

estrelas binárias:

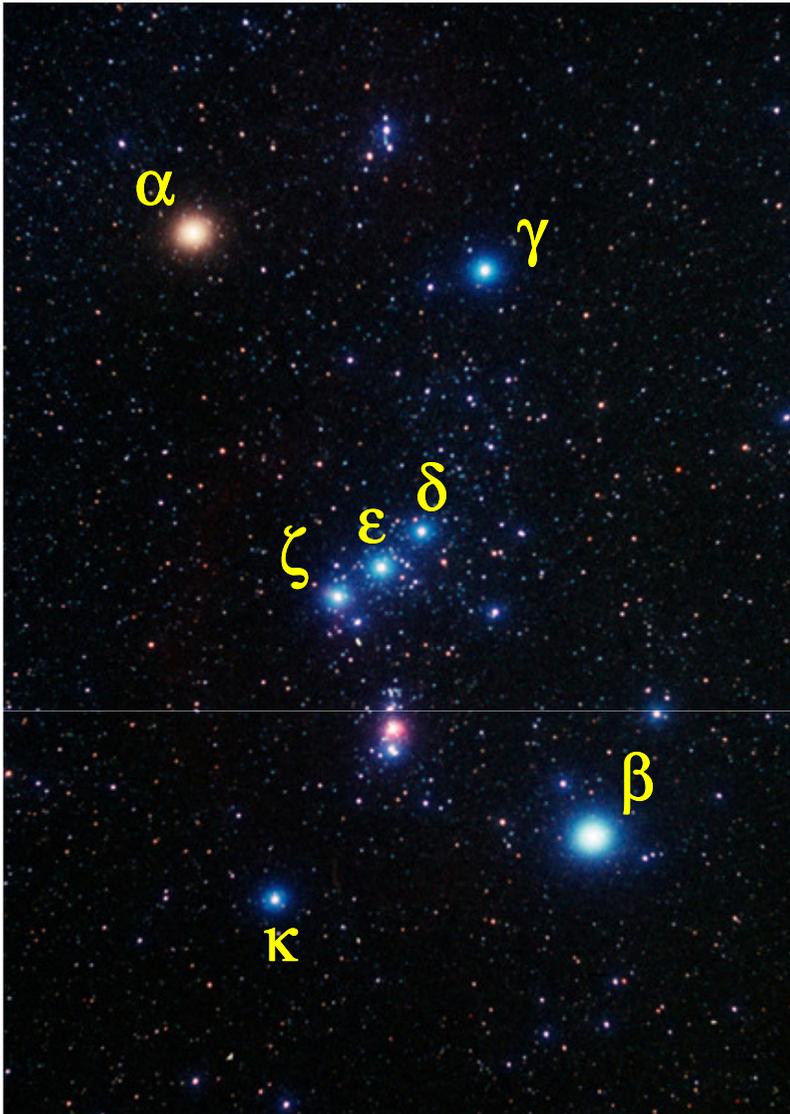
- **importância do estudo: determinação de massas e raios de estrelas**

(Única maneira de se determinar massas, fora o Sol)

A massa determina a estrutura e evolução de uma estrela

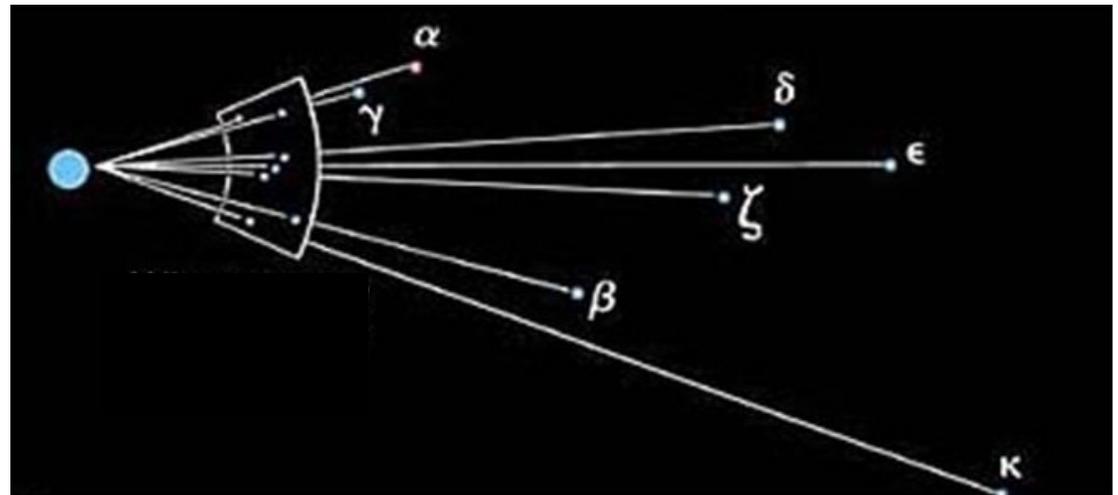
- **Muitas estrelas se encontram em sistemas binários – implicações para o estudo de momento angular de sistemas, formação de estrelas exoplanetas**

**Uma boa referência para esta parte é o Swihart: Astrophysics and Stellar Astronomy
Space Sciences text series**



binárias, trios, etc.
“*aparentes*” ou “*ópticos*”

(nesses casos, os movimentos são independentes, pois as estrelas estão a grandes distâncias uma das outras)

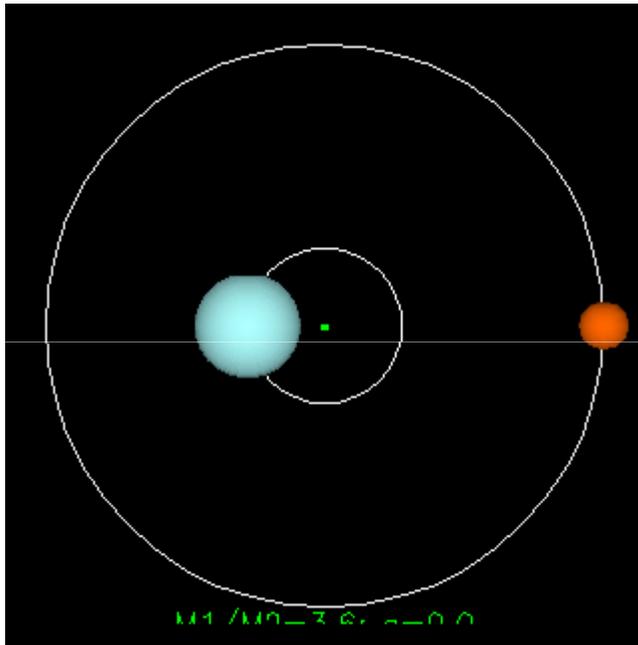


Leis de Kepler:

- 1) A órbita de um planeta é uma elipse com o Sol em um dos focos**
- 2) Uma linha que une o Sol a um planeta varre áreas iguais em tempos iguais**
- 3) O quadrado do período orbital é proporcional ao cubo do semi-eixo maior**

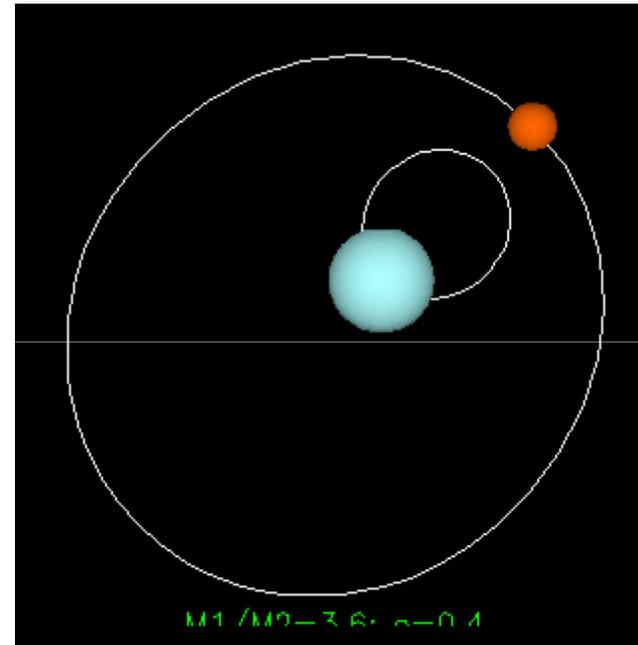
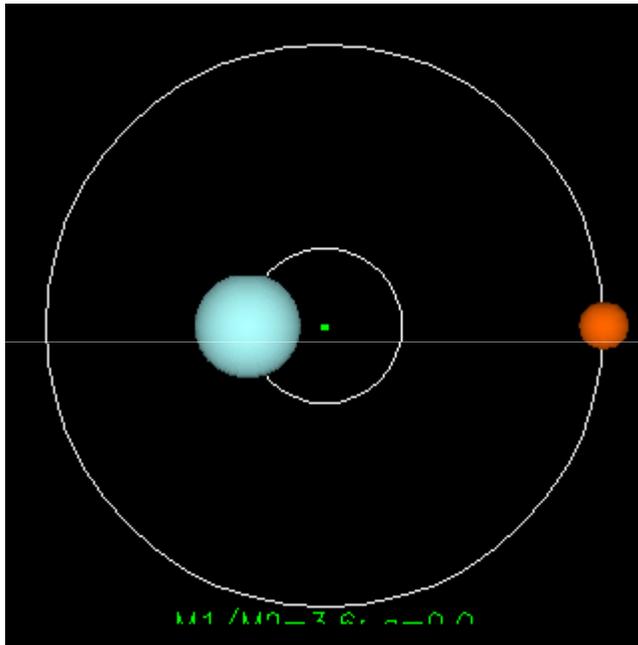
estrelas binárias:

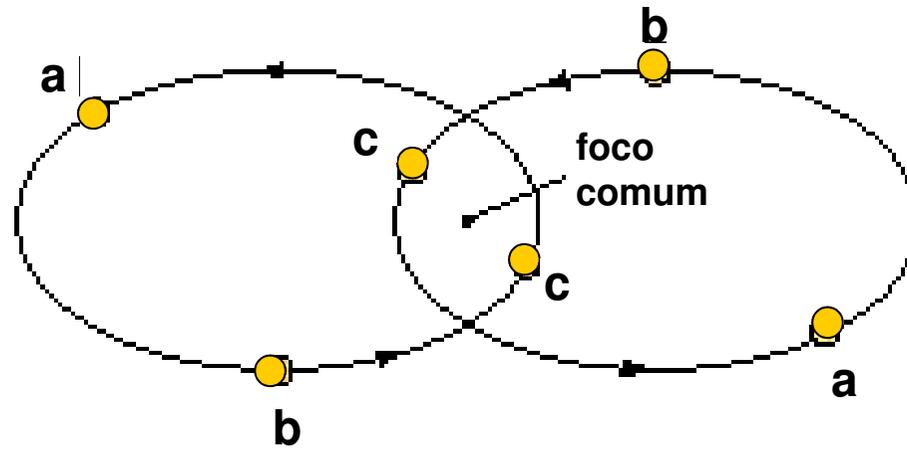
2 estrelas com movimento orbital mútuo
movimento orbital das estrelas é devido à ação gravitacional mútua



