

10 ESFERAS

1ª à 7ª

planetas ptolomaicos

8ª

estrelas fixas, morada da Igreja triunfante,

9ª

"Primum Mobile"

10ª

morada de Deus, rodeado por nove anéis de anjos..

Os Modelos de Movimentos Planetários

**Vamos focalizar os modelos de movimentos planetários,
NÃO a Cosmologia antiga**

O “calcanhar de Aquiles”:

- ✓ “Laçadas” dos planetas ($O \rightarrow L \rightarrow O \rightarrow L$)
- ✓ Fases dos planetas

Os equívocos:

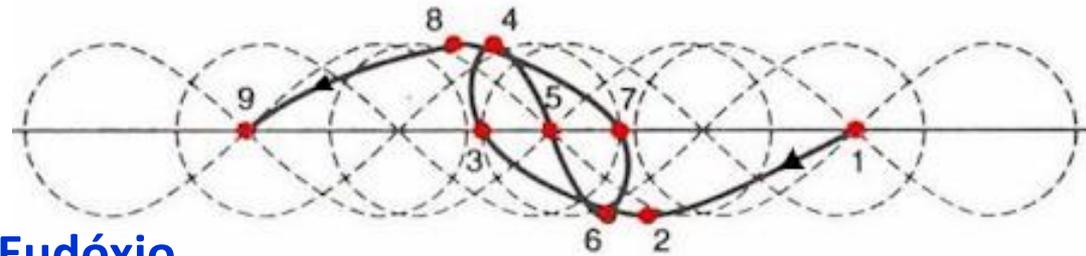
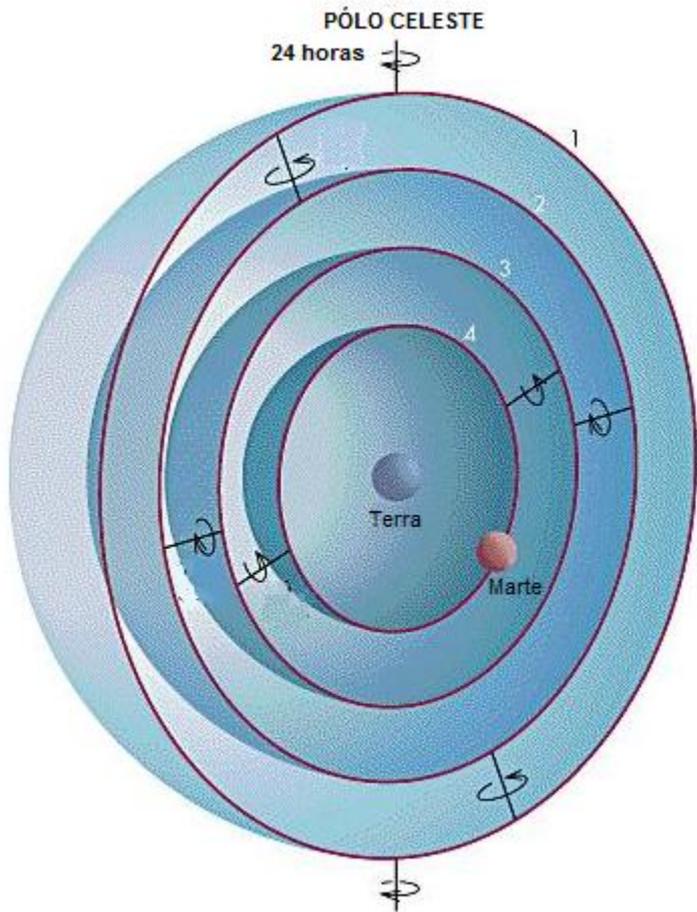
- ✓ Órbitas circulares
- ✓ Movimentos uniformes
- ✓ Terra no centro

As soluções:

- ✓ Contornar as limitações das órbitas circulares e movimentos uniformes com artifícios
- ✓ Observações mais precisas
- ✓ Leis de Kepler, Galileu e Newton

Eudócio de Cnidus (390 – 337 a.C.)

ESFERAS CONCÊNTRICAS:
Terra no centro (comum a todas)
Eixos não coincidentes
Rotações em sentidos opostos



Eudócio



Real

Claúdio Ptomoleu (87 – 151 d.C)



Último astrônomo importante da antiguidade. Egípcio, mas de descendência grega, viveu em Alexandria.

Ptolomeu resumizou todo o conhecimento astronômico grego, incluindo contribuições significativas próprias.



Almagesto

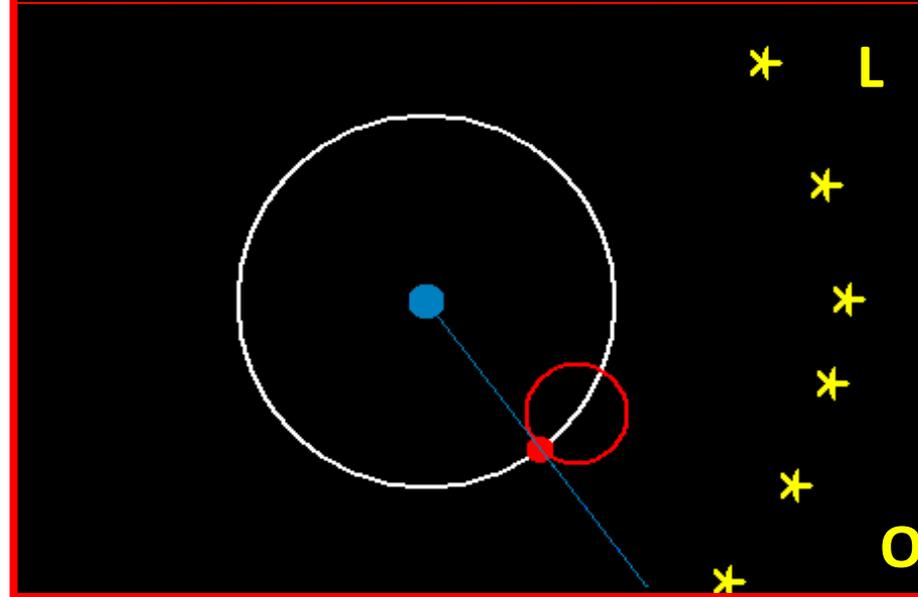
Treze volumes. A maior fonte de conhecimento sobre a Astronomia na Grécia.

Claúdio Ptomoleu (87 – 151 d.C)

Ptolomeu explica a complexidade dos movimentos dos planetas, com um esquema complexo de **epiciclos e deferentes e equantes**.

Visto do equante o movimento era uniforme.

Visto da Terra a velocidade do planeta é variável.

