

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

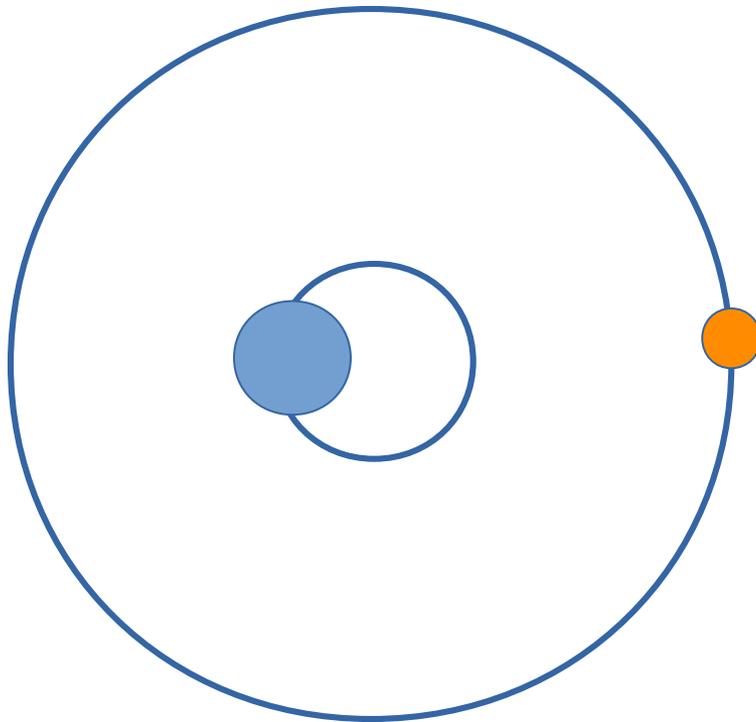
7.4 A busca por planetas extra-solares



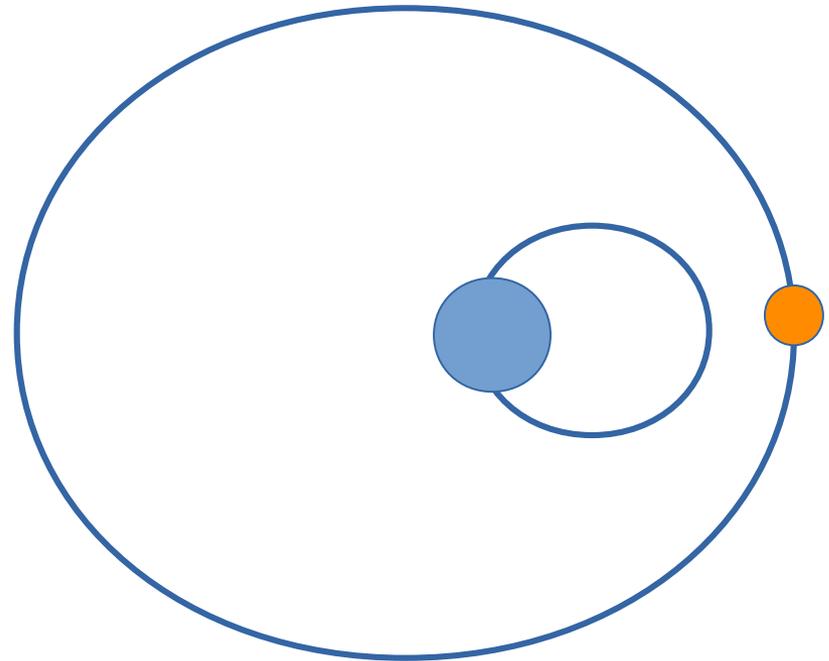
Prof. Dr. Jorge Meléndez (IAG-USP)

Estrelas binárias com razão de massas $m_1/m_2 = 3,6$

$e=0$



$e=0,4$



7.1 Classificação dos Sistemas Binários

- **Binárias aparentes** (*dupla óptica*) → não formam um sistema ligado → efeito de projeção.

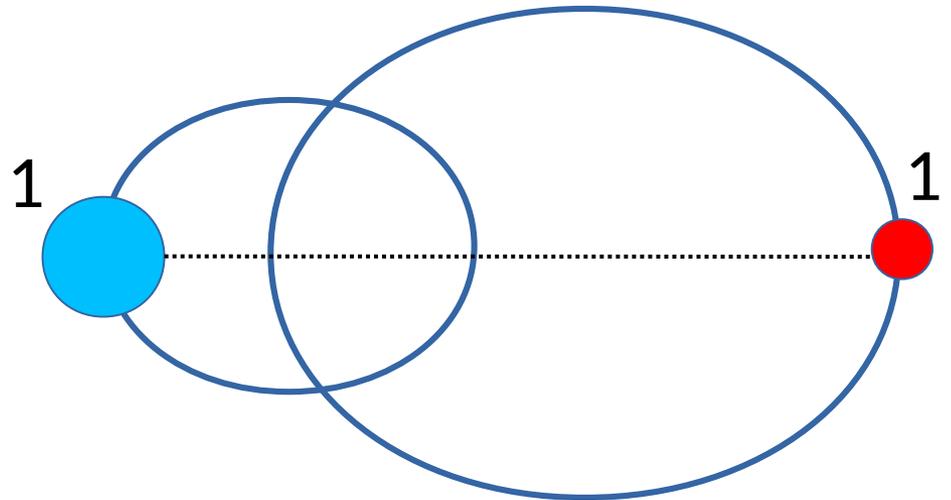


<http://planetfacts.org/>

7.1 Classificação dos Sistemas Binários

- **Binária visual** → estudo de seu movimento → as estrelas estão fisicamente associadas.

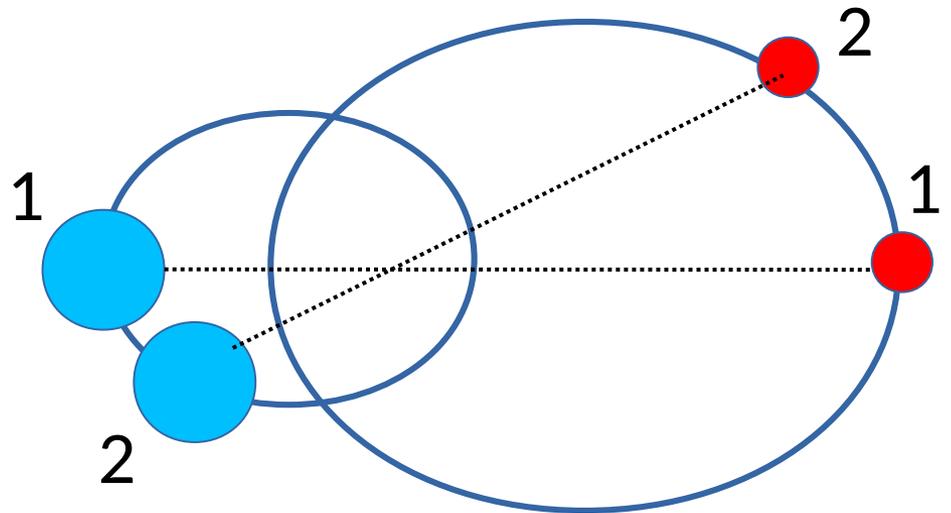
Exemplo de binária visual.
O período e as estrelas binárias podem ser observados diretamente.



7.1 Classificação dos Sistemas Binários

- **Binária visual** → estudo de seu movimento → as estrelas estão fisicamente associadas.

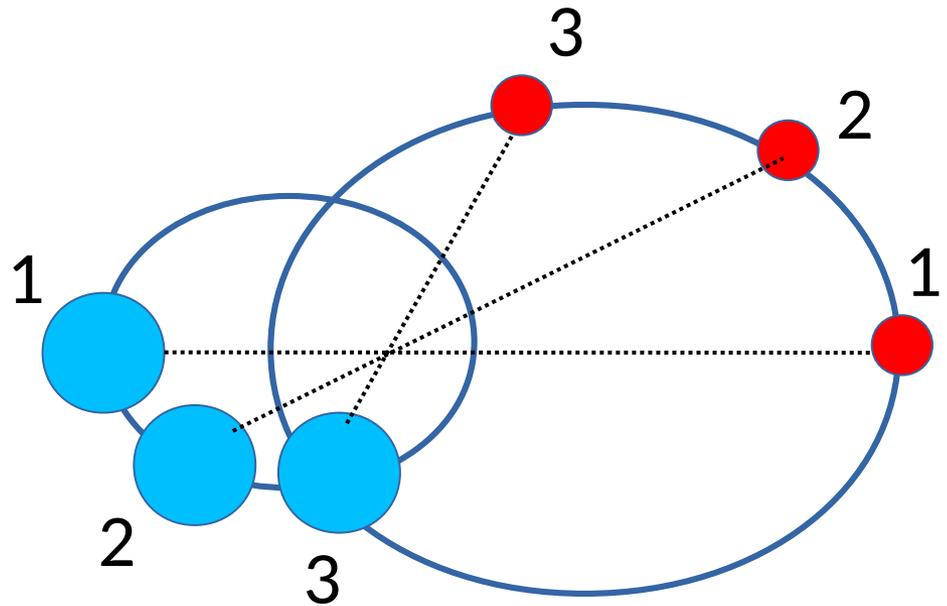
Exemplo de binária visual.
O período e as estrelas binárias podem ser observados diretamente.



7.1 Classificação dos Sistemas Binários

- **Binária visual** → estudo de seu movimento → as estrelas estão fisicamente associadas.

