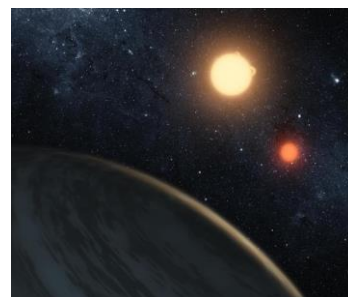


# Aula 12 : Estrelas Binárias

Maria de Fátima Oliveira Saraiva, Kepler de Souza Oliveira Filho & Alexei Machado Müller.



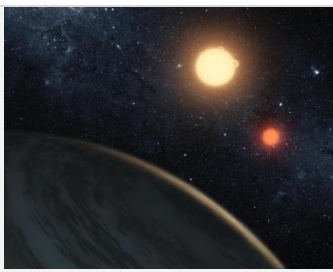
Concepção artística do exoplaneta Kepler-16 com seus dois sóis. O planeta foi descoberto pela missão Kepler da NASA. Crédito: NASA/JPL-Caltech

## Introdução

Prezado aluno,

Em nossa segunda aula da segunda área, vamos tratar das estrelas binárias. Aqui devemos saber diferenciar estrelas binárias reais (duas estrelas próximas no céu que se encontram à mesma distância da Terra, formando um sistema físico) e binárias aparentes – ou estrelas duplas aparentes (duas estrelas próximas no céu, porém, que se encontram a distâncias diferentes da Terra, mas por projeção parecem duplas).

Mais de 50% das estrelas do céu compõem sistemas com dois ou mais membros.



## Objetivos

Nesta aula trataremos de estrelas binárias e esperamos que ao final você possa:

- diferenciar entre binárias reais e binárias aparentes;
- caracterizar os diferentes tipos de sistemas binários;
- calcular a massa das estrelas em sistemas binários visuais;
- reconhecer a importância dos sistemas binários para conhecer as massas das estrelas.

## Por que estudar estrelas binárias?

### Estrelas binárias

Estrelas binárias são sistemas constituídos por duas estrelas ligadas gravitacionalmente, orbitando um centro de massa comum. É preciso distinguir esses sistemas de binárias *aparentes*, que são pares de estrelas que *parecem* estar juntas no céu, mas não estão ligadas gravitacionalmente. Em geral, em um par real, as estrelas estão muito próximas uma da outra, de forma que a olho nu aparecem como uma única estrela.

Mais de 50% das estrelas do céu compõem sistemas com dois ou mais membros ligados gravitacionalmente.



Figura 12.01: Mizar e Alcor, na constelação de Ursa Maior, constituem o mais antigo par de estrelas conhecido. As duas estrelas encontram-se separadas de 12 minutos de arco, sendo considerado um par aparente, mas existem alguns indícios de que estão fracamente ligadas gravitacionalmente, caso em que constituiriam um sistema binário real.

### Tipos de sistemas binários

Existem quatro tipos de sistemas binários, dependendo da maneira como são detectados.

#### - Binárias visuais

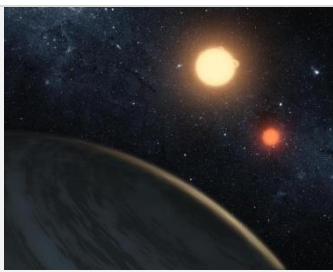
São classificados como binárias visuais os pares de

#### Estrelas binárias:

São duas estrelas próximas que estão praticamente à mesma distância da Terra e formam um sistema físico [orbitando um centro de massa comum](#).

#### Estrelas binárias aparentes:

São duas estrelas que aparecem próximas no céu, mas estão a distâncias diferentes da Terra e só parecem um sistema duplo por efeito da projeção.



estrelas que podem ser observadas ao telescópio como duas estrelas. Em geral a separação entre elas é de centenas de unidades astronômicas. Exemplos: sistemas de Mizar, de Sírius e de Castor.