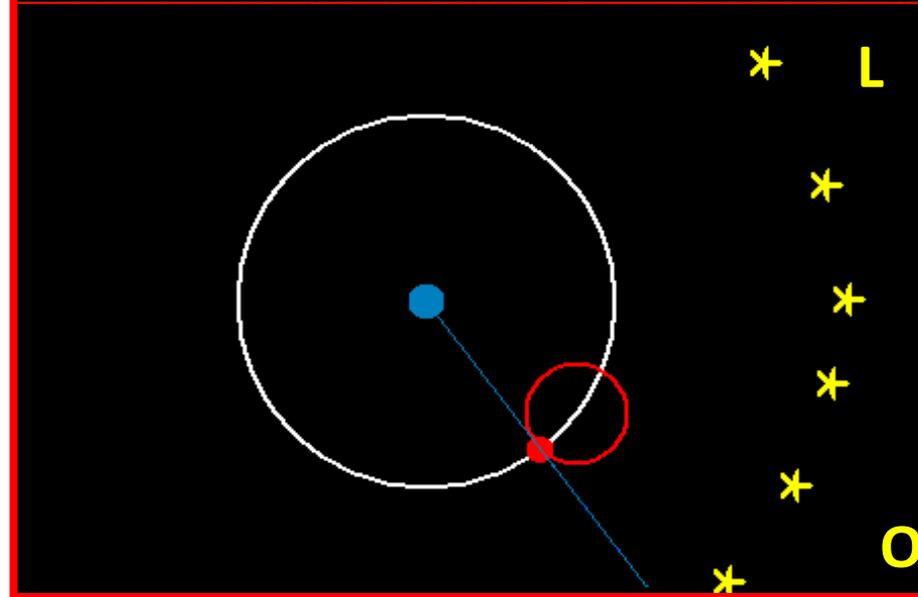
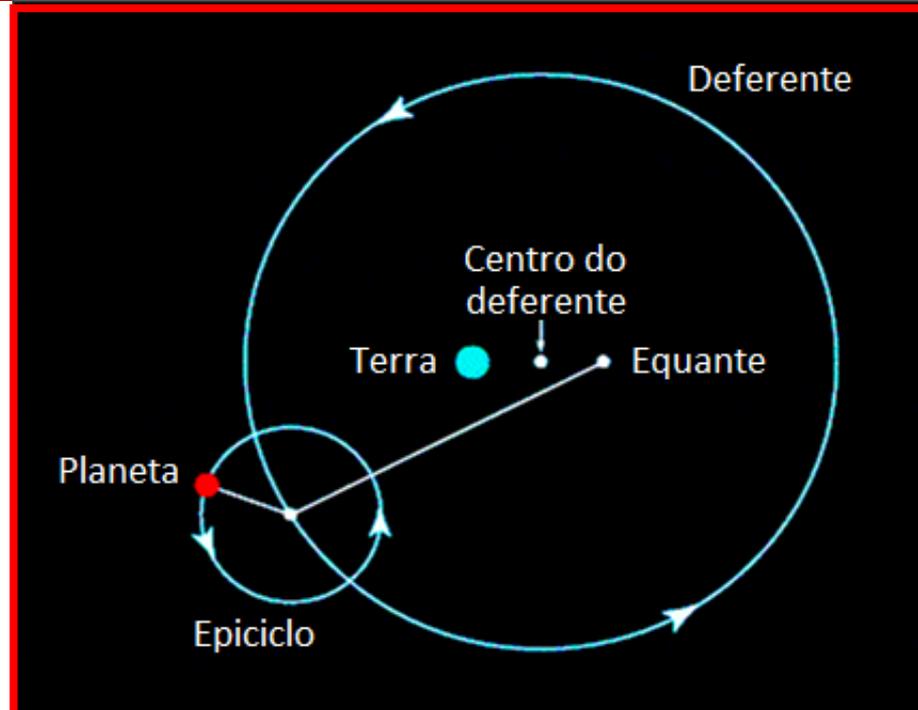


Claúdio Ptomoleu (87 – 151 d.C)

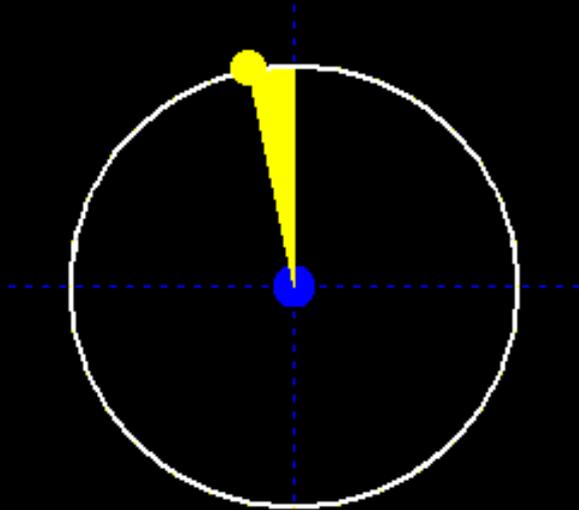
Ptolomeu explica a complexidade dos movimentos dos planetas, com um esquema complexo de **epiciclos e deferentes e equantes**.

Visto do equante o movimento era uniforme.

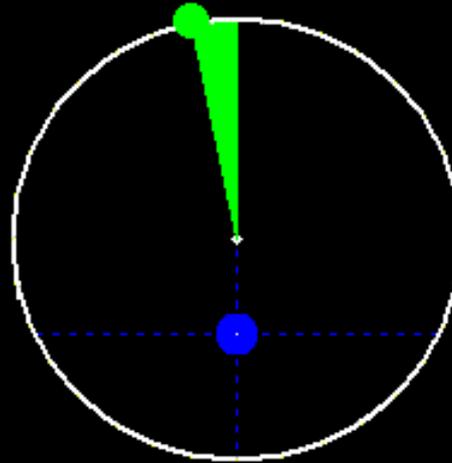
Visto da Terra a velocidade do planeta é variável.



