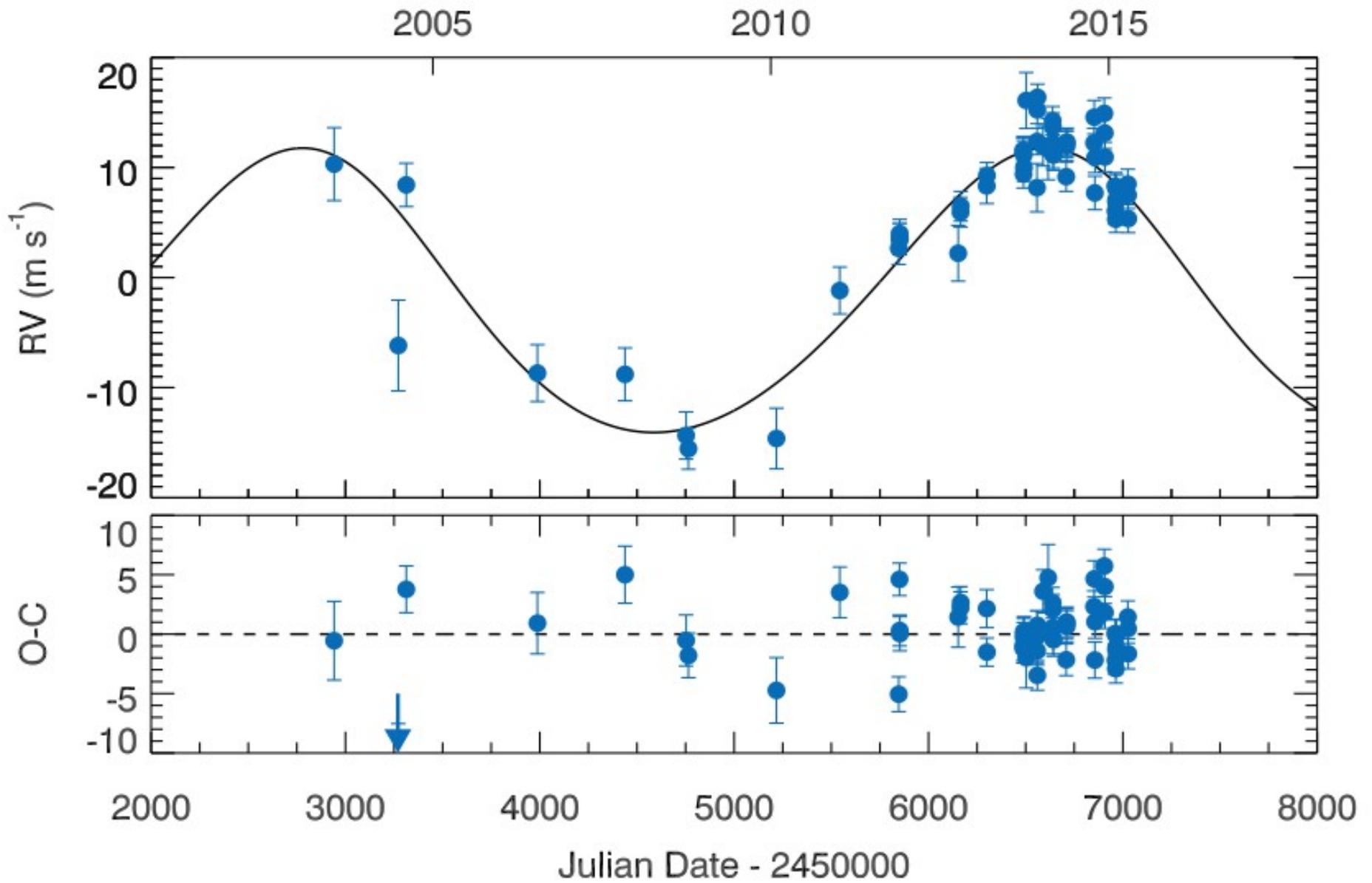
² Departamento de Astronomia do IAG/USP, Universidade de São Paulo, Rua do Matão 1226, Cidade Universitária, 05508-900 São Paulo, SP, Brazil

³ McDonald Observatory and Department of Astronomy,

⁴ Research School of Astronomy and Astrophysics, The

⁵ Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande

Parameter		Value
P	[days]	3830
K	[m s ⁻¹]	12.9
e		0.10
$\omega + M_0$	[rad]	3.0
$\omega - M_0$	[rad]	2.4
α	[m s ⁻¹ (unit S_{HK}) ⁻¹]	160
C	[m s ⁻¹]	-11.0
σ_J	[m s ⁻¹]	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”

Ampla divulgação da descoberta do Júpiter gêmeo na imprensa nacional e internacional



Newly discovered Jupiter twin hints at new solar system similar to Earth's

By Ben Brumfield, CNN
 Updated 1434 GMT (2134 HKT) July 16, 2015

Jupiter's 'Twin' Found: Is This Solar System 2.0?

by Elizabeth Howell, Space.com Contributor | July 16, 2015 08:35am ET



Encuentran gemelos de Júpiter y del Sol

Las posibilidades de encontrar un sistema planetario como el nuestro parecen cada vez más cercanas.