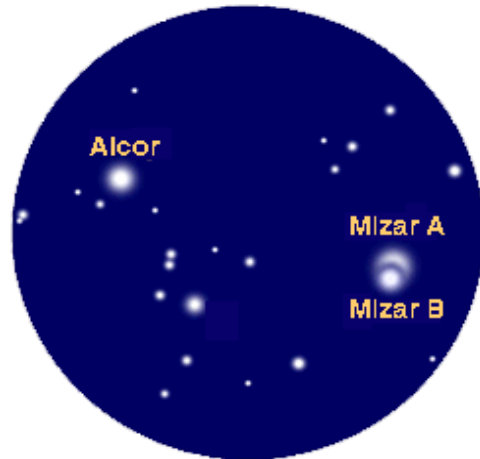


Figura 12.02: Imagem do sistema formado por Mizar A e Mizar B. A separação angular entre Mizar A e Mizar B é 15 segundos de arco, e as duas encontram-se a 12 minutos de arco da estrela variável Alcor. Cada uma das três estrelas, por sua vez, são binárias espectroscópicas. A imagem foi obtida com o interferômetro óptico Navy Prototype Optical Interferometer, no Arizona,



Figura 12.03: Sírius, a estrela mais brilhante do céu, é um sistema binário visual, composto pelas estrelas Sírius A e Sírius B. A olho nú só vemos Sírius A.

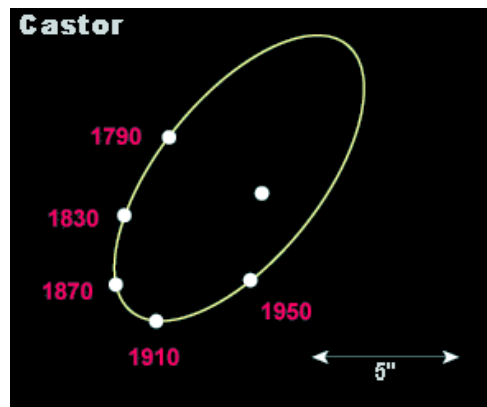
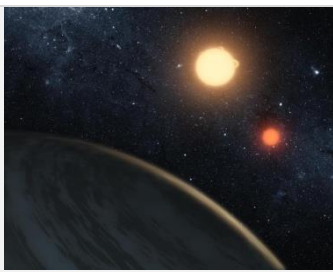


Figura 12.04: O sistema binário Castor, a estrela mais brilhante da constelação de Gêmeos, é composto de duas estrelas separadas de 6 segundos de arco e com um período de 350 anos.



### - Binárias astrométricas

São assim classificadas quando um de seus componentes é muito tênue para ser observado ao telescópio, mas a sua detecção é obtida pelas ondulações no movimento da companheira mais brilhante. Exemplo: A estrela Sírius foi classificada como binária astrométrica até 1862, quando Sírius B foi detectada pela primeira vez.

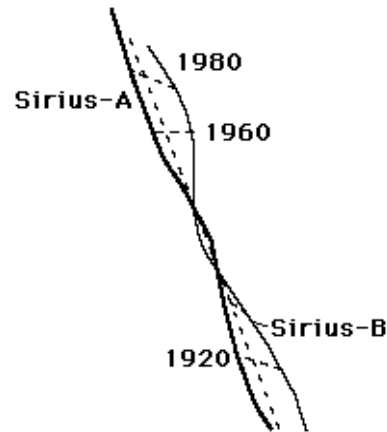


Figura 12.05: Movimento do sistema Sírius A e Sírius B medido entre 1980 e 1920. A linha pontilhada marca o movimento do centro de massa.

### - Binárias espectroscópicas:

Nesse sistema a separação média entre as estrelas é na ordem de uma unidade astronômica (1 UA). Por apresentarem um período curto, a velocidade orbital é grande. Para determinar a natureza desse sistema de estrelas binárias faz-se a observação da variação da sua velocidade radial, estabelecida através da análise das linhas espectrais da estrela que variam de comprimento de onda com o passar do tempo. Exemplos: Mizar A é composta de duas estrelas, detectadas espectroscopicamente. Mizar B também é uma binária espectroscópica, de maneira que Mizar é um sistema quádruplo.