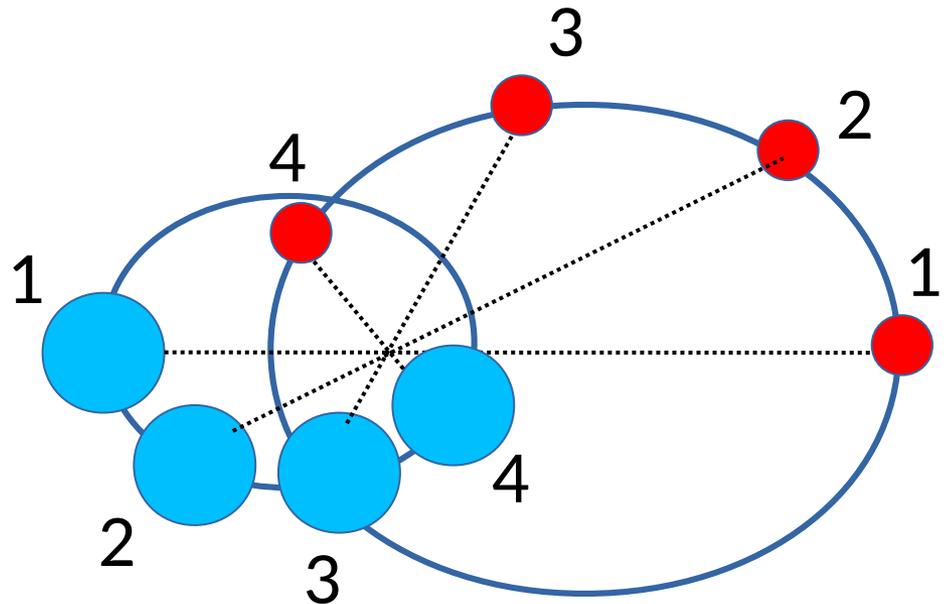
Exemplo de binária visual.
O período e as estrelas binárias podem ser observados diretamente.



7.1 Classificação dos Sistemas Binários

- **Binária visual** → estudo de seu movimento → as estrelas estão fisicamente associadas.

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



Binárias Visuais

A separação angular no movimento orbital deve ser grande o suficiente ($> 1''$) para resolver a duplicidade
→ períodos orbitais longos (de anos até milhares de anos).
Geralmente são sistemas relativamente próximos ao Sol.

