

# Elementos de Astronomia

---

## **Movimento dos Planetas**

Rogemar A. Riffel

# Planetas

- Planetas são corpos que orbitam estrelas e não tem nem nunca tiveram reações nucleares, além de terem forma determinada pela auto-gravidade (esféricos) e terem tamanhos significativamente maiores do que os outros objetos em sua vizinhança
- $M > 75 M_{\text{Jup}} \Rightarrow \text{H em He} \Rightarrow \text{estrelas}$
- $13 M_{\text{Jup}} < M < 75M_{\text{Jup}} = \text{deutério em trítio} \Rightarrow \text{anãs marrons}$
- $M < 13 M_{\text{Jup}} \Rightarrow \text{planetas}$

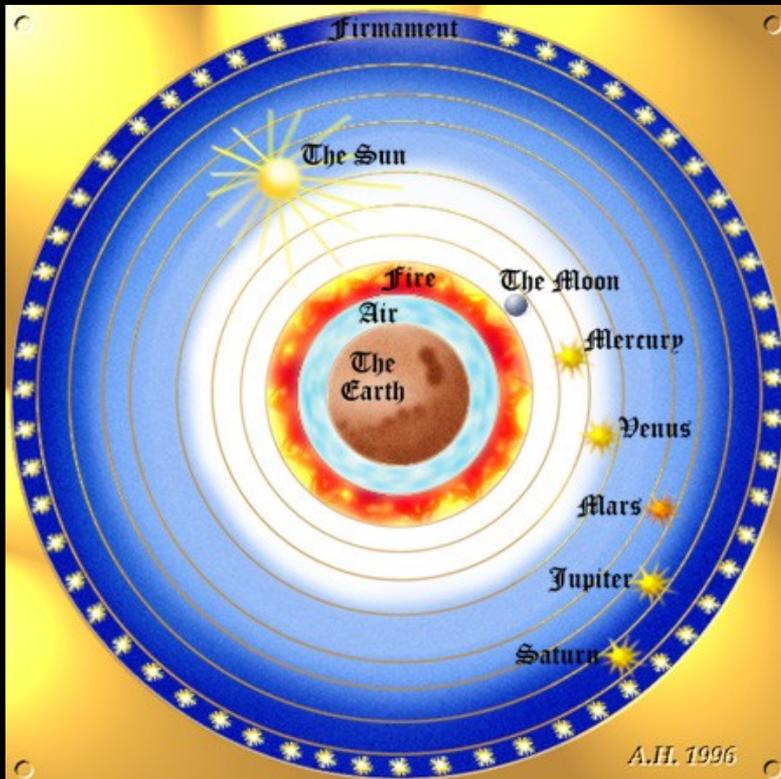
# Movimento dos Planetas

- Os planetas estão muito mais próximos de nós do que as estrelas, de forma que eles parecem se mover, ao longo do ano, entre as estrelas de fundo
- Esse movimento se faz, geralmente, de leste para oeste, mas em certas épocas o movimento muda, passando a ser de oeste para leste.
- O movimento observado de cada planeta é uma combinação do movimento do planeta em torno do Sol com o movimento da Terra em torno do Sol.



# Universo Aristotélico

- Aristóteles de Estagira (384-322 a.C.);
- A Terra está imóvel no centro do Universo;
- Estrelas e planetas ocupam esferas cristalinas perfeitas que giram em torno da Terra;
- O universo é perfeito e imutável.



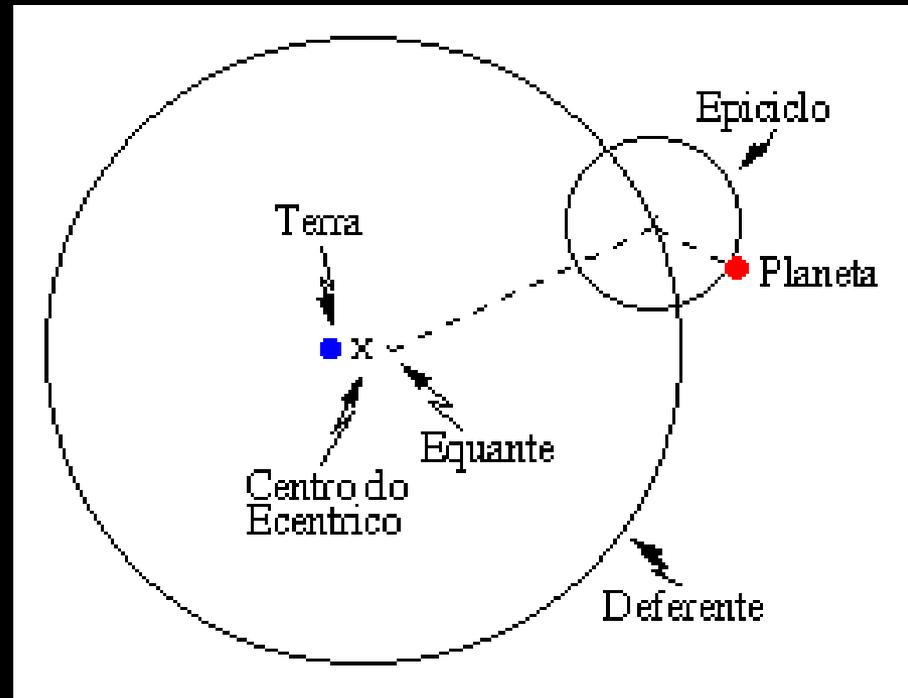
## Problemas:

- Movimento retrógrado dos planetas;
- Brilho variável dos planetas

# O modelo ptolomaico

- Claudio Ptolomeu (85 d.C. - 165 d.C.);
  - Combinação de círculos;
    - O planeta se move ao longo de um pequeno círculo chamado **epiciclo**;
    - O centro do epiciclo se move em um círculo maior, chamado **deferente**;
    - A Terra fica numa posição um pouco afastada do centro do deferente;
  - **Equante**: um ponto ao lado do centro do deferente em relação ao qual o centro do epiciclo se move a uma taxa uniforme.
- Objetivo**: dar conta do movimento não uniforme dos planetas.

Este modelo foi usado por cerca de 1300 anos!



# O modelo heliocêntrico de Copérnico



- Movimento retrógrado e variação em brilho dos planetas explicado!
- Circularidade das órbitas mantida!

*Retrograde Motion in the  
Copernican System*

# Classificação dos planetas pela distância ao Sol

---

- **Planetas Inferiores: Mercúrio e Vênus**

- Tem órbitas menores do que a da Terra;
- Muito próximos do Sol. Máximo afastamento angular de  $28^\circ$  para **Mercúrio** e  $47^\circ$  para **Vênus**.
- Só são visíveis ao anoitecer (astro vespertino) ou ao amanhecer (matutino).

- **Planetas Superiores: Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Netuno e Plutão (anão)**

- Têm órbitas maiores do que a da Terra;
- Podem estar a qualquer distância angular do Sol, podendo ser observados no meio da noite.

# Configurações Planetárias

**Configurações dos planetas:** Posições características dos planetas em suas órbitas, vistas da Terra.

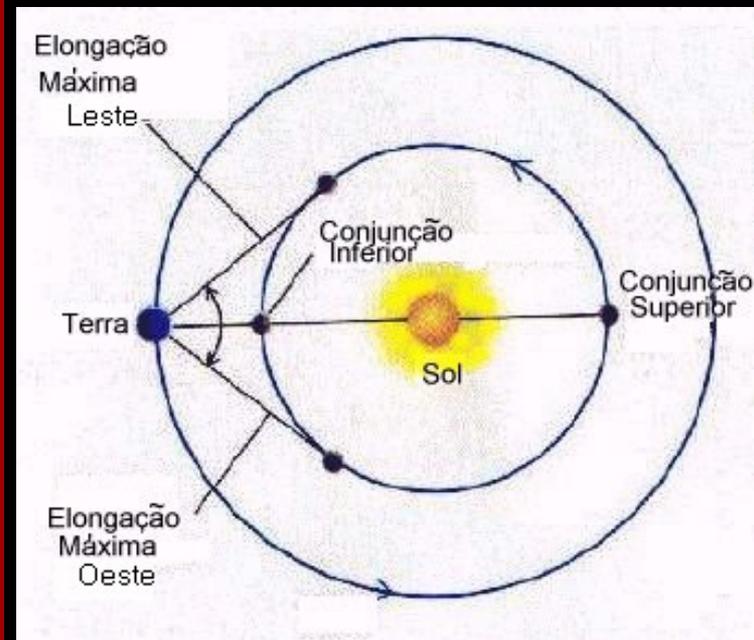
**Elongação (e):** distância angular do planeta ao Sol, vista da Terra.

## Configurações de um planeta inferior

**Conjunção inferior:** O planeta está na mesma direção do Sol ( $e = 0$ ) e mais próximo da Terra do que do Sol.

**Conjunção superior:** O planeta está na mesma direção do Sol ( $e = 0$ ) e mais longe da Terra do que do Sol.

**Máxima elongação:** A distância angular entre o planeta e o Sol é máxima. Na **máxima elongação ocidental** o planeta está a oeste do Sol (nasce e se põe antes do Sol – visível ao amanhecer). Na **máxima elongação oriental** o planeta está a leste do Sol (nasce e se põe depois do Sol – visível ao anoitecer).