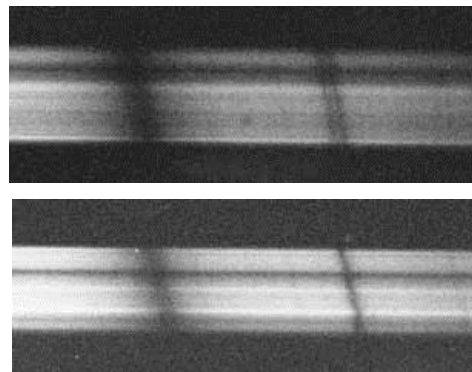
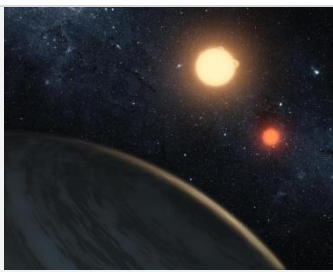


Figura 12.06: Dois espectros da binária espectroscópica Mizar A obtidos por Charles Pickering em 1887. Nota-se que a segunda linha aparece dupla no primeiro espectro e simples no segundo. Não se nota a duplicidade da primeira linha no primeiro espectro porque a linha é muito forte.



### Tipos de Sistemas Binários

- Visuais
- Astrométricos
- Espectroscópicos
- Eclipsantes

Três posições características de um sistema binário e o efeito produzido no espectro observado quando como de uma linha de visada paralela à página, de baixo para cima.

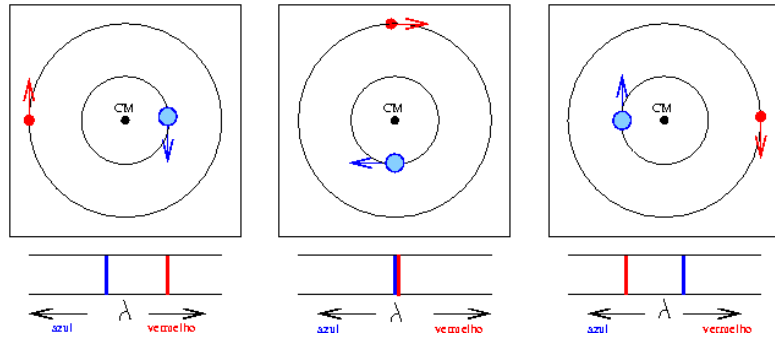


Figura 12.07: Diagrama de um sistema binário em que a órbita das estrelas tem uma componente na linha de visada (isto é, a órbita é vista "de lado"). Na figura da esquerda, a estrela azul está se aproximando do observador, então as linhas espectrais características dela aparecem deslocadas para o azul; a estrela vermelha está se afastando, então as suas linhas espectrais aparecem deslocadas para o vermelho. Na figura do centro os movimentos das estrelas não têm componentes na direção de visada, então as linhas ficam superpostas. Na figura da direita a estrela azul está se afastando e a estrela vermelha está se aproximando, então as linhas da estrela azul ficam deslocadas para o vermelho e as linhas da estrela vermelha ficam deslocadas para o azul.

Veja na página <http://astro.if.ufrgs.br/binary/index.htm> uma simulação de binárias espectroscópicas

### - Binárias eclipsantes:

São classificadas assim os sistemas em que uma estrela eclipsa a outra, quando a órbita do sistema observado está de perfil para o observador de forma de uma passa na frente da outra.