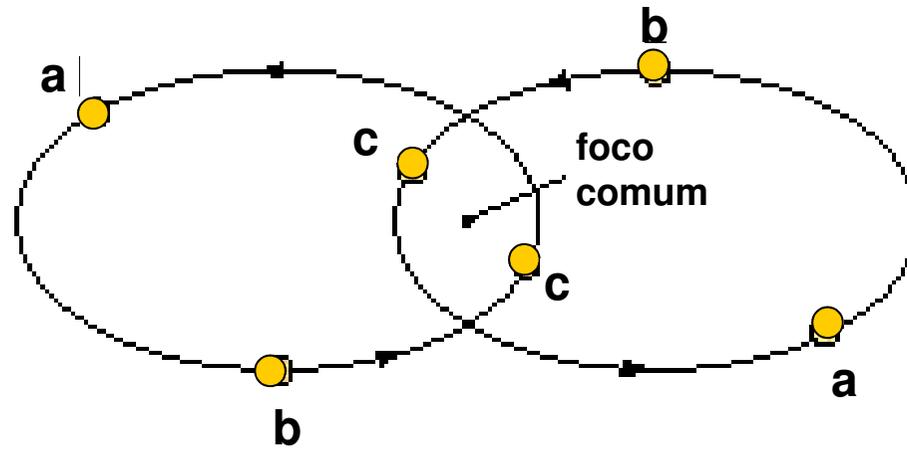
estrelas binárias:

2 estrelas com movimento orbital mútuo
movimento orbital das estrelas é devido à ação gravitacional mútua

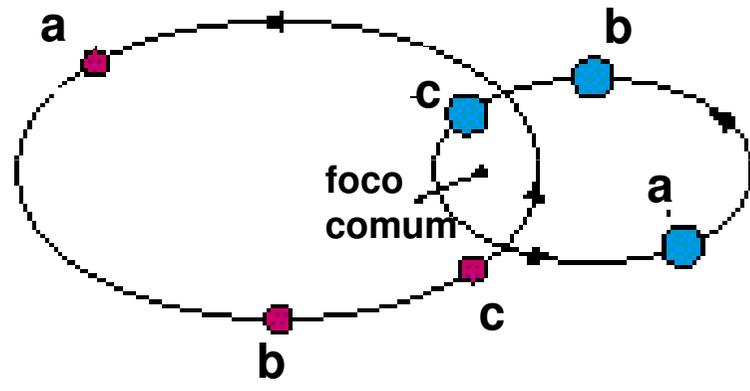




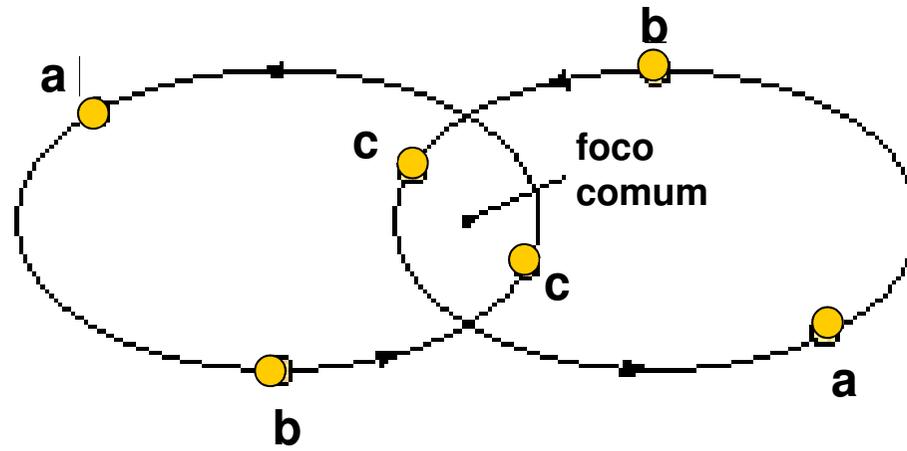
massas ~ iguais



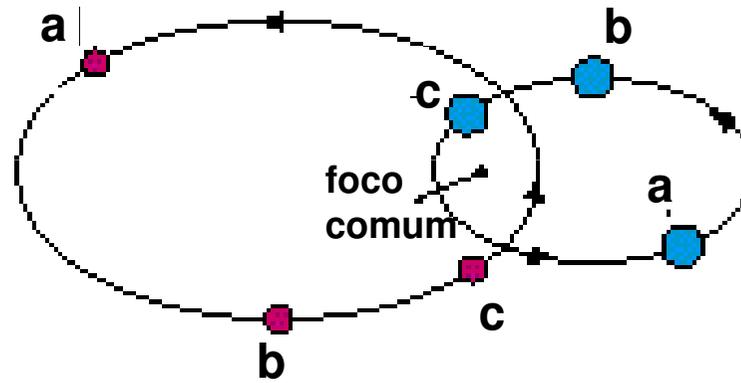
massas ~ iguais



$m_1 \sim 2 m_2$



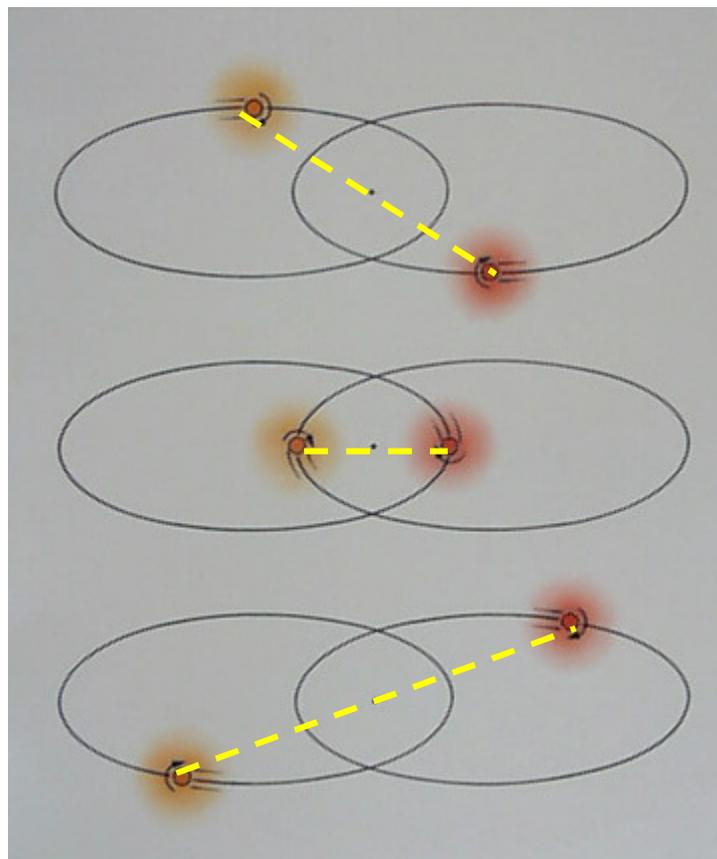
massas ~ iguais



$m_1 \sim 2 m_2$

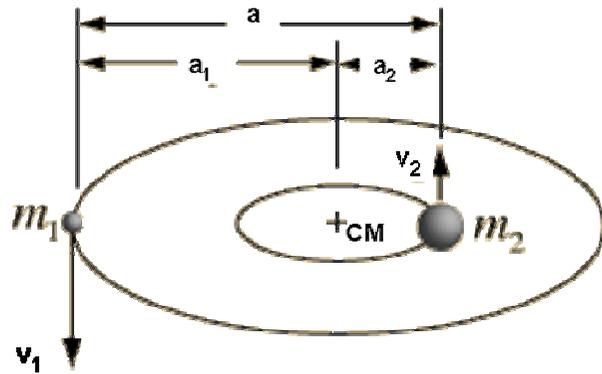


$m_1 \gg m_2$

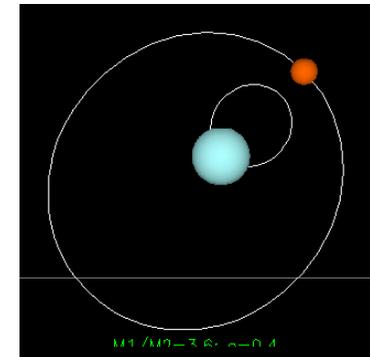


CM está sempre na linha unindo os dois objetos

problema de 2 corpos: movimento de 2 corpos sob ação da gravidade mútua



m_1 e m_2 : massas
 v_1 e v_2 : velocidades
 a_1 e a_2 : distâncias ao centro de massa (CM)
 a = distância relativa
 $a = a_1 + a_2$

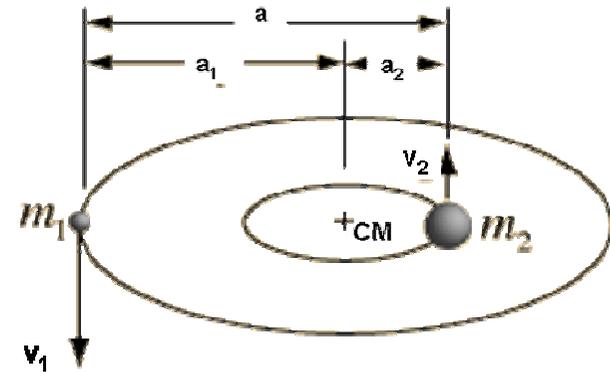


- os dois objetos descrevem elipses ao redor do centro de massa (CM) movimento em um plano
- CM está sempre na linha unindo os dois objetos
- cada objeto descreve uma elipse ao redor do outro elipses têm mesma forma, mas têm tamanhos diferentes se as massas são diferentes
- maior massa, menor elipse

