Sistemas Binários (cap. 9)

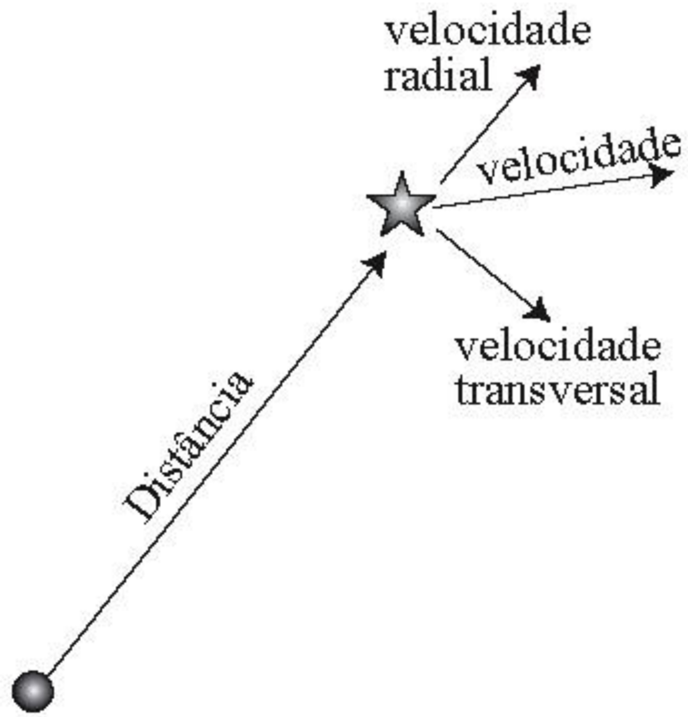
AGA215

Elisabete M. de Gouveia Dal Pino

- **Astronomy: A Beginner's Guide to the Universe, E. Chaisson & S. McMillan (Caps. 12)**
- **Introductory Astronomy & Astrophysics, M. Zeilek, S. A. Gregory & E. v. P. Smith (Cap. 10)**
- **Apostila, J. Gregorio-Hetem, V. Jatenco-Pereira, C. Mendes de Oliveira (www.iag.usp.br/”dalpino/aga215**
- **Agradecimentos Vera-Jatenco**

Movimento das estrelas

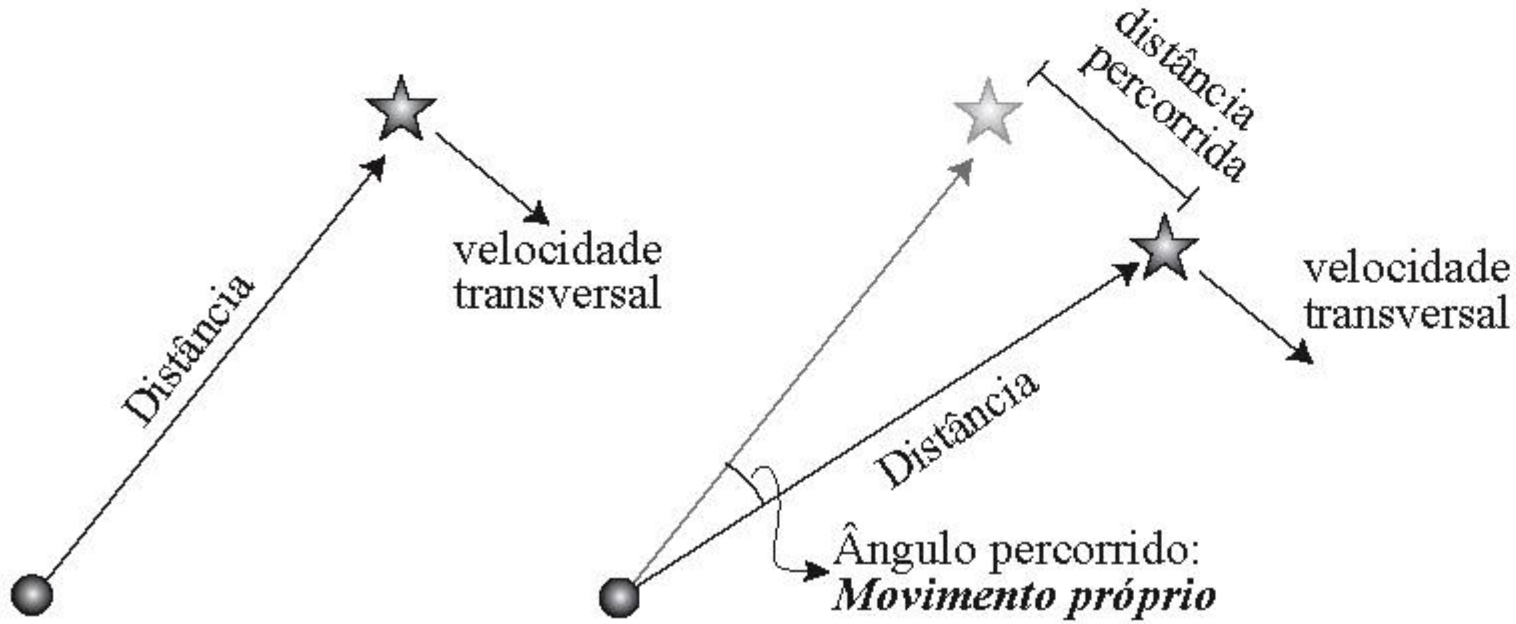
- As estrelas se movem na Galáxia.



- A velocidade se decompõe em 2 componentes:
  - velocidade radial (medida pela espectroscopia – ef. Doppler)
  - velocidade tangencial (medida pelo movimento em relação às estrelas distantes)

Movimento das estrelas

- Movimento em relação às estrelas fixas:
  - Movimento próprio.

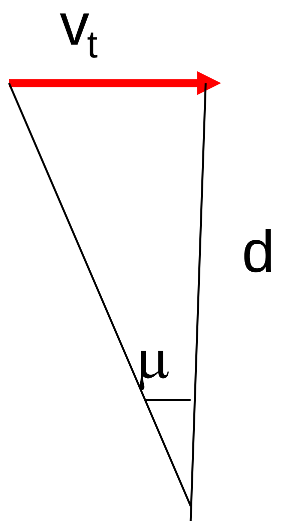


- Quanto maior a velocidade transversal, maior o movimento próprio.
- Mas quanto maior a distância, menor o movimento próprio.

Um pouco de geometria:
➔

Velocidade radial: $\mathbf{v_r = c\ \Delta\lambda/\lambda_o}$ (efeito Doppler)

Velocidade transversal: $\mathbf{v_t = d\ \tan \mu(rad/ano)}$



Onde

μ: movimento (angular) proprio (angulo/tempo)

Como μ<<1:

$$\mathbf{v_t = d\ \mu(rad/ano)}$$

Mas **d(pc) = 1/p(")** :

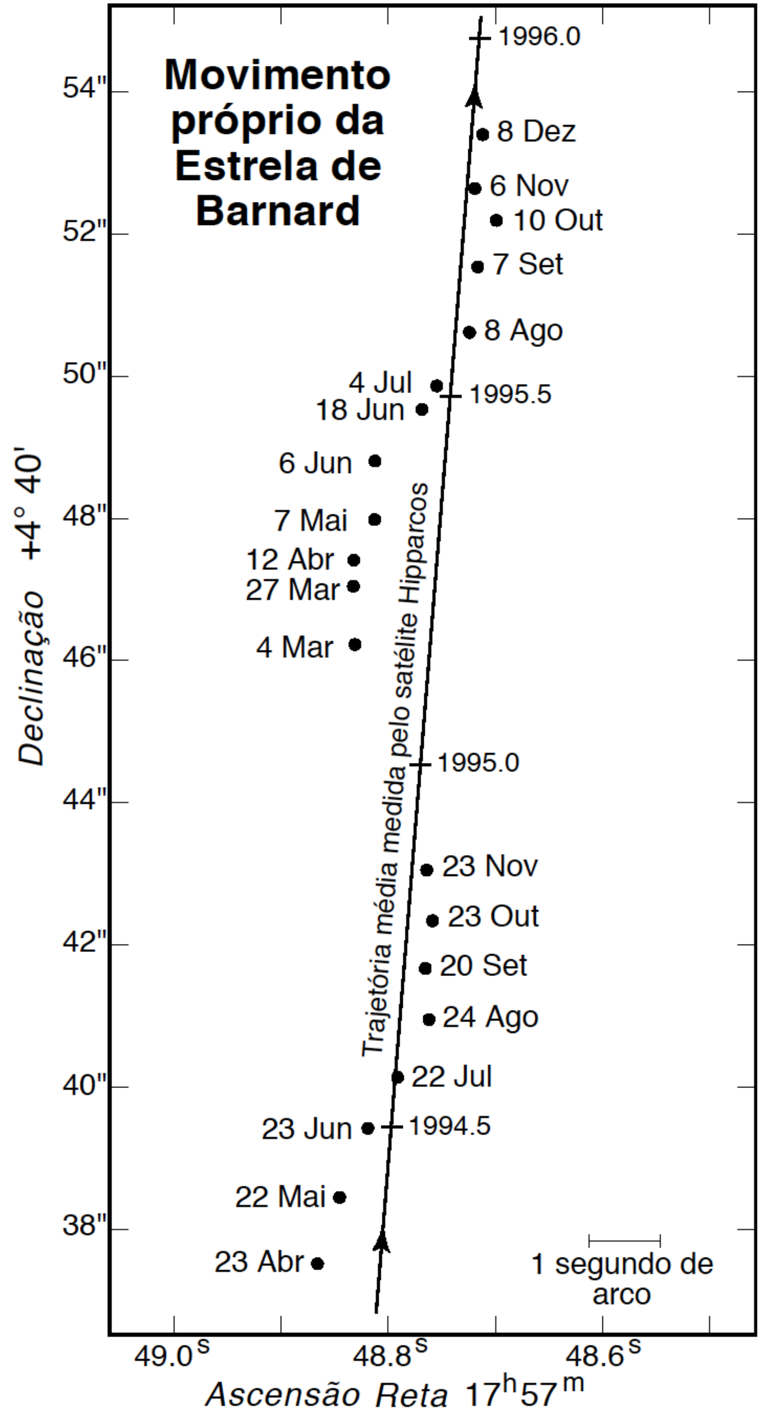
$$\mathbf{v_t\ (pc/ano) = \mu(rad/ano)/p(")}$$

Convertendo radianos em ["], pc em km, e ano em segundos:

$$\mathbf{v_t = 4.74\ \mu("/ano)/p(")} \quad \text{km/s}$$

Movimento das estrelas

- Mesmo para estrelas próximas: o movimento próprio é pequeno.
  - Maior movimento próprio é da Estrela de Barnard: 10,3"/ano;
  - Apenas 35 estrelas c/ movimento próprio acima de 3"/ano.



As estrelas giram em torno do centro Galáctico.

Na posição do Sol esta velocidade é de ~200 km/s.

As estrelas têm uma velocidade aleatória superposta à rotação.

Para estrelas próximas do Sol esta velocidade é ~10 – 40 km/s.

SISTEMAS BINÁRIOS

- Classificação das Binárias:

aparente

visual

espectroscópica

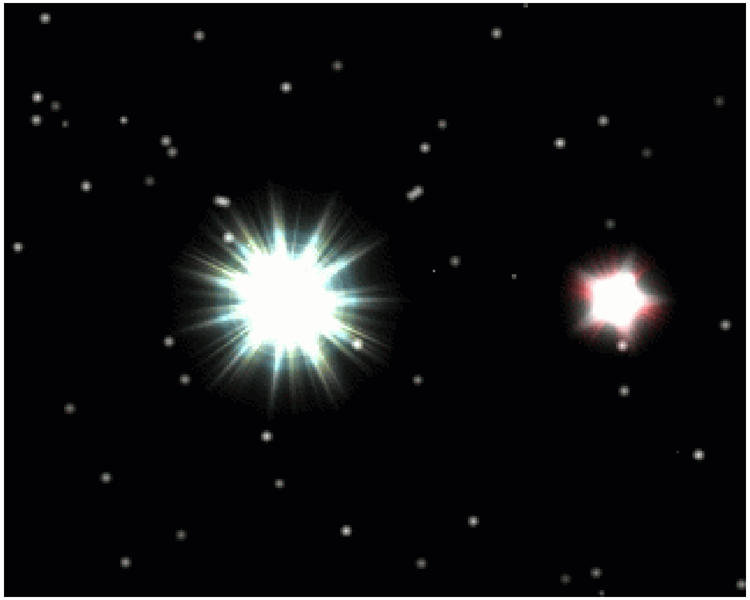
eclipsante

de contato

Estrelas Binárias

Maioria das estrelas encontra-se em sistemas **duplos ou múltiplos**

⇨ fisicamente associadas ⇨ sob ação gravitacional mútua.

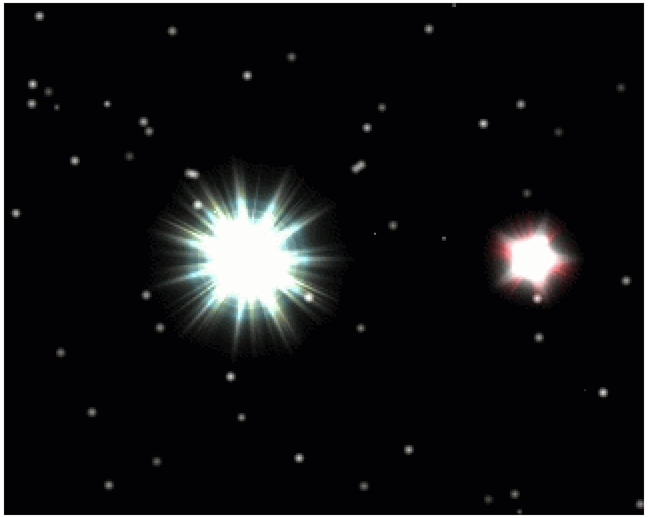


Sistemas binários ⇨ massa, raio, período.