Exemplo: γ Virginis, $P = 183$ anos, distância à Terra = 38 anos-luz



Feb/2003, Sep. $0,85''$

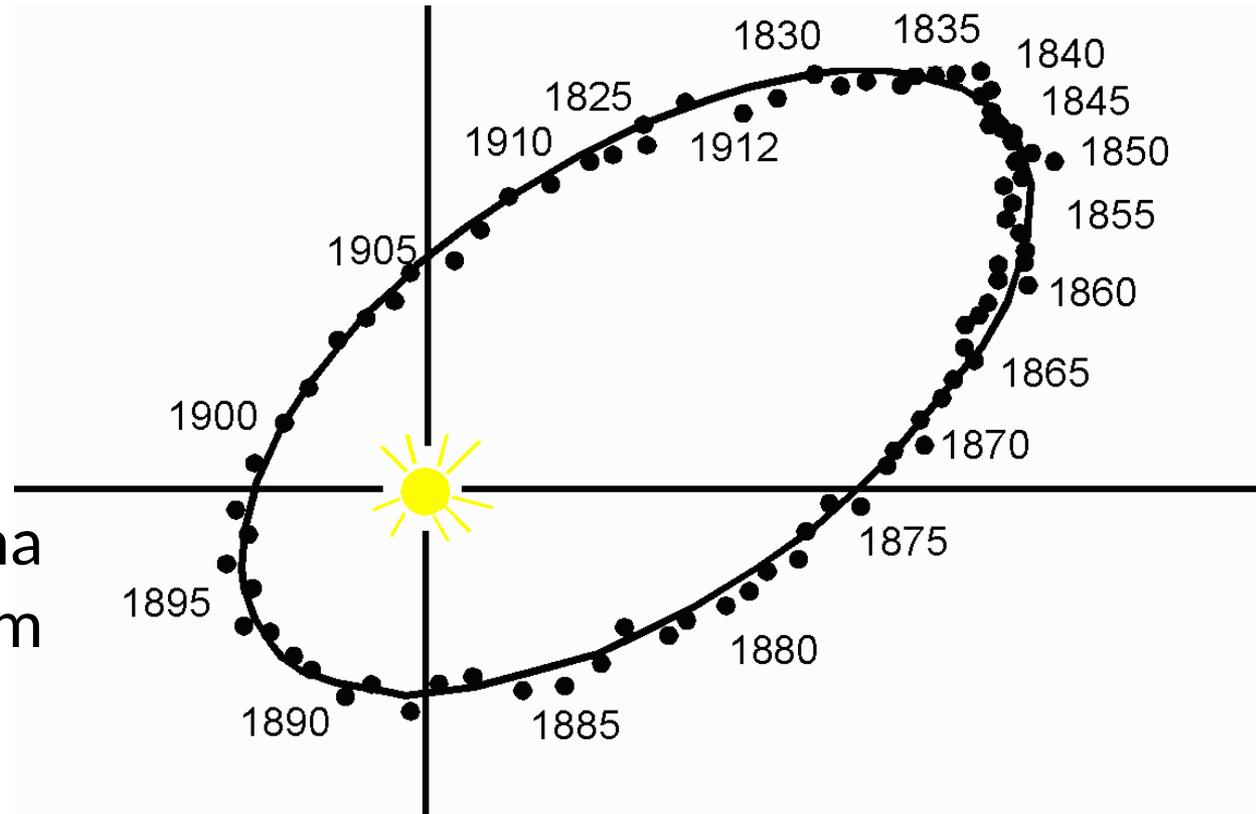
Abril/2005, Sep. $0,35''$

Mai/2018, Sep. $2,5''$

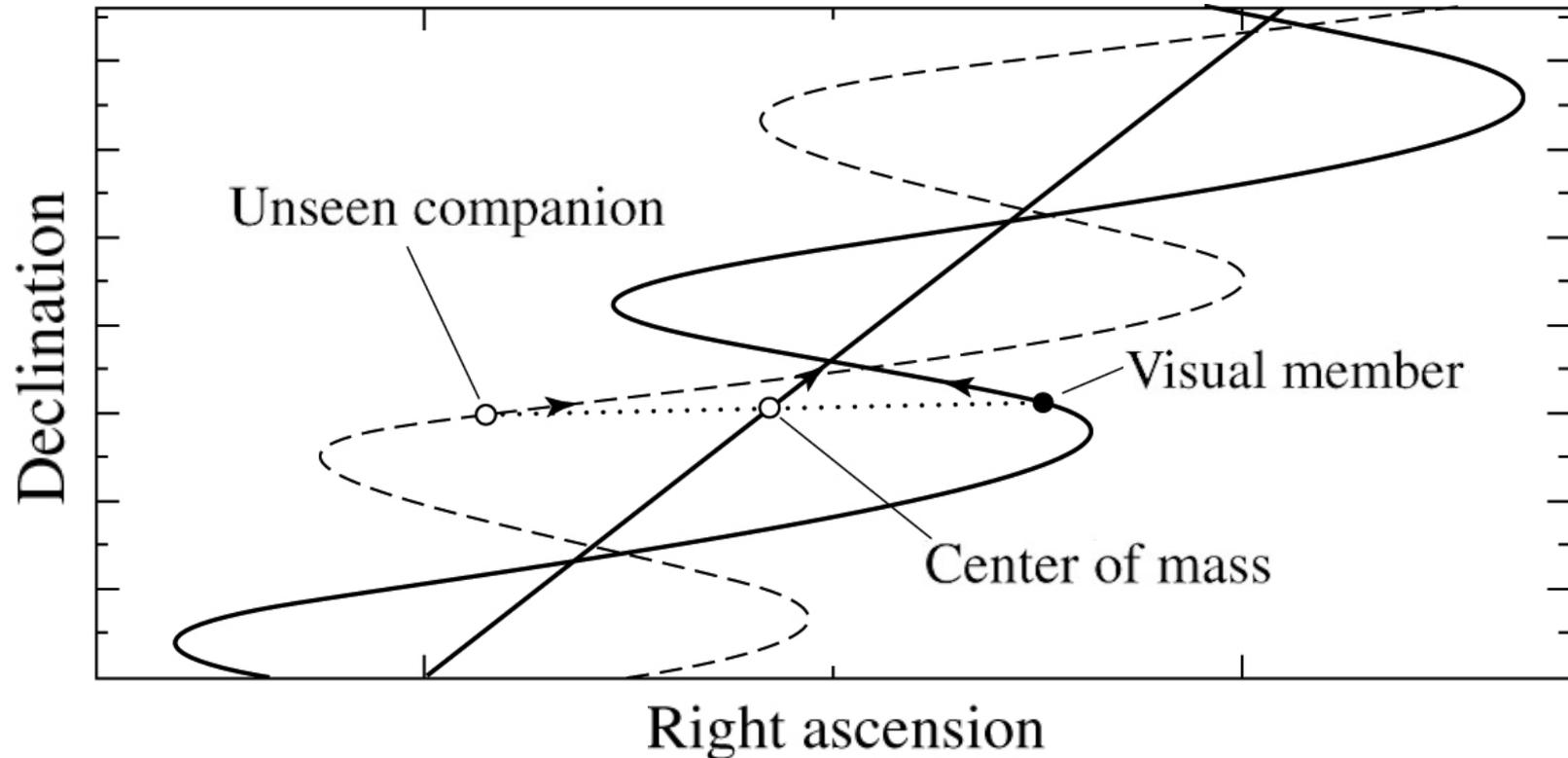
Binárias Visuais

Exemplo: Sistema binário 70 Ophiuchi

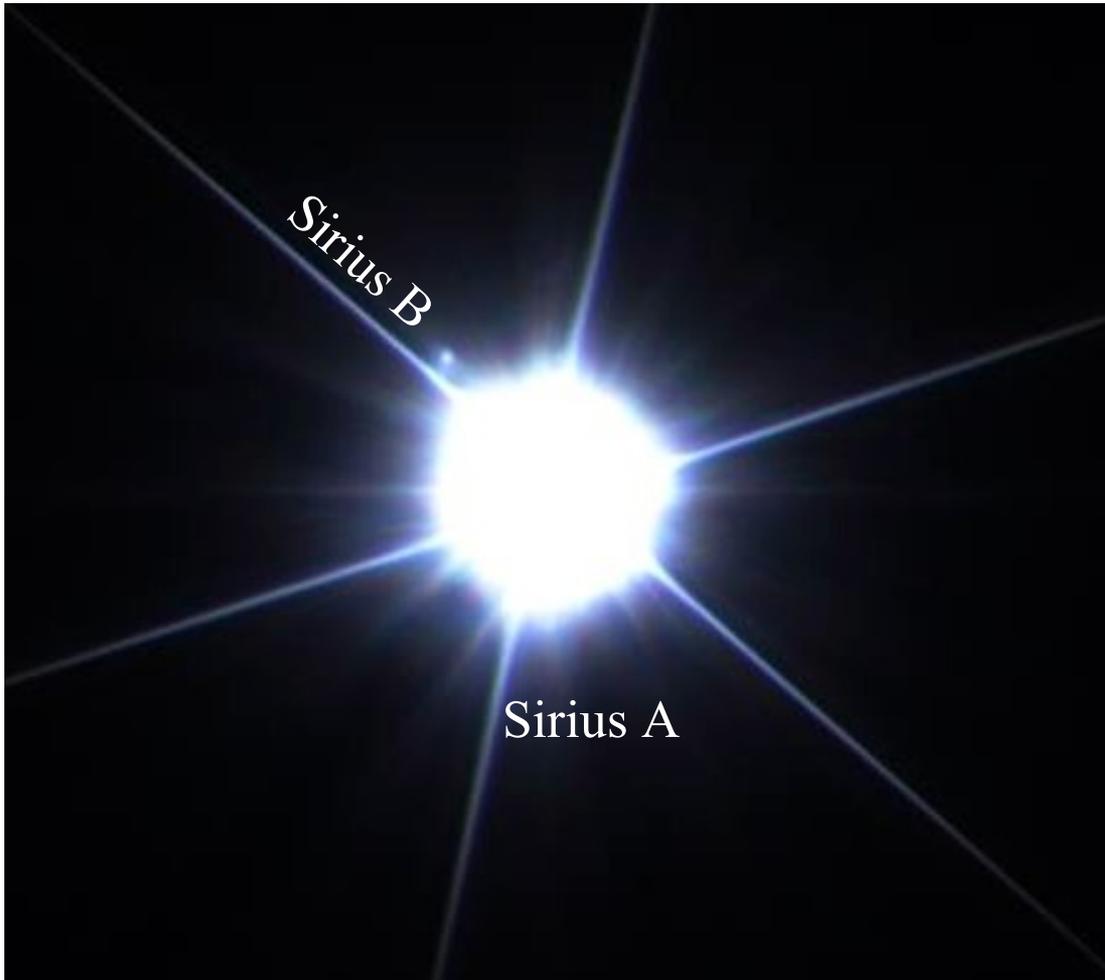
À medida que o tempo passa, a posição relativa entre as estrelas é marcada como um ponto, traçando uma órbita aparente, com período de 88 anos



- **Binária astrométrica** → apenas uma estrela observada c/ telescópio, mas nota-se um movimento oscilatório



Sirius: exemplo de binária astrométrica



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

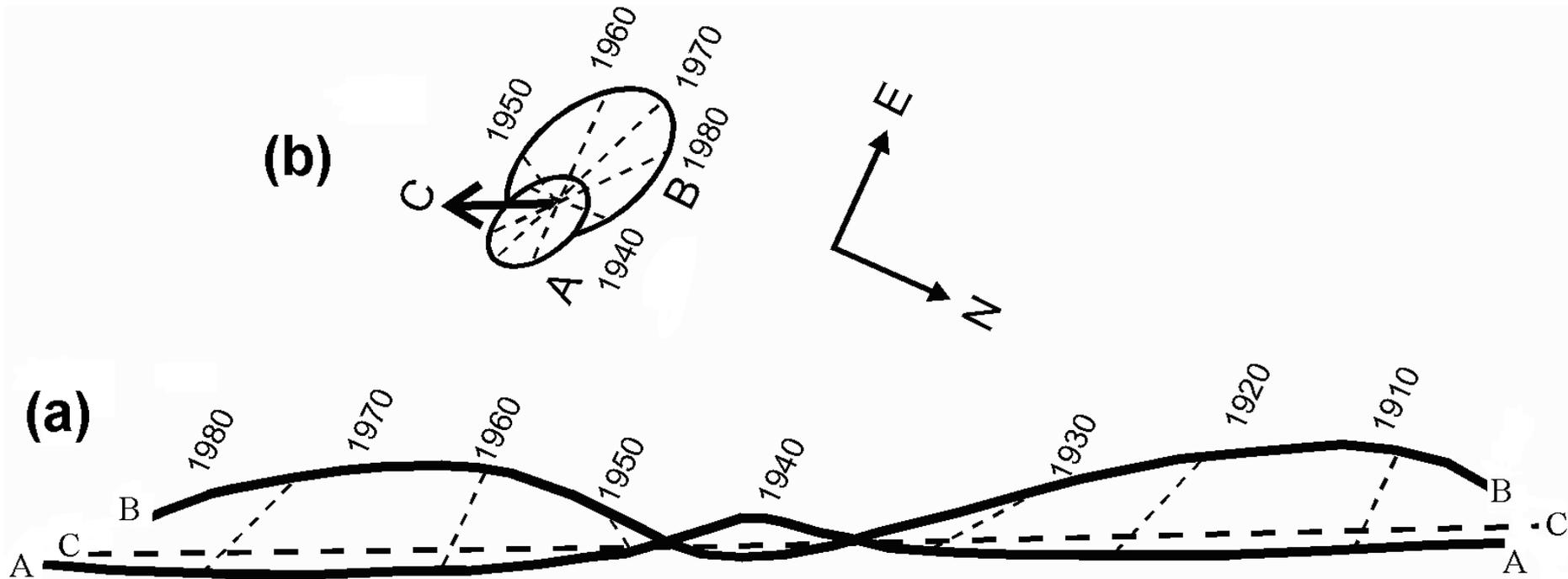
A componente B foi deduzida antes de ser observada, pela alteração causada no movimento próprio de Sirius A.

11/3/2017

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

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

Binárias Astrométricas. Exemplo: sistema Sirius

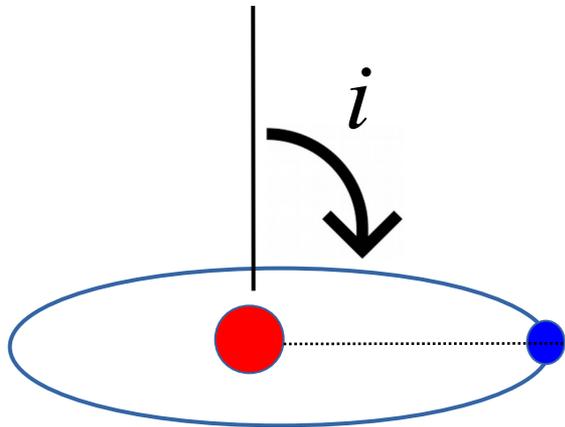


(a) Movimentos aparentes de Sirius A e B, e do centro de massa C, em relação às estrelas de fundo