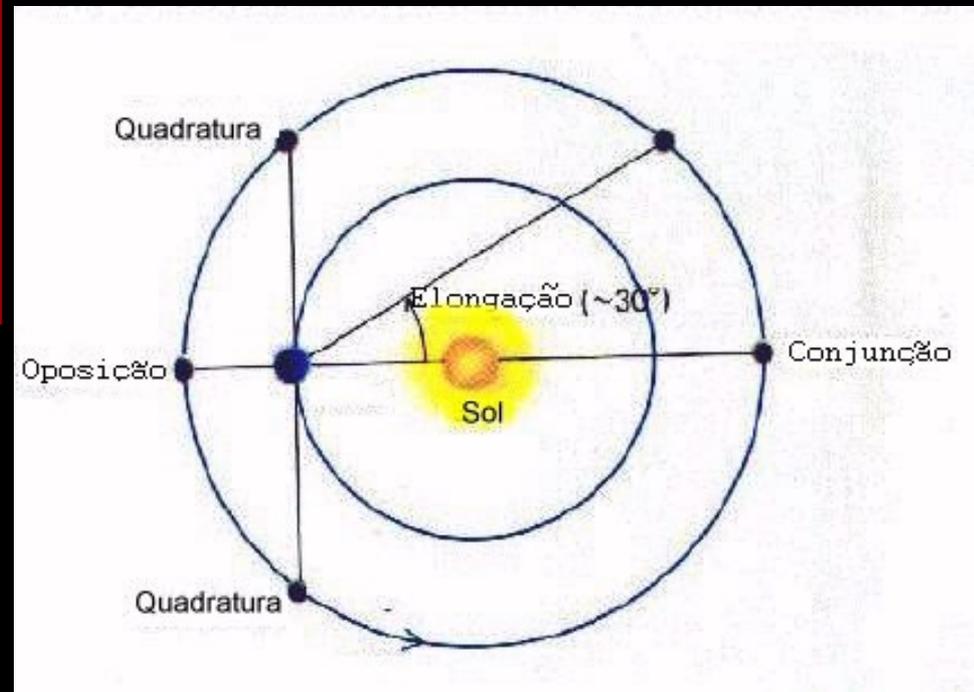
# Configurações Planetárias

## Configurações de um planeta superior

**Conjunção:** O planeta está na mesma direção do Sol ( $e=0$ ) e mais longe da Terra do que do Sol.

**Oposição:** O planeta está na direção oposta ao Sol ( $e=180^\circ$ ). Está no céu durante toda a noite.

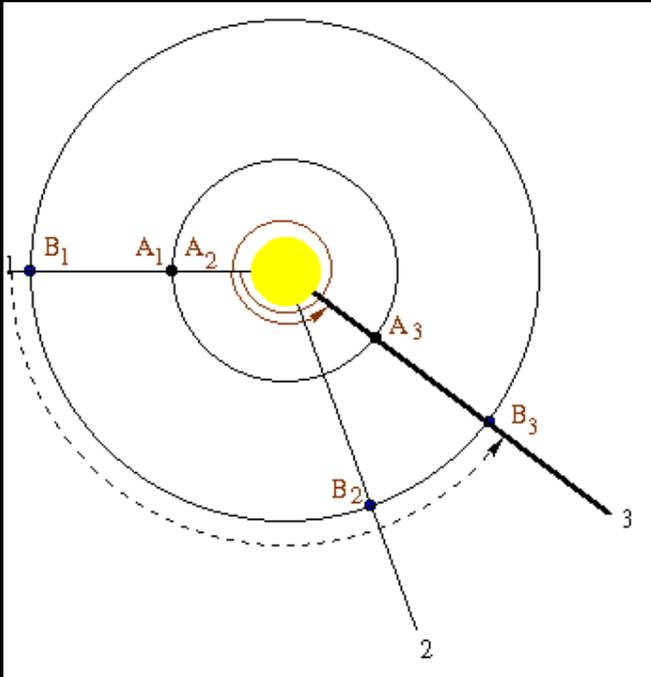
**Quadratura ( $e=90^\circ$ ):** O planeta está 6h a leste do Sol (quadratura oriental) ou a oeste do Sol (quadratura ocidental).



# Período Sinódico e Sideral

**Período sinódico (S):** é o intervalo de tempo decorrido entre duas configurações iguais consecutivas. É o período de revolução *aparente* do planeta, em relação à Terra.

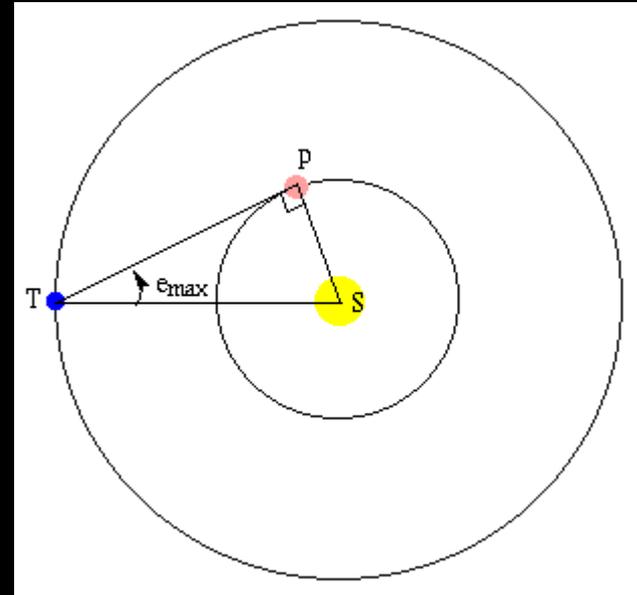
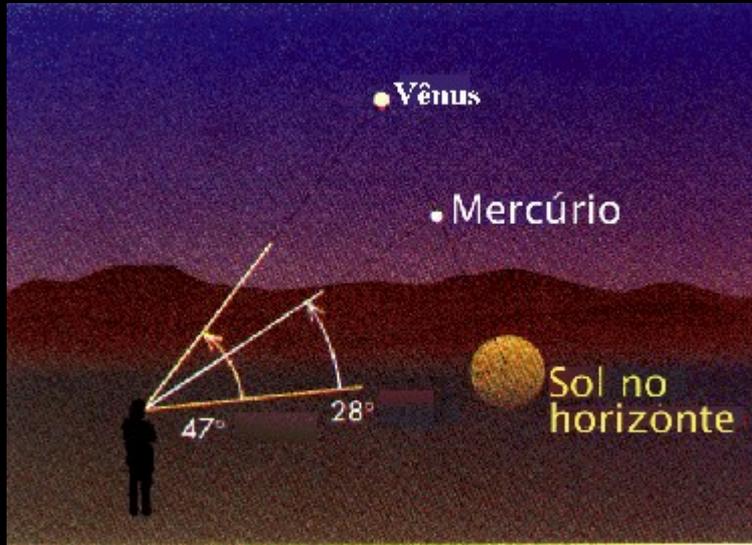
**Período sideral (P):** é o período real de translação do planeta em torno do Sol, em relação a uma estrela fixa.