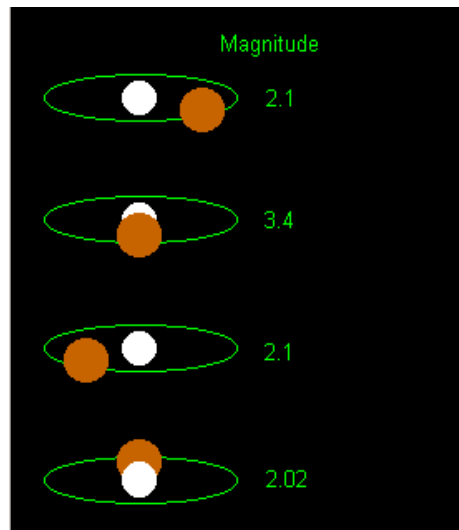
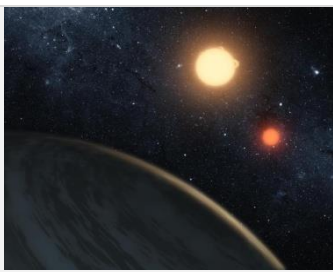


Figura 12.08: Sistema binário eclipsante Algol. O brilho do sistema diminui quando uma das componentes passa na frente da outra; sendo que a diminuição é maior quando a componente mais brilhante fica eclipsada.

Veja na página <http://astro.if.ufrgs.br/binary/eclipses.htm> Uma simulação interativa de binárias eclipsantes.



## Estrelas binárias e massas estelares

As estrelas binárias nos permitem conhecer as massas das estrelas. Como elas consistem de dois corpos orbitando mutuamente, e como o período e o raio médio da órbita estão associados à massa do sistema (pela terceira lei de Kepler modificada por Newton) observando o período e medindo a separação média entre as estrelas podemos conhecer a massa do sistema.

### Determinação da Massa de um Sistema Binário Visual

O movimento de cada estrela constituinte de um sistema binário ocorre em torno do centro de massa do mesmo. Sendo  $M_1$  e  $M_2$  as massas das estrelas,  $r_1$  e  $r_2$  a distância de cada uma ao centro de massa (ver figura 12.09), e  $P$  o período orbital mútuo, a massa do sistema é dada por:

$$(M_1 + M_2) = (4\pi^2 / G)(r_1 + r_2)^3 / P^2$$

onde  $(r_1 + r_2) = a$  é a separação média entre as duas estrelas, que é igual ao semieixo maior da órbita relativa do sistema.

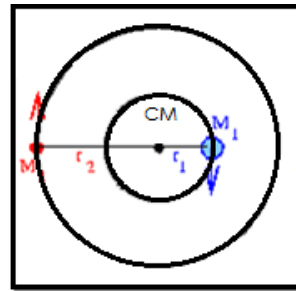


Figura 12.09: Esquema de um sistema binário visual, CM representa o centro de massa do sistema. A separação entre as duas estrelas é igual à soma das distâncias de cada uma ao centro de massa.

Na prática, o período  $P$  é observado diretamente e a separação média entre as duas estrelas pode ser obtida através da separação aparente entre elas ( $\alpha$ ), e a distância do sistema ao Sol ( $r$ ).

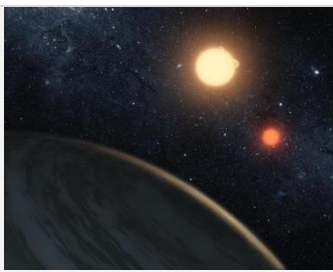
A separação entre as estrelas no sistema binário é da ordem de unidades astronômicas, portanto é conveniente calcular o valor de  $a$  diretamente em unidades astronômicas. Para isso, basta lembrar que, pela definição de parsec,

$$a(\text{UA}) = \alpha(") \times r(\text{pc}).$$

Para expressar as massas ( $M_1$  e  $M_2$ ) em massas solares, como o período ( $P$ ) está em anos e o semieixo maior da órbita  $a$  está em unidades astronômicas, temos:

$$(M_1 + M_2) = \frac{(r \times \alpha)^3}{P^2}.$$

Portanto a massa do sistema pode ser conhecida se a distância do sistema ao Sol for conhecida.



Para descobrir a massa de cada estrela é necessário ainda saber a distância de cada estrela ao centro de massa do sistema. Dessa forma teremos:

$$M_1/M_2 = r_2/r_1$$

### Exemplo 1

Dado o sistema binário visual da figura 12.10, vamos determinar a massa de cada uma das estrelas, Sírius A e Sírius B. A separação angular média entre as duas estrelas é 7,50". A distância do Sol a Sírius é de 2,67 pc (1 pc = 206 265 UA). O período orbital do sistema é de 50 anos.