(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

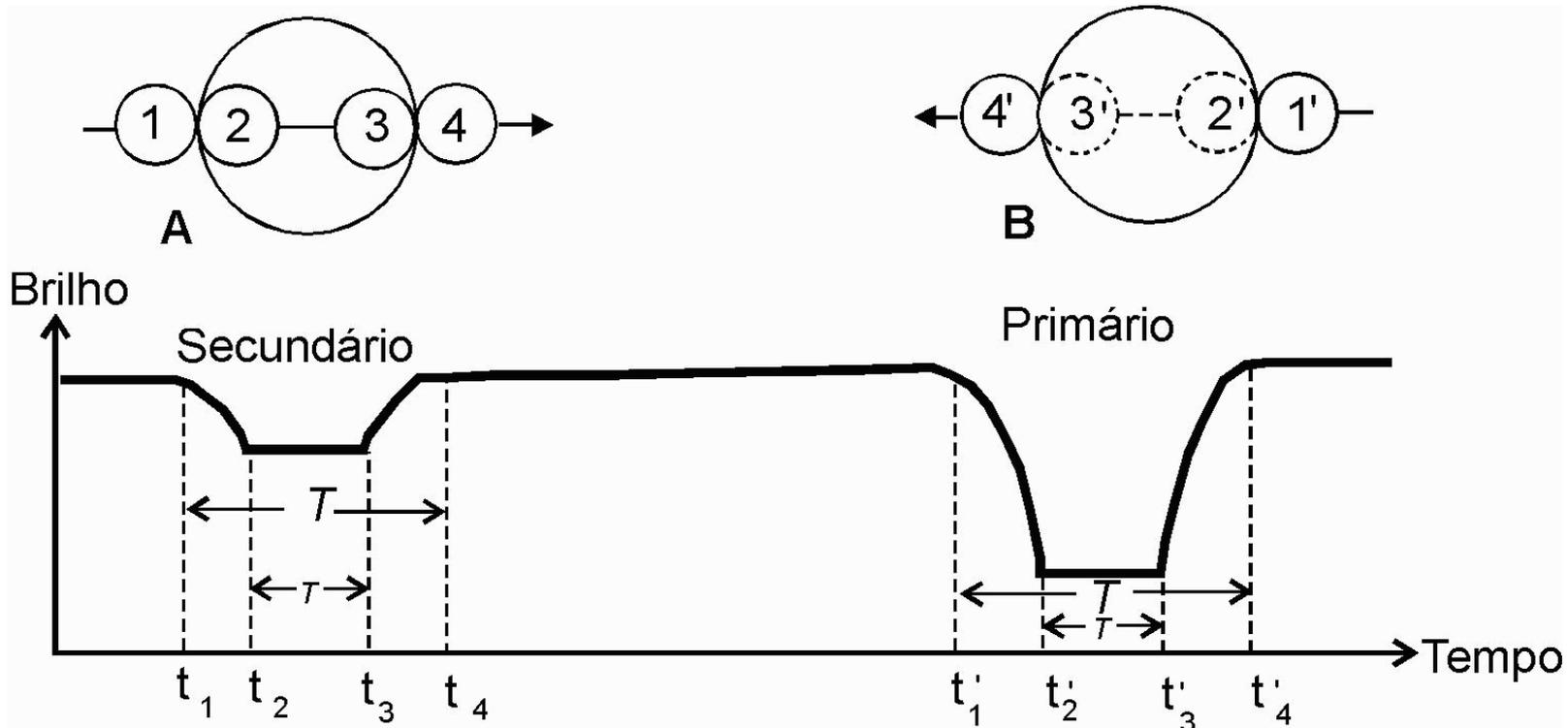


Se o ângulo de inclinação i da órbita de um sistema duplo é $\sim 90^\circ$, as estrelas podem se eclipsar



Binárias Eclipsantes

A curva de luz mostra a **variação temporal do brilho** (fluxo ou magnitude) da binária



Os 4 pontos de contato são numerados e definem a duração do eclipse

2 tipos de mínimos na curva de luz de binárias eclipsantes

We see light from both stars A and B.



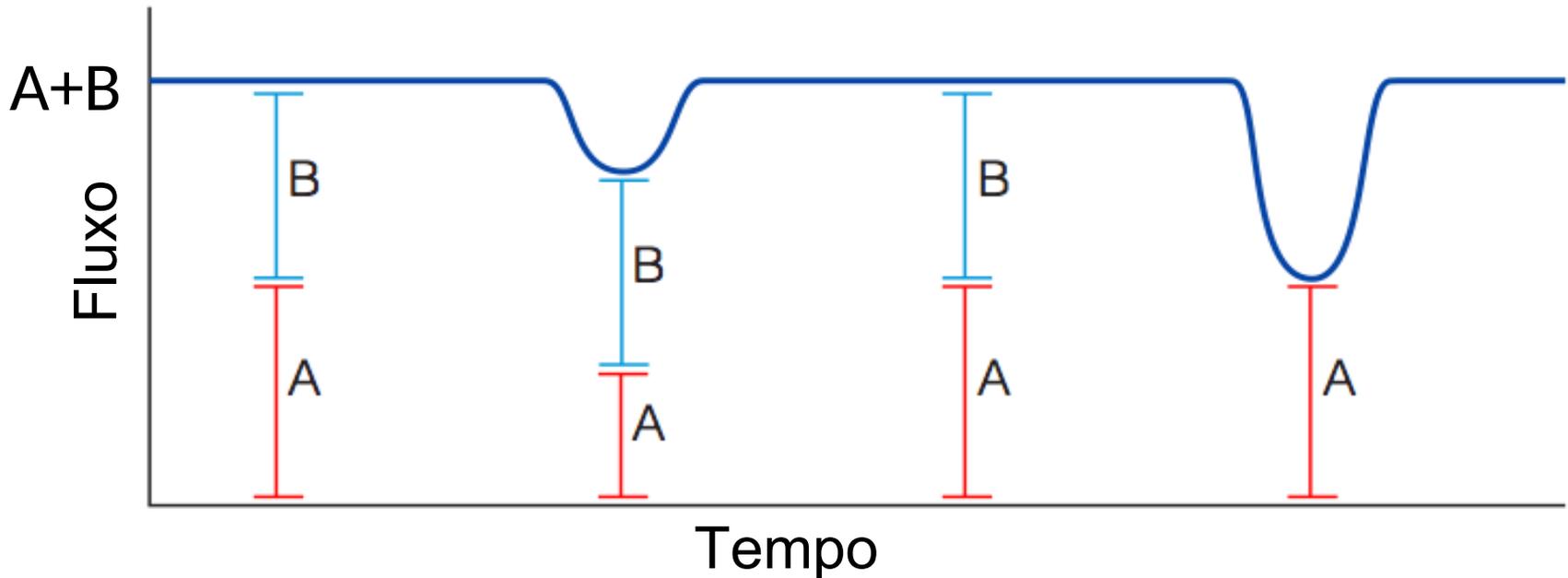
Estrela **quente** passa na frente da **fria** → **eclipse secundário**



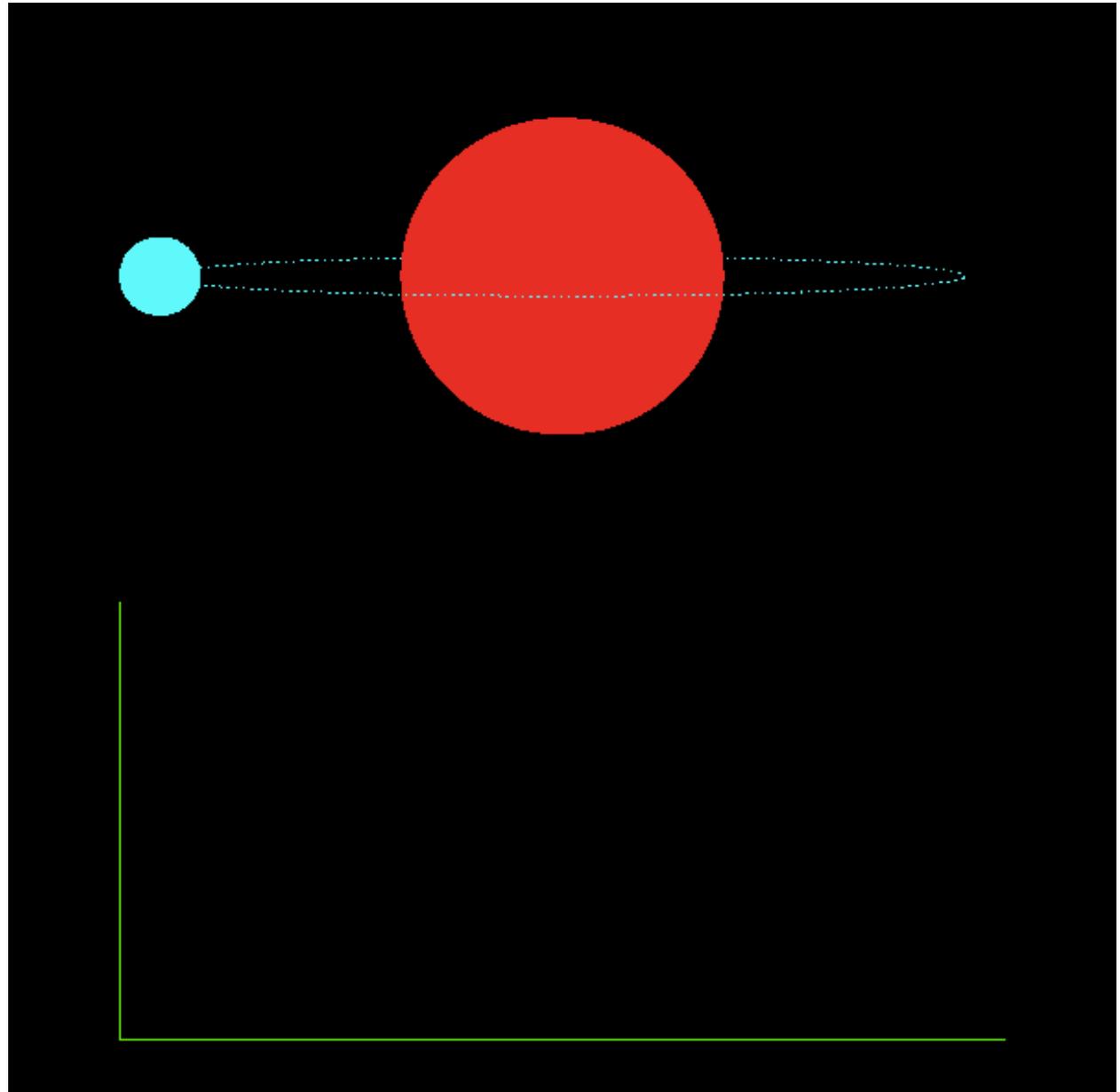
We see light from both A and B.