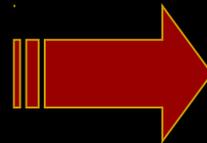
$$\frac{1}{S} = \left( \frac{1}{P_i} - \frac{1}{P_e} \right)$$

**$P_i$ :** período sideral do planeta interior;  
 **$P_e$ :** período sideral do planeta exterior.

# Distâncias dos planetas inferiores

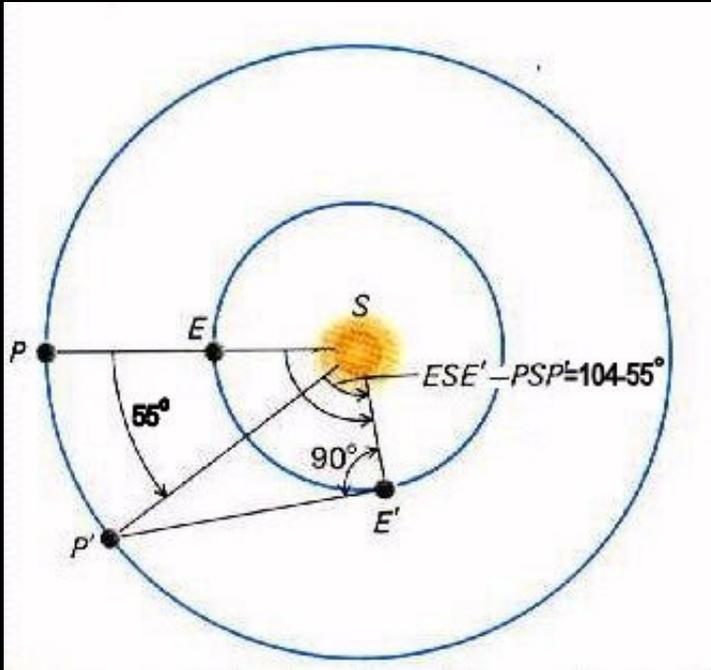


$$\text{sen } e_M = \frac{\text{distância}_{(\text{planeta-Sol})}}{\text{distância}_{(\text{Terra-Sol})}}$$



$$\text{Distância}_{(\text{planeta-Sol})} = 1 \text{ UA} \times \text{sen } e_M$$

# Distâncias dos planetas superiores



Observando Marte, Copérnico viu que o intervalo de tempo decorrido entre uma *oposição* e uma *quadratura* é de *106 dias*.

Nesse período de 106 dias, a Terra percorre uma distância angular de  $ESE' = 104^\circ$

Como o período sideral de Marte é de 687 dias, então a distância angular percorrida por Marte nesse mesmo período de 106 dias será:  $PSP' = 55^\circ$  ( $106/687 \times 360^\circ$ ).

Considerando o triângulo formado pelo Sol (S), Terra (E') e Marte (P') na quadratura (SE'P'), o ângulo entre o Sol e o planeta, visto da Terra, é  $90^\circ$ , e o ângulo entre Terra e Marte, visto do Sol, é  $ESE' - PSP' = 104^\circ - 55^\circ = 49^\circ$ .

$$\begin{aligned} \text{Distância}_{(\text{Sol-Marte})} &= 1 \text{ UA} / \cos 49^\circ \\ &= 1,52 \text{ UA} \end{aligned}$$

## Distâncias dos planetas superiores

---

Planeta	Copérnico	Moderno
Mercúrio	0,38	0,387
Vênus	0,72	0,723
Terra	1	1
Marte	1,52	1,52
Júpiter	5,22	5,2
Saturno	9,17	9,54