Métodos observacionais ⇨ dependem da categoria dos sistemas estelares.

Exemplo de sistemas próximos (até 3,8 pc):

Alfa Centauro: 3 estrelas
Sirius: 2 estrelas
EZ Aquário: 3 estrelas
Procyon: 2 estrelas
61 Cygni: 2 estrelas
Epsilon Indi: 3 estrelas



Dentro de 10 pc (em 09/2006):

175 estrelas solitárias
55 binárias
14 sistemas triplos
4 quádrupos
1 quíntuplo

173 estrelas em sistemas múltiplos

Sistemas binários

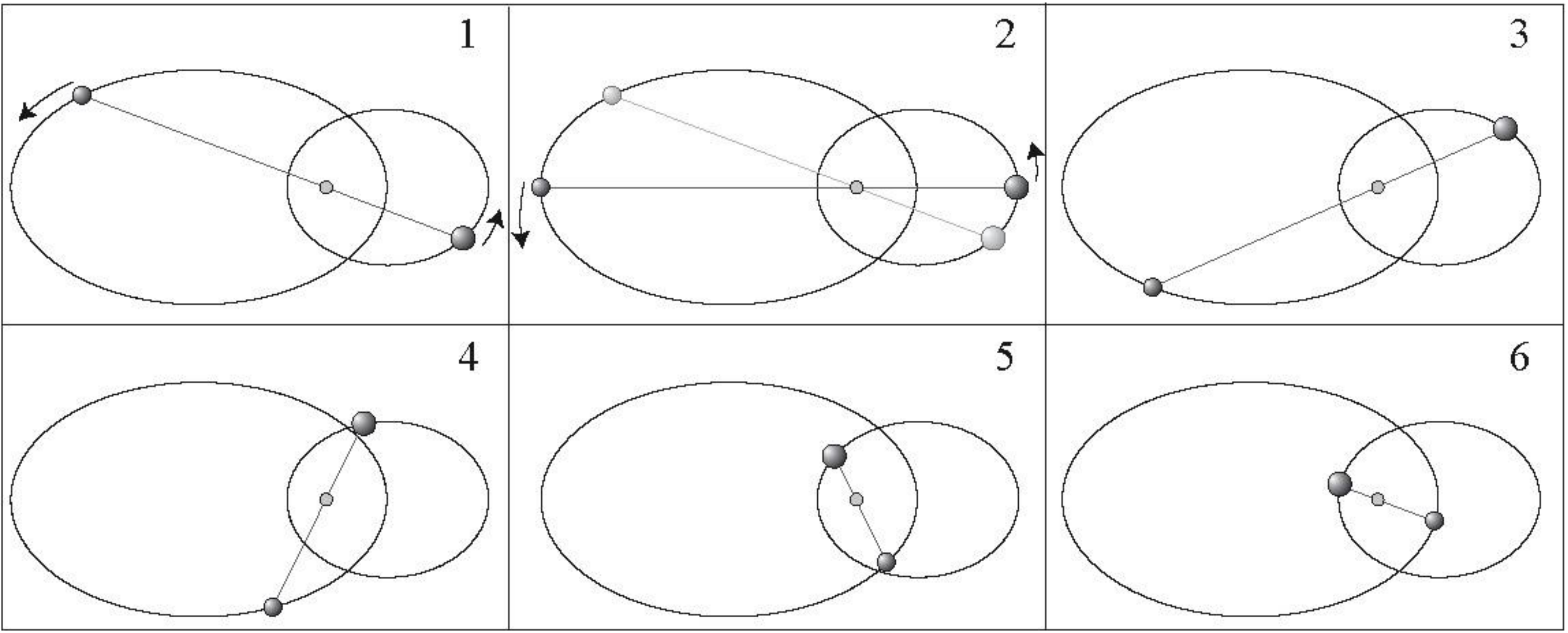
- Algumas estrelas binárias ou "estrelas duplas" são conhecidas desde a época de Ptolomeu.

- William Herschel mostra em 1803 que algumas "estrelas duplas" são sistemas onde uma estrela orbita ao redor da outra.

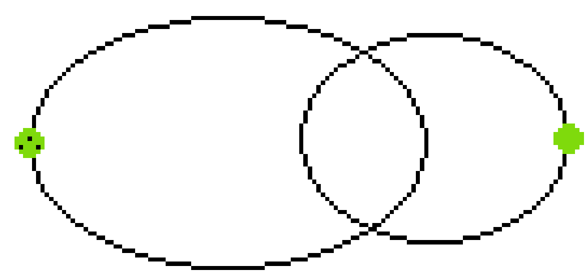
- Conhecendo a órbita das estrelas de um sistema duplo podemos determinar a **massa** das estrelas (leis de Kepler).

massa é um parâmetro fundamental e **não** é observável diretamente

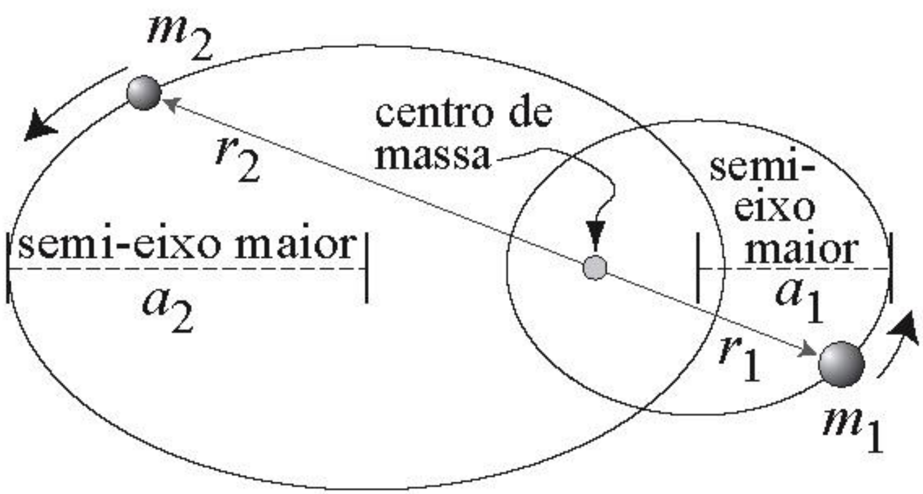
Órbita em sistemas binários

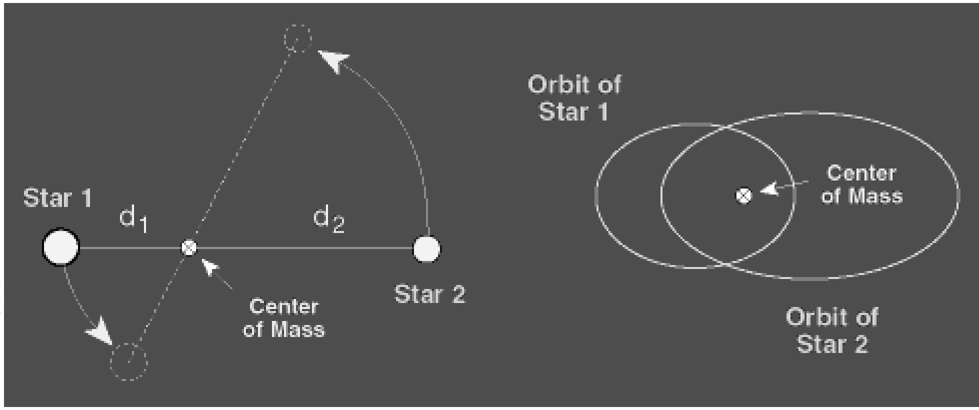


- As estrelas orbitam em torno do centro de massa (em repouso)
- Assim como no Sistema Solar, valem as Leis de Kepler



Órbita em sistemas binários





- A massa total é determinada pela 3a Lei de Kepler:

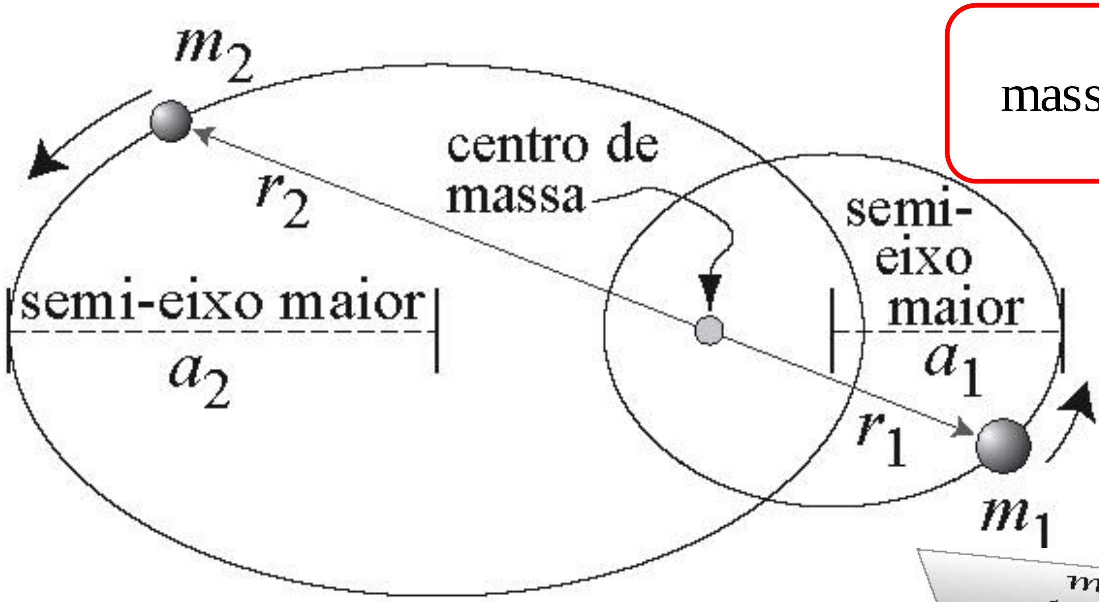
$$\boxed{P^2 = \left[\frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)}\right] a^3}$$

$$\boxed{\text{massa total} = m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2}{G}\frac{(a_1 + a_2)^3}{\text{período}^2}}$$

- A razão das massas é dada pela razão dos semi-eixos maiores:

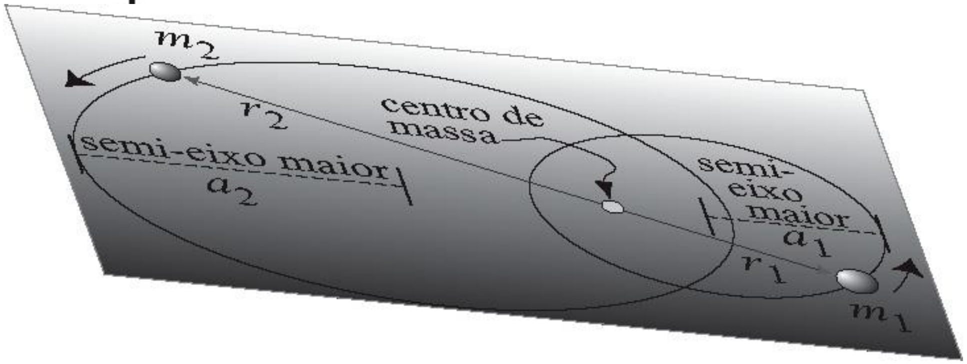
$$\boxed{\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}}$$

Órbita em sistemas binários



$$\text{massa total} = m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2}{G}\frac{(a_1 + a_2)^3}{\text{período}^2}$$

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

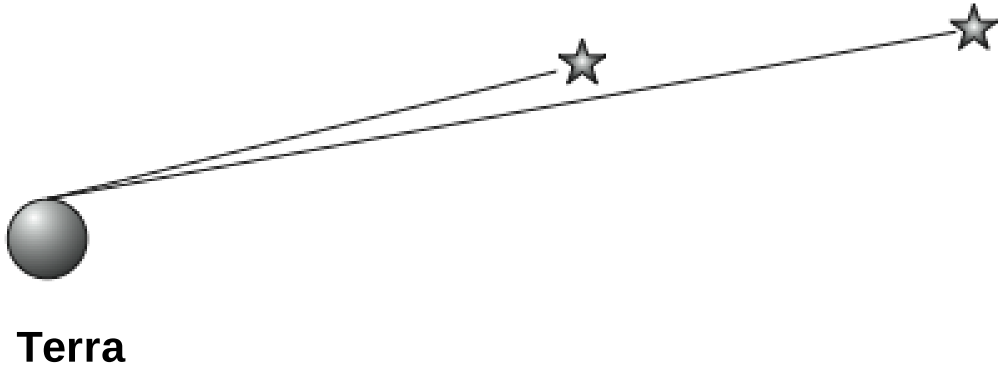


- Complicadores:
  - movimento próprio do centro de massa;
  - em geral, o plano da órbita está inclinado em relação ao observador ➔ efeito de projeção;
  - é claro, este método só funciona se podemos resolver as estrelas!