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} a^3 \quad P_1 = P_2 = P$$

(3ª lei de Kepler)

supondo o movimento circular, para simplificar
(círculo é um caso particular de elipse)



$$P_1 = \frac{2\pi a_1}{v_1} \rightarrow v_1 = \frac{2\pi a_1}{P}$$

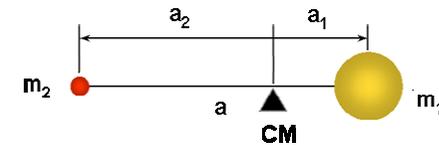
$$P_2 = \frac{2\pi a_2}{v_2} \rightarrow v_2 = \frac{2\pi a_2}{P}$$

$$F_1 = m_1 \frac{v_1^2}{a_1} = F_2 = m_2 \frac{v_2^2}{a_2}$$



$$\frac{m_1}{a_1} \left(\frac{2\pi a_1}{P} \right)^2 = \frac{m_2}{a_2} \left(\frac{2\pi a_2}{P} \right)^2 \rightarrow m_1 a_1 = m_2 a_2$$

$$\boxed{\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}}$$



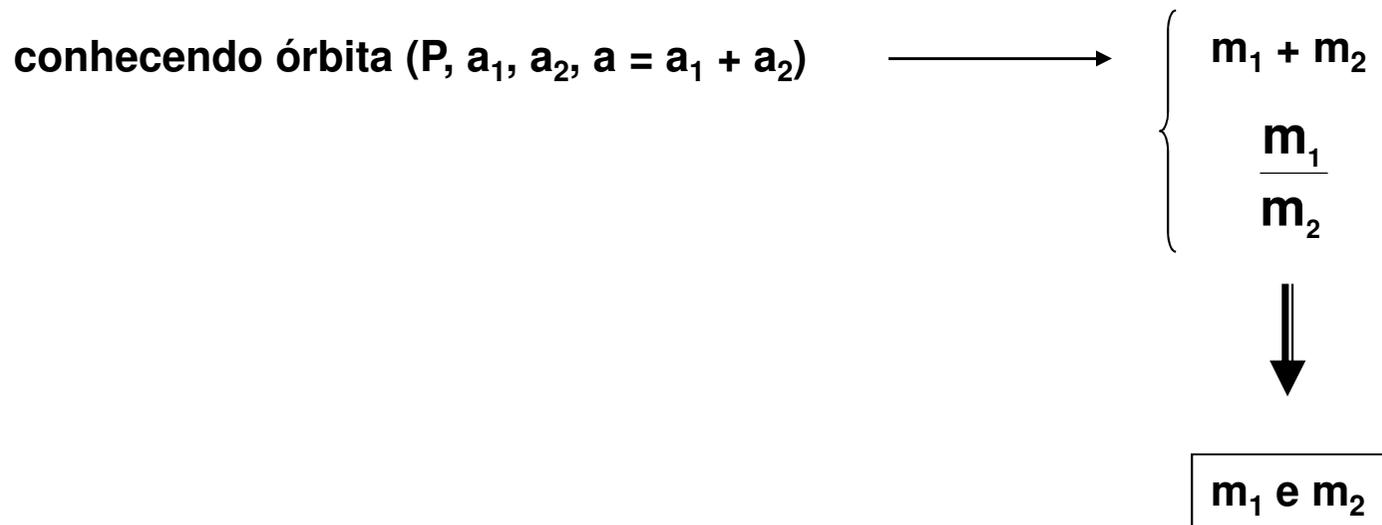
- o baricentro estará sempre + próximo do objeto + pesado; válido também para órbitas elípticas
- muitas vezes, a massa de uma das estrelas é bem maior; posição do objeto mais massivo ~ CM

determinação de massas através do movimento de 2 corpos

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

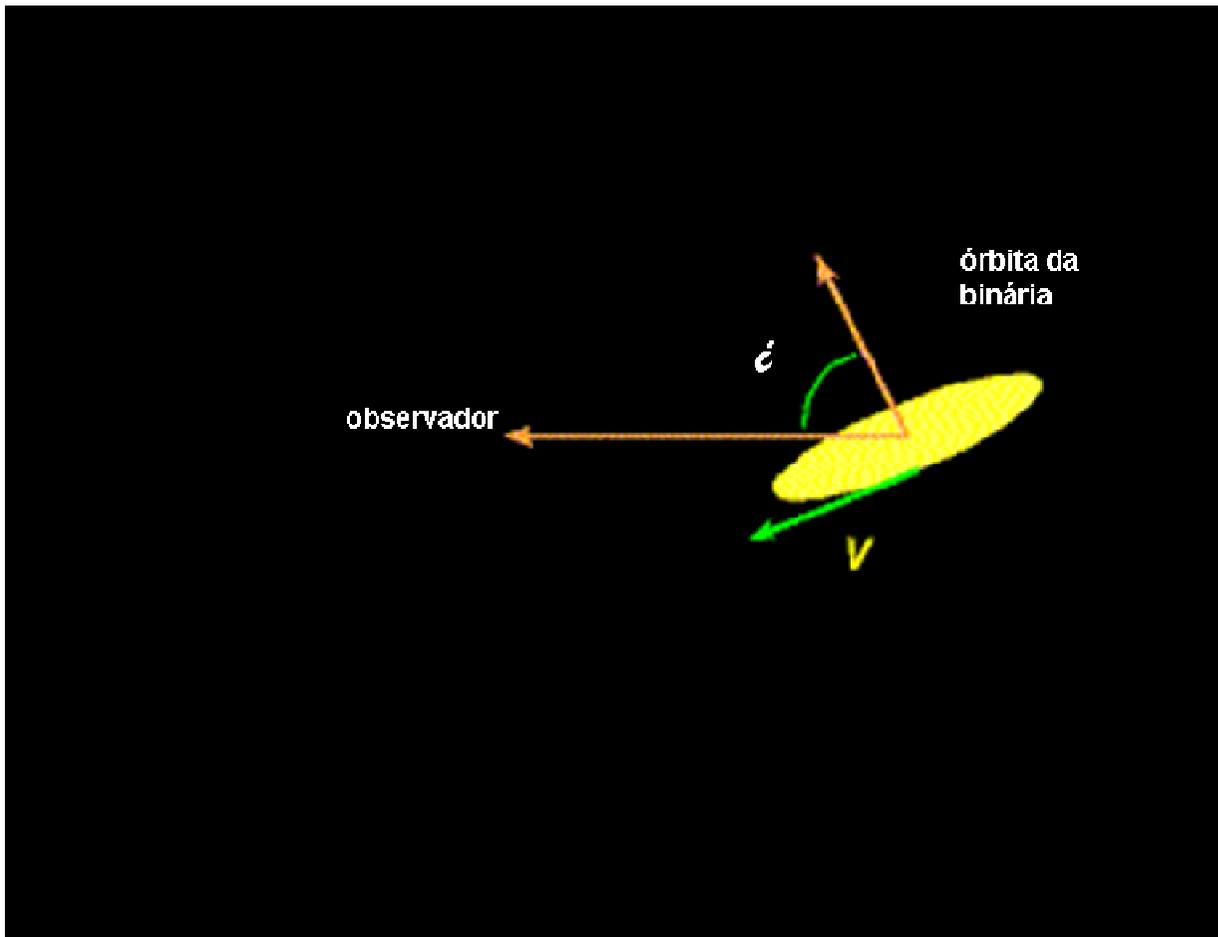
• 3ª lei de Kepler: $P^2 = \frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} a^3 \longrightarrow m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2}{GP^2} a^3$

• portanto:



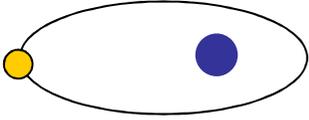
observações de sistemas binários:

- nem sempre o plano das órbitas coincide com o plano de céu
- nem sempre as duas estrelas são observadas



observador com ângulo
elipse deformada

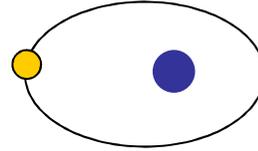
$$i = \alpha^\circ$$



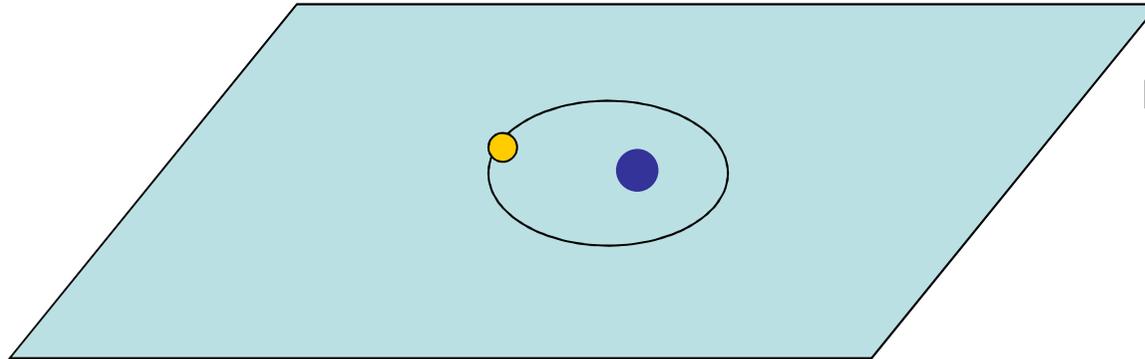
observador na vertical

elipse verdadeira

$$i = 0^\circ$$

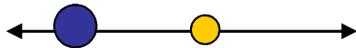


plano da órbita



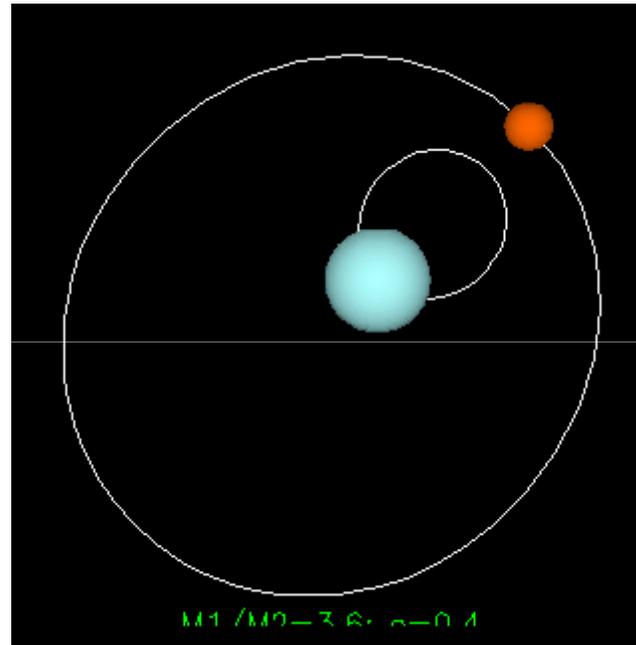
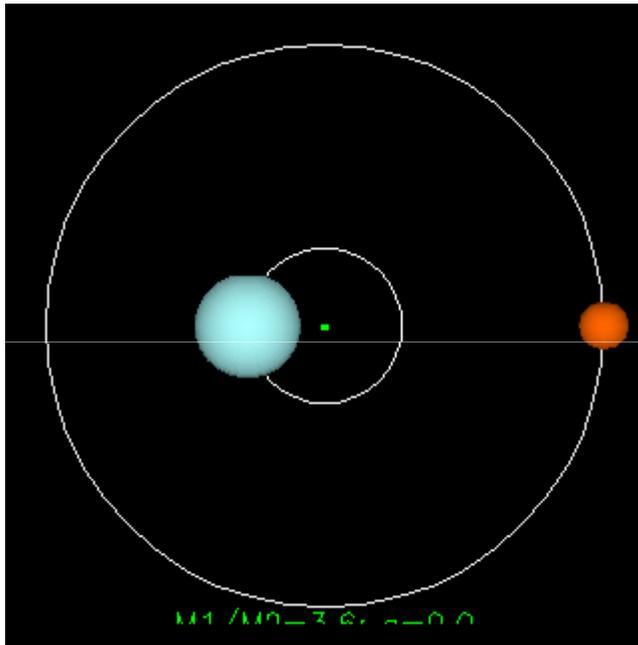
observador no plano das órbitas

$$i = 90^\circ$$



classificação de binárias: depende do método de descoberta (visualização)