# Problemas do modelo de Copérnico

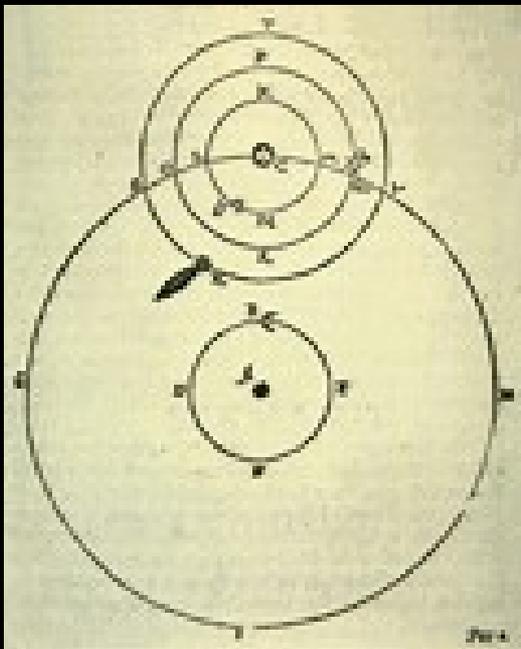
---

- A Teoria Heliocêntrica conseguiu dar explicações mais simples e naturais para os fenômenos observados
  - Movimento retrógrado dos planetas;
  - Variação em brilho dos planetas;
- Órbitas circulares;

## Problemas:

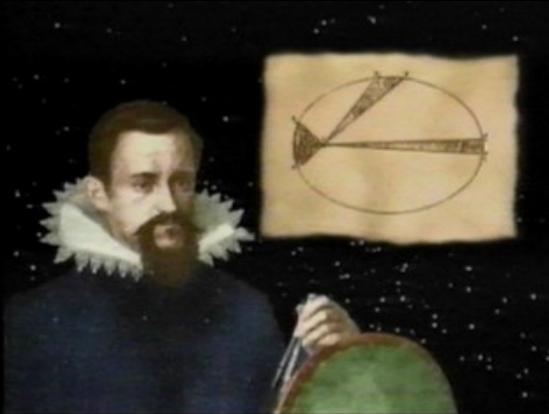
- Copérnico não conseguiu prever as posições dos planetas de forma precisa;
- Não provou que a Terra estava em movimento.

# Tycho Brahe (1546-1601)



- Último grande astrônomo antes da invenção do telescópio;
- 20 anos de observações de planetas e estrelas com precisão, em muitos casos, melhor do que 1 minuto de arco ( $1/30$  do diâmetro do Sol);
- Suas observações dos planetas levaram as leis de Kepler do movimento planetário;
- Em 1600, Tycho contratou para ajudá-lo na análise de dados sobre os planetas o matemático alemão Johannes Kepler;
- Tinha seu próprio sistema cosmológico - todos os planetas giravam em torno do Sol, com exceção da Terra. O Sol e a Lua giravam em torno da Terra.

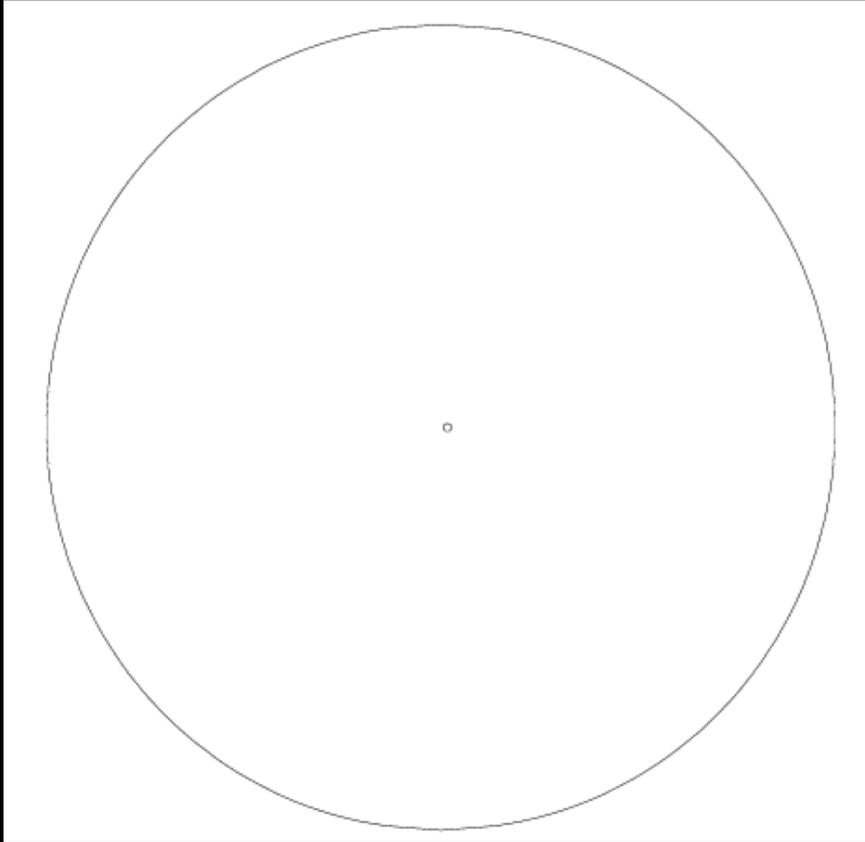
# Johannes Kepler (1571-1630)



- Astrônomo e matemático habilidoso, adepto do heliocentrismo;
- Analisou os dados de Tycho Brahe;
- Kepler conseguiu determinar as diferentes posições da Terra após cada período sideral de Marte;
- Verificou que a órbita da Terra era bem ajustada por um círculo excêntrico;
- Não obteve sucesso ao ajustar a órbita de Marte com um círculo (erro de 8 minutos de arco =  $1/4$  do tamanho do Sol);
- Descobriu que as órbitas são elípticas, não circulares! A posição do Sol coincide com um dos focos da elipse.