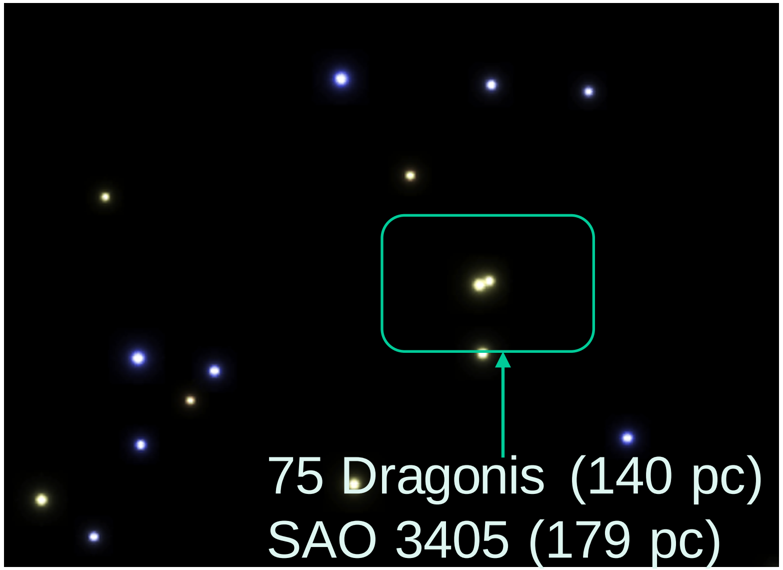
Classificação das Binárias

Tipos identificados de acordo com características físicas e observacionais:

1. Aparente: sistema *parece* duplo devido a efeito de projeção. Estrelas estão a diferentes distâncias do Sol ⇨ não formam um sistema ligado.



como visto
no céu



2. Binárias Visuais

- **Sistema ligado que pode ser *resolvido* (distinguido) por um telescópio**.

- Limitação observacional: atmosfera da Terra - raramente a imagem de uma estrela é vista com diâmetro menor que 1”.

- Binárias visuais podem ser *resolvidas* com telescópio se tiverem uma **separação > 1”**

períodos orbitais longos (alguns anos até milhares de anos).

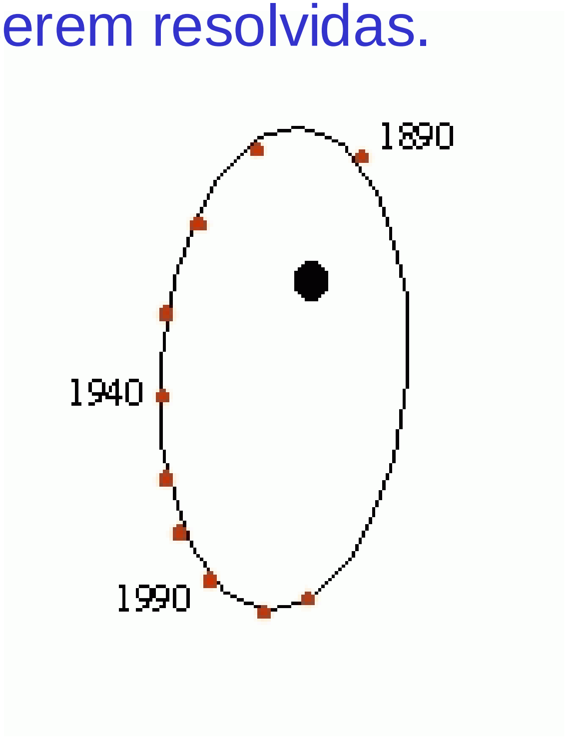
Binária Visual

Sistema onde as componentes podem ser identificadas individualmente;

- estão suficientemente separadas para serem resolvidas.

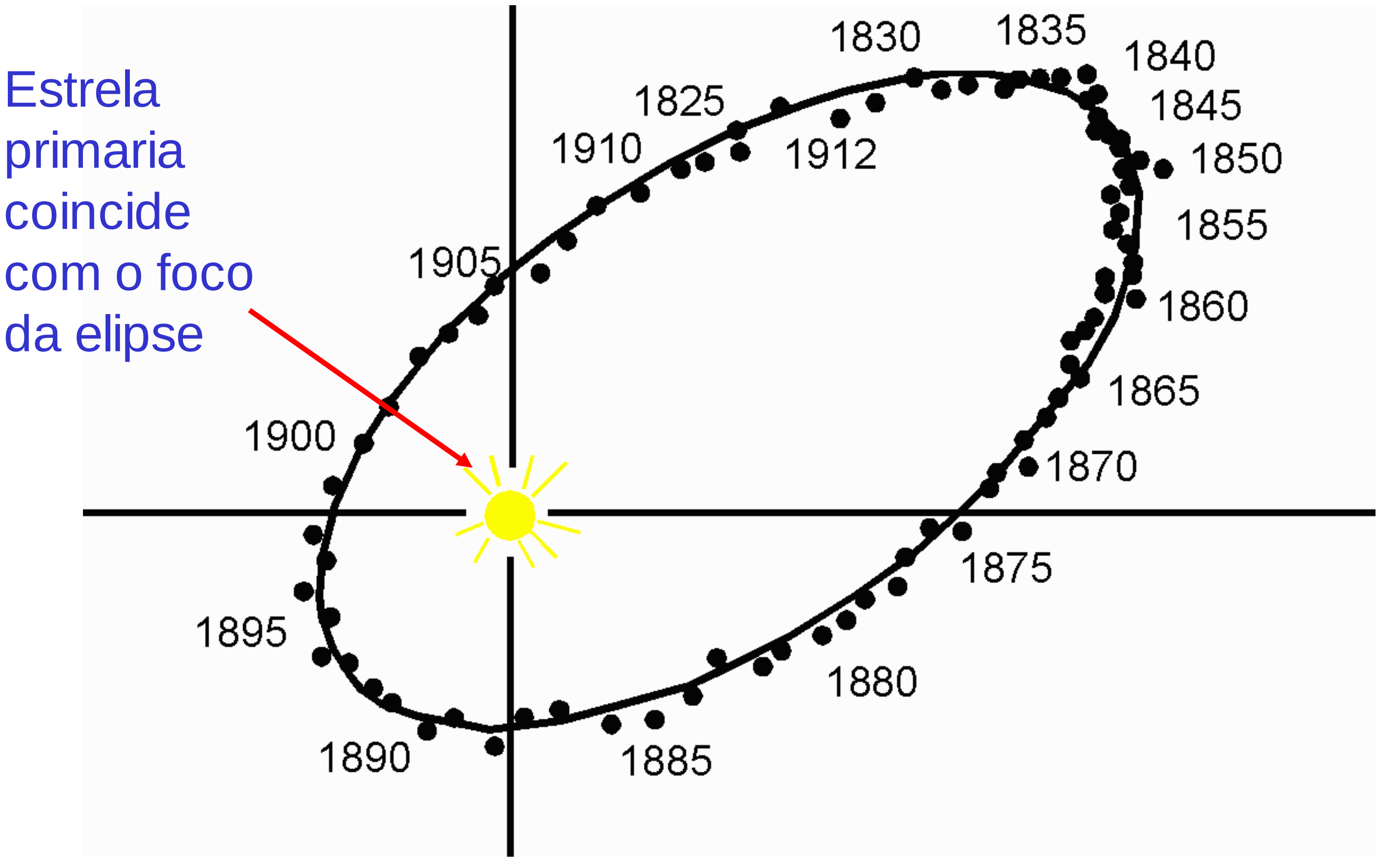
Estudo do seu movimento é necessário

→ para verificar se as estrelas se movem de forma independente ou não.



Períodos e separações de uma binária podem ser observados diretamente se cada estrela é vista claramente.

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.



A determinação das massas das estrelas é feita em etapas:

- Observa-se o período orbital (P) e a separação angular (θ) (semi-eixo maior da órbita), que pode ser transformada em separacao linear em parsecs (a), dada a distância do sistema (paralaxe):

a (pc) = θ(rad) d = θ(rad)/p(“) pc

Mas 1 pc= 206.265 UA e

1 rad= 206.265” $\rightarrow$ θ(rad) = θ(“)/206.265

Logo:

a(UA) = θ(“) / p(“) UA

- Período (P) e tamanho da órbita (a) são aplicados na 3ª lei de Kepler (formulação Newtoniana):

$$\boxed{P^2 = \left[\frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)}\right] a^3}$$

Lembrando que se:

P [anos]

a [UA]

m [$M_\odot$]

Entao nesse caso, a 3ª lei de Kepler é dada por:

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

Pois $4\pi^2/GM_{sol}$ = K = 1: quando P, a e m sao dados nas unidades acima

Exemplo de aplicação

- Binária visual observada com separação máxima de 3” e paralaxe de 0,1”.
- Órbita completada em 30 anos; posição da estrela primária coincide com o foco da órbita.
- Secundária é sempre vista a uma distância de $r_2 = 5\,r_1$ do centro de massa.

Lembrando os dados: θ=3"; p=0,1"; P=30 anos; $r_2 = 5\ r_1$

$a = r_1 + r_2$ **a(UA) = θ(") / p(") UA**

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

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

$\rightarrow$ $m_1+m_2=30M_\odot$ (1)

- Lembrando que: **$m_1\, r_1 = m_2\, r_2$**, e **$r_2 = 5\ r_1$**

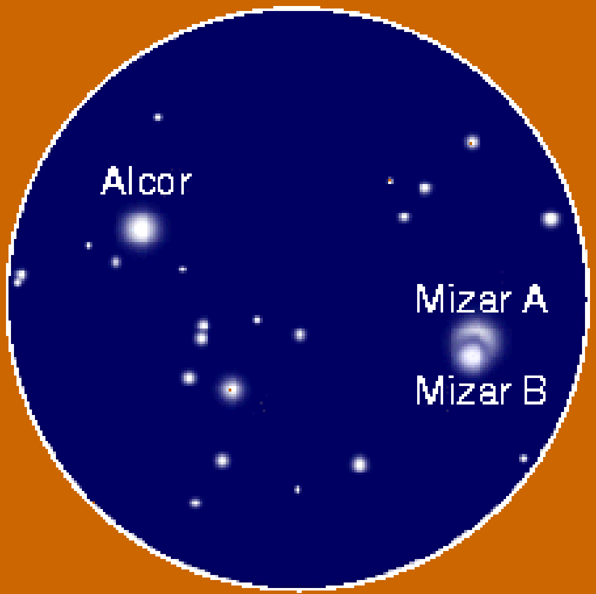
temos: $m_1 = 5\ m_2$ (2)

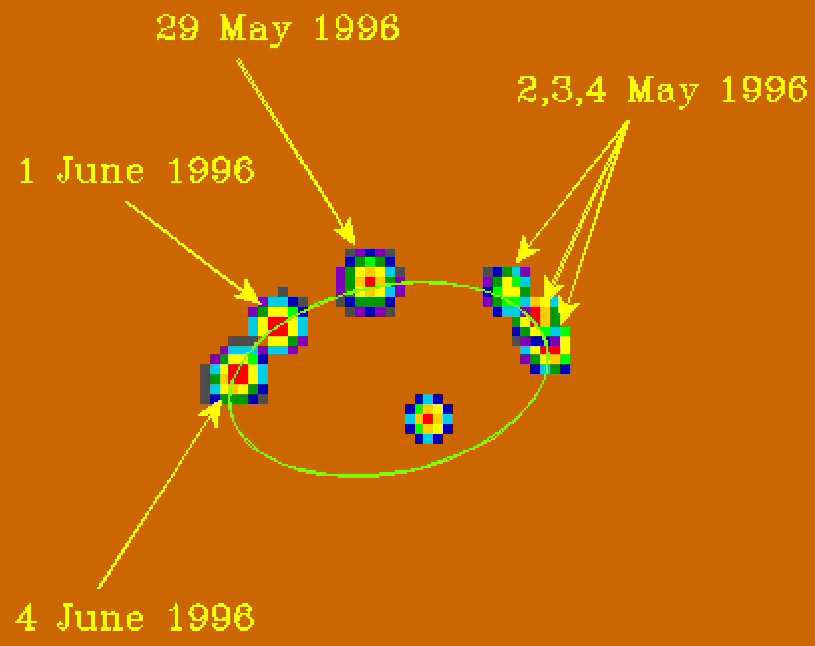
- Substituindo (2) em (1) teremos: $6\ m_2= 30M_\odot$

então $m_2= 5\ M_\odot$ e $m_1= 25\ M_\odot$

A olho nu Mizar parece uma estrela só que está a 11 minutos de arco de Alcor.

Do telescópio, Mizar é uma binária visual. Mizar A e B estão separadas de 15”. Período orbital é de meio ano.





Mizar A é uma binária com separação de 10 mili-segundos de arco e período orbital de 20.5 dias.

3. Binárias Astrométricas

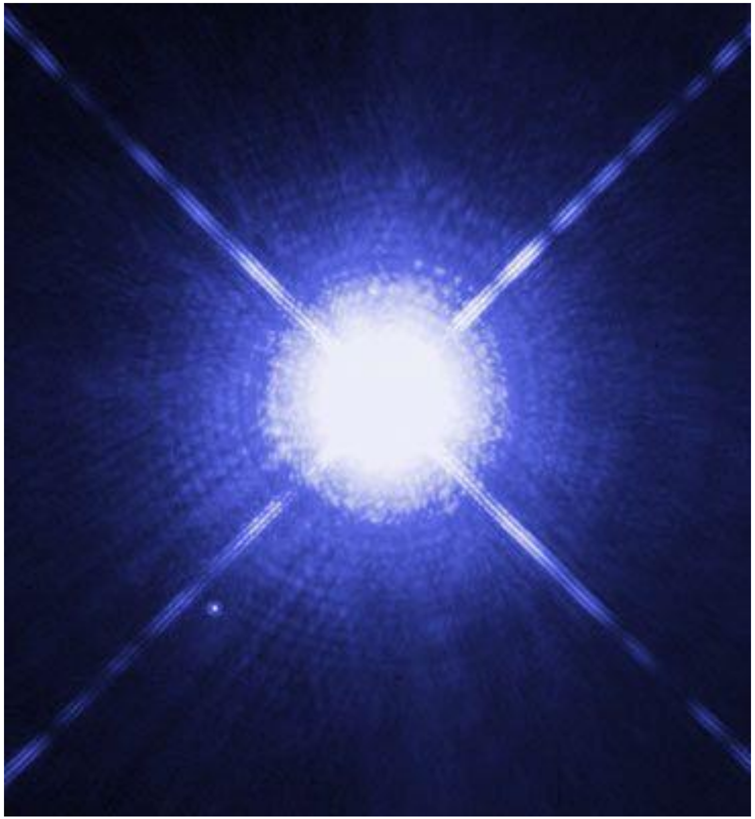
- Apenas uma estrela é detectada no telescópio, mas nota-se seu movimento oscilatório

⇨ presença de uma companheira não observável.