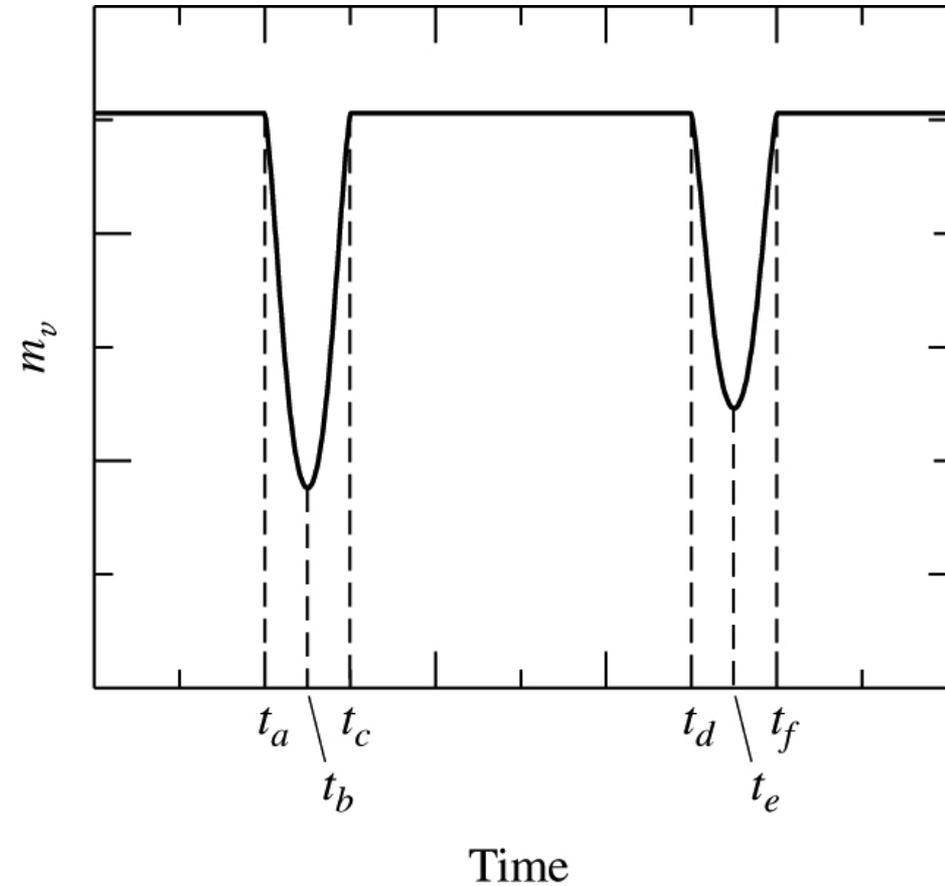
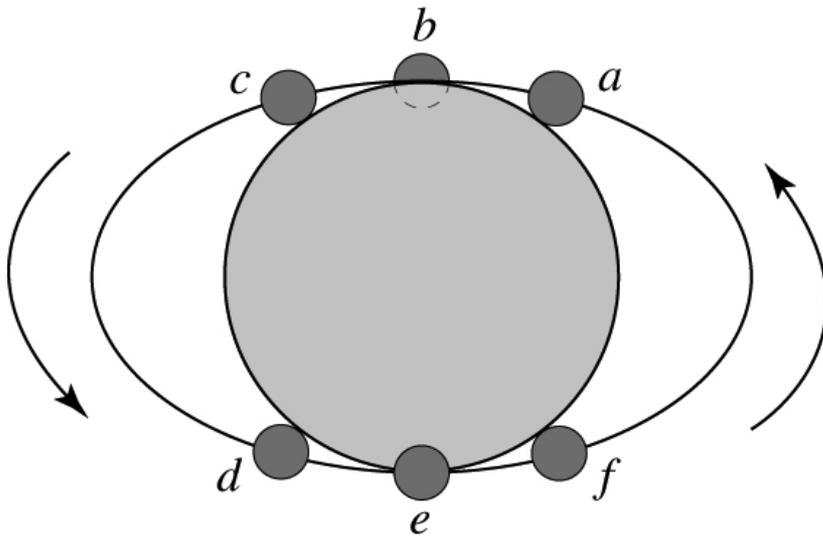


Estrela mais **fria** passa na frente da mais **quente** → **eclipse primário**



Curva de luz de binária eclipsante





Eclipses parciais para uma órbita circular com inclinação menor a 90° .

No exemplo, a estrela menor é a mais quente

Binárias espectroscópicas

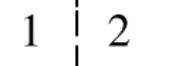
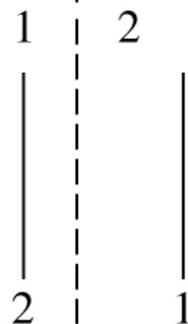
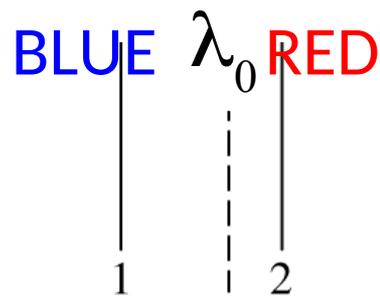
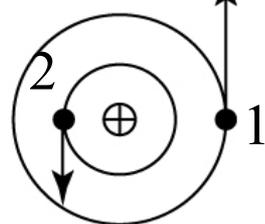
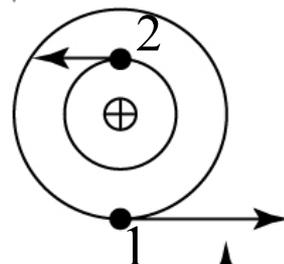
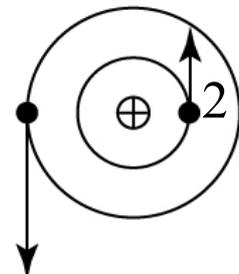
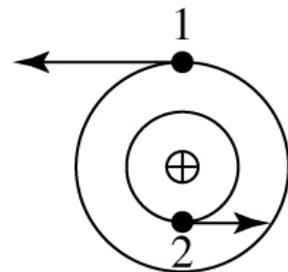
Estrelas relativamente próximas