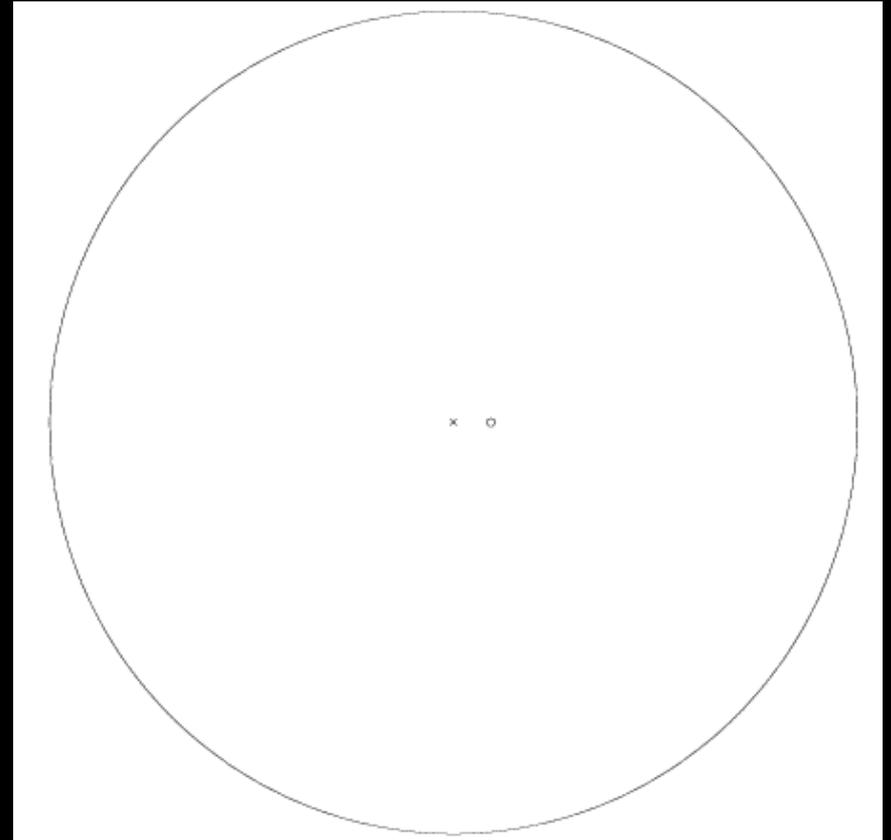
# Exemplos de órbitas elípticas

---

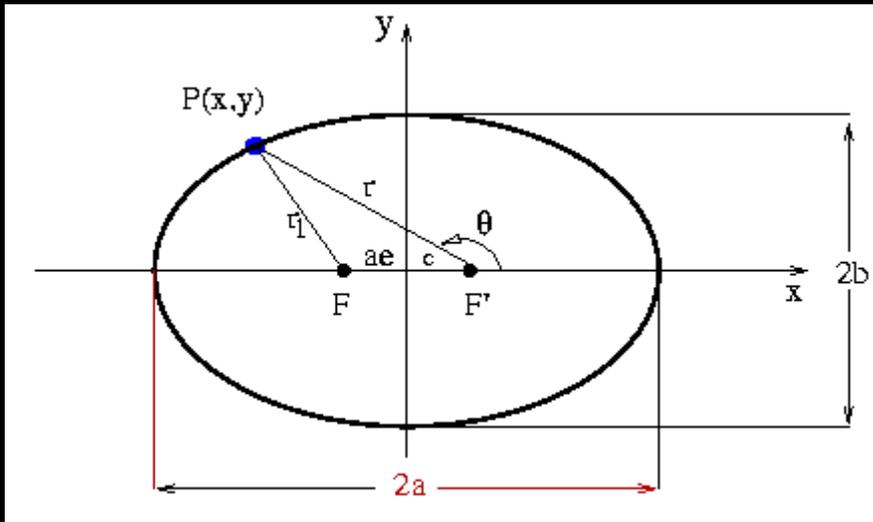


Terra

Marte



# Propriedades das elipses



$$e = \frac{c}{a} = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$$

- *Equação da elipse em coordenadas polares:*

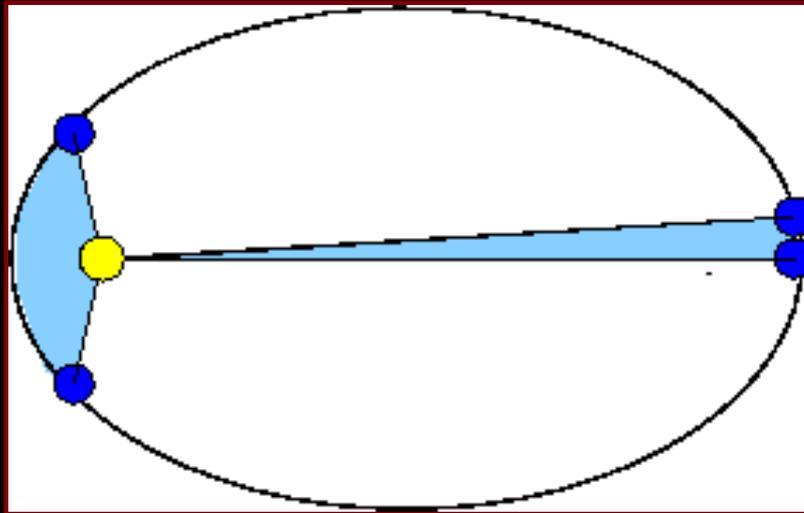
$$r = \frac{a(1 - e^2)}{(1 + e \cos \theta)}$$