Ex: par formado por Sirius A e B.

Exemplo de binária astrométrica: Sirius

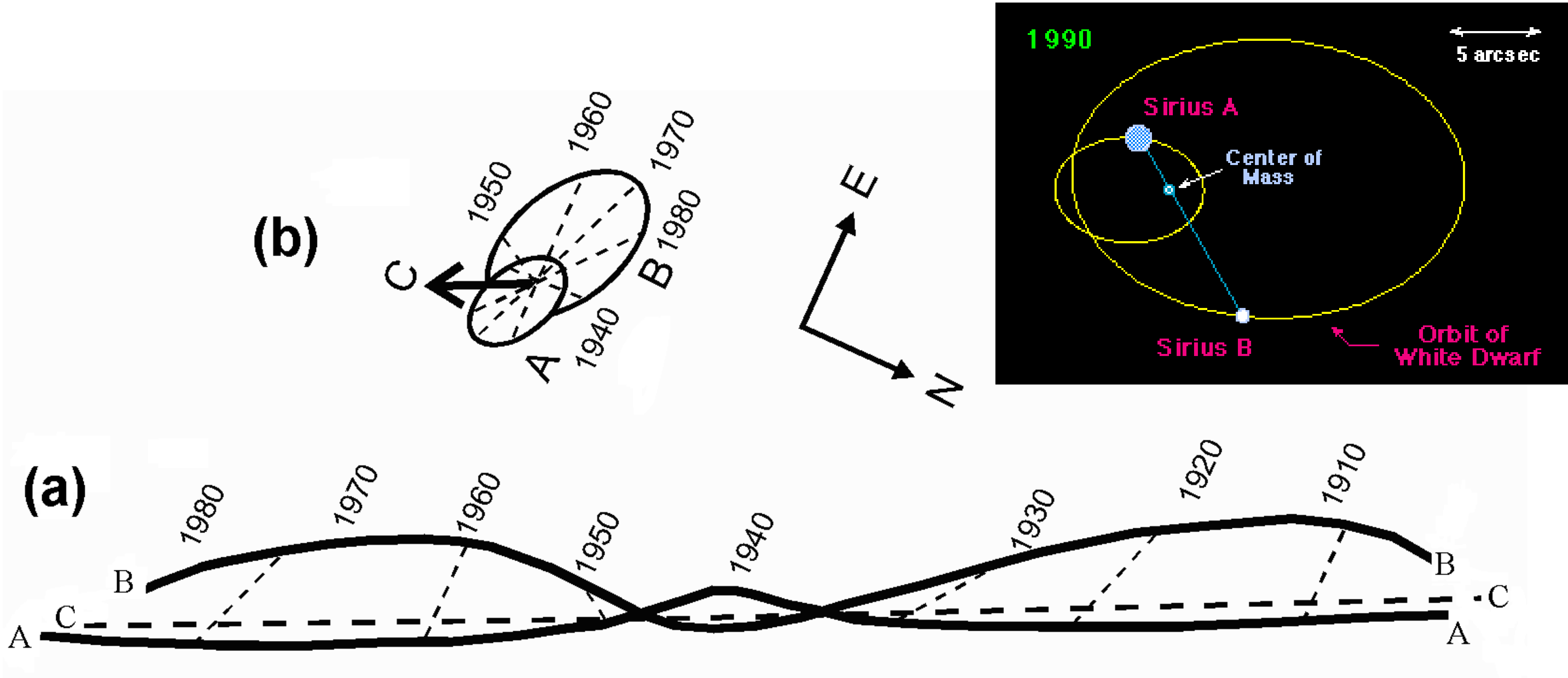
- A presença de uma companheira de Sirius foi descoberta pelo movimento oscilatório de Sirius.
  - Antigamente: Sirius era classificada como binária astrométrica.
  - Sirius B foi observada (posteriormente)
    - Passa a ser uma binária visual.



- Pela paralaxe, a distância de Sirius é 2,63 pc.

- Medida da trajetória de Sirius nos diz:

Período = 49,9 anos
semi-eixo maior de Sirius A = 2,309"
semi-eixo maior de Sirius B = 5,311"



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

(b) Movimentos orbitais de Sirius A e B com relação ao centro de massa.

Exemplo de binária: Sirius

- Medida da trajetória de Sirius nos diz:
  - Período = 49,9 anos
  - semi-eixo maior de Sirius A = 2,309"
  - semi-eixo maior de Sirius B = 5,311"

- $\text{Massa}_A/\text{Massa}_B = a_B/a_A$

$\text{Massa}_A/\text{Massa}_B = 2,3$ ou $\boxed{M_{\text{SiriusA}} = 2,3\ M_{\text{SiriusB}}}$

Pela lei de Kepler:

$$\boxed{\text{massa total} = m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2}{G}\frac{(a_1 + a_2)^3}{\text{período}^2}}$$

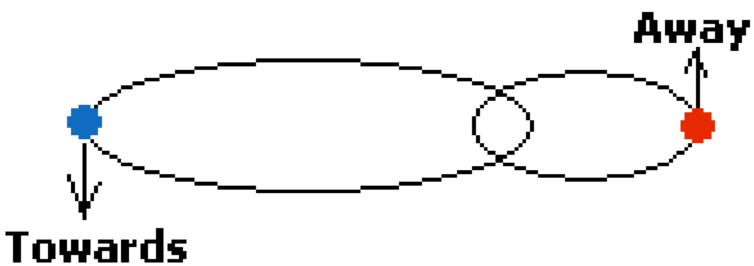
$a_A + a_B = 7,62"$ ou 20,04 UA [pois **a(UA) = a(") / p(") UA]**

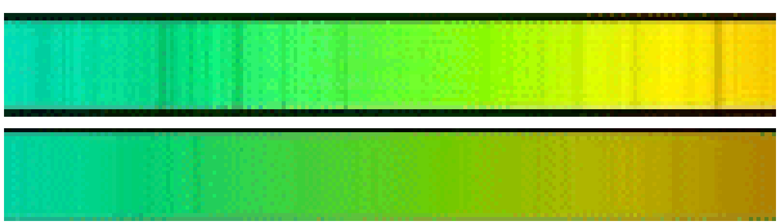
Portanto, $M_{\text{SiriusA}} + M_{\text{SiriusB}} = 3,23\ M_{\text{Sol}}$

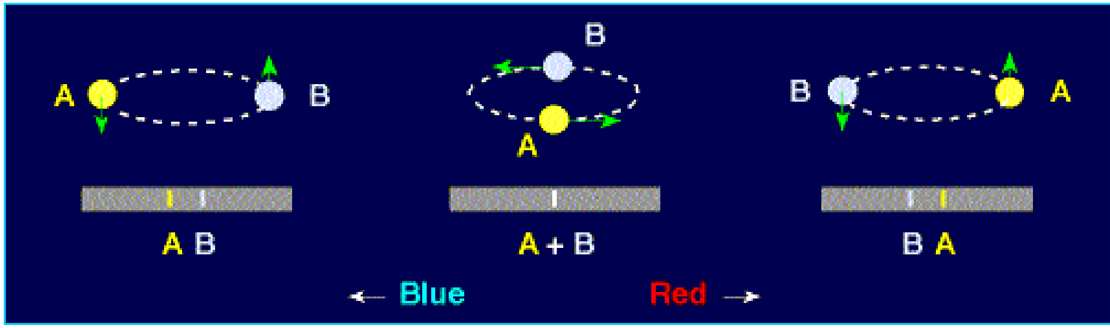
Logo, $M_{\text{SiriusA}} = 2,25\ M_{\text{Sol}}$ e $M_{\text{SiriusB}} = 0,98\ M_{\text{Sol}}$.

4. Binárias Espectroscópicas

- estrelas encontram-se muito próximas entre si (< 1UA);
- períodos orbitais pequenos (horas a meses);
- sistema **não resolvido**
- Se a inclinacao da orbita (i) relativa ao plano do ceu **nao é 0º**: duplicidade revelada por **oscilação nas linhas espectrais**:

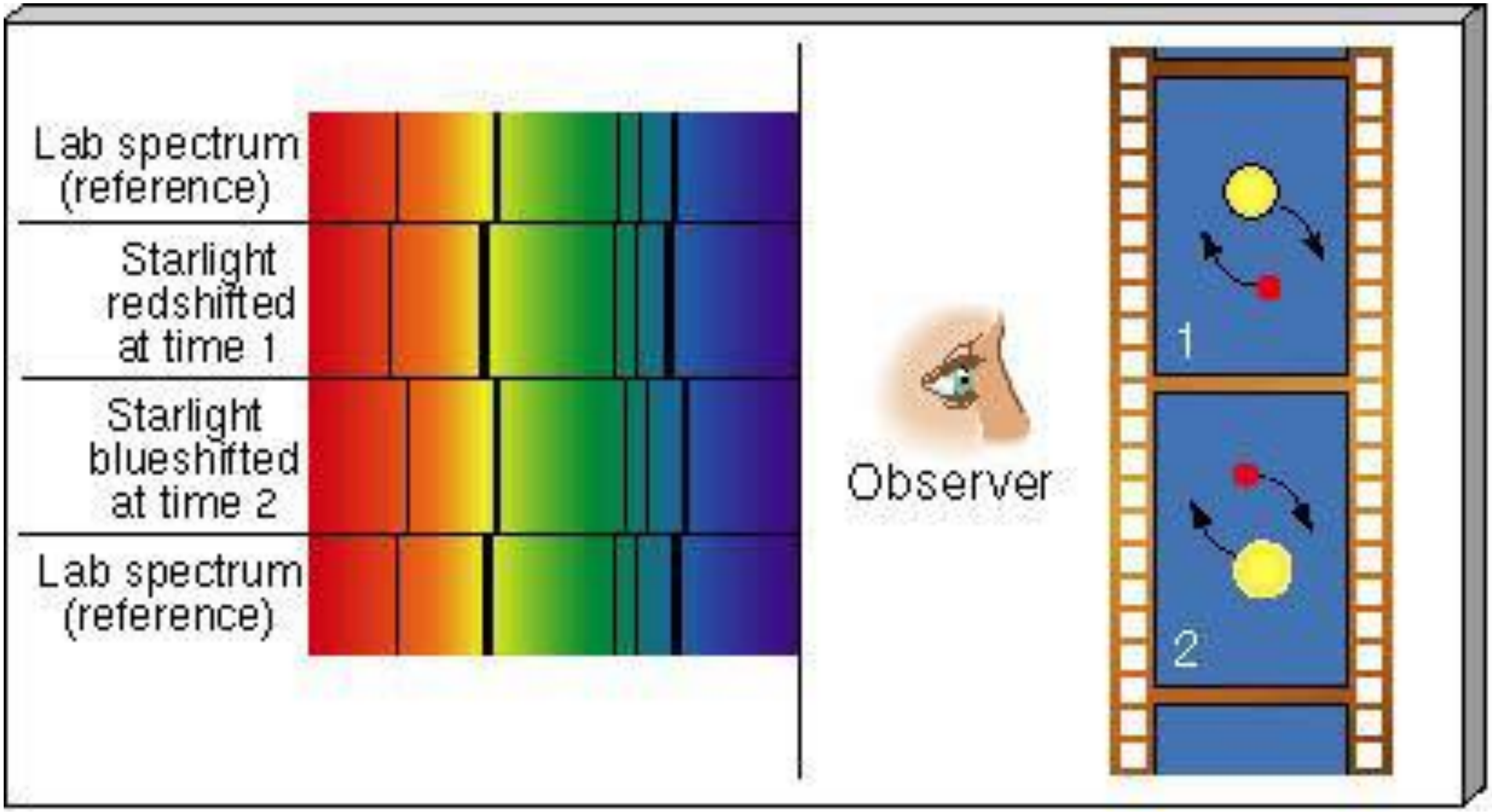






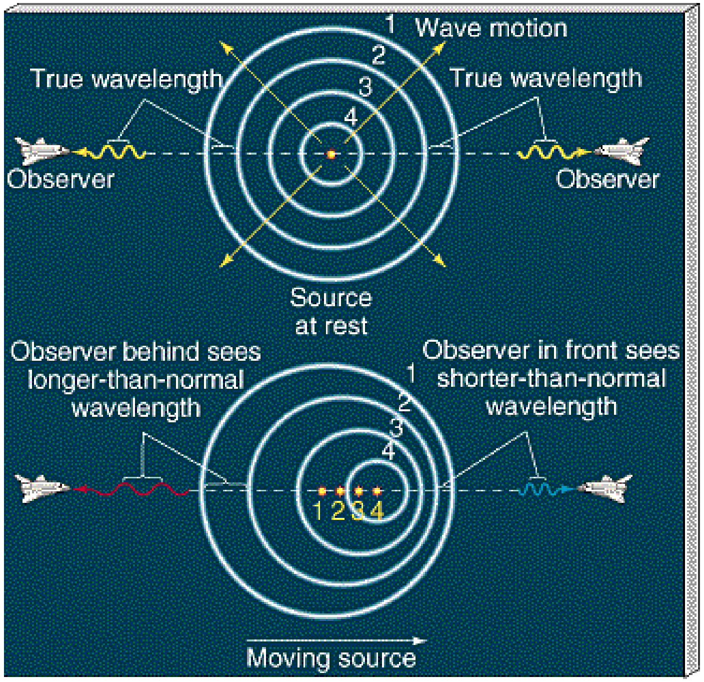
Deslocamento Doppler observado nas linhas espectrais indica movimento radial.