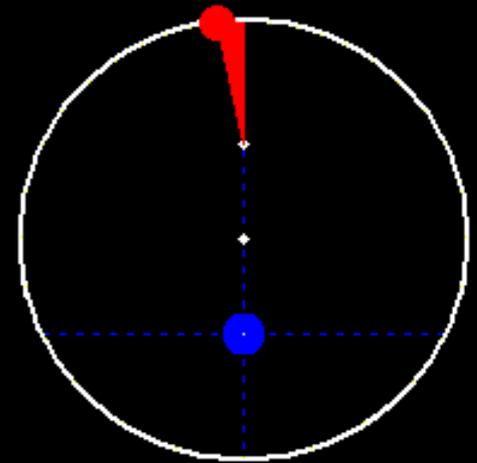
Movimentos circulares



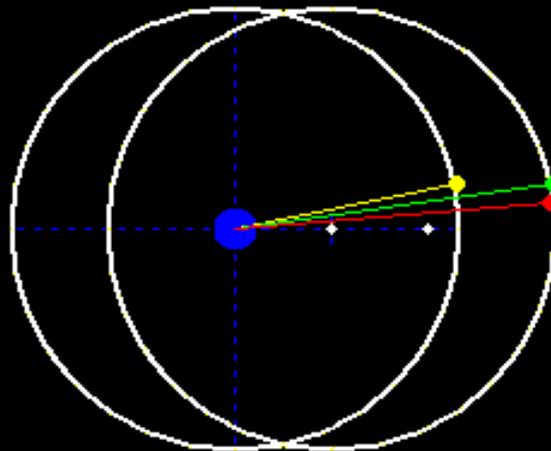
Centro na Terra



Terra fora do centro

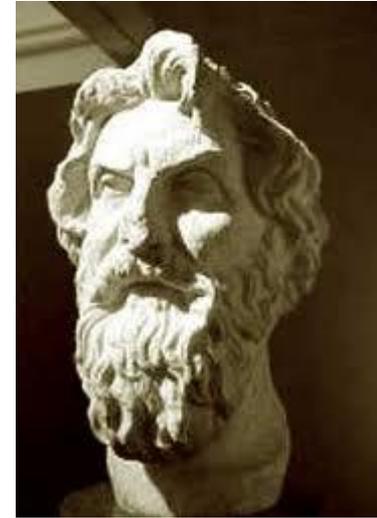
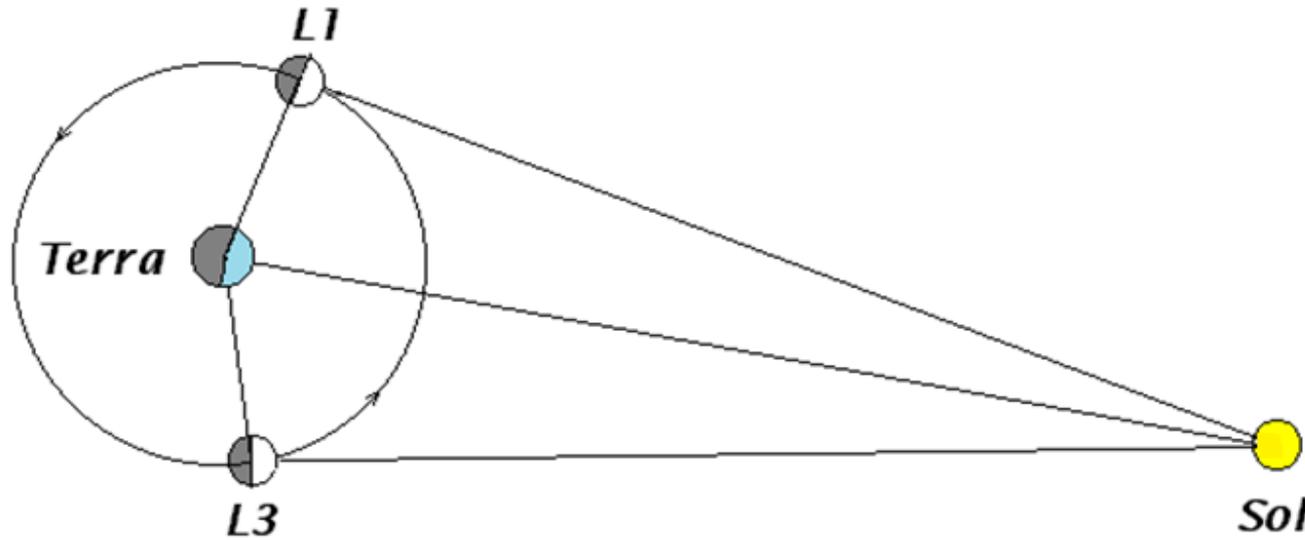


Terra e Equante
fora do centro



Visão da Terra

Aristarco de Samos (280 a.C.)



- Intervalos de tempo entre L1 e L3 e L3 e L1 são praticamente iguais → os raios de luz são quase paralelos → então, o Sol está bem mais longe que a Lua
- Como os diâmetros aparentes são praticamente iguais, → então o Sol é bem maior
- **Conclusão: o Sol deve estar no centro do universo, não a Terra.**

Nicolau Copérnico (1472-1543)

Imagem reconstruída com técnicas forenses, a partir do crânio de Copérnico.

- Aprimorou o sistema discutido por Aristarco de Samos, com o Sol no centro do movimento

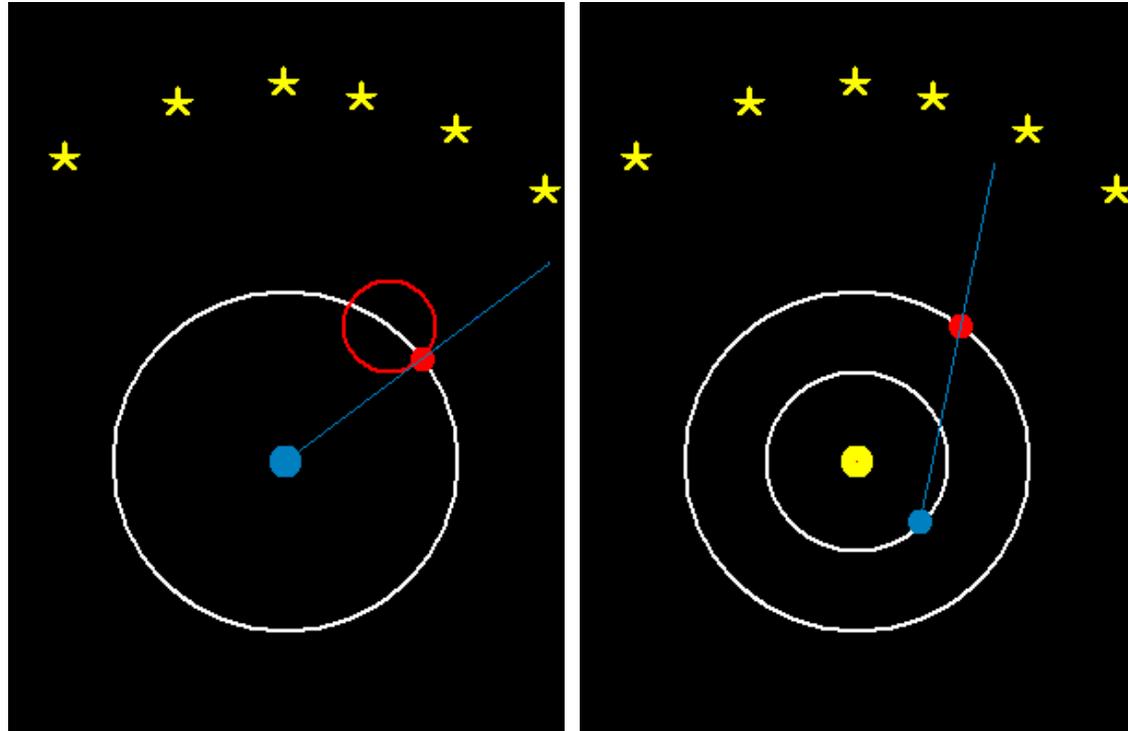


- Ele manteve o sistema de esferas concêntricas, com os planetas girando em órbitas circulares
- Seu trabalho só foi publicado 1 ano após a sua morte
- Seu modelo não foi prontamente aceito

Movimento Retrógrado

Ptolomeu e Copérnico

Movimento
de Marte



-
- No heliocentrismo, a explicação do movimento retrógrado aparente é mais simples.
 - A precisão crescente na determinação das posições implicava em maiores dificuldades de explicação.

Fases de Vênus

Real (Copernicano)