Scoperto un gemello di Giove che ruota attorno al sosia del sole

16/07/2015 - 15:35 - Un gemello di Giove orbita attorno a una stella simile al nostro sole. A scoprirlo è stato un team internazionale di astronomi utilizzando il telescopio da 3,6 metri dell'Eso. L'esopianeta si trova a una distanza dalla sua stella (HIP 11915) simile a ...



O primeiro exoplaneta brasileiro

POR SALVADOR NOGUEIRA
 15/07/15 @ 15:22

O ESO (Observatório Europeu do Sul) escolheu o dia seguinte à passagem da primeira espaçonave enviada da Terra por Plutão para anunciar a descoberta do primeiro exoplaneta brasileiro. Parabéns.



O GLOBO
 Descoberto planeta extrassolar 'gêmeo' de Júpiter

GALILEU Astrônomos brasileiros descobrem gêmeo de Júpiter orbitando gêmea do Sol

Busca por um Sistema Solar 2.0 acaba de ganhar um de seus mais promissores candidatos

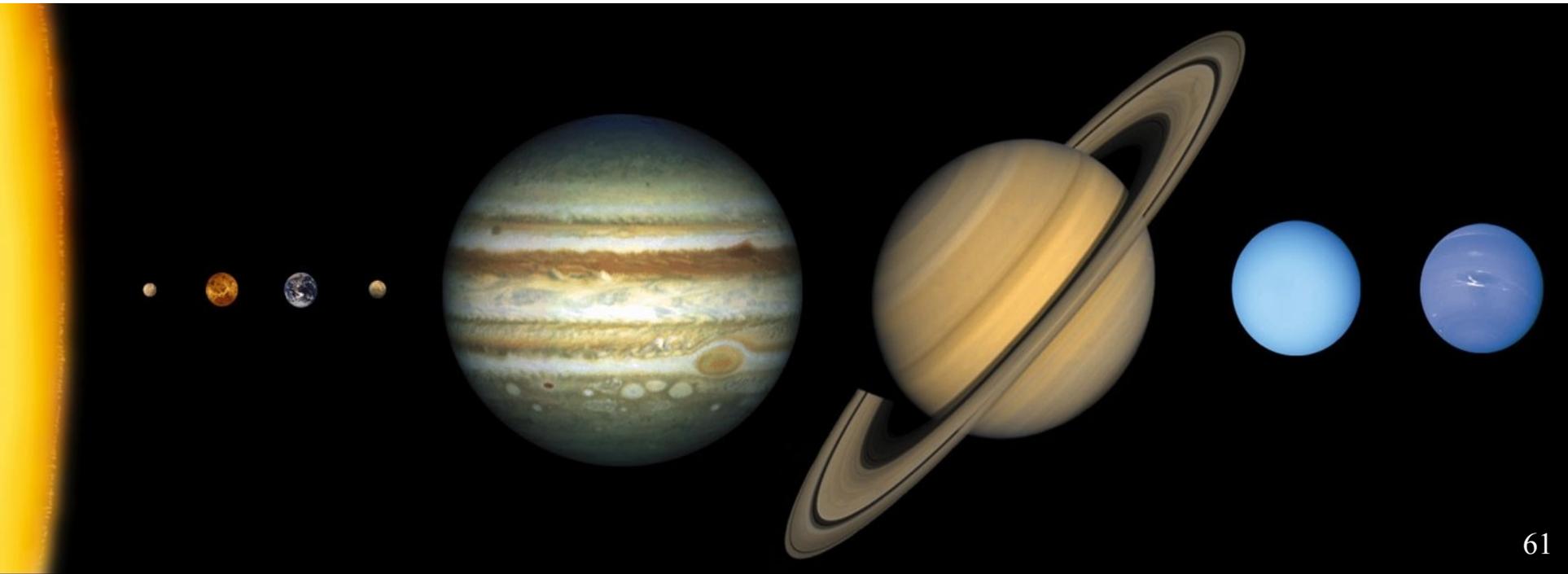
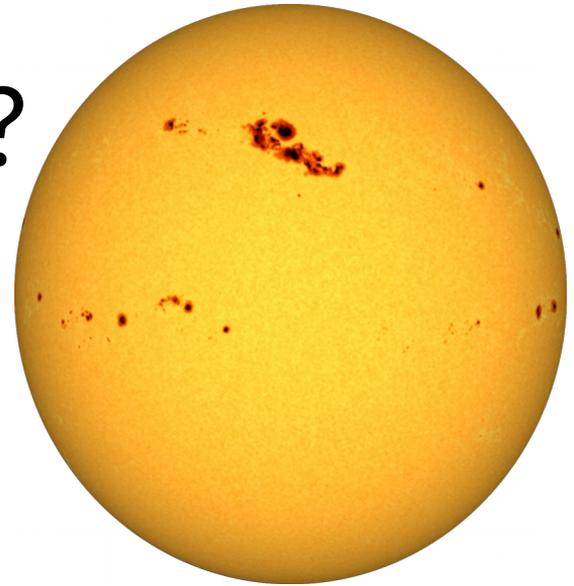