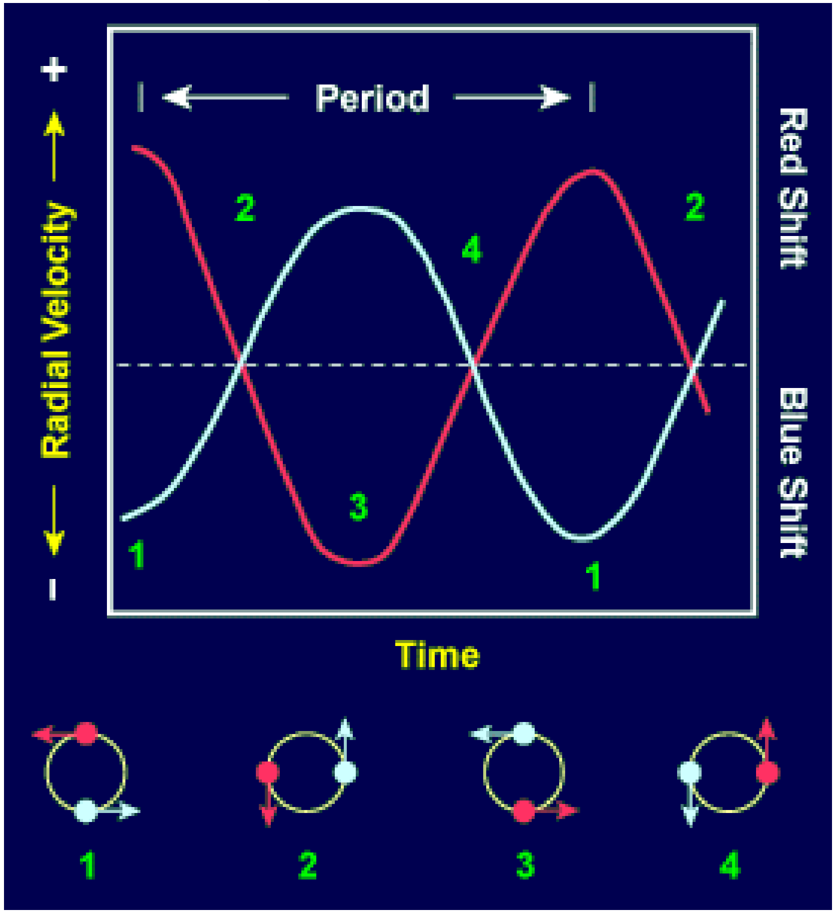
Binarias Espectroscopicas



Efeito Doppler

$$\lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \left(v/c \right) \longrightarrow \Delta\lambda/\lambda_0 = v/c$$





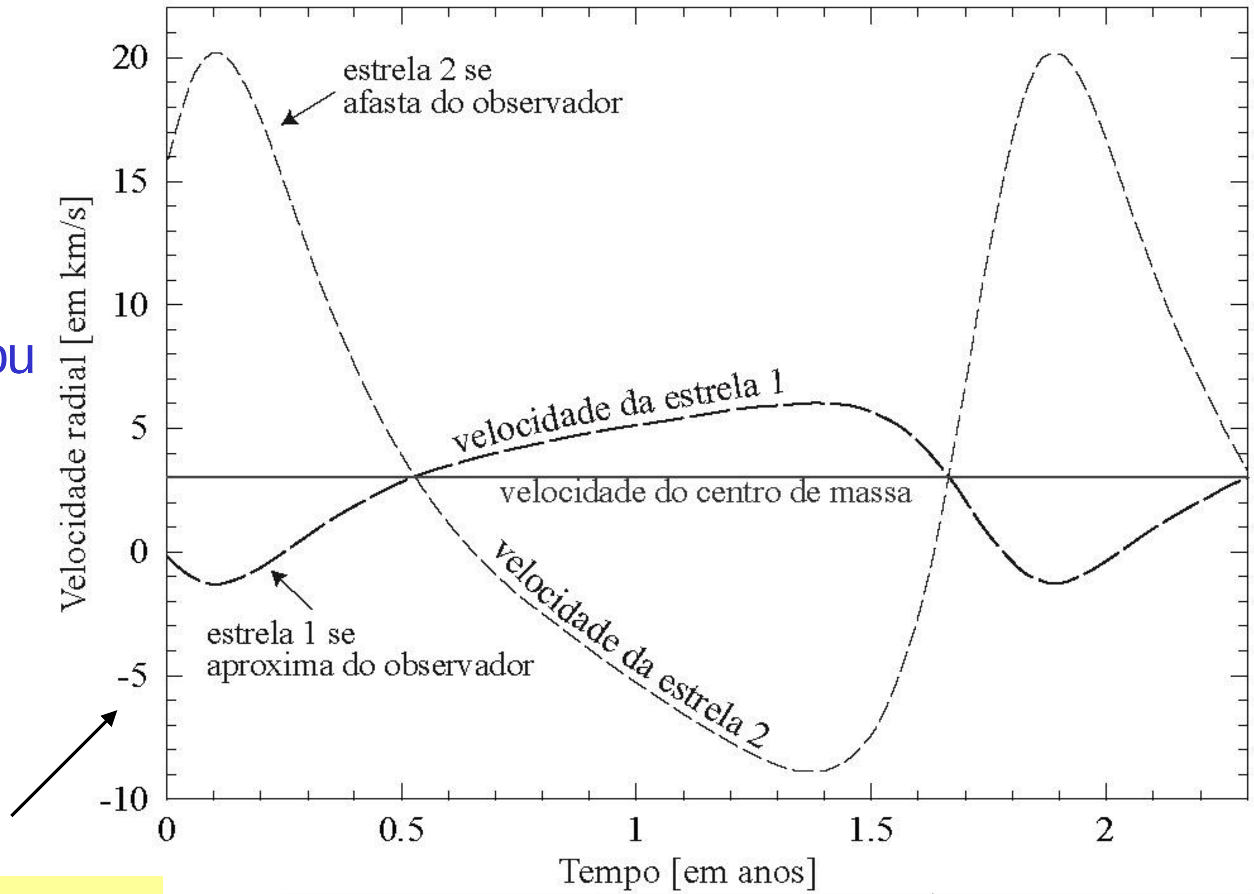
v x t:

Medimos P

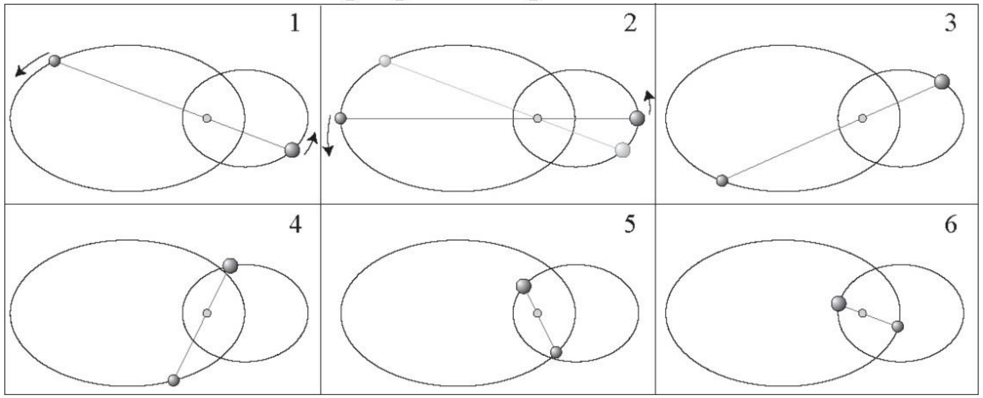
➔ Obs.

Velocidade em sistemas binários

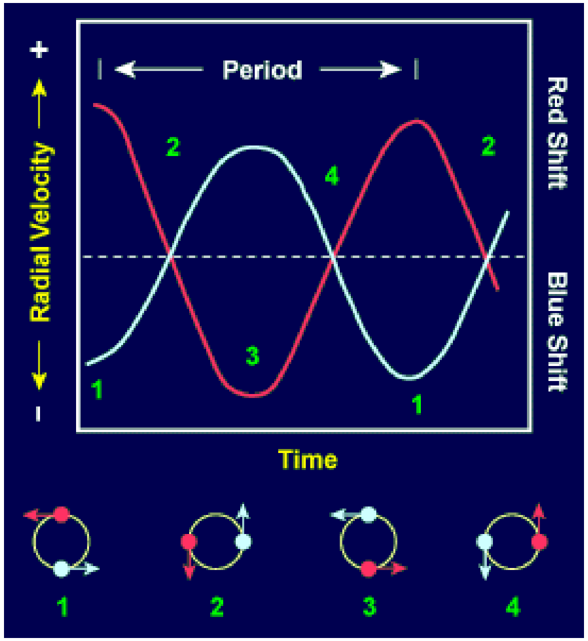
- Da curva **V x t:**
- Medimos P
- A velocidade de uma ou das duas estrelas nos permite deduzir a massa das estrelas



Curvas de velocidades para orbitas elipticas (se fossem circulares teriamos senoidais)



Sejam 2 estrelas com **orbitas circulares** em torno do CM e com inclinacao de suas orbitas **i=90°** em relacao ao plano do céu (o sistema é visto de lado):



- **P, V e v** sao medidas (pelo efeito Doppler)
- Estrela 1 (primaria): V, M, R
- Estrela 2 (secundaria): v, m, r

- Como determinar M e m?

$$\mathbf{R = VP/2\pi} \qquad \mathbf{r = vP/2\pi}$$

$$\mathbf{M\,R = m\,r} \rightarrow \mathbf{M/m = r/R = v/V}$$

$$\mathbf{a = R+r}$$

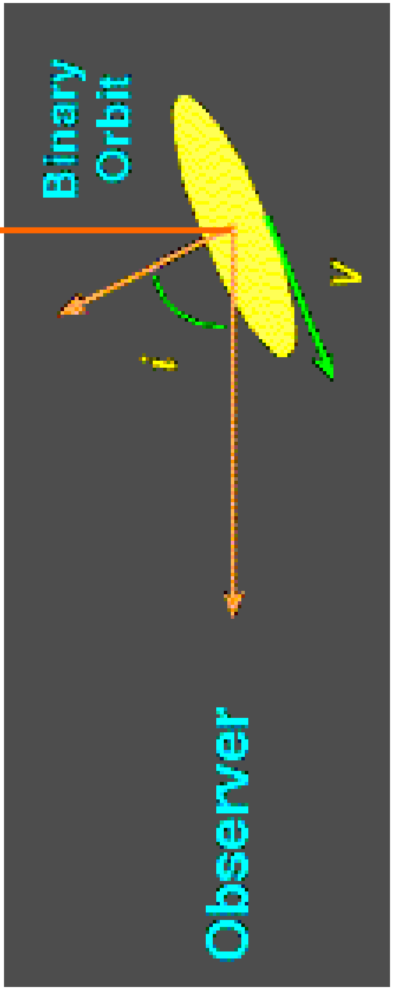
$$\mathbf{M+m = a^3/P^2}$$

➔ **e podemos entao obter M e m**

Em geral - situacao é mais complicada:

Ex.: em geral nao facil determinar inclinacao (i) do plano orbital (so se for binaria eclipsante tambem).

Plano do céu



Se nao se conhece i:

so se mede a projecao de v e V na linha do obs.:

v’ = v sen i

V’ = V sen i

No caso em que a **secundaria é muito fraca**:

so primaria mais brilhante é observada:

so se mede **V’xt** (determina P e R’, mas nao r) :

➔ so se determina **Funçao de massa f(M,m):**

Funçao de Massa

Se conseguimos medir somente

P

V'=Vseni

R'= Rseni da estrela primaria

e nao conhecemos i, nem r e v da secundaria

Entao so podemos obter a funçao de massa **f(M,m):**

$$(M+m)P^2 = a^3 = (r+R)^3 = R^3(1 + M/m)^3$$

$$= \frac{R'^3}{\mathrm{seni}^3} \frac{(M+m)^3}{m^3}$$

$$\Rightarrow \mathbf{f(M,m) = \frac{m^3 \, sen \, i^3}{(M+m)^2} = \frac{R'^3}{P^2}}$$

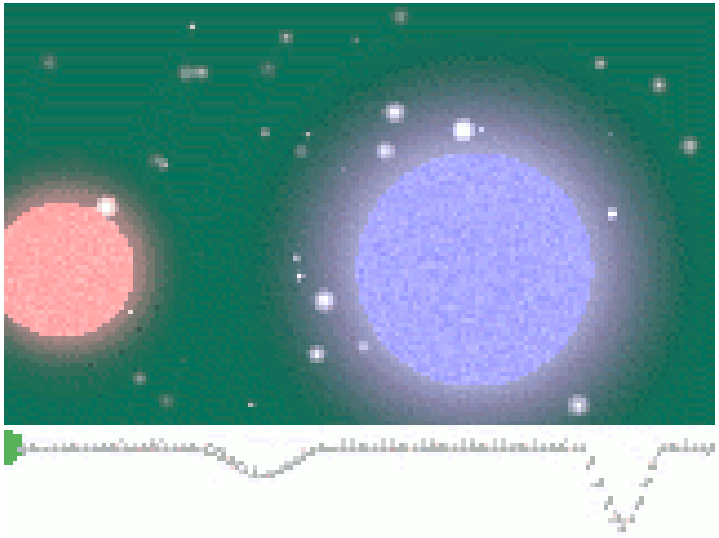
Binárias Eclipsantes

- Uma das estrelas passa pela frente da outra.