→ períodos orbitais de dias a anos

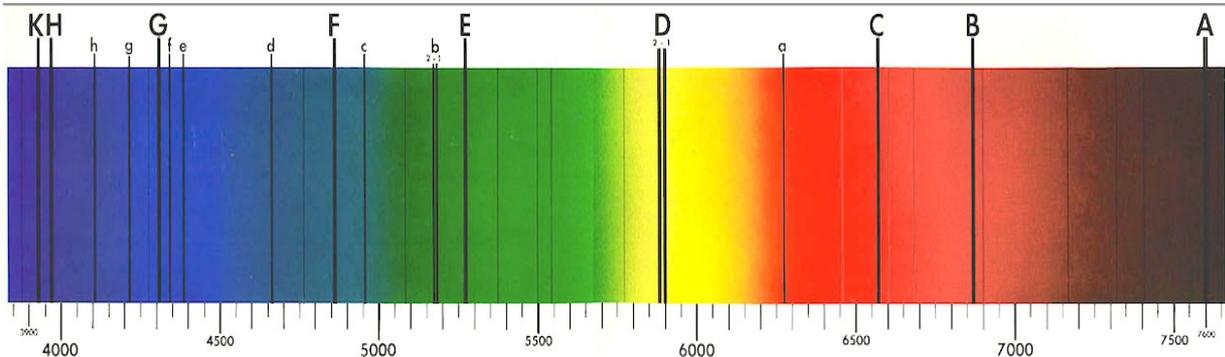


To Earth ←

Órbita determinada a partir do movimento periódico das linhas espectrais



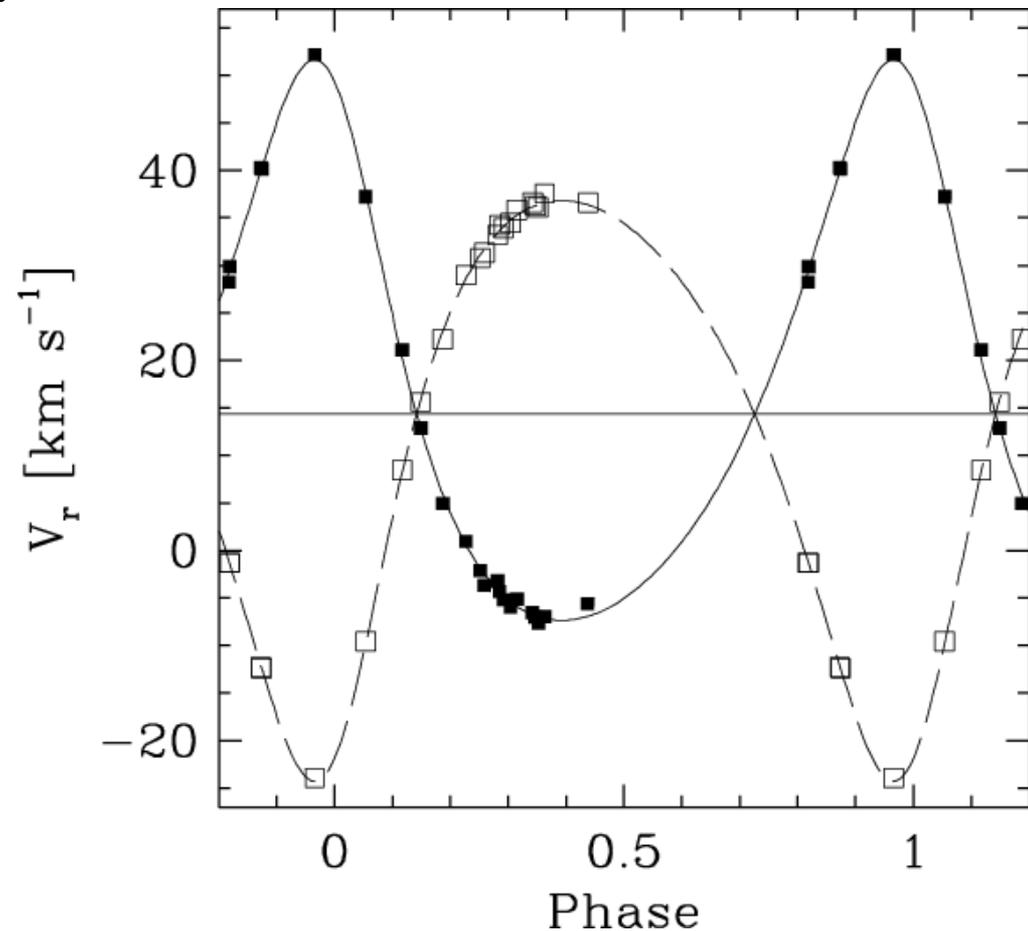
λ 18



Binárias Espectroscópicas

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

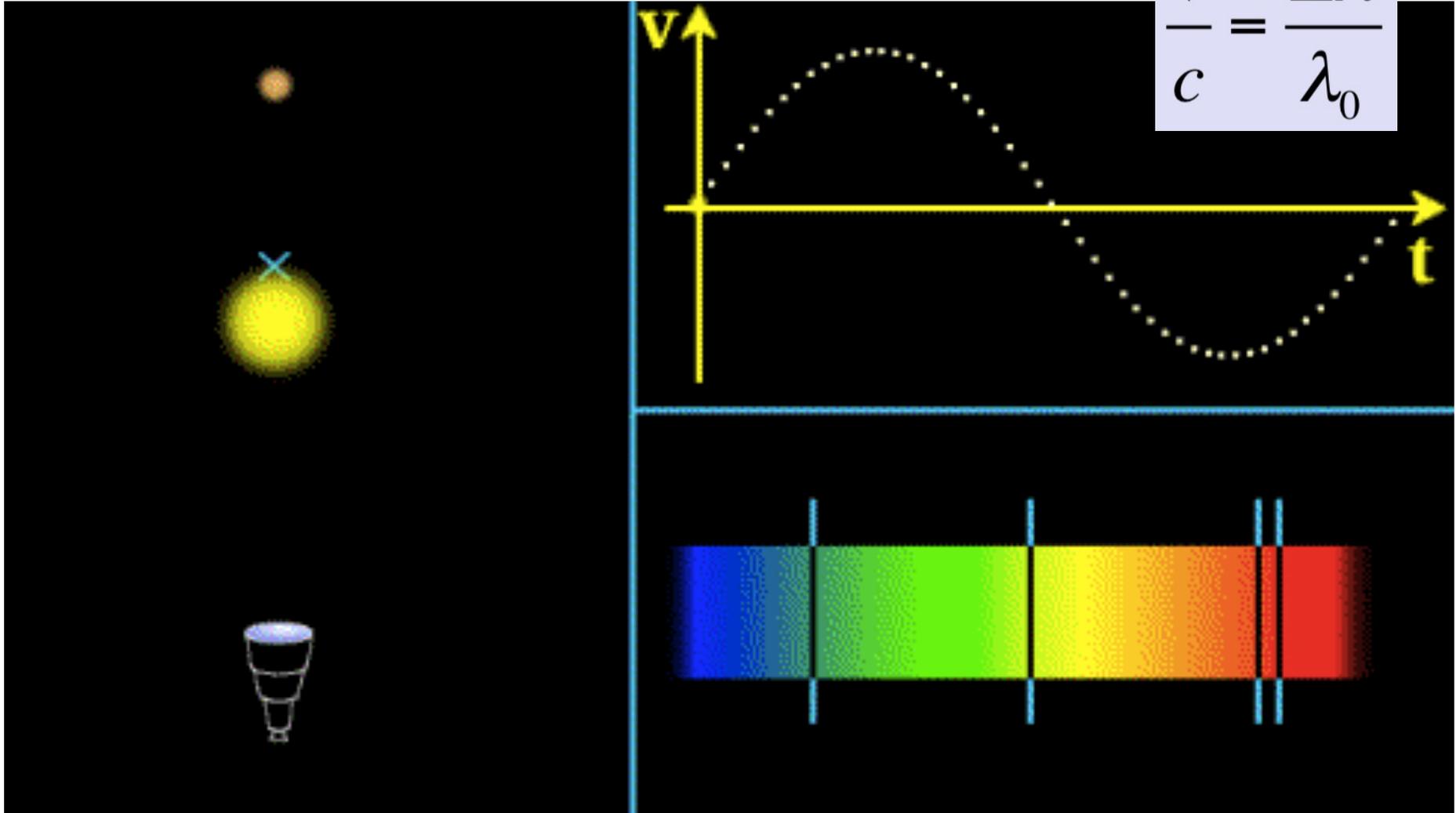
$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$



Platais et al. 2007 A&A 461, 509

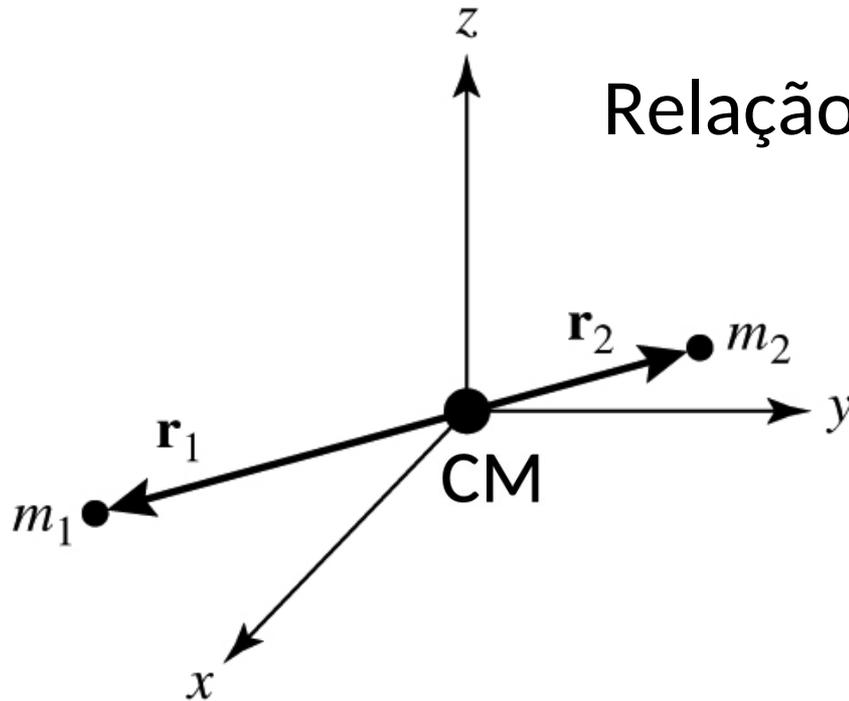
Deslocamento Doppler em binária espectroscópica. É mostrado um sistema em que apenas o espectro da componente mais brilhante é detectado

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



7.2 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

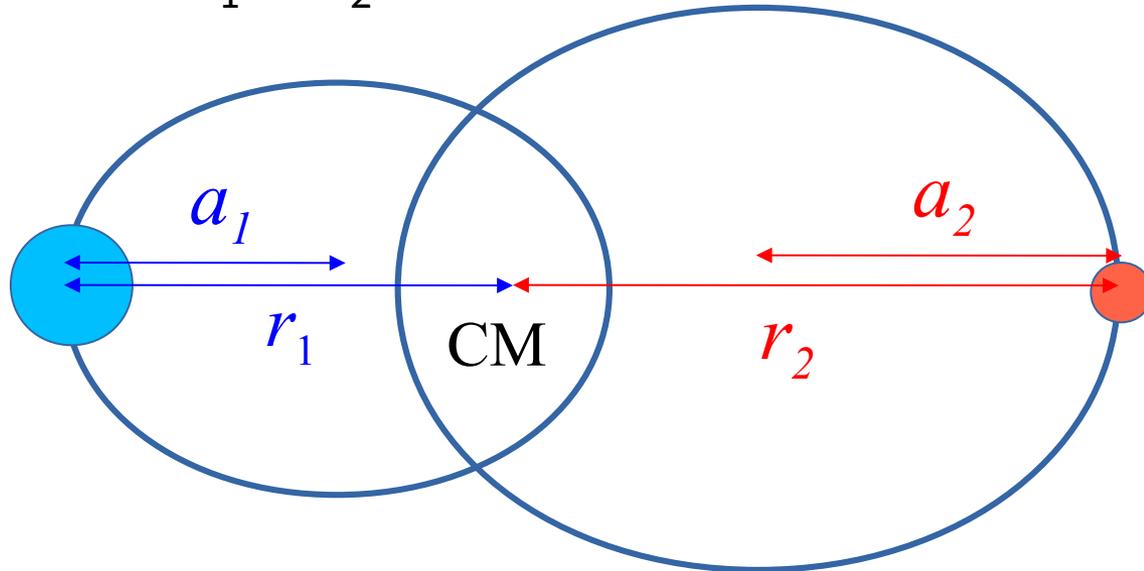


Relação das massas: $m_1 r_1 = m_2 r_2$

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

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_{Sol}

- a em UA

- P em anos

Exercício

Uma binária visual é observada com uma separação angular máxima $\theta = 3''$ e uma paralaxe trigonométrica de $p = 0.1''$. A órbita é completada em $P = 30$ anos, sendo que a companheira é sempre vista a uma distância até o centro de massa cinco vezes maior que a distância da estrela primária até esse ponto ($a_2 = 5a_1$).