'Novo Júpiter' dá pista para Terra 2.0

GIOVANA GIBARDI - O ESTADO DE S. PAULO
 15 Julho 2015 | 12h:38
 Gêmeo do gigante do Sistema Solar orbita estrela parecida com o Sol - sugere a existência de um planetinha como o nosso

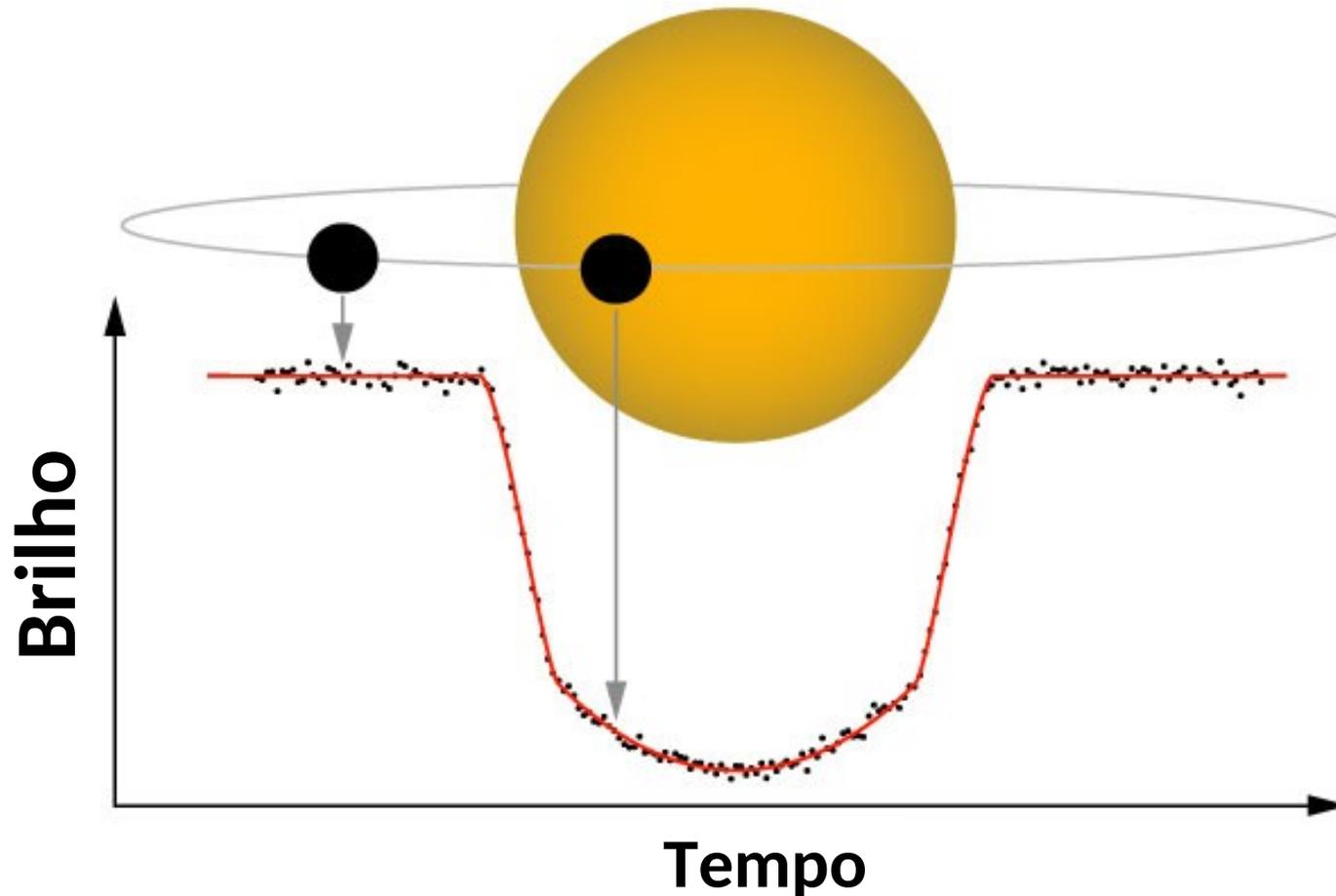
Como detectar a Terra 2.0?