- Se o ângulo de inclinação da órbita é de ~90º
  ⇨ cada uma das estrelas pode eclipsar a outra periodicamente.

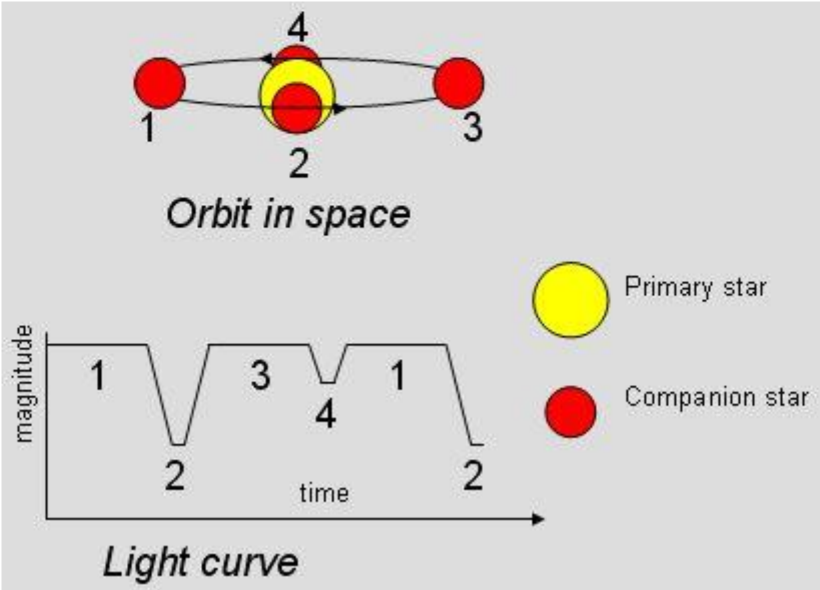
- Milhares conhecidas, muitas são binárias espectroscópicas e apenas algumas são binárias visuais.

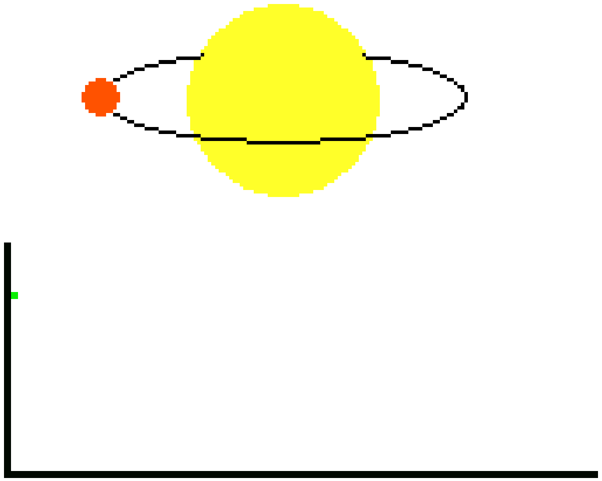
- Detecção através das variações de brilho do sistema e sua interpretação.



Curva de Luz

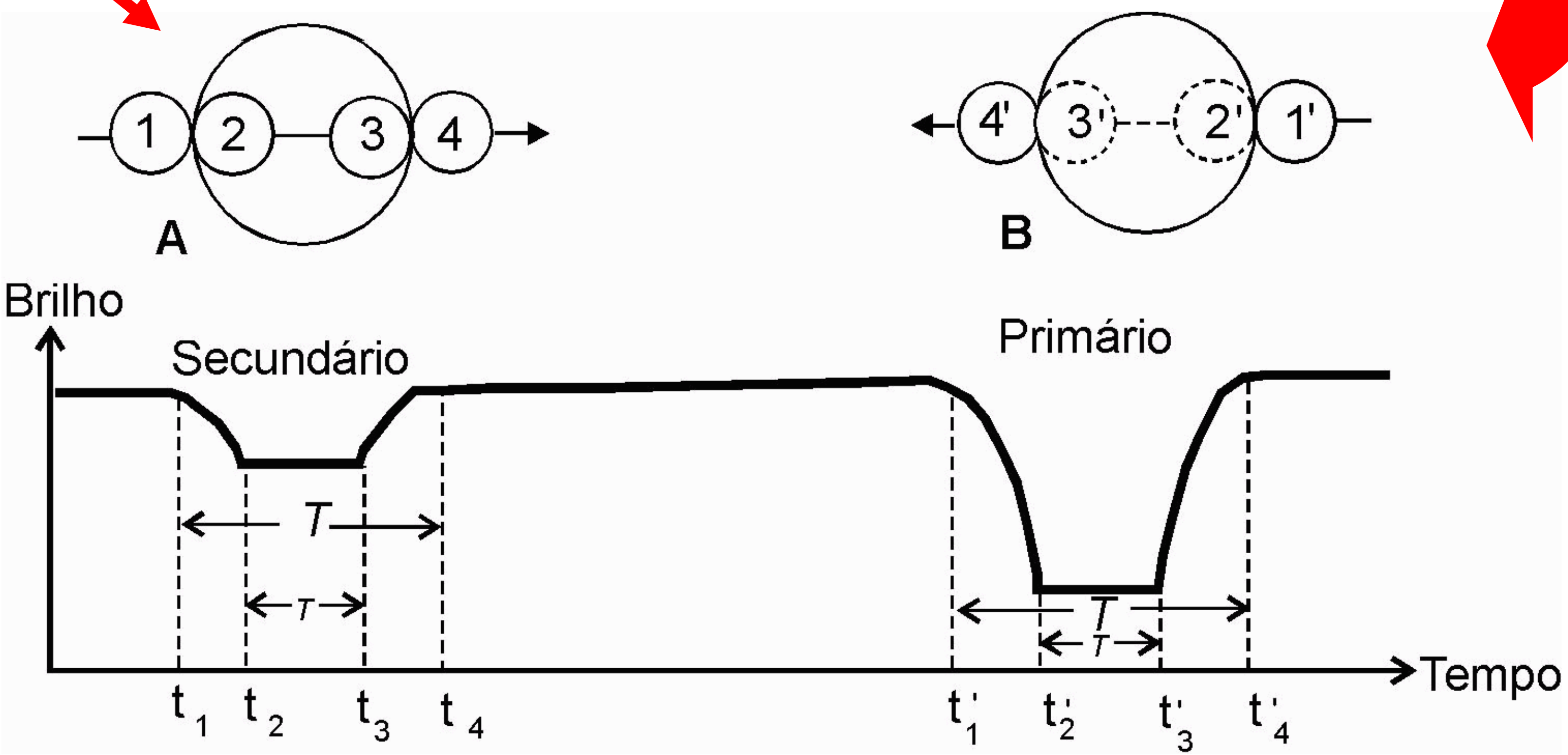
- Variação no brilho (**magnitude aparente ou fluxo**) de uma **binária eclipsante** em função do tempo.
- O brilho é constante quando não ocorre o eclipse, e diminui quando uma das estrelas é eclipsada.
- Durante o eclipse podem ocorrer dois tipos de *mínimos* de brilho (diferentes profundidades na curva de luz).



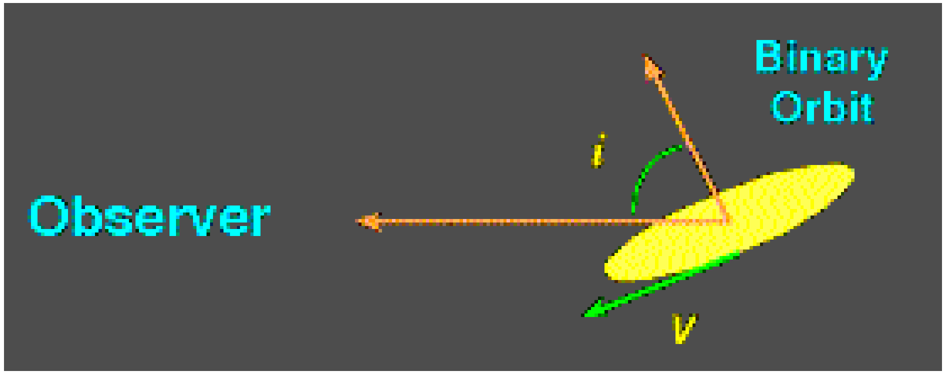


- Mínimo mais profundo: a estrela de menor brilho aparente **(<Temperatura**) passa na frente da **mais brilhante (>Temperatura)**: eclipse primário.

- Minimo menos profundo: quando a estrela + brilhante (+ quente) passa na frente da mais fria: eclipse secundário



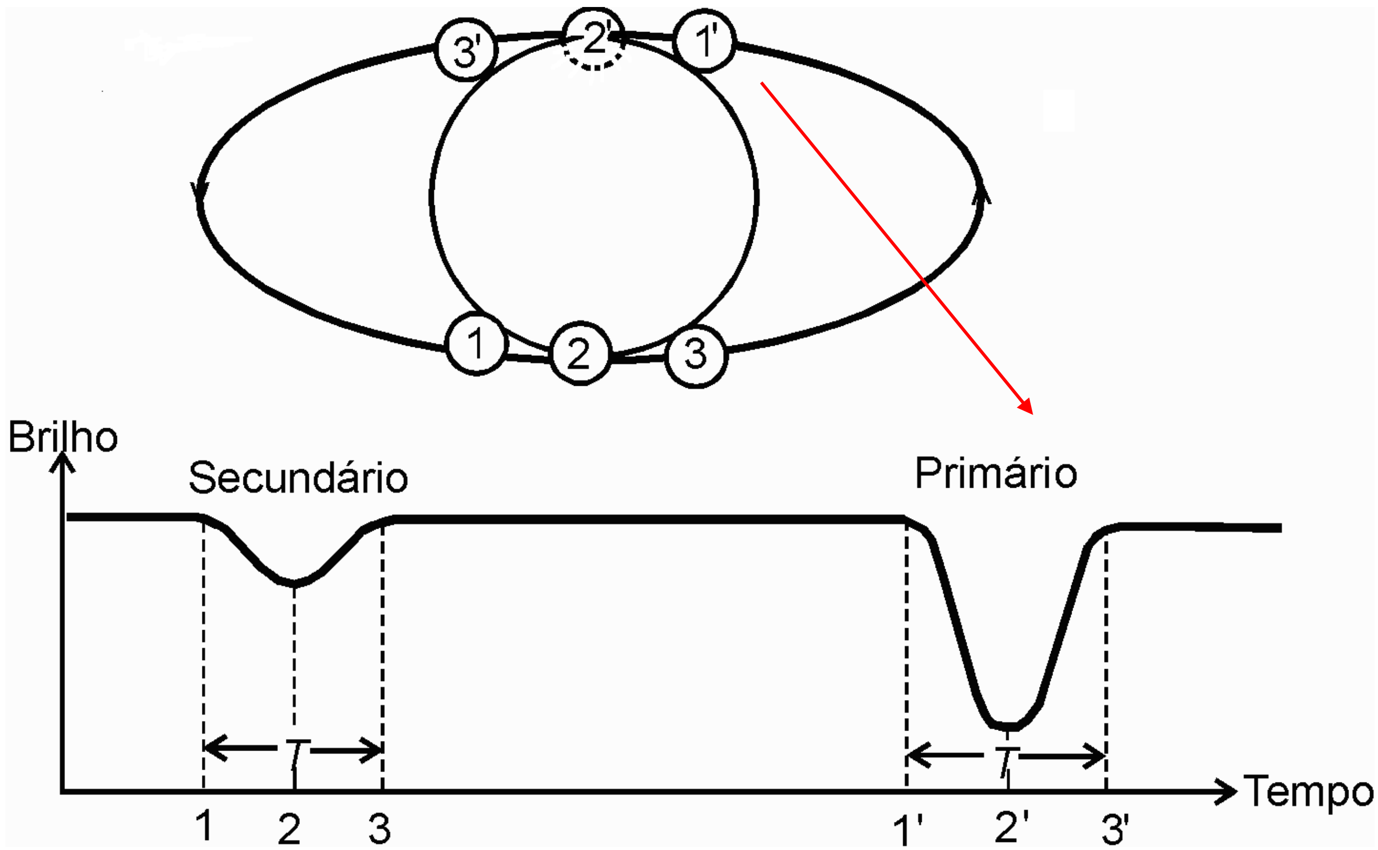
• De acordo com a inclinação da órbita ⇨ eclipse pode ser **central ou parcial.**



Central (i=90º) { total (estrela menor atrás da maior)
anular (estrela menor na frente da maior).

Parcial (i<90º): se órbita circular ambos eclipses têm igual duração (porem menor que no eclipse total)

Eclipses parciais para uma órbita circular inclinada.



Note que neste caso a estrela menor é a mais quente (> brilho aparente).