1. binárias visuais: as duas componentes podem ser vistas separadamente

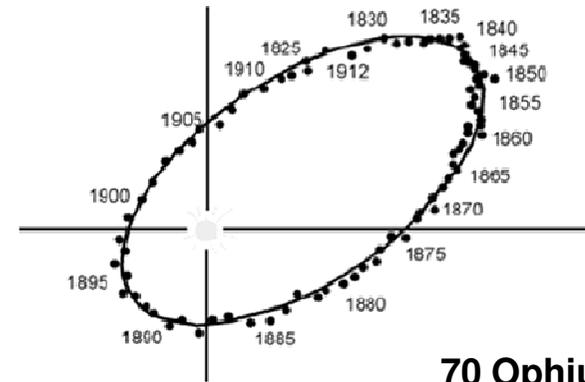
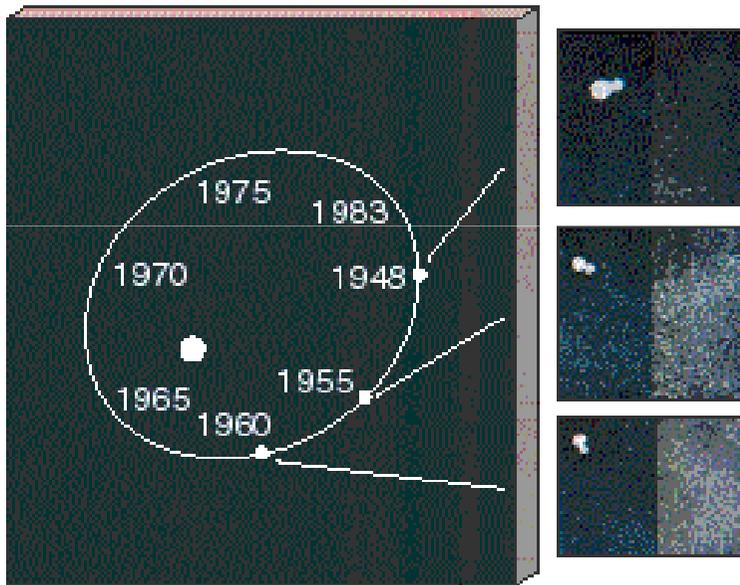


1. binárias visuais: as duas componentes podem ser vistas separadamente

estrela + brilhante: estrela primária

estrela + fraca: estrela secundária

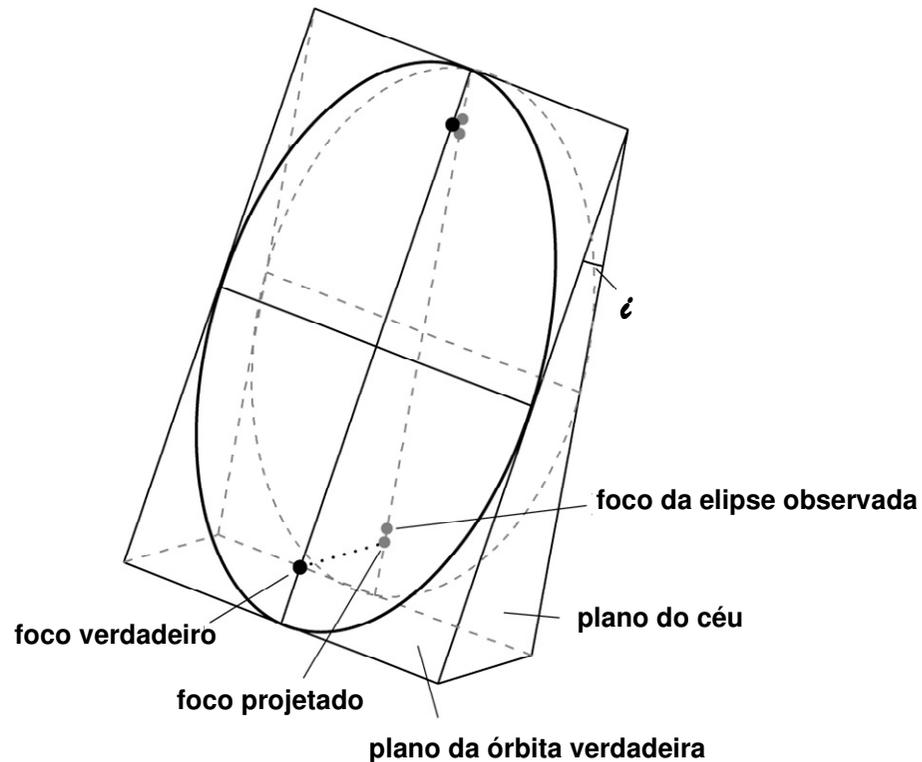
⌘ movimento relativo (velocidades, órbitas, período) das duas pode ser determinado



70 Ophiuchi

1. binárias visuais: as duas componentes podem ser vistas separadamente

o plano da órbita não está necessariamente no plano do céu



i (inclinação): a partir do deslocamento da estrela do foco aparente

1. binárias visuais:

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

$$m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2}{GP^2} a^3$$

observações: órbita aparente

$$a_{ap}'' , a_{1ap}'' , a_{2ap}''$$

P

$$\left\{ \begin{array}{l} a'' = a_{ap}'' \text{ sen } \epsilon \\ a_1'' = a_{1ap}'' \text{ sen } \epsilon \\ a_2'' = a_{2ap}'' \text{ sen } \epsilon \end{array} \right\} \xrightarrow{\epsilon} \boxed{\begin{array}{l} a'', a_1'', a_2'' \\ P \end{array}}$$

a) se D não for conhecido: $\frac{a_2''}{a_1''} = \frac{a_2^{\text{rad}}}{a_1^{\text{rad}}} = \frac{a_2^{\text{rad}}/D}{a_1^{\text{rad}}/D} = \frac{a_2}{a_1} = \frac{m_1}{m_2} \longrightarrow \boxed{\frac{m_1}{m_2}}$

b) se D for conhecido:

$$\boxed{\begin{array}{l} a'', a_1'', a_2'' \\ P \end{array}} \xrightarrow{D} \boxed{\begin{array}{l} a, a_1, a_2 \\ P \end{array}} \xrightarrow{\begin{array}{l} m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2}{GP^2} a^3 \\ \frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} \end{array}} \boxed{m_1 \text{ e } m_2}$$

exercício:

a) Sirius A e Sirius B

$$a''_1 = 2.309'' \text{ (inclinação já corrigida, } 136.5^\circ)$$

$$a''_2 = 5.311''$$

$$D = 2.63 \text{ pc}$$

$$P = 49.9 \text{ anos}$$

$$a'' = a''_1 + a''_2 = 2.309'' + 5.311'' = 7.619''$$

$$a_{\text{rad}} = \frac{7.619}{2.06 \times 10^5} = \frac{a}{D} \quad \longrightarrow$$

$$a = 3 \times 10^{14} \text{ cm}$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} = \frac{a''_2}{a''_1} = \frac{5.311}{2.309} = 2.30$$

$$m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2}{GP^2} a^3 = 6.44 \cdot 10^{33} \text{ g} = 3.22 M_\odot$$

$$\left. \begin{array}{l} m_2 = 0.98 M_\odot \\ m_1 = 2.30 m_2 = 2.25 M_\odot \end{array} \right\}$$

exercício:

b) órbita circular ($i = 0$)

$P = 8$ anos

máxima separação angular = $3''$

p (paralaxe) = $0.5''$

em relação ao CM, a secundária tem o dobro de distância do que a primária

$$a_2'' = 2 a_1''$$

massas?

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} \quad m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2}{GP^2} a^3$$

$$p = 0.5'' \quad D = 2 \text{ pc}$$

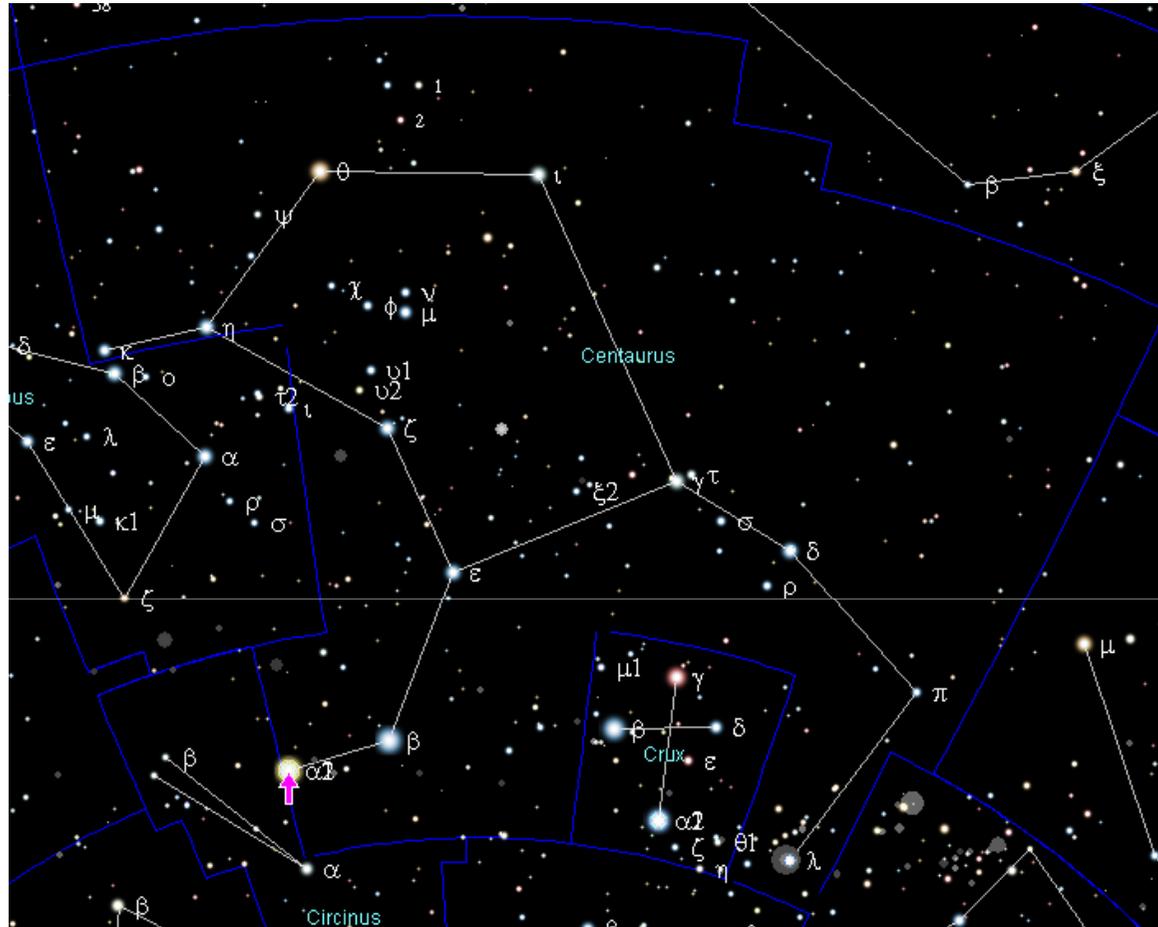
$$\frac{3}{2.06 \times 10^5} = \frac{a}{D} \quad \longrightarrow \quad a = 9 \times 10^{13} \text{ cm}$$

$$m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2}{GP^2} a^3 = 6.79 \times 10^{33} \text{ g} = 3.40 M_{\odot}$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} = \frac{a_2''}{a_1''} = 2$$

$$\left. \begin{array}{l} m_2 = 1.13 M_{\odot} \\ m_1 = 2.26 M_{\odot} \end{array} \right\}$$

Alpha Centauri: binária + brilhante no céu

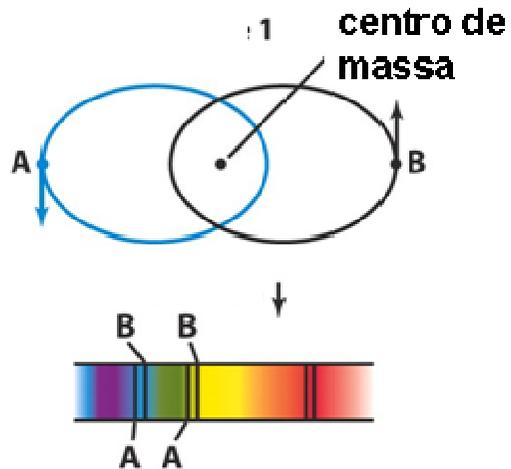


**Alfa Centauri A(G2V) e Alfa Centauri B (K1V) – orbitam o CM em 80 anos
separação média = 24 UA
D = 1.347 pc**

Próxima Centauri (M5V) D = 1.295 pc ; d = 13000UA - faz parte?