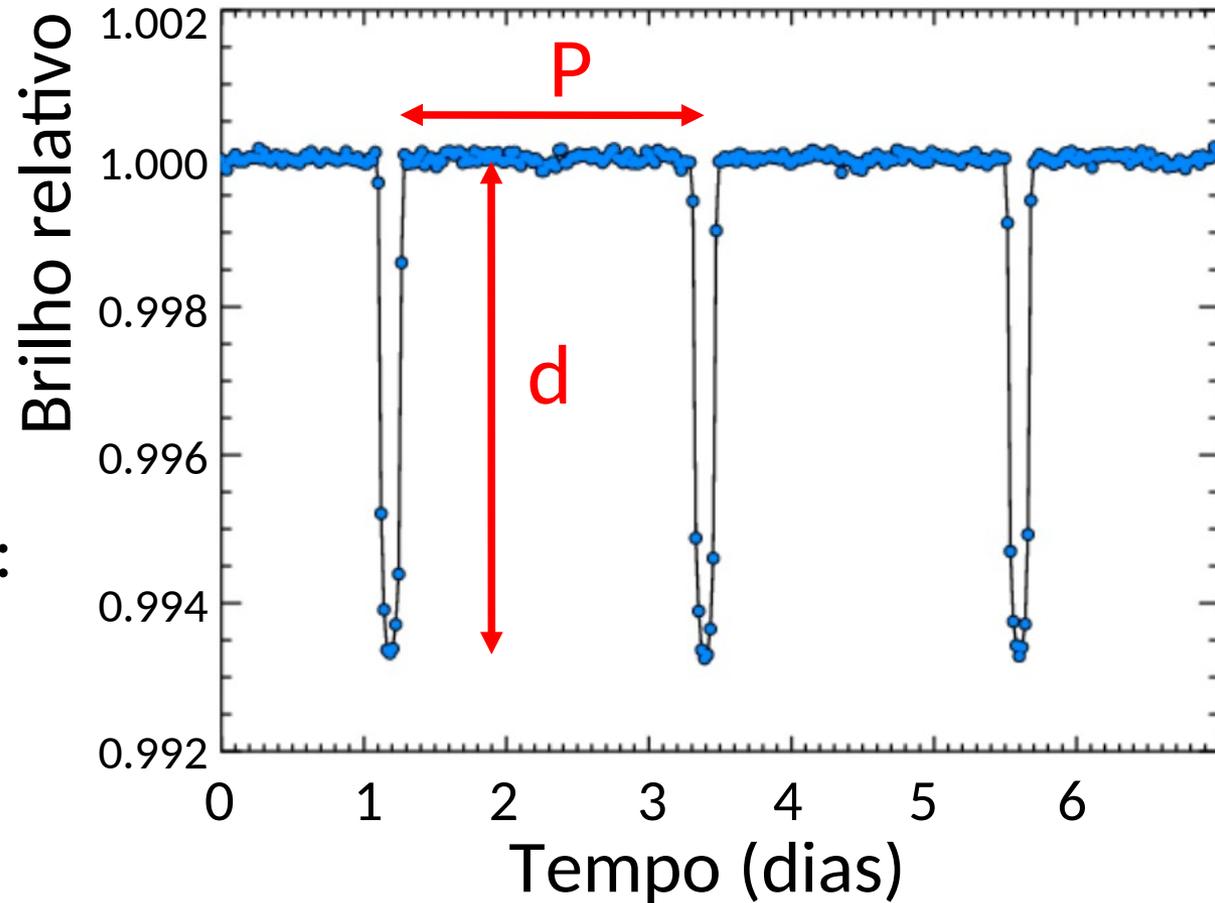
- Atual instrumentação: 1m/s
- Efeito da Terra 9 cm/s
- **Desafios: “ruído” estelar**
(atividade magnética) ~ 1m/s