- Ex.: Sejam as estrelas 1 e 2 formando sistema binario eclipsante
  - T_1= 20.000 K, R_1= 60 R_{sol} , M_{bol1} = -6,8
  - R_2= 0,3 R_{sol}, M_{bol2}= -0,4

- Calculemos:
  - razao das luminosidades
  - Razao das Ts efetivas
  - Qual estrela ao ser eclipsada produz minimo primario?

$$\mathbf{M_{bol1}-M_{bol2} = -2,5 \log (L_1/L_2)}$$

$$\mathbf{Log(L_1/L_2) = (-6,8 + 0,4)/-2,5}$$

$$\mathbf{L_1/L_2= 2,56 \quad \rightarrow \quad L_2<L_1}$$

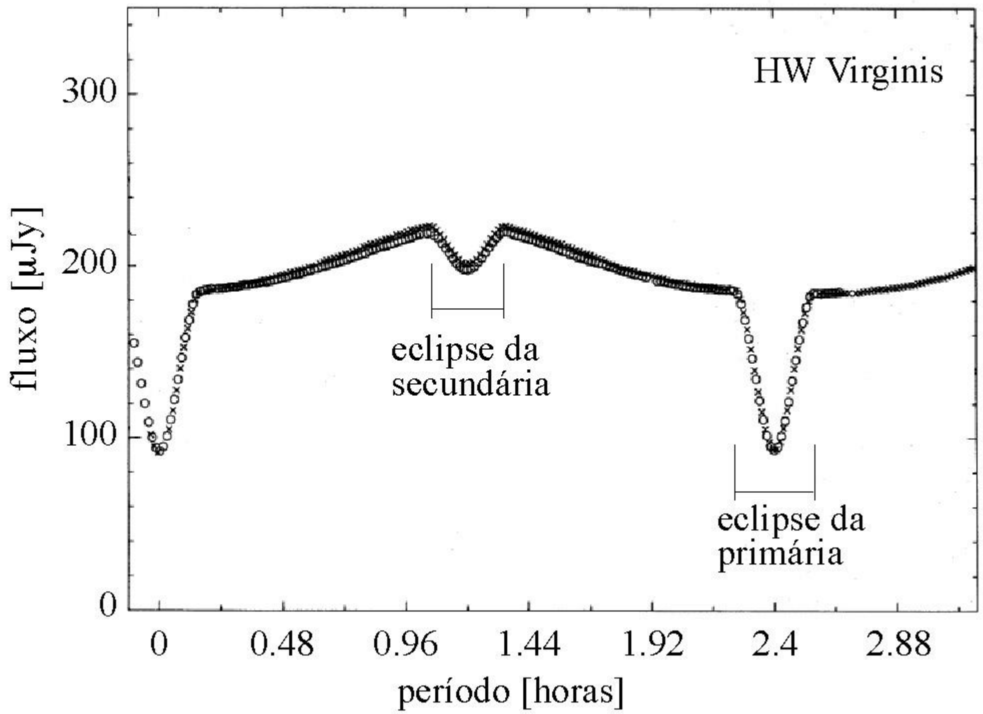
$$\mathbf{L = \sigma T^4 \; 4 \pi R_*^2 \rightarrow T_1/T_2 = [(L_1/L_2) \; (R_2/R_1)^2]^{1/4} = 0,09}$$

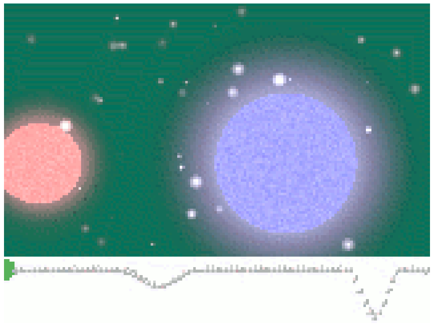
$$\mathbf{\rightarrow T_2>T_1 \quad \rightarrow T_2= 2,2 \times 10^5 \, K}$$

➔**Eclipse primario** → estrela **mais quente** é eclipsada pela mais fria : **eclipse da estrela 2**

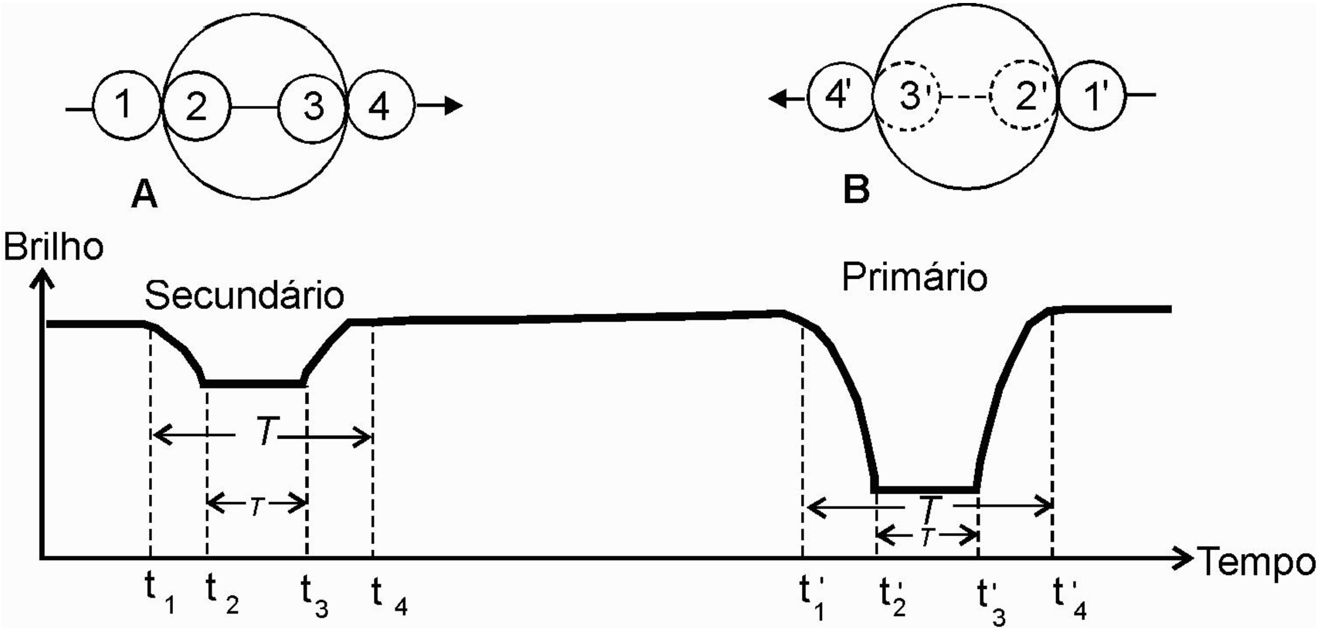
Sistemas binários eclipsantes

- Neste caso (raro) temos informação do tamanho das estrelas.





- O tamanho das estrelas está relacionado com a <u>duração</u> da fase de eclipse e com a <u>velocidade relativa</u> das estrelas.



Ex. simples:

Seja **i = 90°**

R_G: raio da estrela >

R_P e v : raio e velocidade orbital da estrela <

- Da geometria temos:

$$2 R_P = v\,(t_2 - t_1) = v\,(t_4 - t_3)$$

$$2(R_P + R_G) = v\,(t_4 - t_1)$$

- Assumindo raio da orbita aproximadamente circular e que estrela P gira em torno de G com raio orbital aproximadamente circular:

$$a = v\,P/\,2\,\pi$$

- Das 3 equacoes obtemos entao os raios **R_P e R_G**:

$$R_P/a = \pi(t_2 - t_1)/P \qquad R_G/a = \pi(t_4 - t_2)/P$$

Binárias de contato

- Estrelas muito próximas entre si

⇨ sistemas eclipsantes com períodos extremamente curtos (poucas horas)

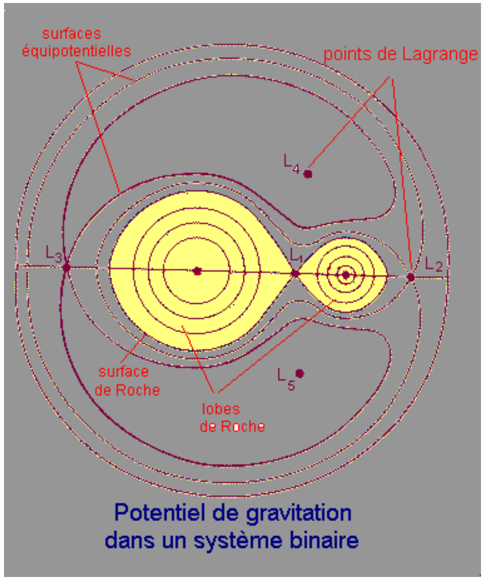
⇨ contato físico ⇨ podem compartilhar o mesmo envoltório.

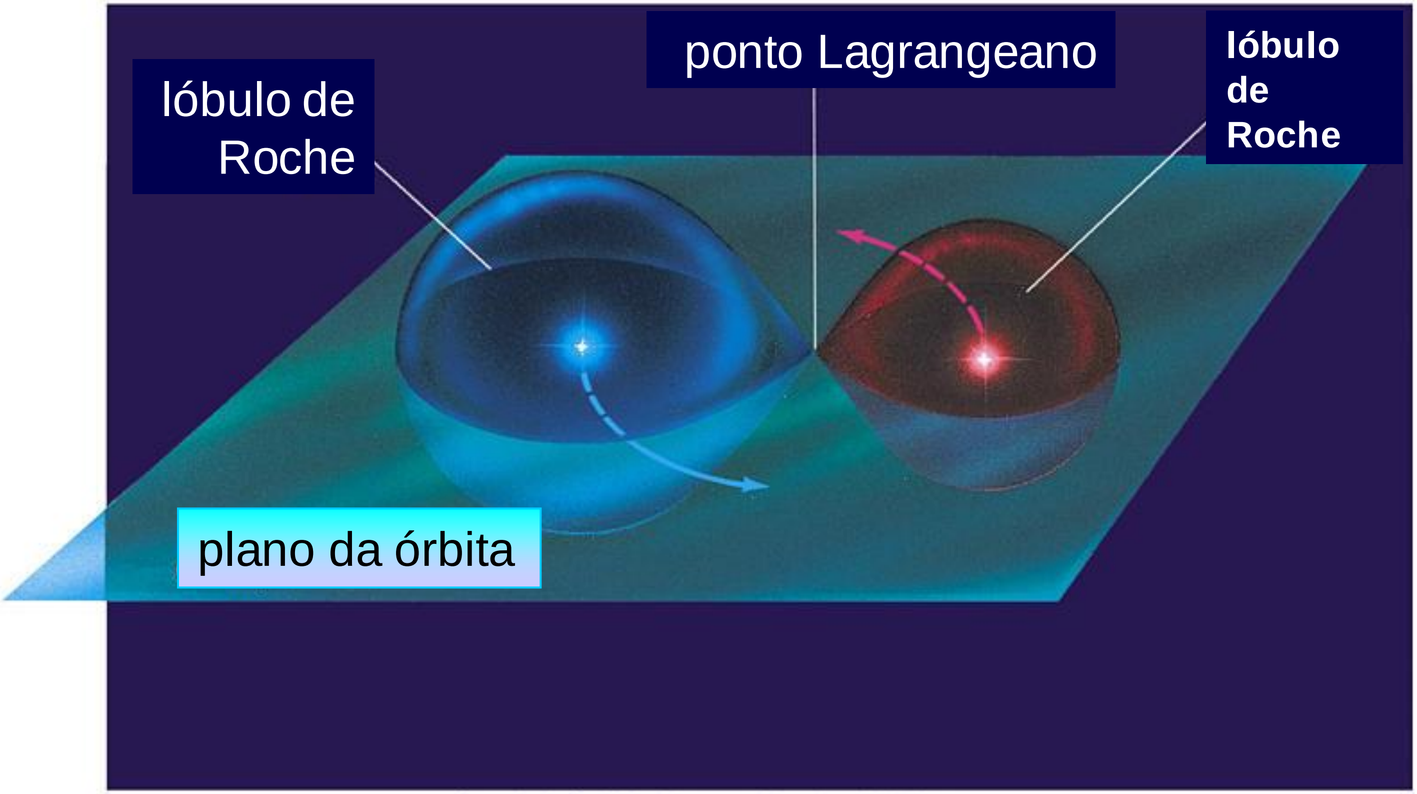
• Classificação baseada no tamanho da estrela com relação ao *lóbo de Roche* (região que define a ação do campo gravitacional).

Volume ao redor da estrela em um sistema binário dentro do qual o material está ligado a estrela.

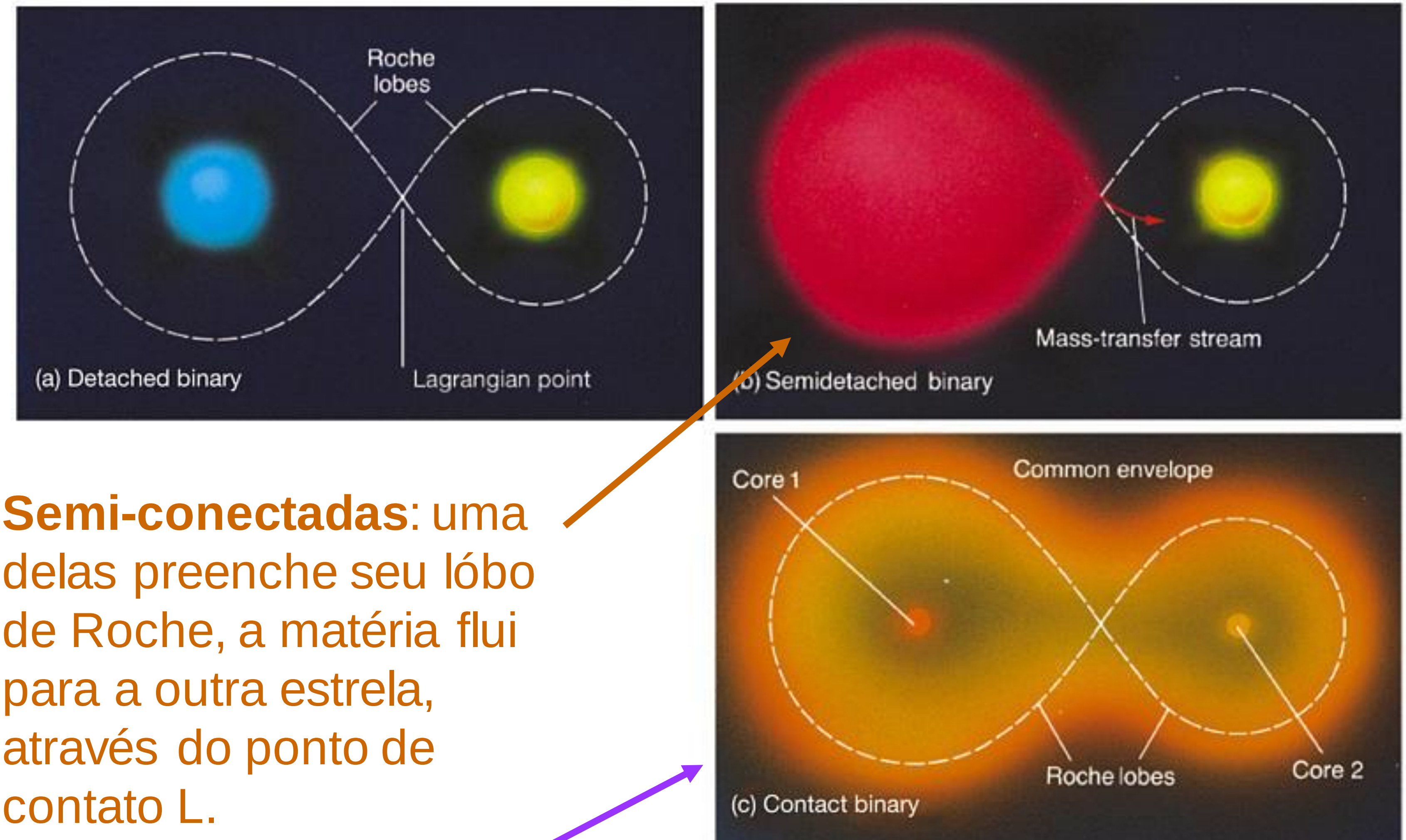
Lóbulo de Roche

A superfície do lóbulo de Roche é uma superfície gravitacional equipotencial.