Encontrar a massa das estrelas.

Separação $\theta = 3''$, $p = 0.1''$, $P = 30$ anos, $r_2 = 5 r_1$

Se utilizarmos os parâmetros P , a e m respectivamente em unidades de anos, UA e M_{\odot} , podemos aplicar a terceira lei de Kepler na forma:

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

Separação $\theta = 3''$, $p = 0.1''$, $P = 30$ anos, $r_2 = 5 r_1$

Se utilizarmos os parâmetros P , a e m respectivamente em unidades de anos, UA e M_{\odot} , podemos aplicar a terceira lei de Kepler na forma:

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

$$p(\text{rad}) = \frac{1 \text{UA}}{d}$$

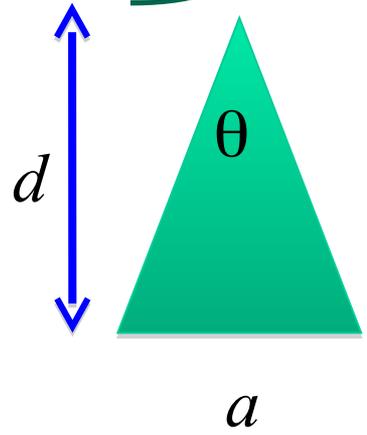
$$p'' = \frac{1}{d(\text{pc})}$$

$$a(\text{UA}) = \theta(\text{rad}) * d(\text{UA})$$

$$a(\text{UA}) = \theta(\text{rad}) / p(\text{rad})$$

$$a(\text{UA}) = \frac{\theta''}{p''}$$

1pc=206265 UA
1rad=206265''



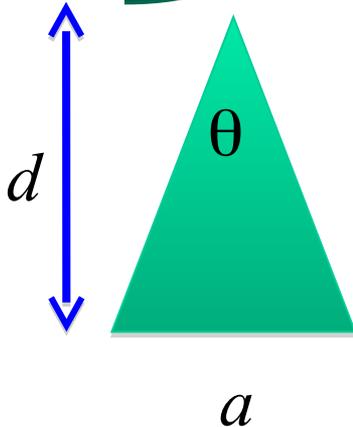
Separação $\theta = 3''$, $p = 0.1''$, $P = 30$ anos, $r_2 = 5 r_1$

Se utilizarmos os parâmetros P , a e m respectivamente em unidades de anos, UA e M_{\odot} , podemos aplicar a terceira lei de Kepler na forma:

$$p(\text{rad}) = \frac{1\text{UA}}{d}$$

$$p'' = \frac{1}{d(\text{pc})}$$

1pc=206265 UA
1rad=206265''



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

$$a(\text{UA}) = \theta(\text{rad}) * d(\text{UA})$$

$$a(\text{UA}) = \theta(\text{rad}) / p(\text{rad})$$

$$a(\text{UA}) = \frac{\theta''}{p''}$$

$$m_1 + m_2 = \left(\frac{3''}{0,1''} \right)^3 \frac{1}{(30)^2}$$

Separação $\theta = 3''$, $p = 0.1''$, $P = 30$ anos, $r_2 = 5 r_1$

Se utilizarmos os parâmetros P , a e m respectivamente em unidades de anos, UA e M_{\odot} , podemos aplicar a terceira lei de Kepler na forma:

$$p(\text{rad}) = \frac{1\text{UA}}{d}$$

$$p'' = \frac{1}{d(\text{pc})}$$

$$1\text{pc} = 206265 \text{ UA}$$

$$1\text{rad} = 206265''$$

$$a(\text{UA}) = \theta(\text{rad}) * d(\text{UA})$$

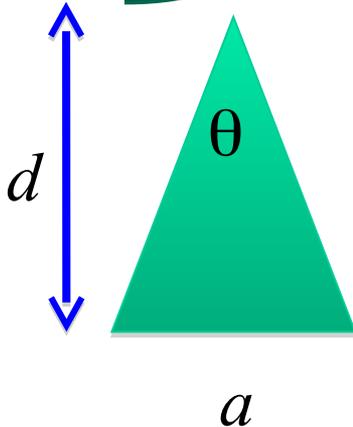
$$a(\text{UA}) = \theta(\text{rad}) / p(\text{rad})$$

$$a(\text{UA}) = \frac{\theta''}{p''}$$

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

$$m_1 + m_2 = \left(\frac{3''}{0,1''} \right)^3 \frac{1}{(30)^2}$$

$$m_1 + m_2 = 30 M_{\odot}$$



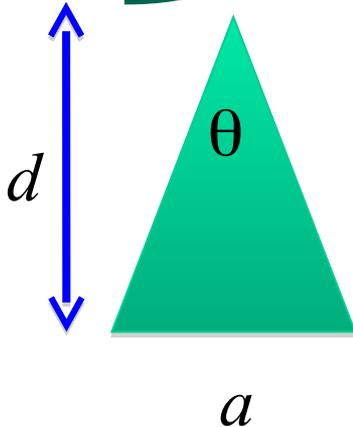
Separação $\theta = 3''$, $p = 0.1''$, $P = 30$ anos, $r_2 = 5 r_1$

Se utilizarmos os parâmetros P , a e m respectivamente em unidades de anos, UA e M_\odot , podemos aplicar a terceira lei de Kepler na forma:

$$p(\text{rad}) = \frac{1 \text{UA}}{d}$$

$$p'' = \frac{1}{d(\text{pc})}$$

1pc=206265 UA
1rad=206265''



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

$$a(\text{UA}) = \theta(\text{rad}) * d(\text{UA})$$

$$a(\text{UA}) = \theta(\text{rad}) / p(\text{rad})$$

$$a(\text{UA}) = \frac{\theta''}{p''}$$

$$m_1 + m_2 = \left(\frac{3''}{0,1''} \right)^3 \frac{1}{(30)^2}$$

$$m_1 + m_2 = 30 M_\odot$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} = 5 \rightarrow m_1 = 5 m_2$$

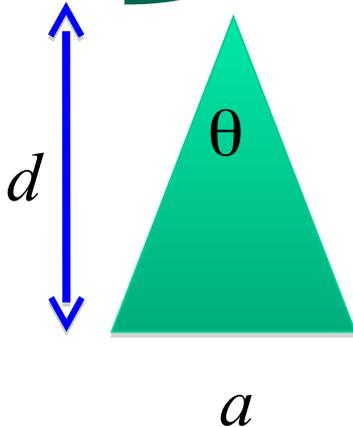
Separação $\theta = 3''$, $p = 0.1''$, $P = 30$ anos, $r_2 = 5 r_1$

Se utilizarmos os parâmetros P , a e m respectivamente em unidades de anos, UA e M_\odot , podemos aplicar a terceira lei de Kepler na forma:

$$p(\text{rad}) = \frac{1\text{UA}}{d}$$

$$p'' = \frac{1}{d(\text{pc})}$$

1pc=206265 UA
1rad=206265''



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

$$a(\text{UA}) = \theta(\text{rad}) * d(\text{UA})$$

$$a(\text{UA}) = \theta(\text{rad}) / p(\text{rad})$$

$$a(\text{UA}) = \frac{\theta''}{p''}$$

$$m_1 + m_2 = \left(\frac{3''}{0,1''} \right)^3 \frac{1}{(30)^2}$$

$$m_1 + m_2 = 30 M_\odot$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} = 5 \rightarrow m_1 = 5 m_2$$

$$6m_2 = 30 M_\odot$$

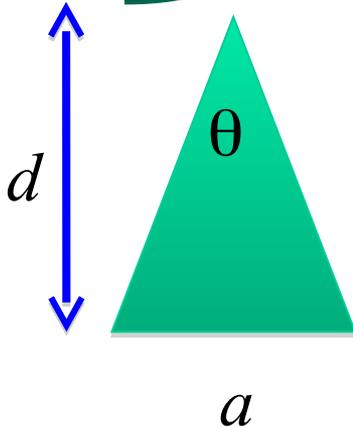
Separação $\theta = 3''$, $p = 0.1''$, $P = 30$ anos, $r_2 = 5 r_1$

Se utilizarmos os parâmetros P , a e m respectivamente em unidades de anos, UA e M_\odot , podemos aplicar a terceira lei de Kepler na forma:

$$p(\text{rad}) = \frac{1\text{UA}}{d}$$

$$p'' = \frac{1}{d(\text{pc})}$$

1pc=206265 UA
1rad=206265''