- *Área da elipse:*

$$A = \pi ab.$$

# As três leis

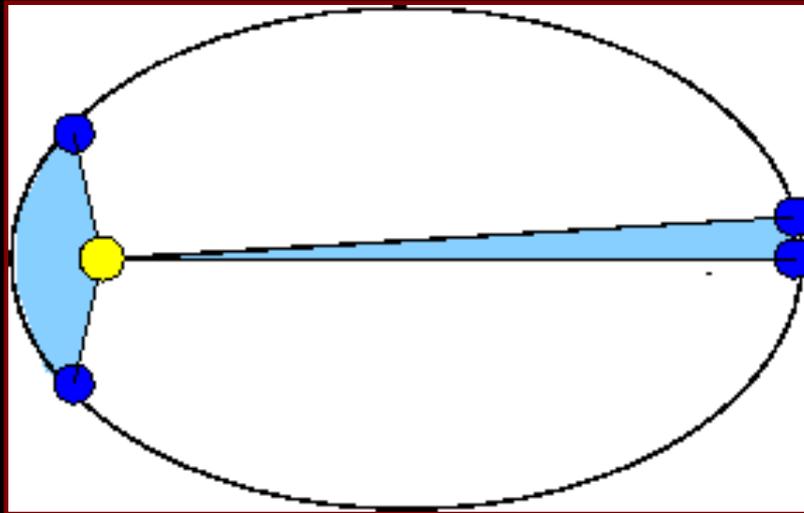
- **Lei da áreas (1609):** A reta unindo o planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais.



- O significado físico desta lei é que a velocidade orbital não é uniforme, mas varia de forma regular: quanto mais distante o planeta está do Sol, mais devagar ele se move.

# As três leis

- **Lei da áreas (1609):** A reta unindo o planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais.



- O significado físico desta lei é que a velocidade orbital não é uniforme, mas varia de forma regular: quanto mais distante o planeta está do Sol, mais devagar ele se move.

# As três leis

- **Lei harmônica (1618):** O quadrado do período orbital dos planetas é diretamente proporcional ao cubo de sua distância média ao Sol.

$$P^2 = K a^3$$

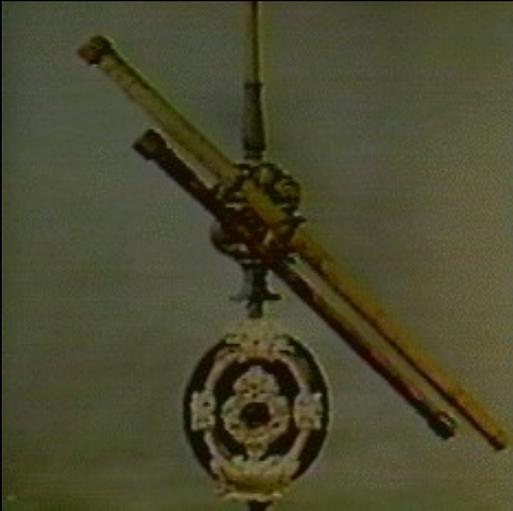
$a$  é o semi-eixo maior,  $P$  o período orbital do planeta e  $K$  uma constante.

$P$  (anos);  $a$  (UA)  $\Rightarrow$   $K=1$

$$P^2 = a^3$$

- Esta lei estabelece que planetas com órbitas maiores se movem mais lentamente em torno do Sol e, portanto, isso implica que a força entre o Sol e o planeta decresce com a distância ao Sol.

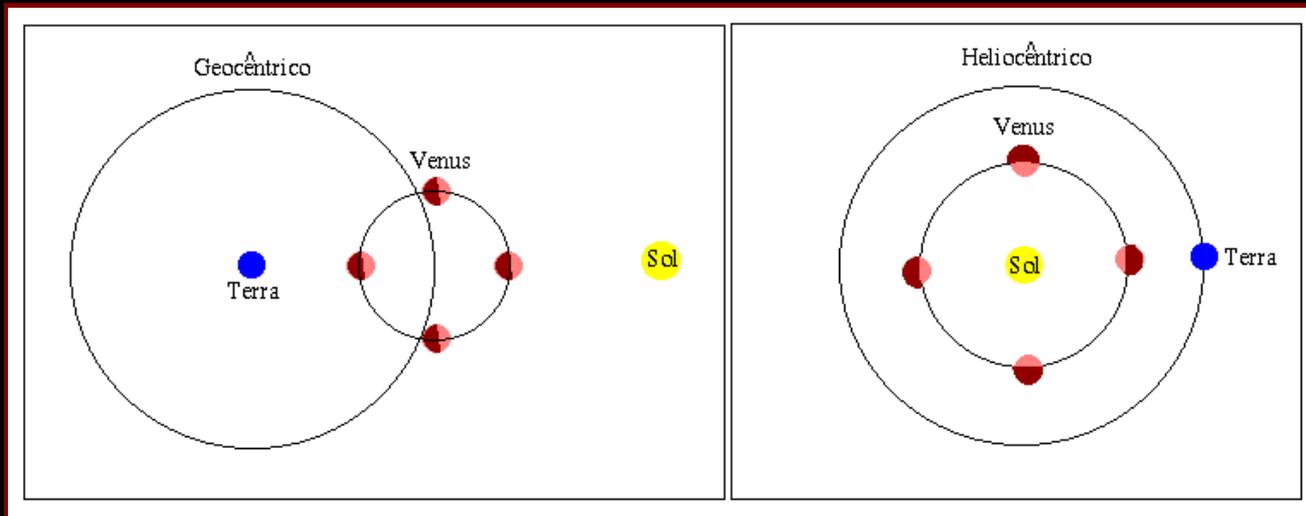
# Galileo Galilei (1564 - 1642)