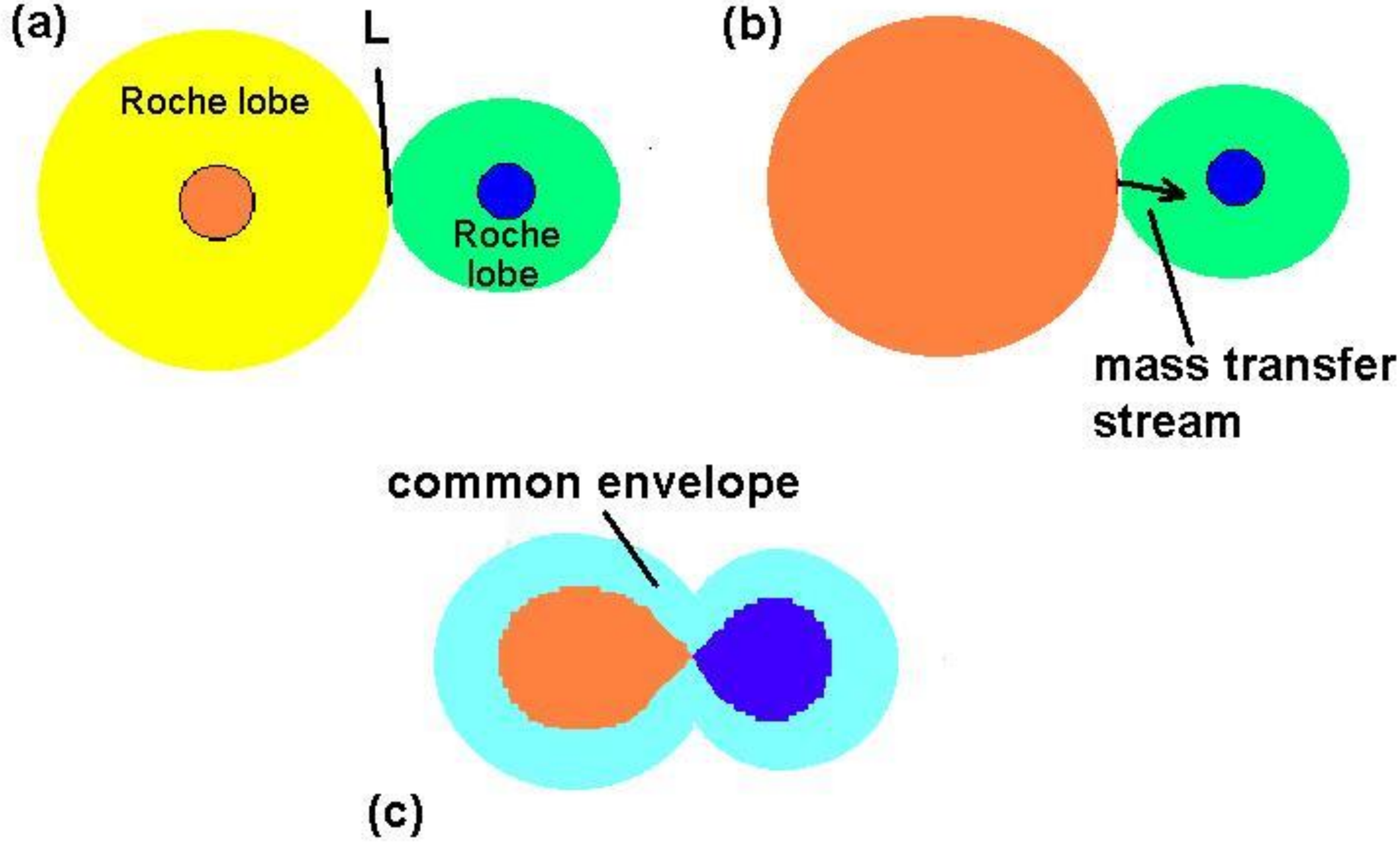
Desconectadas: raio de ambas é menor que seus lóbos de Roche.



Semi-conectadas: uma delas preenche seu lóbo de Roche, a matéria flui para a outra estrela, através do ponto de contato L.

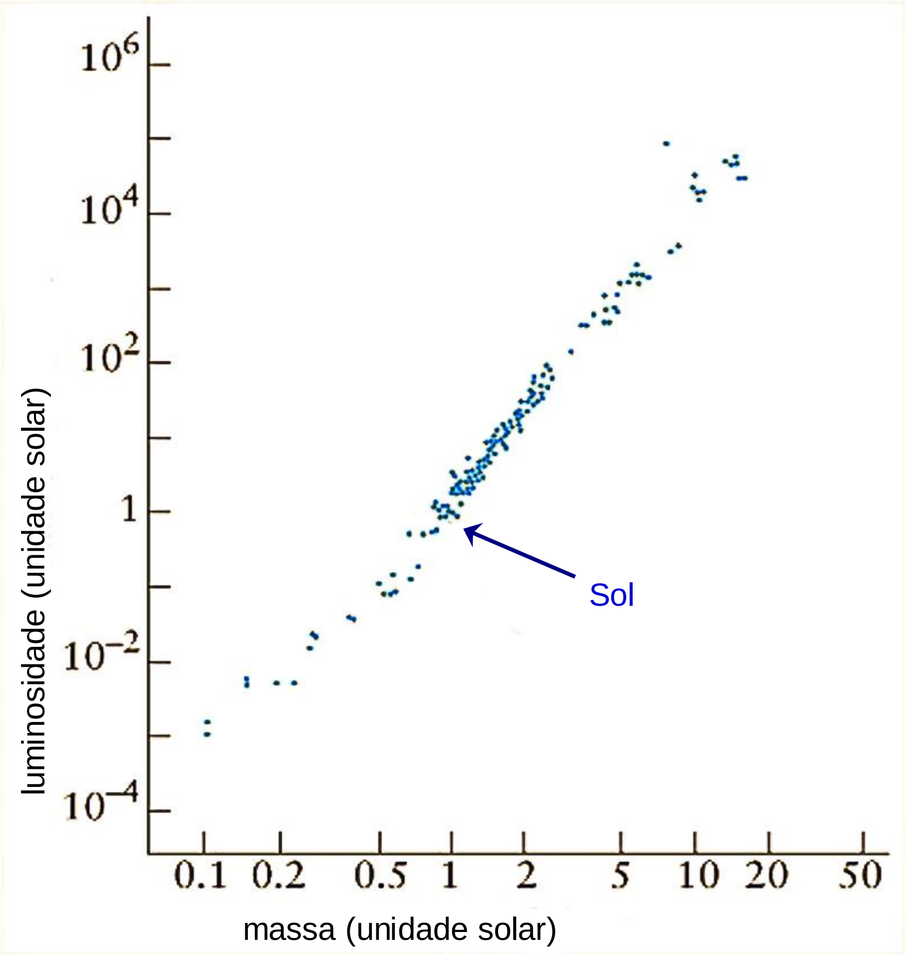
Binárias de contato: ambas preenchem os lóbos de Roche, compartilhando um mesmo envoltório.

(a) desconectadas; (b) Semi-conectadas; (c) Binárias de contato



Relação Massa–Luminosidade

- Para as estrelas da Seqüência Principal existe uma relação bem definida entre a massa e a Luminosidade.



Obtida a partir de medidas de massa de varias binarias

Relação Massa-Luminosidade

- Em 1924, Eddington sugeriu que a relação entre massa e luminosidade das estrelas* pode ser expressa por:

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

• O expoente α depende do tipo de estrela:

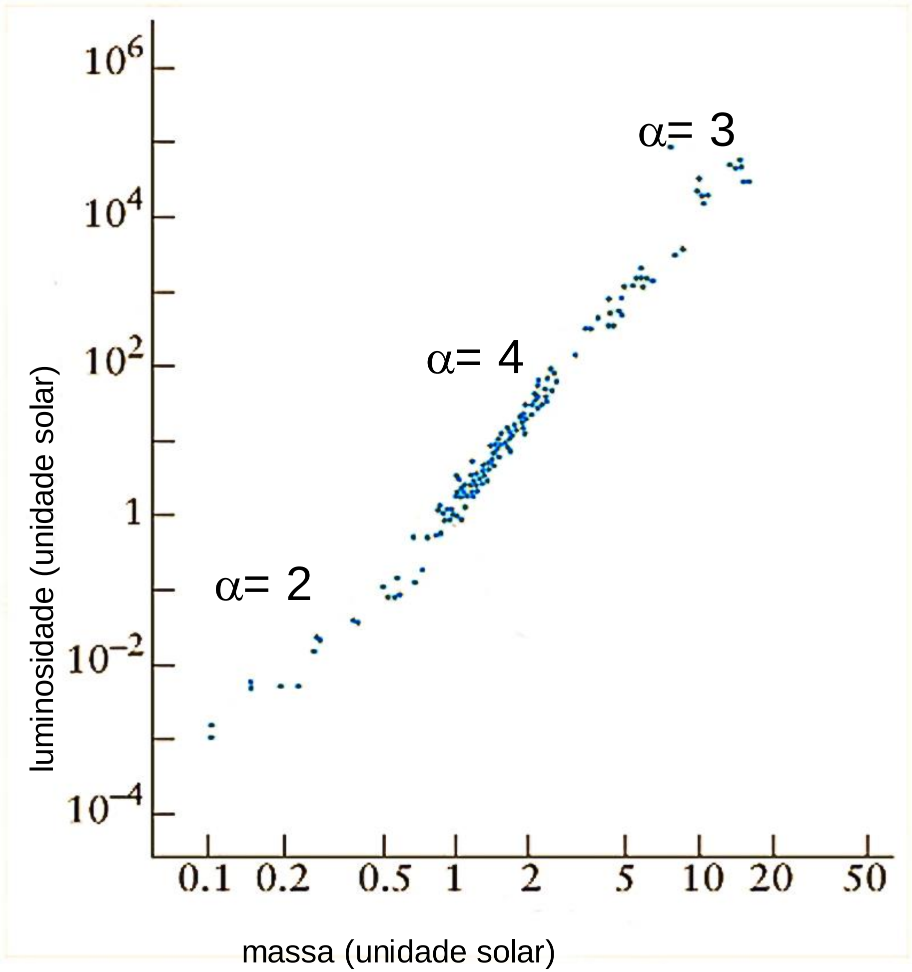
- muito luminosas e de alta massa ⇨ $\alpha \sim 3$;

- estrelas semelhantes ao Sol ⇨ $\alpha \sim 4$;

- estrelas fracas, baixas massas ⇨ $\alpha \sim 2$.

(*) somente válida para estrelas da seqüência principal.

Relação Massa–Luminosidade



$$\frac{\text{luminosidade}}{\text{lum. do Sol}} = \left(\frac{\text{massa}}{\text{massa do Sol}}\right)^{3,5}$$

- Note que a massa varia entre 0,1 e 50 $M_\odot$.
- A luminosidade varia de 0,001 à 1.000.000 $L_\odot$.

Densidade das estrelas

- Conhecendo a massa (**razão massa-luminosidade**) e o raio (**relação com luminosidade e temperatura**)
  - podemos calcular a densidade média de uma estrela.
  - densidade = massa/volume = massa/($4\pi R^3/3$)

Exemplo:

Sol: raio = 696.000 km; massa = $1{,}99 \times 10^{30}$ kg

densidade = 1,41 g/cm^3 .

Betelgeuse: raio = $1000 \times R_\odot$; massa = $10 \times M_\odot$.

densidade = $1{,}41 \times 10^{-8}$ g/cm^3.

Sirius B: raio = 1400 km; massa = 1 $M_\odot$.

densidade = $1{,}7 \times 10^{+8}$ g/cm^3.

Diagrama H-R e massa das estrelas

- A massa aumenta ao longo da Seqüência Principal.
- **A massa é o fator determinante na posição de uma estrela ao longo da Seqüência Principal.**