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**

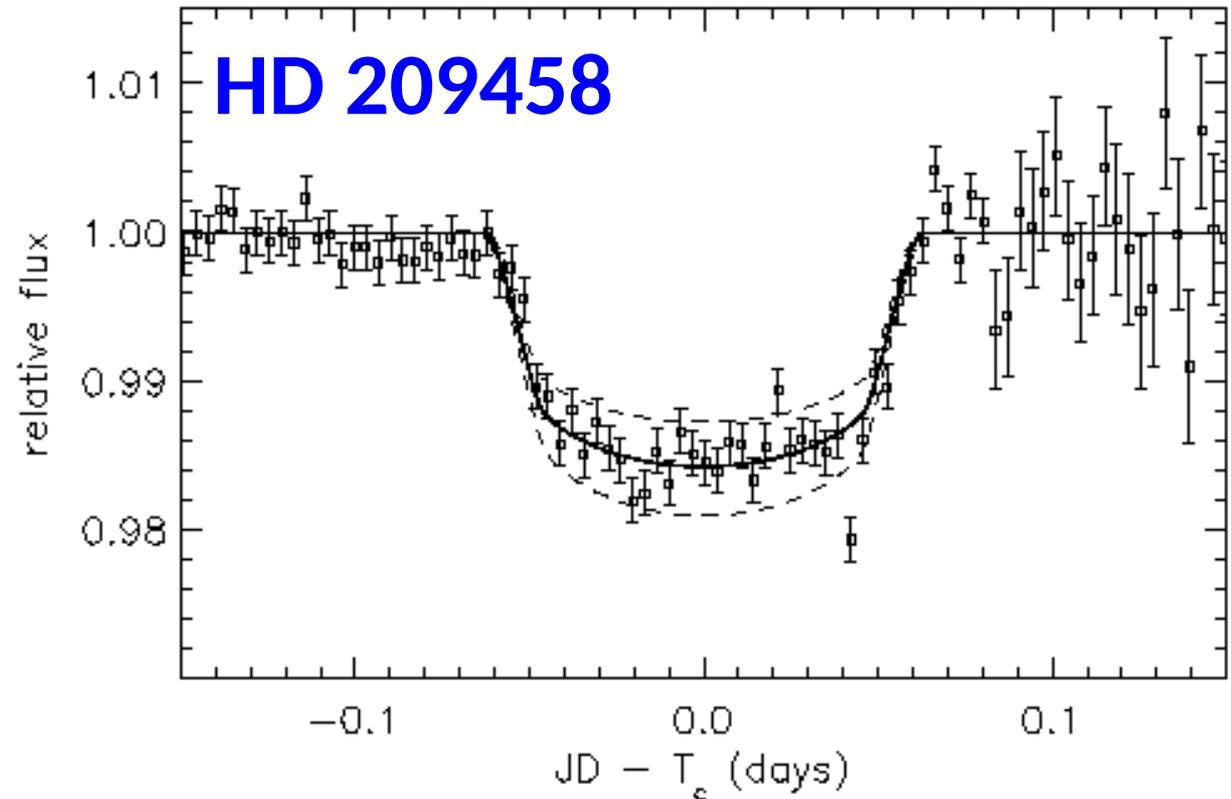
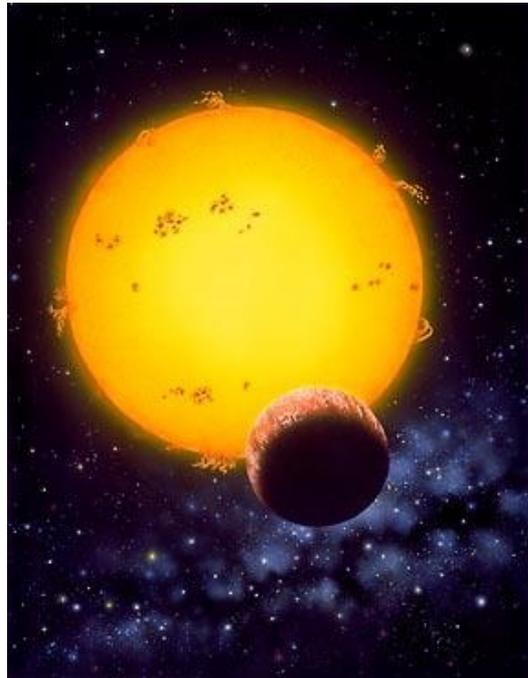
- raio do planeta R_p

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

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,^{1,2} Timothy M. Brown,² David W. Latham,¹ & Michel Mayor³