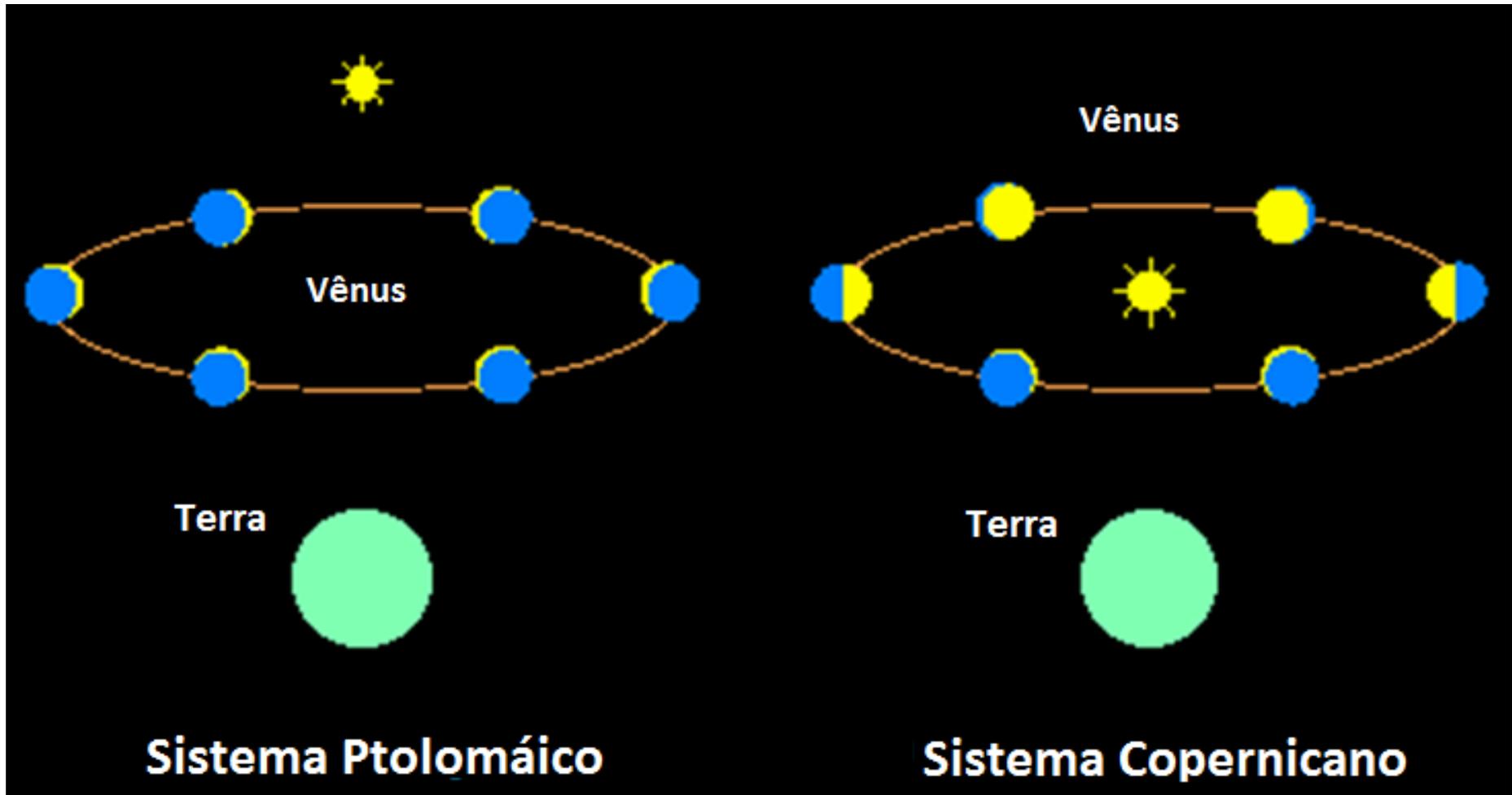
<http://astro.unl.edu/classaction/animations/renaissance/venusphases.html>

Ptolomaico

<http://astro.unl.edu/classaction/animations/renaissance/ptolemaic.html>

Heliocentrismo explica melhor as fases observadas

Fases de Vênus

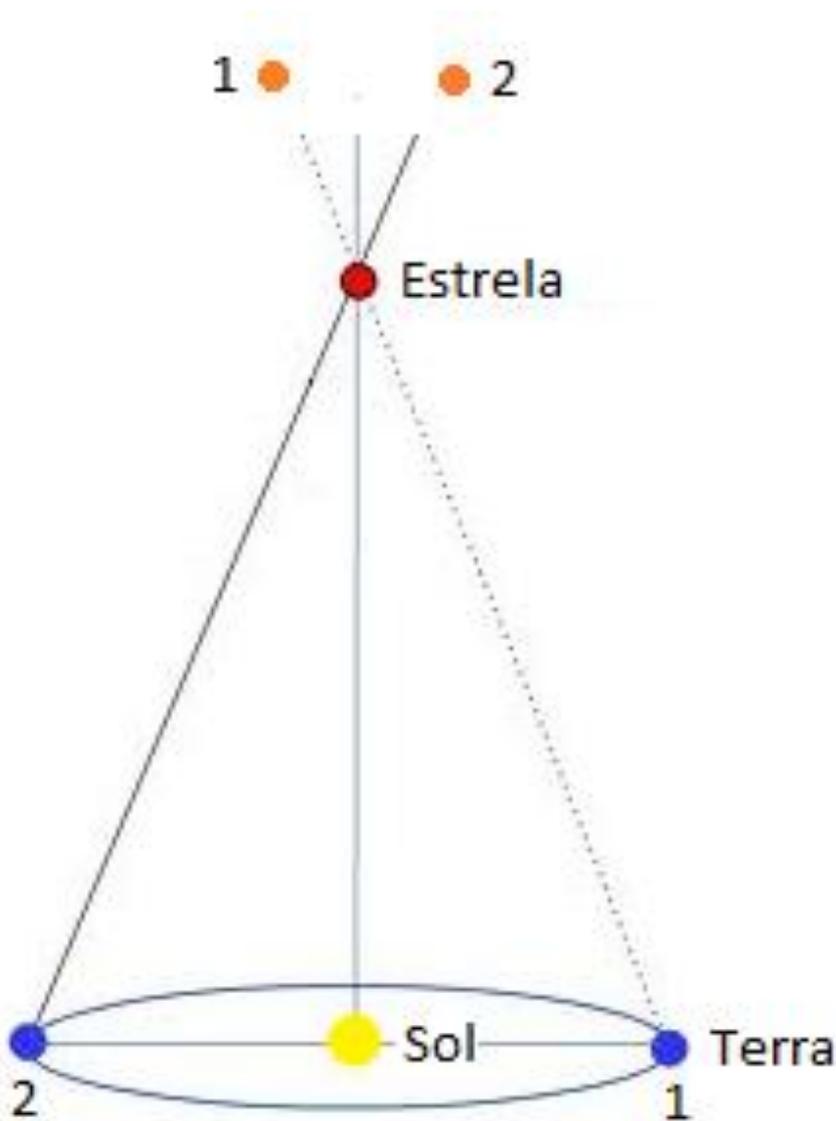


Heliocentrismo explica melhor as fases observadas

O problema da paralaxe

Apesar de o modelo heliocêntrico solucionar as dificuldades do modelo geocêntrico, permanecia em aberto a questão da paralaxe:

Por que a posição aparente das estrelas não mudava durante o movimento da Terra em torno do Sol?



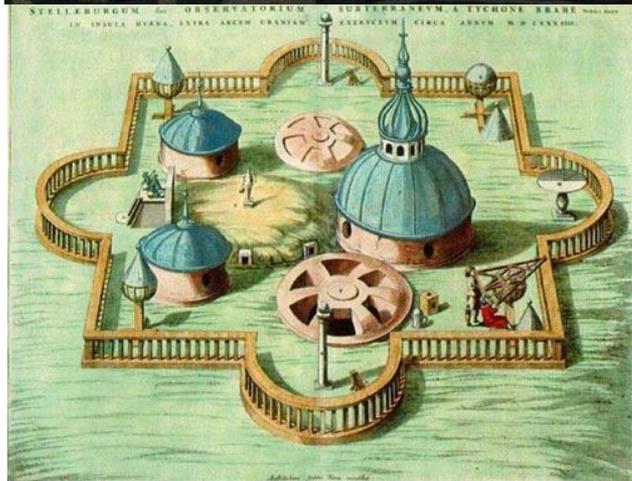
Tycho Brahe (1546-1601)



Dinamarquês

Tycho Brahe (1546-1601)

1584 - Uraniburgo, Ilha de Vem, no Öresund, entre Dinamarca e Suécia



Stjärneborg. Copper etching from Blaeu's Atlas Major, 1663.

QVADRANS MVRALIS SIVE TICHONICVS.