2. binárias espectroscópicas

se estrelas muito distantes para serem resolvidas
se movimento orbital percebido pelo deslocamento periódico das linhas espectrais
(efeito Doppler devido ao movimento de uma estrela ao redor da outra)

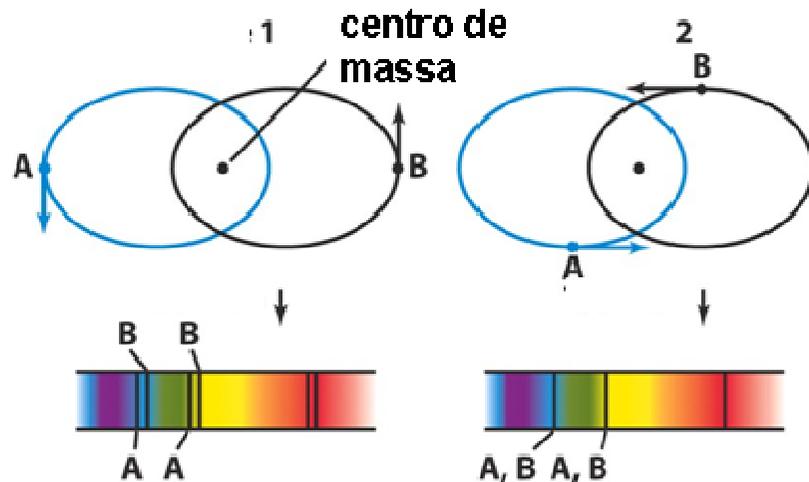


A: movimento de aproximação
deslocamento para o azul

B: movimento de afastamento
deslocamento para o vermelho

2. binárias espectroscópicas

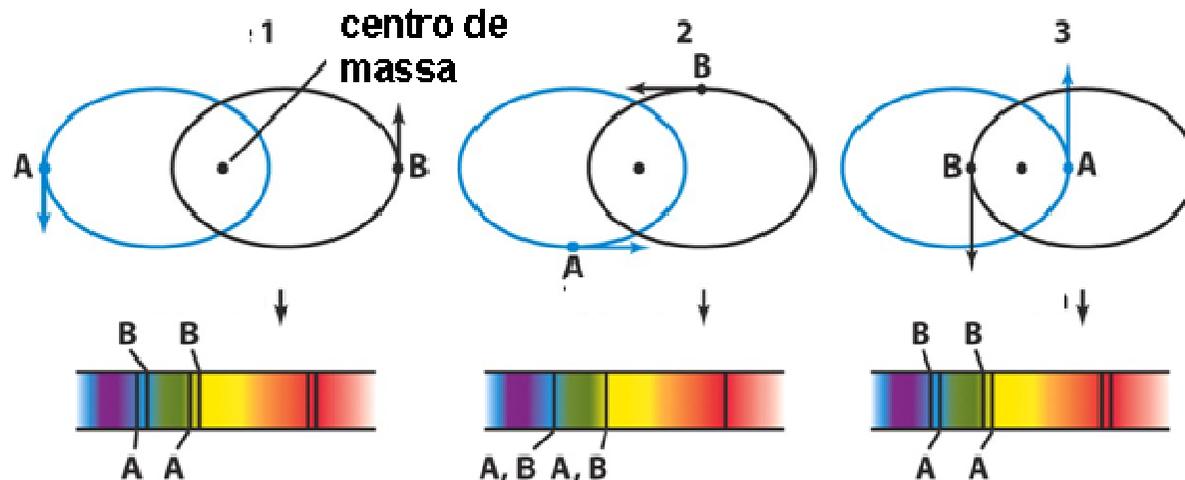
se estrelas muito distantes para serem resolvidas
se movimento orbital percebido pelo deslocamento periódico das linhas espectrais
(efeito Doppler devido ao movimento de uma estrela ao redor da outra)



$v_r = 0$
sem deslocamento das linhas

2. binárias espectroscópicas

se estrelas muito distantes para serem resolvidas
se movimento orbital percebido pelo deslocamento periódico das linhas espectrais
(efeito Doppler devido ao movimento de uma estrela ao redor da outra)

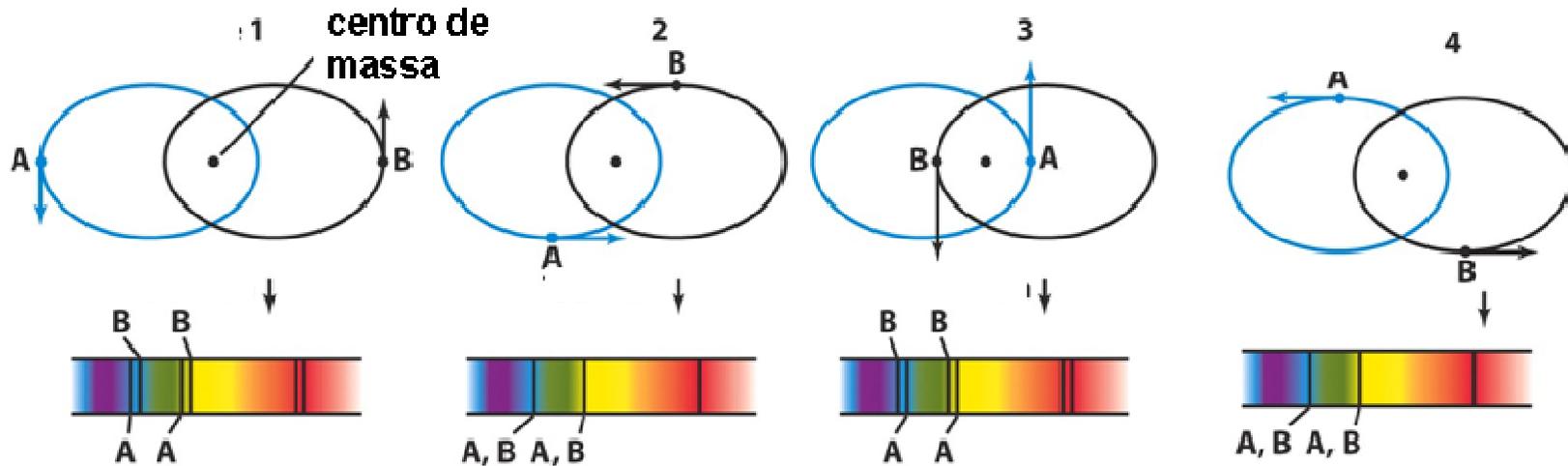


A: movimento de afastamento
deslocamento para o vermelho

B: movimento de aproximação
deslocamento para o azul

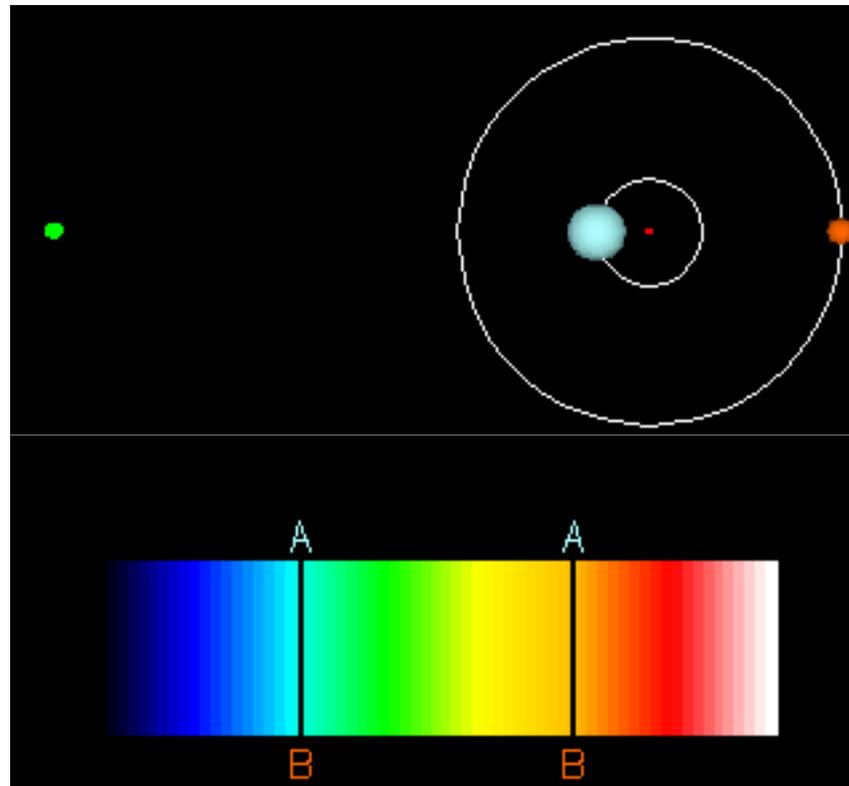
2. binárias espectroscópicas

se estrelas muito distantes para serem resolvidas
se movimento orbital percebido pelo deslocamento periódico das linhas espectrais
(efeito Doppler devido ao movimento de uma estrela ao redor da outra)



$v_r = 0$
sem deslocamento das linhas

2. binárias espectroscópicas



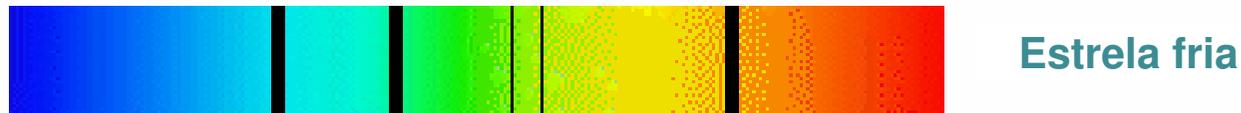
espectro observado

Binária espectroscópica de tipo espectral bem diferente

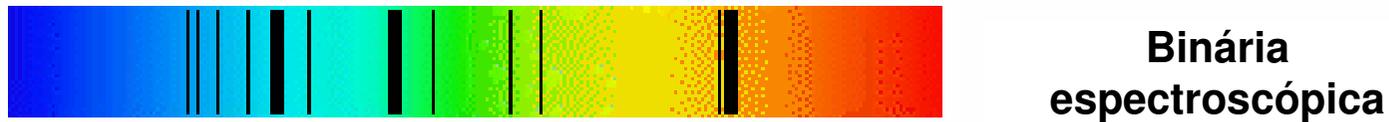
Normalmente uma estrela tem um espectro que corresponde a sua classificação espectral. Por exemplo uma estrela quente tem espectro rico em linhas de hidrogênio.