Trânsito observado do espaço com o Hubble

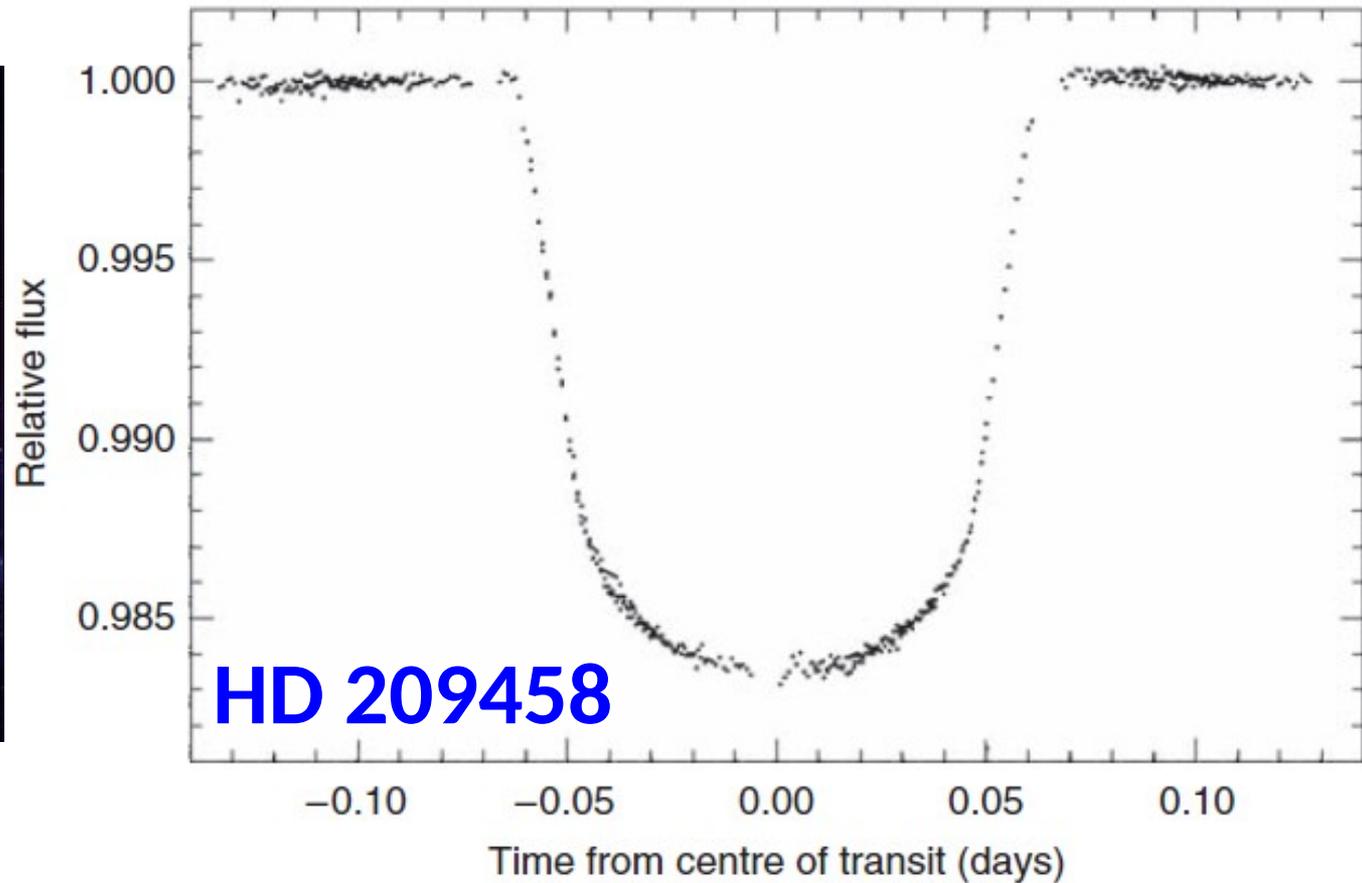