Precisão:

Tycho Brahe:
2'

**Satélite
Hipparcos
(1998):**
0,001" de arco

**Satélite Gaia
(futuro):**
0,00001"

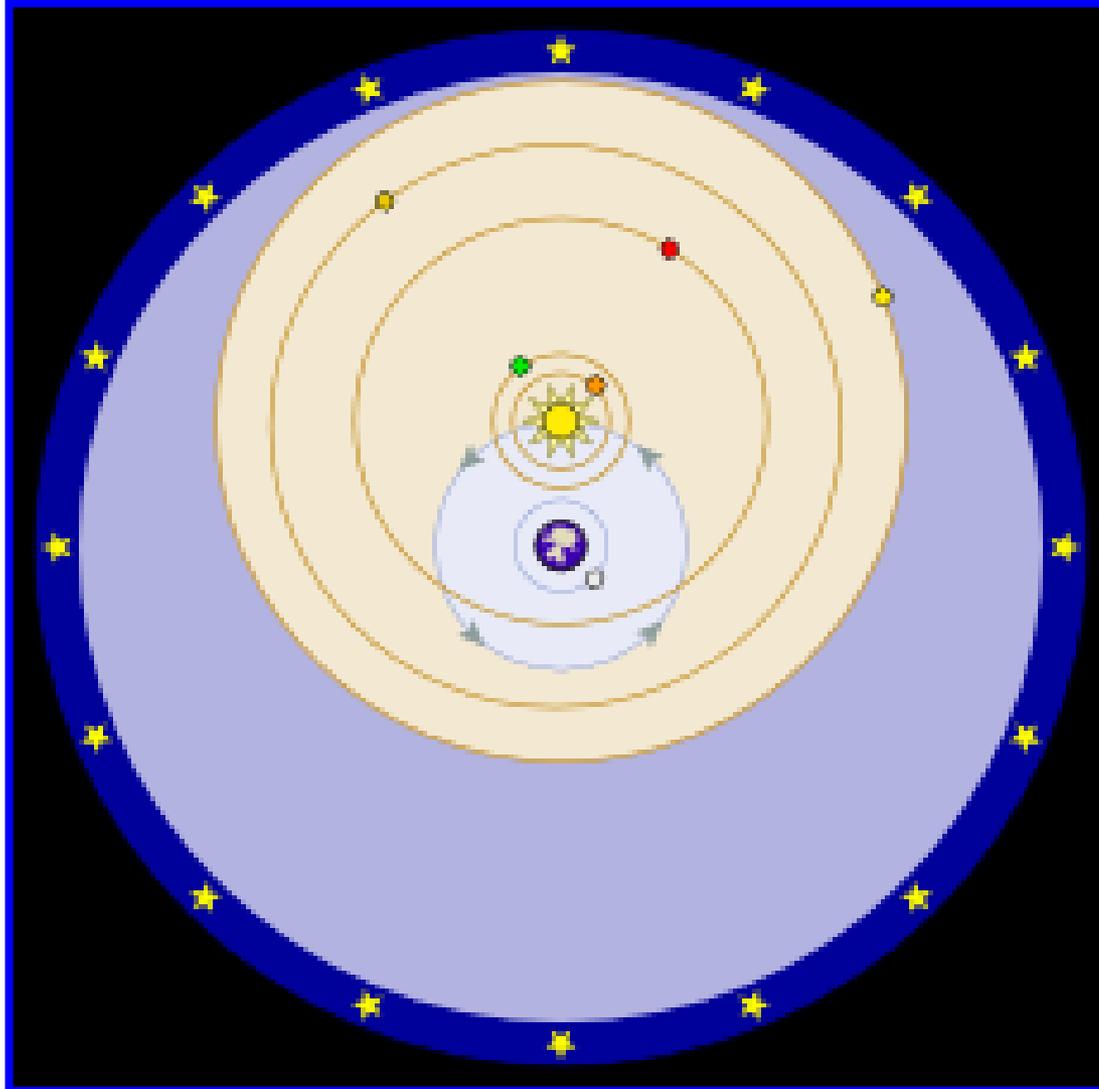
Tycho Brahe (1546-1601)

Brahe passou décadas observando e registrando as posições dos planetas no céu.

Em 1572 observa uma supernova e em 1577 observa um cometa. Mediu as paralaxes e mostrou que esses objetos estavam mais distante que a Lua e que o brilho da supernova variava.

Refutava a totalidade do modelo Copernicano porque não via paralaxe decorrente do movimento da Terra em torno do Sol

Modelo Ticoniano

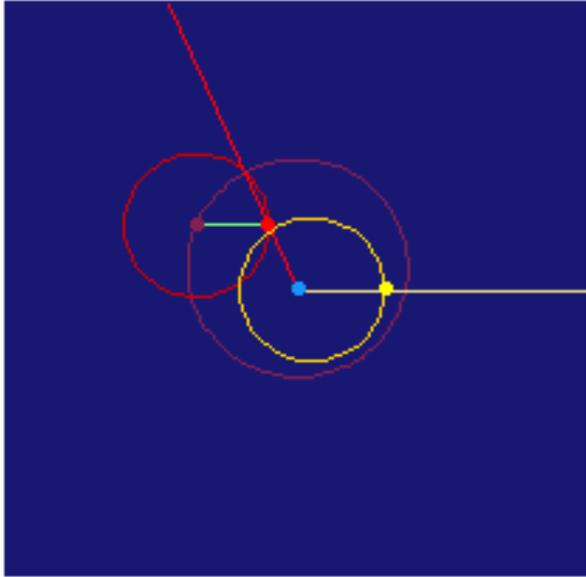


Planetas orbitam o Sol.
Sol e a Lua orbitam a Terra.