Uma estrela fria tem linhas metálicas importantes, como abaixo



Numa binária espectroscópica, você não vê as duas estrelas separadamente, mas percebe que o espectro é uma composição de dois espectros



2. binárias espectroscópicas

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} \quad m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2}{GP^2} a^3$$

do deslocamento Doppler - componentes radiais das velocidades orbitais das estrelas

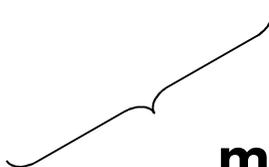
$$\frac{\lambda - \lambda_o}{\lambda_o} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_o} = \frac{v_r}{c}$$

hipótese: órbita circular $P_1 = \frac{2\pi a_1}{v_1} = P_2 = \frac{2\pi a_2}{v_2} \longrightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{a_1}{a_2}$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{v_1^{\text{medido}} / \text{sen}(i)}{v_2^{\text{medido}} / \text{sen}(i)} = \frac{v_1^{\text{medido}}}{v_2^{\text{medido}}}$$

(o que é medido é a projeção no plano do céu)

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


$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} = \frac{v_2^{\text{medido}}}{v_1^{\text{medido}}}$$

2. binárias espectroscópicas

a) para sistema espectroscópico duplo (são observadas linhas das 2 estrelas) :

das observações temos v_1^{medido} , v_2^{medido} , $P = P_1 = P_2$, $\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} = \frac{v_2^{\text{medido}}}{v_1^{\text{medido}}}$

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{2\pi a_1}{v_1} = P \rightarrow a_1 = P \frac{v_1}{2\pi} \\ P_2 &= \frac{2\pi a_2}{v_2} = P \rightarrow a_2 = P \frac{v_2}{2\pi} \end{aligned} \right\} a_1 + a_2 = P \frac{(v_1 + v_2)}{2\pi} = a$$

$$\frac{G}{4\pi^2} P^2 (m_1 + m_2) = a^3 = (a_1 + a_2)^3 \longrightarrow \frac{P}{2\pi G} (v_1 + v_2)^3 = (m_1 + m_2)$$

$$v_1^{\text{medido}} = v_1 \sin(i) \quad ; \quad v_2^{\text{medido}} = v_2 \sin(i)$$

$$\frac{P}{2\pi G} \left[\frac{v_1^{\text{medido}}}{\sin(i)} + \frac{v_2^{\text{medido}}}{\sin(i)} \right]^3 = (m_1 + m_2) \longrightarrow \underbrace{\frac{P}{2\pi G} [v_1^{\text{medido}} + v_2^{\text{medido}}]^3}_{\text{das observações}} = \boxed{(m_1 + m_2) \sin^3(i)}$$

se i (ângulo de inclinação da órbita) não conhecido só limites inferiores para a soma das massas

e $\boxed{\frac{m_1}{m_2}}$ são determinados

2. binárias espectroscópicas

b) para sistema espectroscópico de 1 linha:

das observações temos v_1^{medido} , $P = P_1$

↳ do slide anterior,
$$\frac{P}{2\pi G} (v_1 + v_2)^3 = (m_1 + m_2)$$

$$\frac{P}{2\pi G} (v_1 + v_2)^3 = \frac{P}{2\pi G} \left(v_1 + v_1 \frac{m_1}{m_2} \right)^3 = \frac{P}{2\pi G} v_1^3 \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right)^3$$

\swarrow
 $\left[\frac{v_1^{\text{medido}}}{\text{sen}(i)} \right]^3$

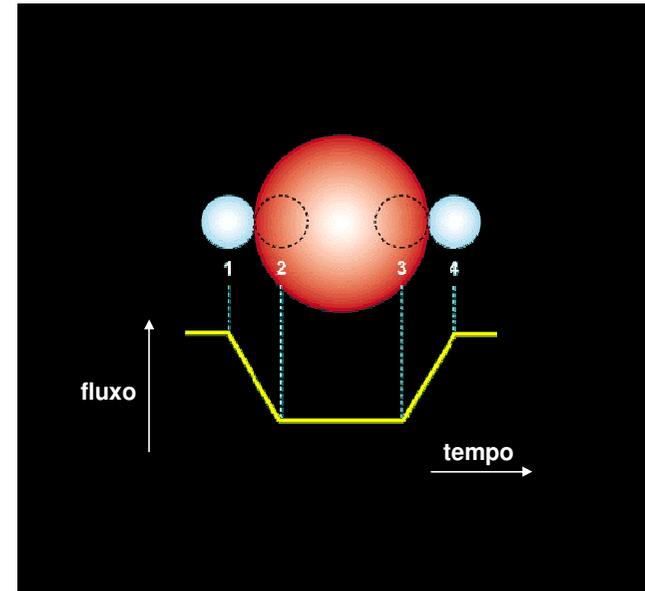
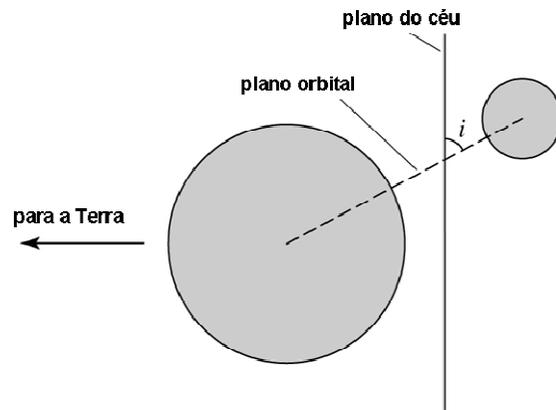
$$= \frac{P}{2\pi G} \left[\frac{v_1^{\text{medido}}}{\text{sen}(i)} \right]^3 \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right)^3 = (m_1 + m_2)$$

$$\Rightarrow \underbrace{\frac{P}{2\pi G} [v_1^{\text{medido}}]^3}_{\text{das observações}} = \frac{m_2^3 \text{sen}^3(i)}{(m_1 + m_2)^2}$$

função de massa

das observações

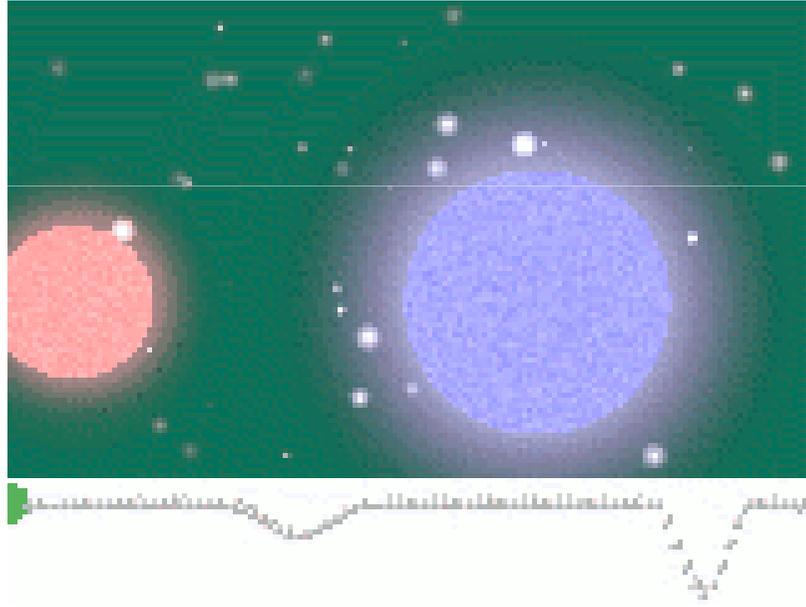
3. binárias eclipsantes ($i \sim 90^\circ$; mais raras)

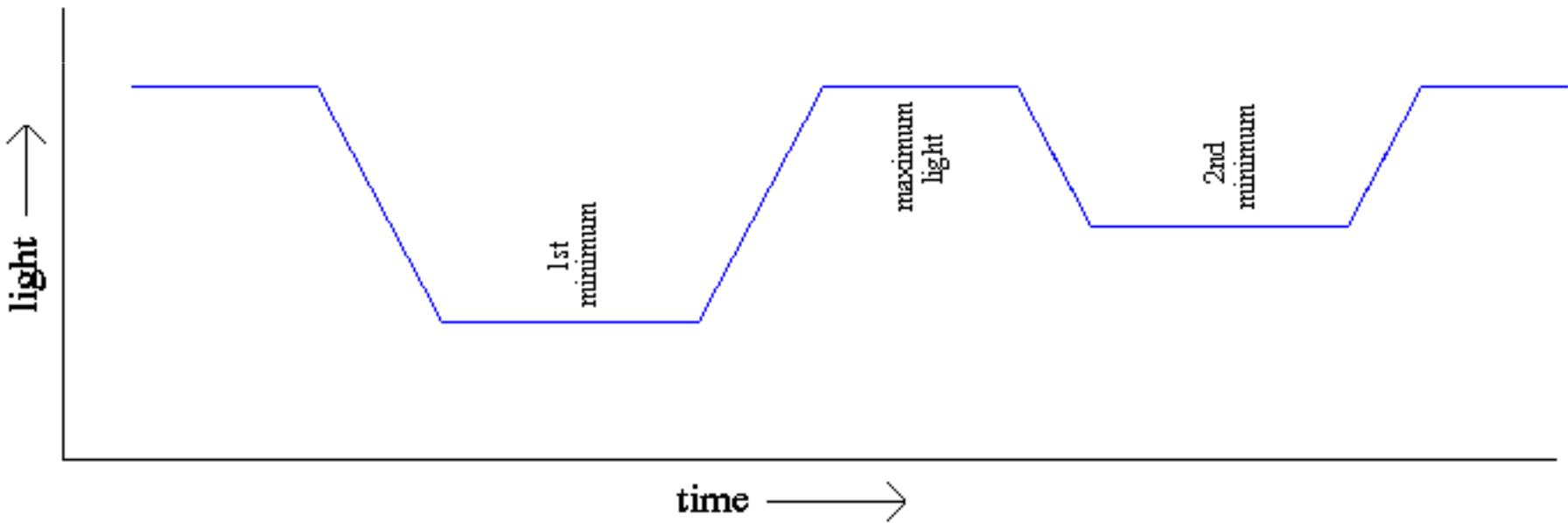
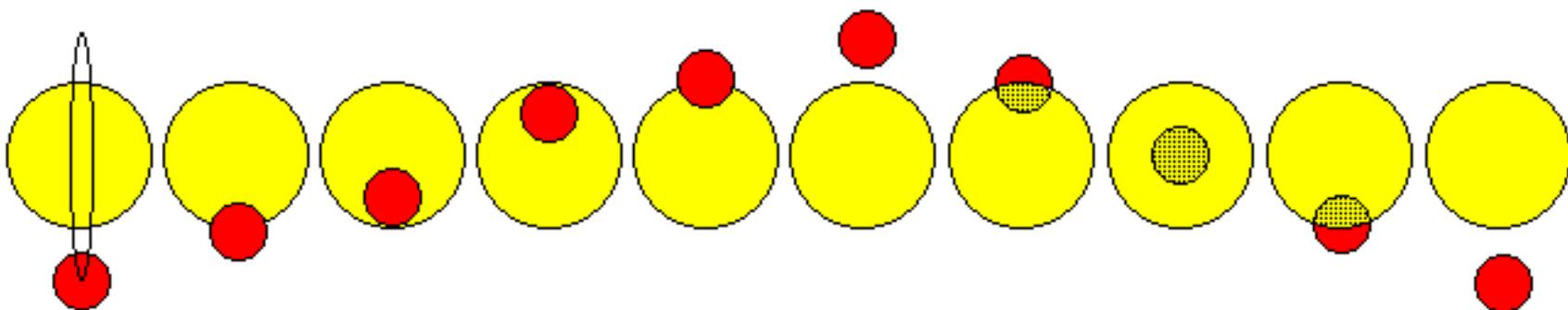


das observações: obtemos a curva de luz (F x t)