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

$$a(\text{UA}) = \theta(\text{rad}) * d(\text{UA})$$

$$a(\text{UA}) = \theta(\text{rad}) / p(\text{rad})$$

$$a(\text{UA}) = \frac{\theta''}{p''}$$

$$m_1 + m_2 = \left(\frac{3''}{0,1''} \right)^3 \frac{1}{(30)^2}$$

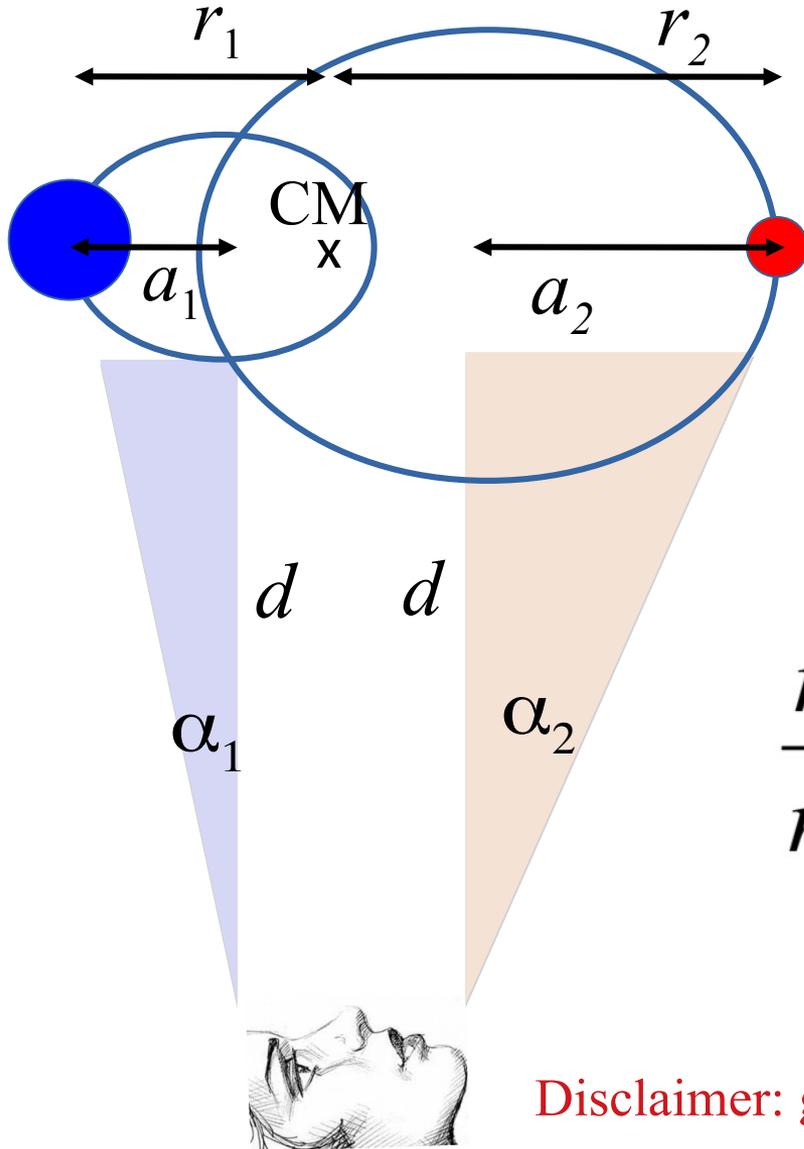
$$m_1 + m_2 = 30 M_\odot$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} = 5 \rightarrow m_1 = 5 m_2$$

$$6m_2 = 30 M_\odot$$

$$m_2 = 5M_\odot \quad m_1 = 25M_\odot$$

Sejam a_1, a_2 os semi-eixos maiores das órbitas (excentricidade e) com ângulos subtendidos α_1, α_2 , e d a distância ao observador



$$\alpha_1 = \frac{a_1}{d}$$

$$\alpha_2 = \frac{a_2}{d}$$

$$r_1 = a_1(1+e)$$

$$r_2 = a_2(1+e)$$

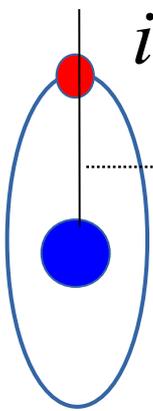
$$\alpha_2 / \alpha_1 = a_2 / a_1$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{a_2}{a_1} \rightarrow \frac{m_1}{m_2} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1}$$

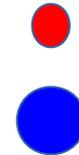
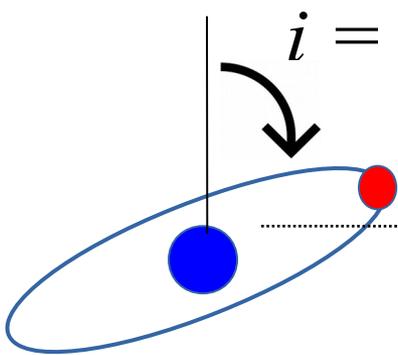
Disclaimer: gráfico não à escala

$i = 0^\circ$

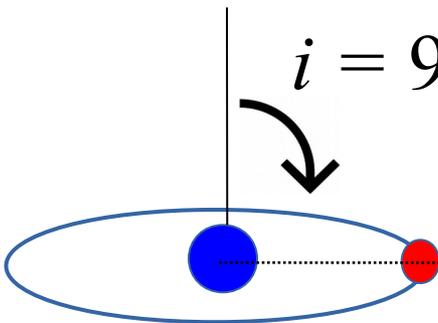
A separação observada depende da inclinação i



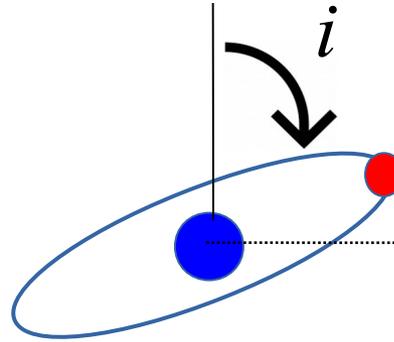
$i = 60^\circ$



$i = 90^\circ$



Considere o **ângulo de inclinação** (i) entre o plano de órbita e a perpendicular à linha de visada. O observador não mede diretamente α_1 e α_2 , mas sua projeção:



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

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

Podemos determinar o ângulo de inclinação i estudando a projeção da órbita no céu

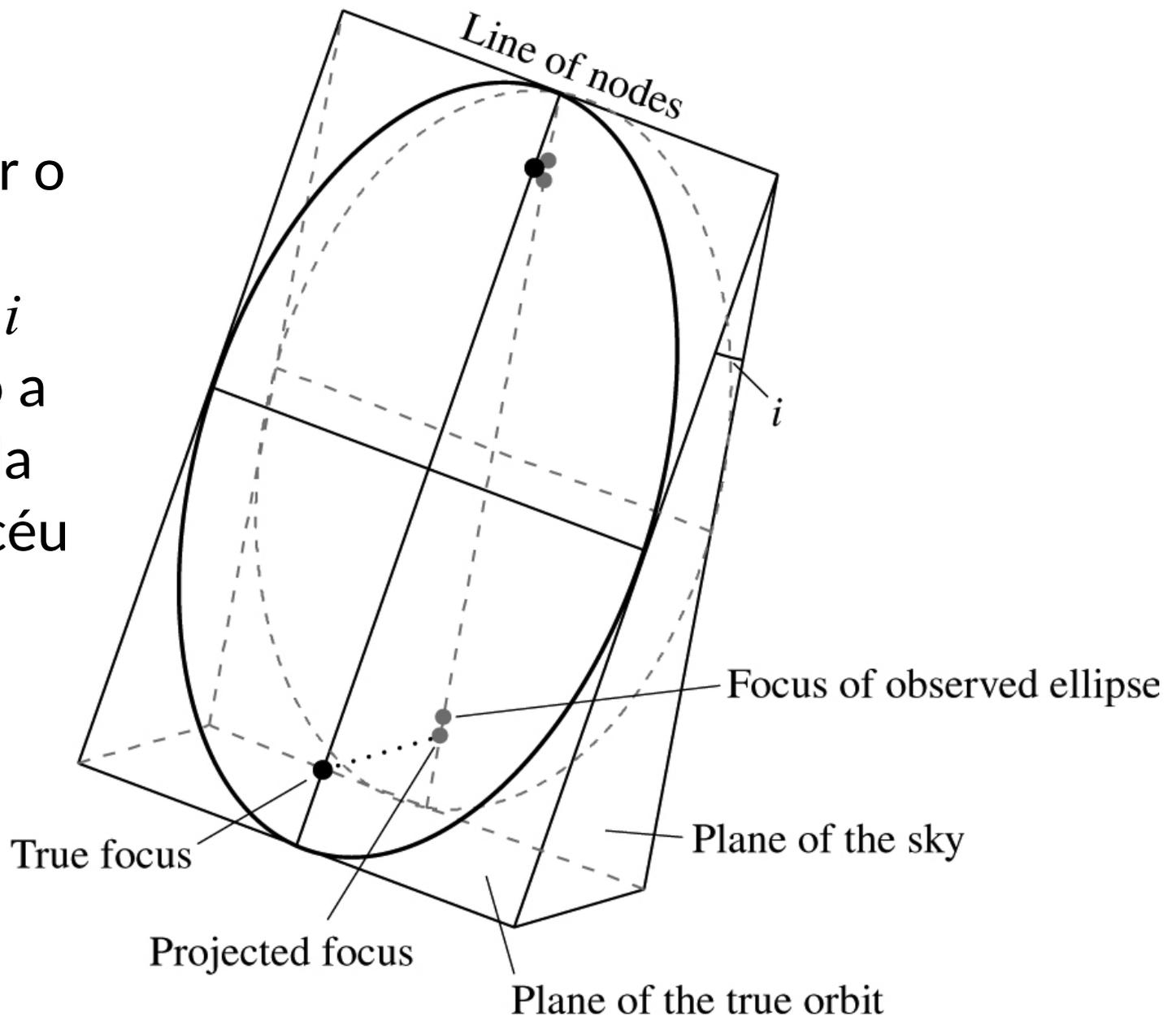


FIGURE 7.4 An elliptical orbit projected onto the plane of the sky produces an observable elliptical orbit. The foci of the original ellipse do not project onto the foci of the observed ellipse, however.

Ângulo de inclinação i afeta a velocidade radial

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

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