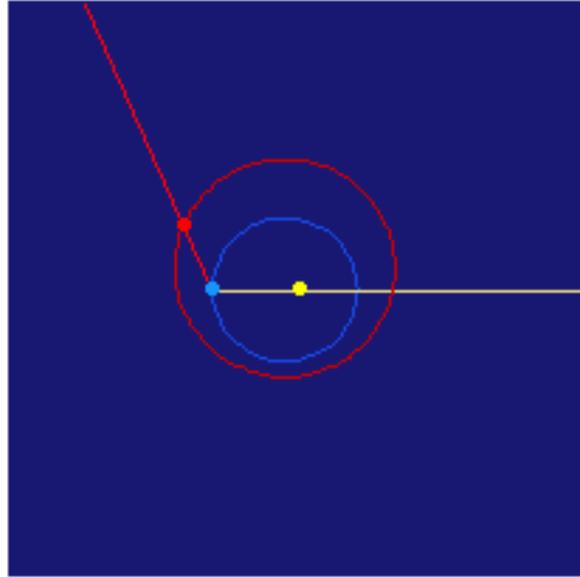
Equivalências dos Modelos

<http://wlym.com/~animations/part1/MegaEquivalence.swf>

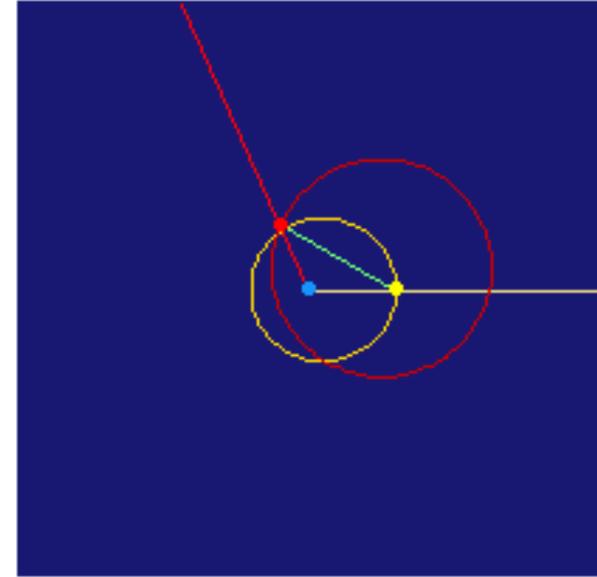
Ptolomeu, Copérnico e Brahe



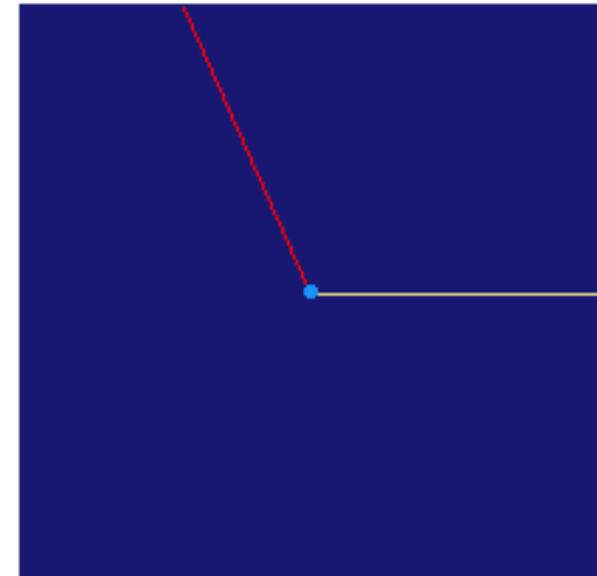
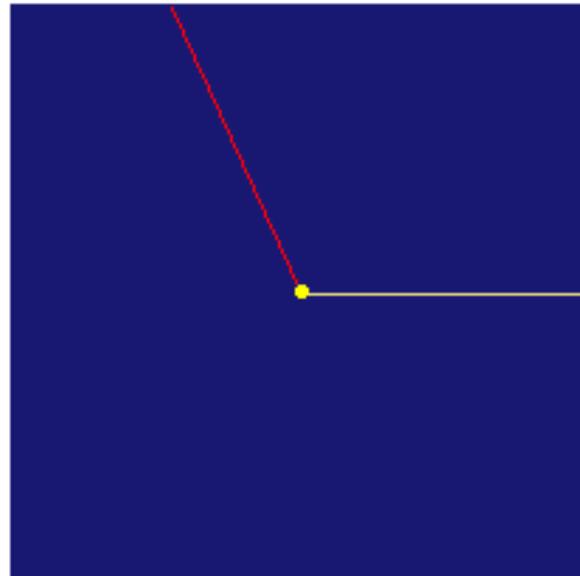
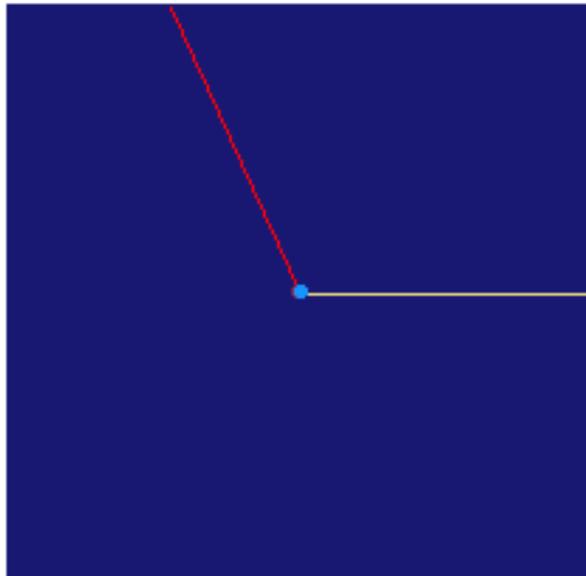
Ptolomeu



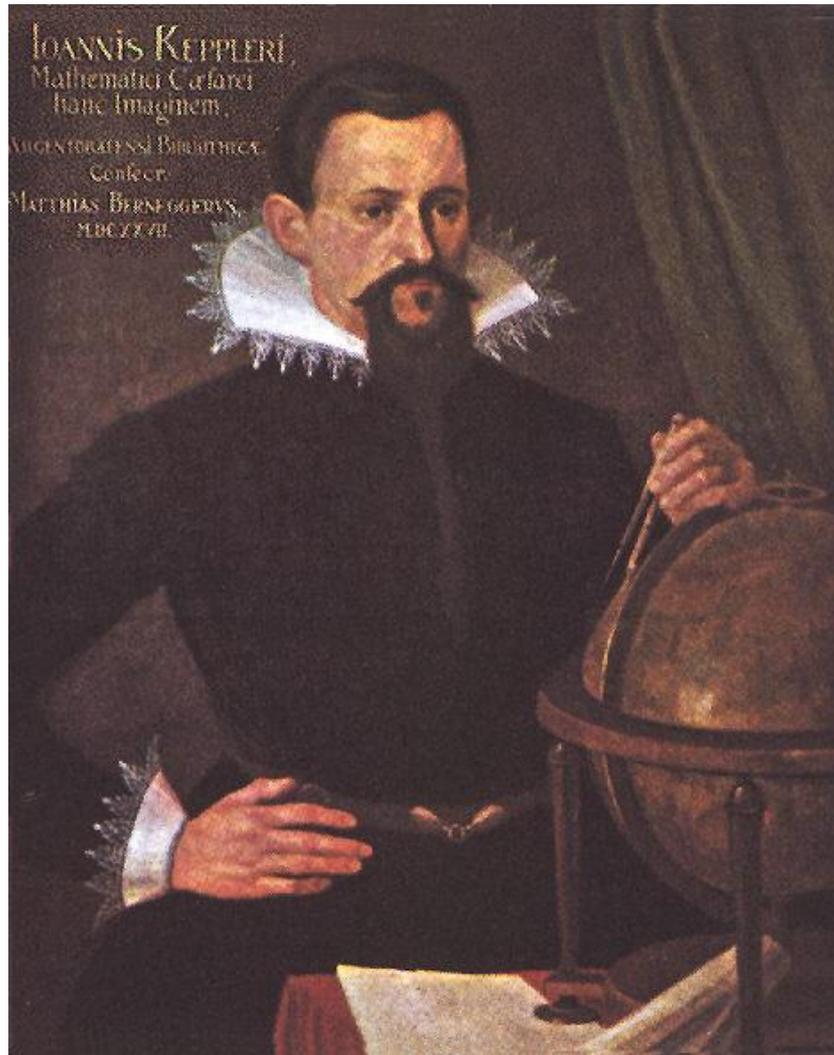
Copérnico



Brahe



Johannes Kepler (1571 – 1630)



Alemão

Johannes Kepler (1571 – 1630)