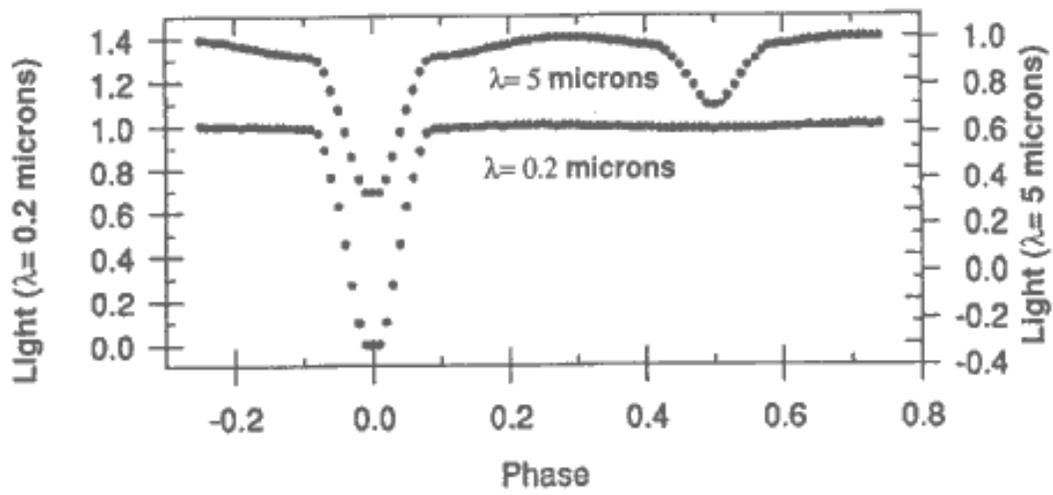
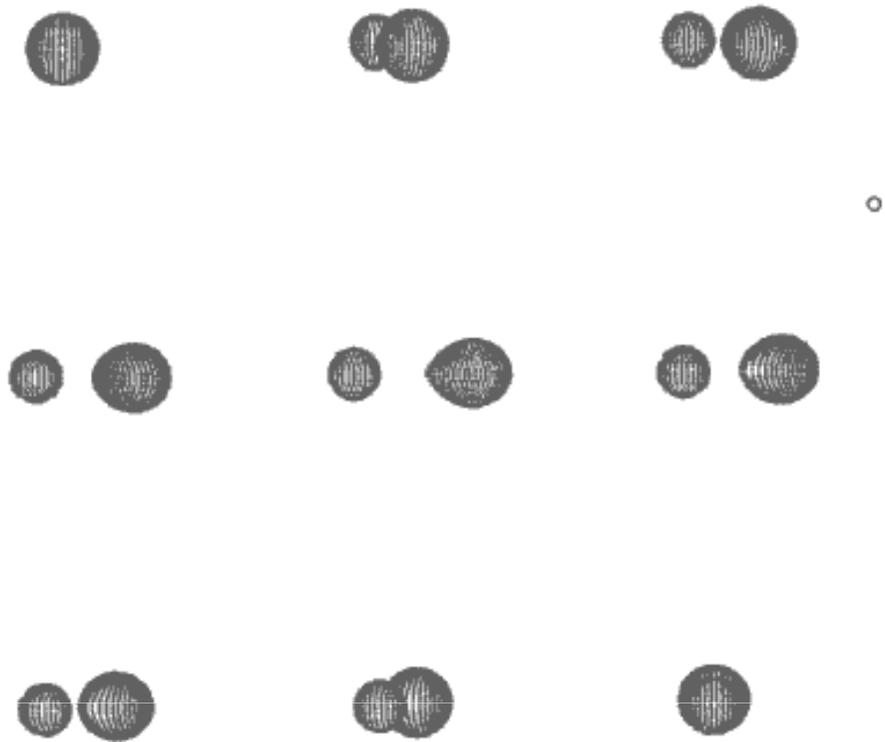


valores de $i, \frac{R_1}{a}, \frac{R_2}{a}$ que melhor reproduzem a curva de luz observada

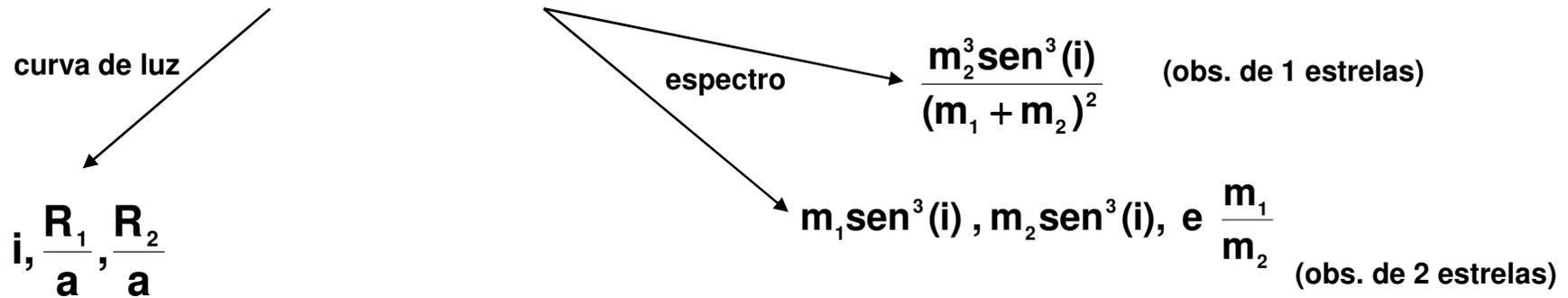




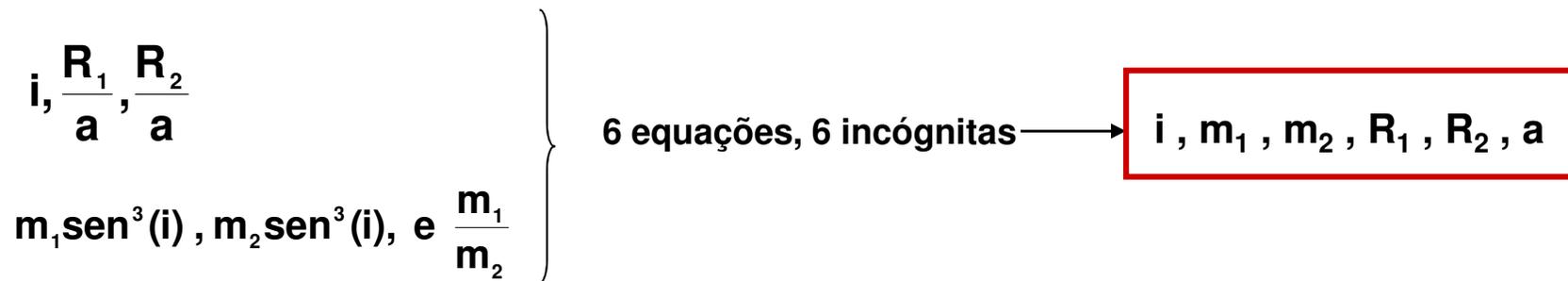




4. binárias eclipsante + espectroscópica

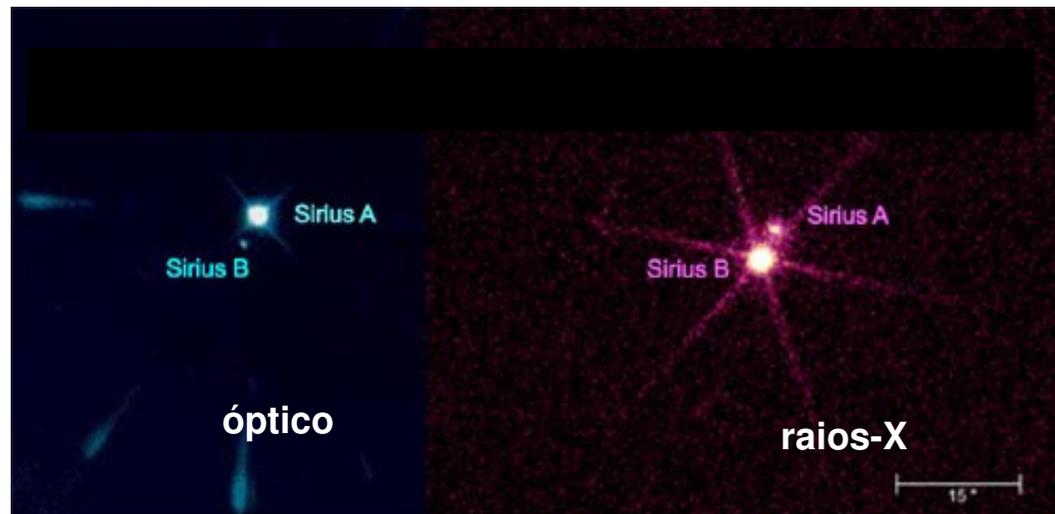
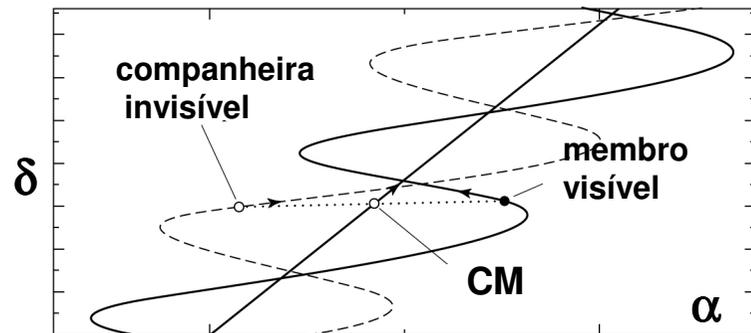


se uma binária espectroscópica também for um sistema eclipsante, não teremos a incerteza na inclinação (muitas eclipsantes são também espectroscópicas)