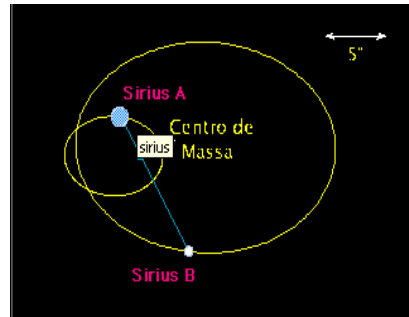


Figura 12.10: Esquema do sistema binário visual de Sírius A e Sírius B.

a) Qual é a massa desse sistema?

$$(M_A + M_B) 50^2 = (7,50'' \times 2,67 \text{ pc})^3,$$

$$(M_A + M_B) = \frac{8030,03}{2500} = 3,21 M_{\odot}.$$

b) Se a distância de Sírius B ao centro de massa é o dobro da distância de Sírius A ao centro de massa, qual é a massa de cada estrela?

$$\frac{M_A}{M_B} = \frac{r_B}{r_A} = 2,$$

$$(M_A + M_B) = 2M_B + M_B = 3,21M_{\odot}.$$

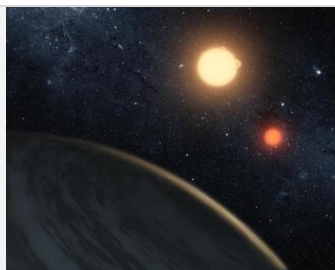
$$M_B = 1,07M_{\odot} \rightarrow M_A = 2,14M_{\odot}.$$

### Determinação de Massas de Binárias Espectroscópicas de Linhas Duplas

Para a determinação de massas de binárias espectroscópicas faz-se uso do Efeito Doppler (figura 12.11). O comprimento de onda de uma fonte que está se movendo com velocidade  $v$ , com a necessidade de correção relativística, é dado por:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \cos\theta \left( \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)^{1/2},$$

sendo  $\theta$  é o ângulo entre o vetor velocidade e a linha de visada.



### Efeito Doppler:

Devido ao movimento da fonte geradora da onda, que se aproxima ou se afasta de quem observa, ocorre uma alteração no comprimento de onda (ou na frequência detectada). Ao se aproximar a frequência aparente aumenta (o comprimento de onda diminui), ao se afastar a frequência aparente diminui (o comprimento de onda aumenta).

### Efeito Doppler com fontes luminosas:

Um aumento na frequência é chamado de deslocamento para o azul; uma redução na frequência é chamado de deslocamento para o vermelho.

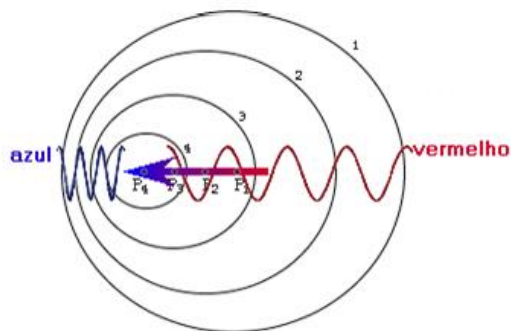


Figura 12.11: Esquema ilustrativo do Efeito Doppler indicando que quando diminui o comprimento de onda da luz a cor assume tom azul e, quando o comprimento de onda da luz aumenta e a cor assume tom vermelho.

Se a velocidade for muito menor que a velocidade da luz ( $c$ ) e considerando-se  $v$  como a componente de velocidade na direção do observador teremos:

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

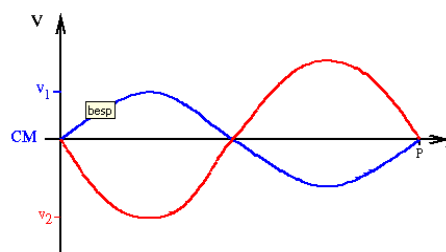


Figura 12.12: Gráfico  $v \times t$  de duas estrelas, formando um sistema de estrelas binárias espectroscópicas de linhas duplas.