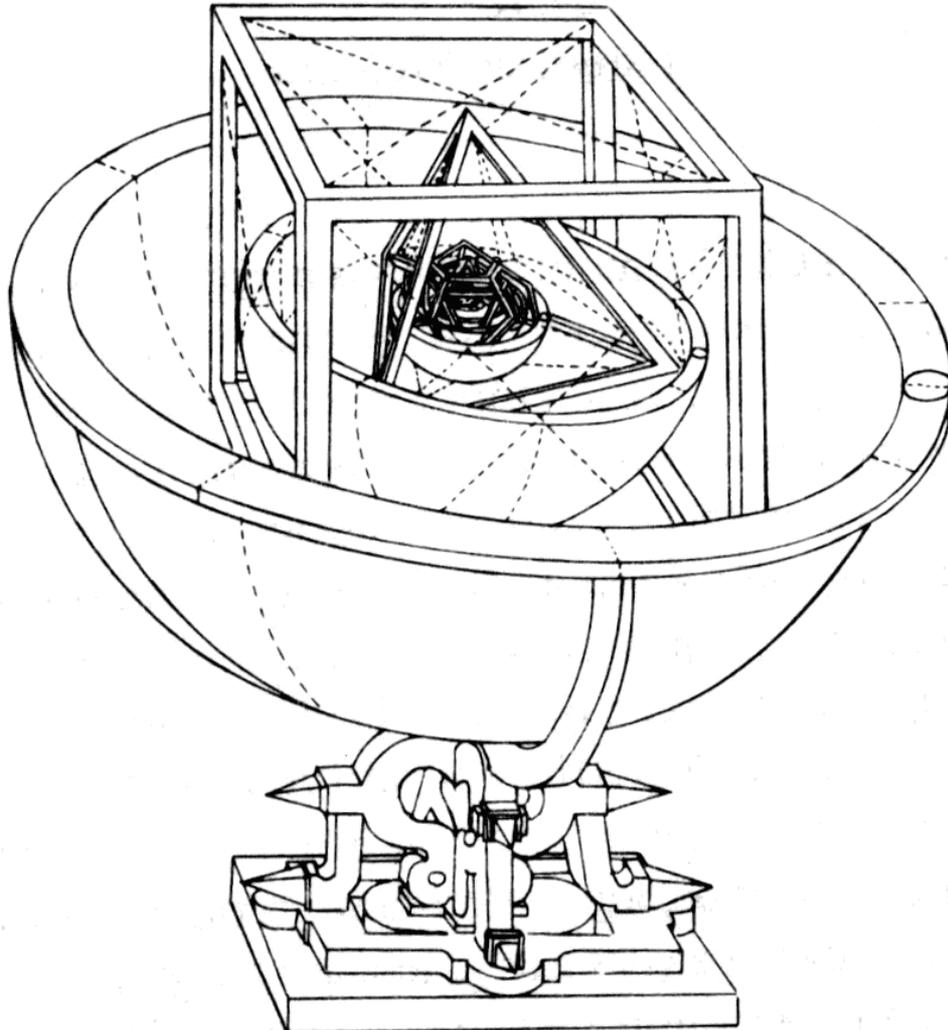
Fascinado pela simplicidade da teoria de Copérnico, pela geometria e pelos sólidos geométricos.

“Existem cinco sólidos perfeitos. Portanto, apenas seis esferas podem ser interpoladas entre eles... o número de planetas é consequência do número de sólidos perfeitos!... o Sol no centro, seguido da esfera de Mercúrio, cercada por um octaedro. Depois a esfera de Vênus, cercada por um icosaedro. A da Terra, cercada por um dodecaedro. A de Marte, por um tetraedro. A de Júpiter, por um cubo. E, por fim, a esfera de Saturno. É essa a solução do mistério cósmico”

[A Harmonia do Mundo, Marcelo Gleiser, Cia. das Letras]

Johannes Kepler (1571 – 1630)

Fascinado pela simplicidade da teoria de Copérnico, pela geometria e pelos sólidos geométricos.



Esfera de Saturno

- Cubo -

Esfera de Júpiter

- Tetraedro -

Esfera de Marte

- Dodecaedro -

Esfera da Terra

- Icosaedro -

Esfera de Vênus

- Octaedro -

Esfera de Mercúrio

Johannes Kepler (1571 – 1630)

Iniciou a análise com os dados de Marte.

Admitiu

- órbita terrestre circular (mantinha fixa a distância heliocêntrica)
- período de translação de 365 dias.

Constatou

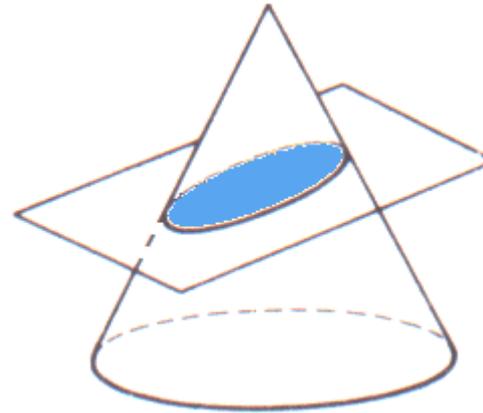
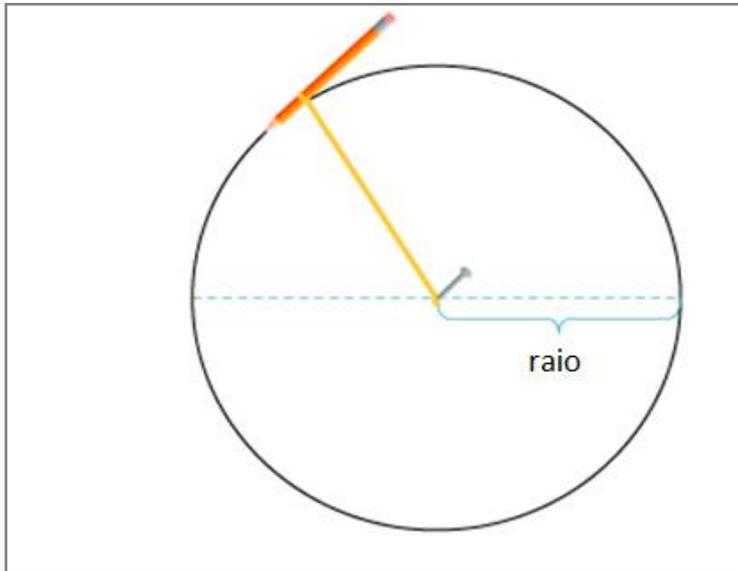
- a órbita de Marte não se ajustava a um círculo



Obras:

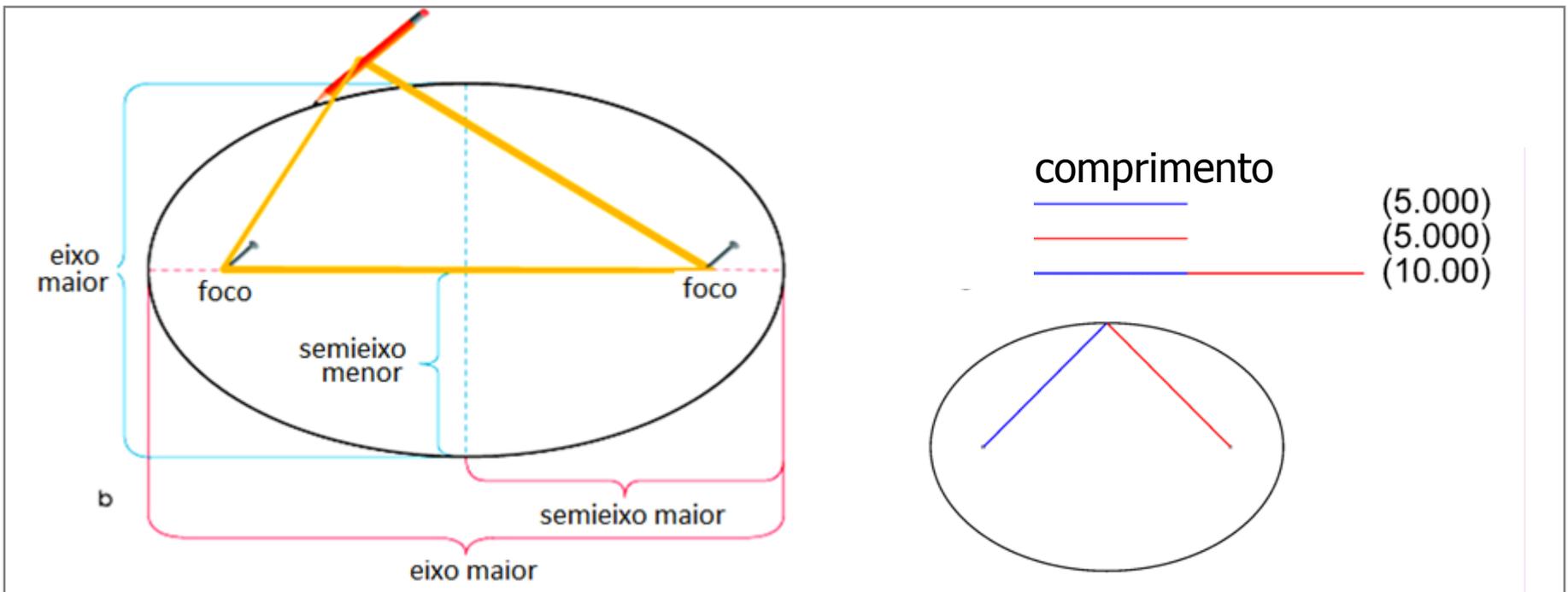
Mysterium Cosmographicum - Dioptrice
- Astronomicarum pars Optica -
Astronomia Nova - De vero Anno, quo
aeternus Dei Filius humanam naturam in
Utero benedictae Virginis Mariae
assumpsit - Stereometria, Harmonices
Mundi e Epitome Astronomiae
Copernicanae.