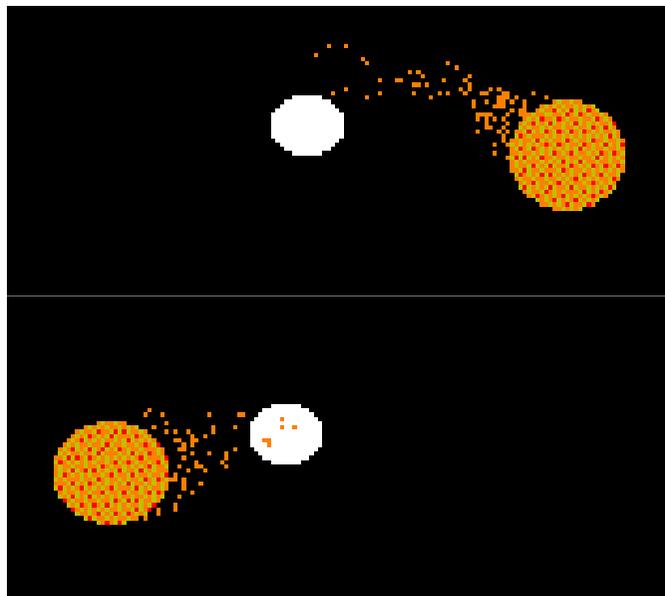
binárias astrométricas

- somente uma estrelas é observada
- sabemos que há uma companheira devido ao movimento oscilatório da estrela observada

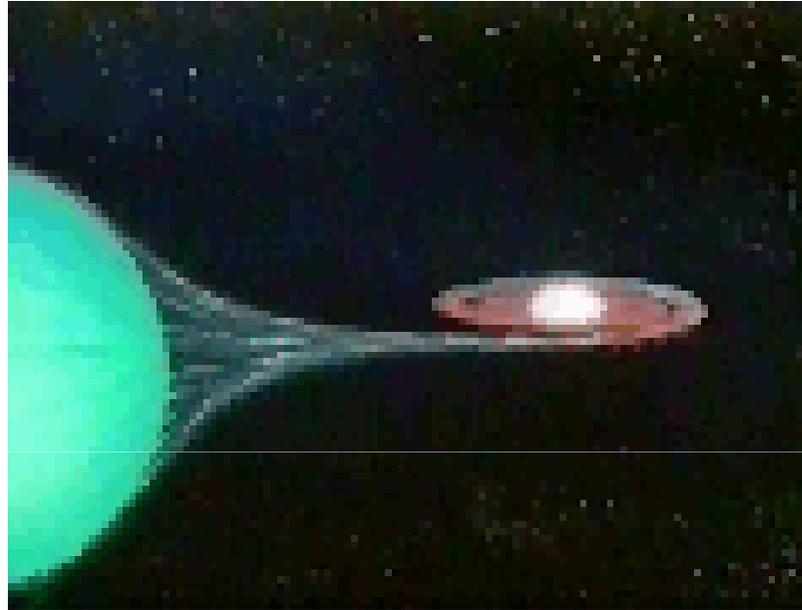


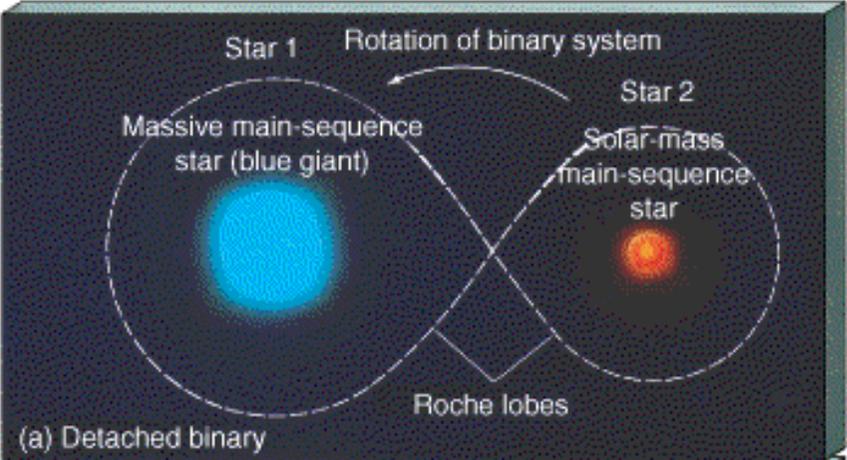
Bessel sugeriu a existência de uma companheira de Sirius em 1844 observada em 1862 (Sirius B)

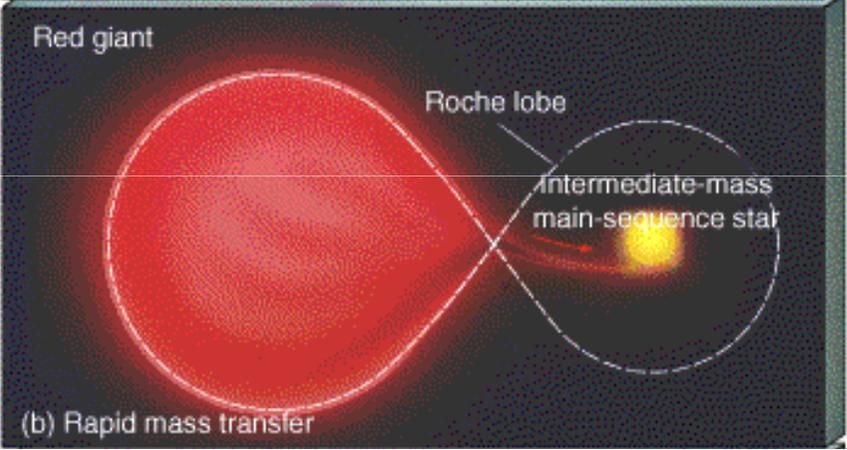
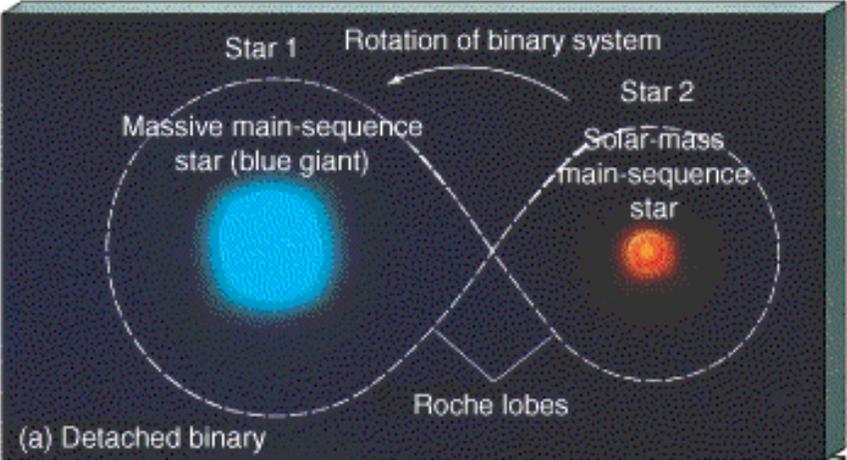
binárias interagentes

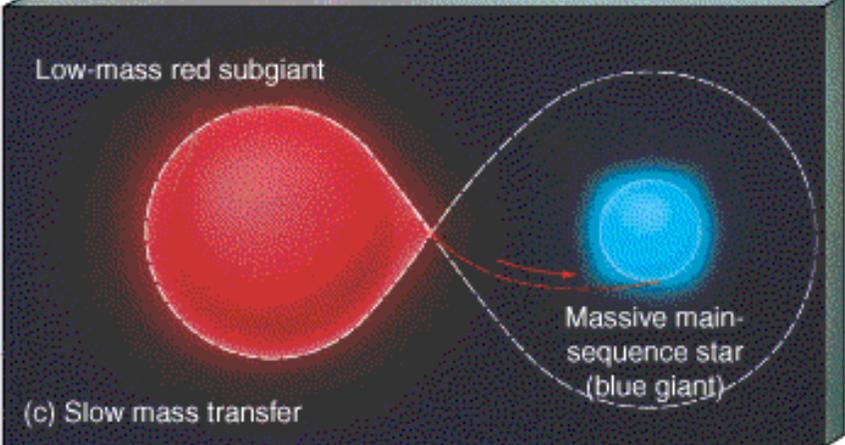
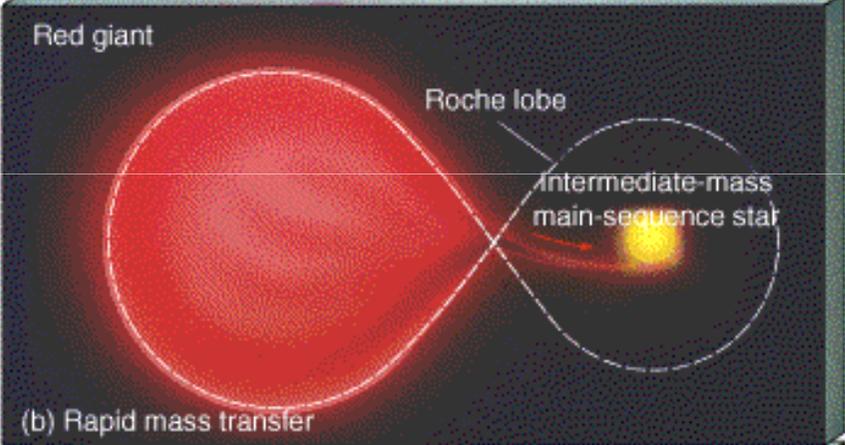
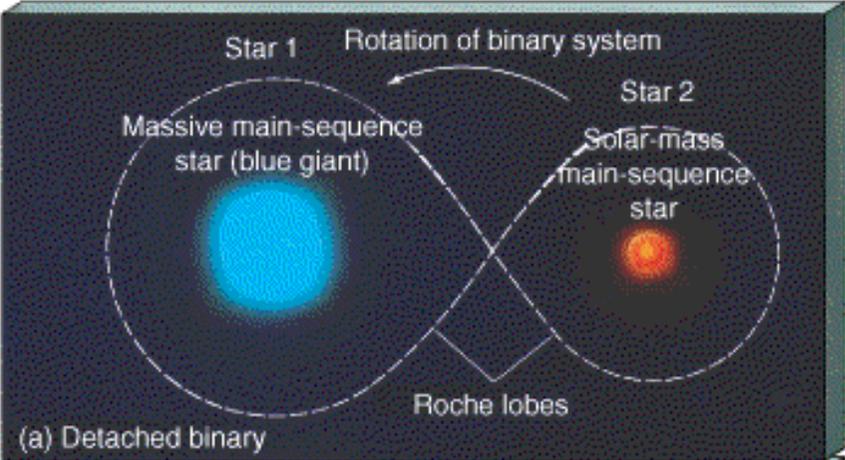


binárias interagentes









**dependência do massa e da luminosidade de estrelas jovens (não evoluídas)
(baseado em observações de sistemas binários)**