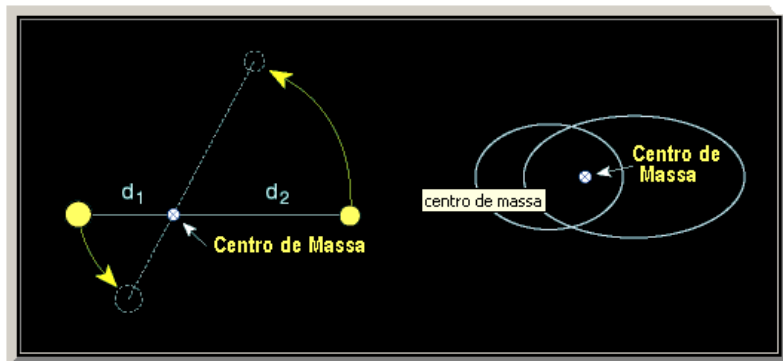


Figura 12.13: estrelas binárias separadas por distâncias  $d_1$  e  $d_2$  do centro de massa.

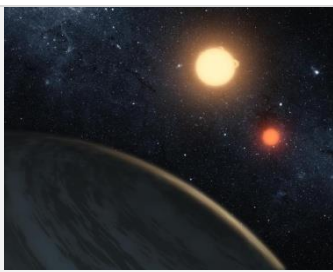
Vamos determinar as massas de binárias espectroscópicas:

Seja  $a_1$  a separação da componente 1 ao centro de massa e seja  $v_1$  a sua velocidade orbital.

Logo

$$2 \cdot \pi \cdot a_1 = v_1 \cdot P \text{ e } 2 \cdot \pi \cdot a_2 = v_2 \cdot P \text{ e,}$$





por definição de centro de massa:

$$M_1 \cdot a_1 = M_2 \cdot a_2.$$

Dessa forma temos:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{M_2}{M_1} = \frac{v_1}{v_2},$$

sendo  $M_{\odot}$  a massa do Sol. Usando a 3ª lei de Kepler:

$$\frac{M_1 + M_2}{M_{\odot}} = \frac{(a / \text{UA})^3}{(P / \text{ano})^2}.$$

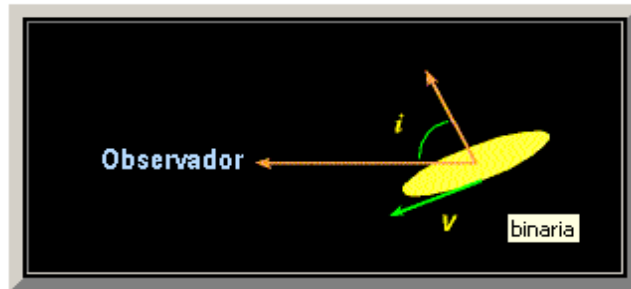


Figura 12.14: Esquema explicativo para estrelas binárias:  $i$  é o ângulo entre o observador e a normal ao sistema binário,  $v$  é a velocidade radial.

### Exemplo 2

Seja um sistema binário de período 17,5 dias (0,048 anos), e com velocidades  $v_1 = 75 \text{ km/s}$ , e  $v_2 = 25 \text{ km/s}$ . Qual é a massa de cada estrela?

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{75}{25} = 3 \Rightarrow M_2 = 3M_1,$$

$$v_1 + v_2 = 75 \text{ km/s} + 25 \text{ km/s} = 100 \text{ km/s} \rightarrow a_1 + a_2 = (v_1 + v_2) / 2\pi$$

$$\frac{100 \text{ km/s} \times 17,5 \text{ dias}}{2\pi} = 24.000.000 \text{ km} = 0,16 \text{ UA}.$$

$$(M_1 + M_2) = \frac{a^3}{P^2} = \frac{0,16^3}{0,048^2} = 1,78 M_{\odot},$$

mas como:

$$M_2 = 3M_1 \rightarrow 4M_1 = (M_1 + M_2),$$

$$M_1 = 0,44 M_{\odot},$$

$$M_2 = 1,33 M_{\odot}.$$

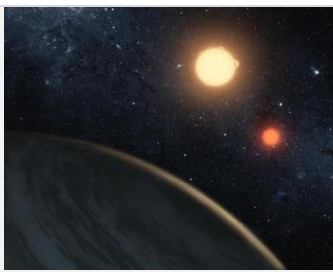
Na realidade, a medida é o limite inferior das massas, pois

$$v_1^{med} = v_1 \cdot \text{sen } i,$$

$$v_2^{med} = v_2 \cdot \text{sen } i,$$

$$a_1^{med} = a_1 \cdot \text{sen } i,$$

$$a_2^{med} = a_2 \cdot \text{sen } i.$$



E, portanto temos:

$$\frac{(M_1 + M_2)_{real}}{(M_1 + M_2)_{med}} = \frac{(a_1 + a_2)^3}{(a_1 + a_2)_{med}^3} = \frac{1}{\sin^3 i}$$

Sabemos que o módulo do seno de qualquer ângulo é sempre menor ou igual a 1, logo a massa real será maior ou igual à massa medida.

Existem ainda as chamadas binárias interagentes; as variáveis cataclísmicas, binárias próximas compostas de uma estrela vermelha e uma anã branca; as variáveis simbióticas, também compostas de uma estrela vermelha e uma anã branca, mas mais distantes; há as binárias de raio-X, em que a companheira vermelha orbita uma estrela de nêutrons ou um buraco negro.

Para saber mais sobre estrelas binárias você pode acessar o [link](#):

[Estrelas Binárias](#), ou vá para a página:

<http://astro.if.ufrgs.br/bin/binarias.htm>.

## Resumo

O estudo do movimento orbital mútuo das estrelas em sistemas binários permite determinar as massas das estrelas.

- **Estrelas binárias** reais são duas estrelas próximas no céu que se encontram à mesma distância da Terra, formando um sistema físico.

As estrelas binárias são classificadas de acordo com a maneira como são detectadas. Temos então:

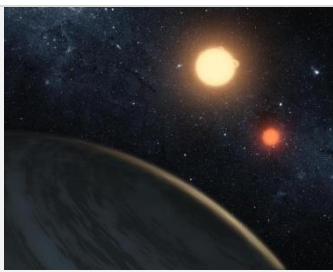
Binárias Visuais;

Binárias Astrométricas;

Binárias Espectroscópicas;

Binárias Eclipsantes.

Em um sistema binário podemos determinar as massas das estrelas constituintes, observando o movimento orbital e aplicando a 3ª Lei de Kepler. É graças às estrelas binárias que conhecemos as massas das estrelas.



## Questões de fixação

As seguintes questões são para vocês fixarem os conteúdos trabalhados nessa aula. Elas devem ser respondidas por cada um de vocês individualmente, antes da resolução do questionário de avaliação. As mesmas não valem nota nem serão entregues.

Bom trabalho!

1. Quais seriam os períodos de revolução de sistemas binários nos quais cada estrela tem a massa do Sol e as distâncias médias entre as duas estrelas têm os valores:

- a) 1 UA?
- b) 2 UA?
- c) 20 UA?
- d) 60 UA?
- e) 100 UA?

2. Para cada item do problema anterior, a que distância do sistema as duas estrelas pareceriam ter uma separação angular de  $1''$ ?

3.  $\xi$  Ursa Maior é um sistema binário cuja órbita tem um semi-eixo maior de  $2,5''$ . A paralaxe do sistema é  $0,127''$ , e o período é de 60 anos. Qual é a massa do sistema, em massas solares?

## Resposta da questão introdutória:

A principal importância do estudo dos sistemas binários é a obtenção das massas estelares. A única maneira direta que temos de conhecer as massas das outras estrelas além do Sol é nos valendo dos sistemas binários, nos quais os parâmetros da órbita mútua estão relacionados à massa do sistema pela forma newtoniana da terceira lei de Kepler.