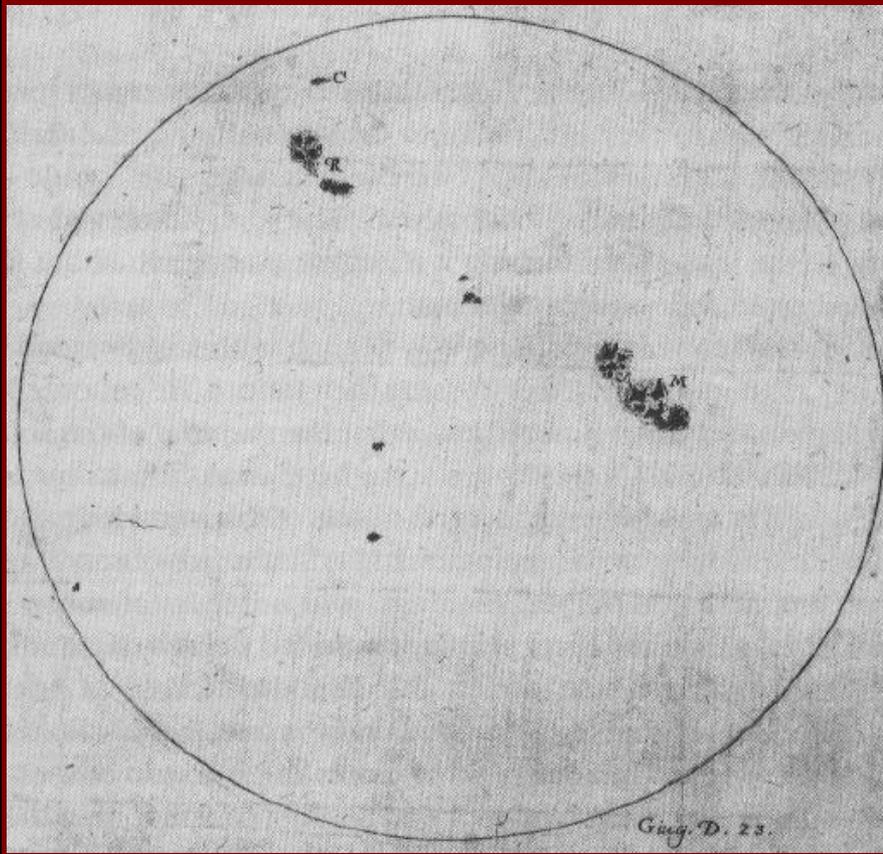
- Experimentos em mecânica:
  - conceito de inércia;
  - aceleração de corpos em queda livre não dependem de seu peso.
- Construiu seu próprio telescópio e observou o céu com ele (aumentos de 3 a 30 vezes).
- Descobriu que a Via Láctea era constituída por uma infinidade de estrelas;
- Descobriu que Júpiter tinha 4 luas orbitando em torno dele, com períodos entre 2 e 17 dias (Io, Europa, Ganimedes e Calisto).
  - Desde então mais 12 satélites foram descobertos.

# Galileo Galilei (1564 - 1642)

- Descobriu que Vênus passa por um ciclo de fases, assim como a Lua.
  - No sistema ptolomaico, Vênus está sempre mais próximo da Terra do que do Sol, e como Vênus está sempre próximo do Sol, ele **nunca poderia ter toda sua face iluminada voltada para nós** (fase cheia);
  - Galileu concluiu que Vênus deve viajar ao redor do Sol (heliocêntrico).
- Descobriu a superfície em relevo da Lua e as manchas do Sol
  - provou que os corpos celestes não são esferas perfeitas e, portanto a Terra não é diferente dos outros corpos.



# Galileo Galilei (1564 - 1642)



Reprodução de um desenho de Galileu mostrando as manchas solares, em 23 de junho de 1612.

- Descobriu a superfície em relevo da Lua e as manchas do Sol
  - provou que os corpos celestes não são esferas perfeitas e, portanto a Terra não é diferente dos outros corpos.

## Suporte ao sistema heliocêntrico

Foi chamado a depor ante a Inquisição Romana, sob acusação de heresia, e obrigado a se retratar.

Apenas em 1992 o Vaticano reconheceu o erro.