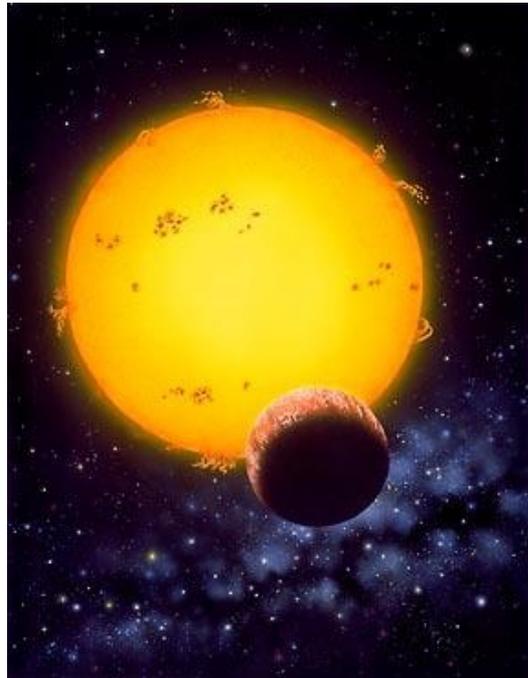
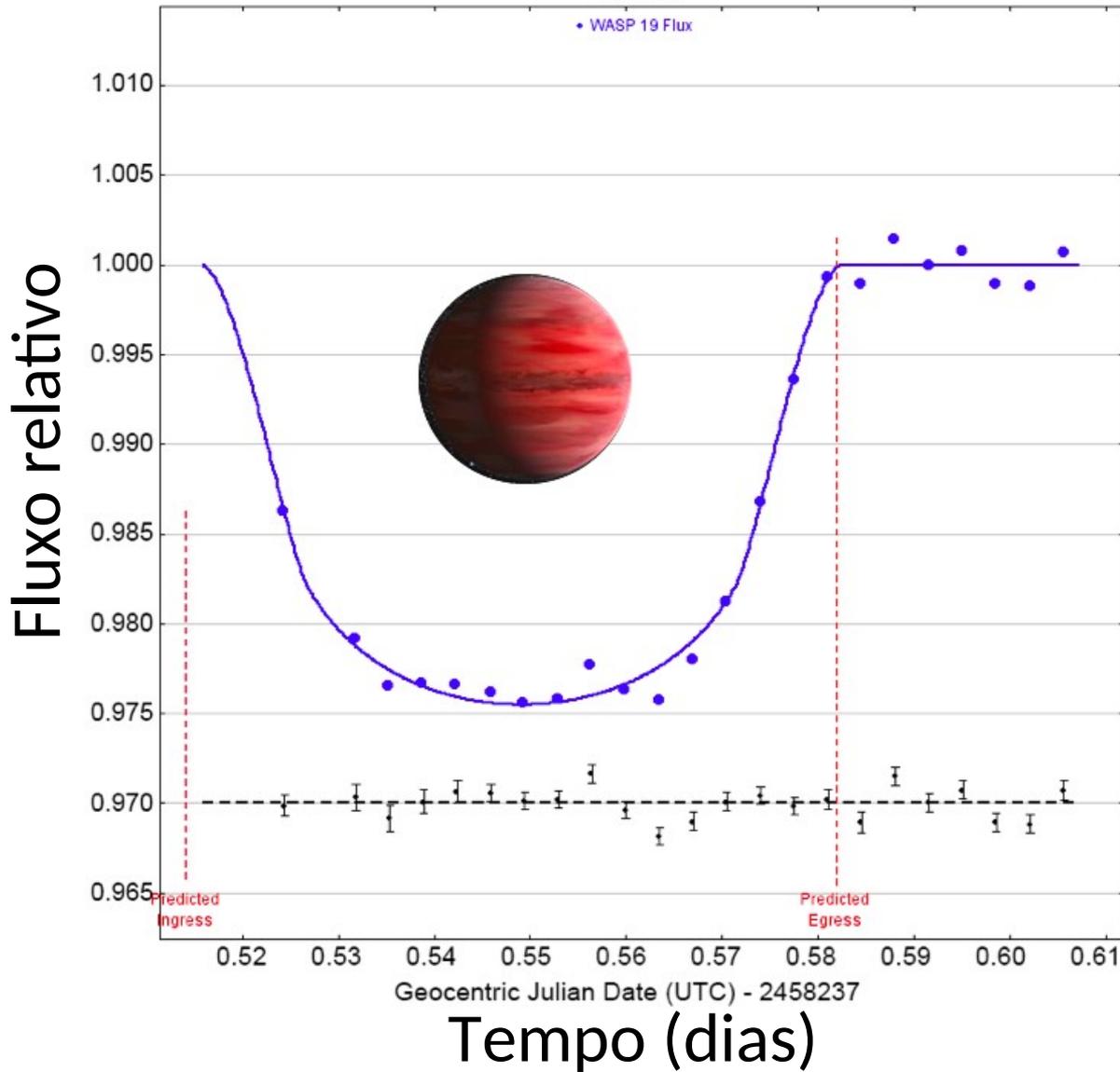


Figure 1.1 Eclipse of HD 209458 by its low-mass, presumed planetary, companion. The light curve has been combined from four separate recordings in April and May 2000 using the Imaging Spectrograph of the Hubble Space Telescope integrating over a yellow–orange region of the spectrum. Individual points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

Trânsito no OPD/LNA (Brazópolis)



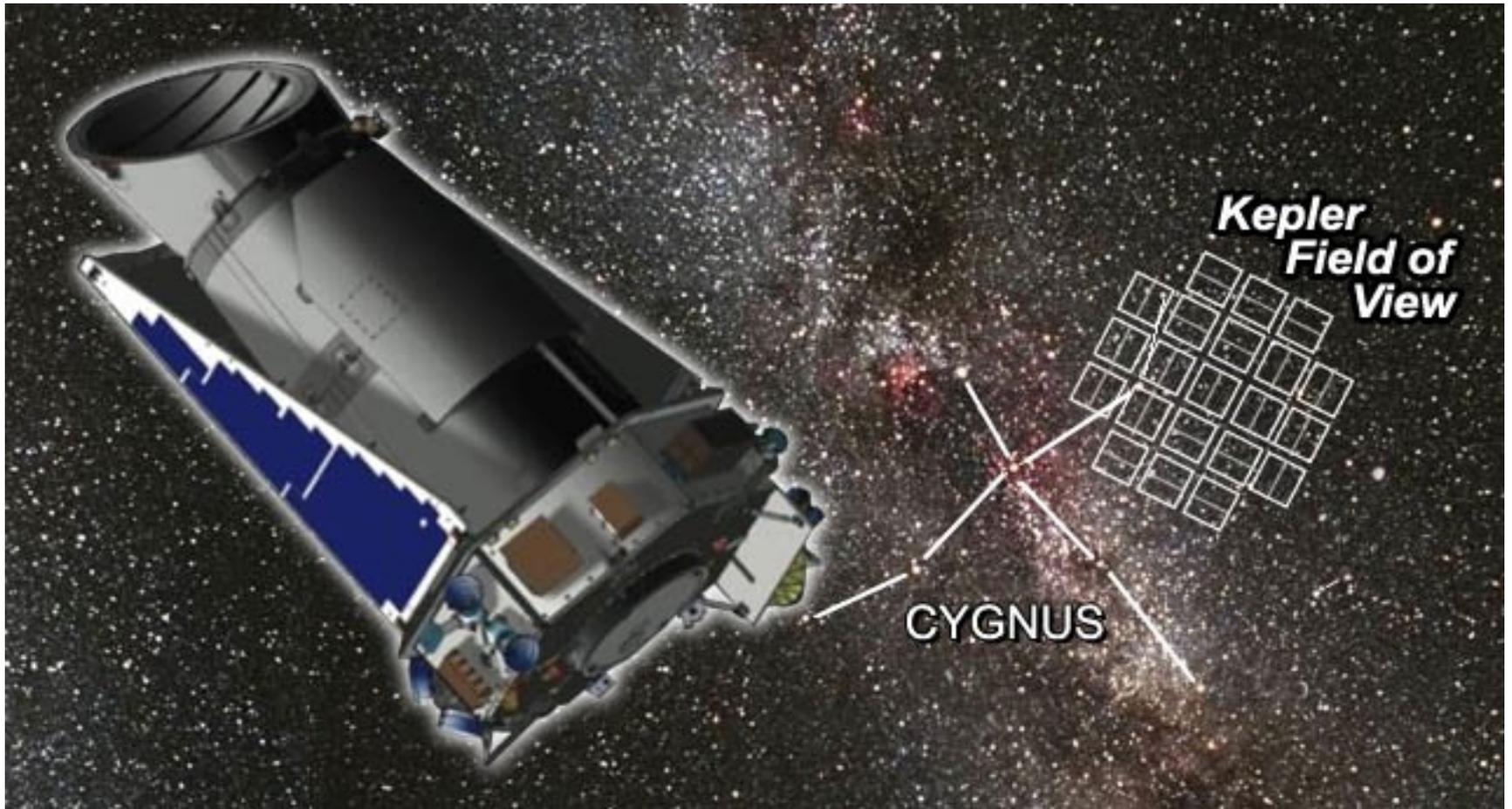
Exoplaneta conhecido, WASP 19

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

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

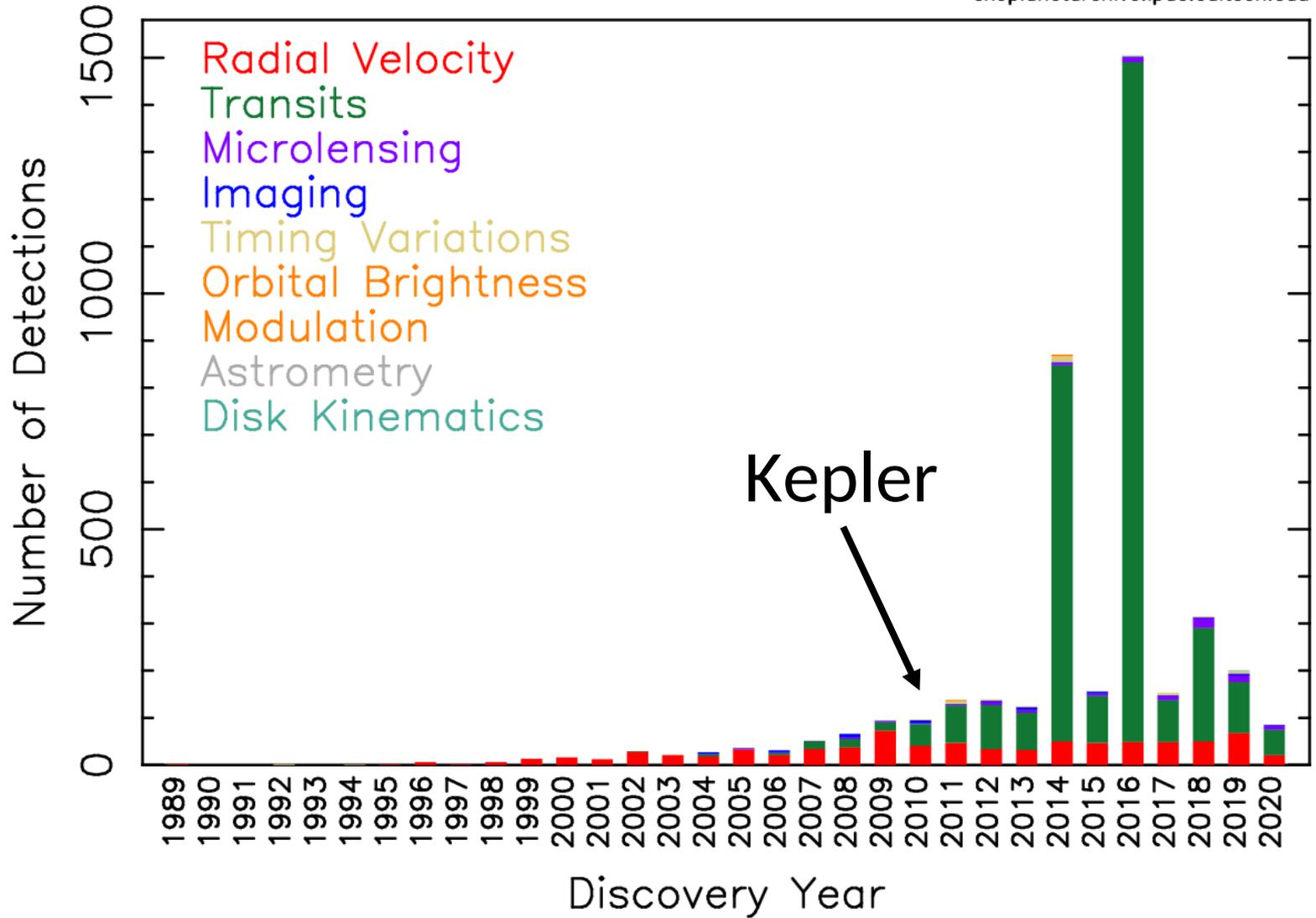
Telescópio espacial Kepler (0,95 m)

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



Detections Per Year

13 Aug 2020
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu



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

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