Elipse (Cônica)

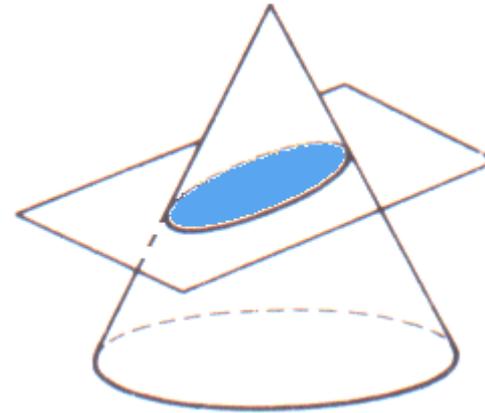
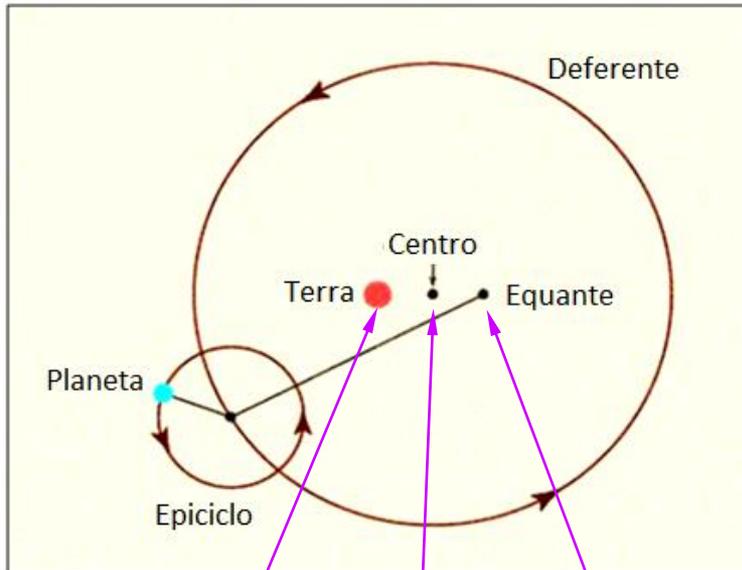


Círculo
achatado
não é
elipse

$$\text{excentricidade} = \frac{\text{distância entre pontos focais}}{\text{comprimento do eixo maior}}$$

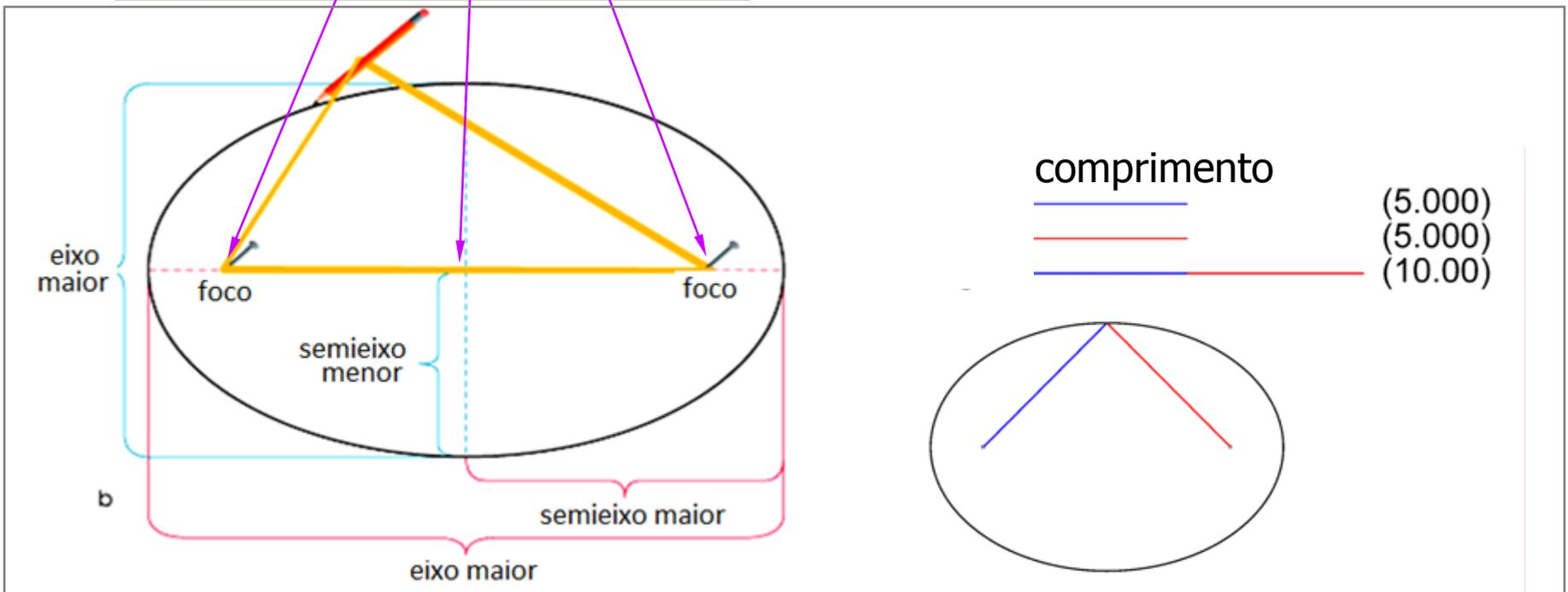


Elipse (Cônica)



Círculo
achatado
não é
elipse

$$\text{excentricidade} = \frac{\text{distância entre pontos focais}}{\text{comprimento do eixo maior}}$$



Leis de Kepler

<http://astro.unl.edu/classaction/animations/renaissance/kepler.html>

A Explicação

- **Leis de Kepler**
 - são excelentes para descrever o movimento dos planetas
 - mas não dizem por que eles se movimentam dessa forma
- **A resposta veio através de**

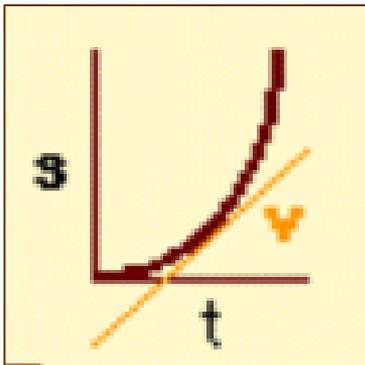
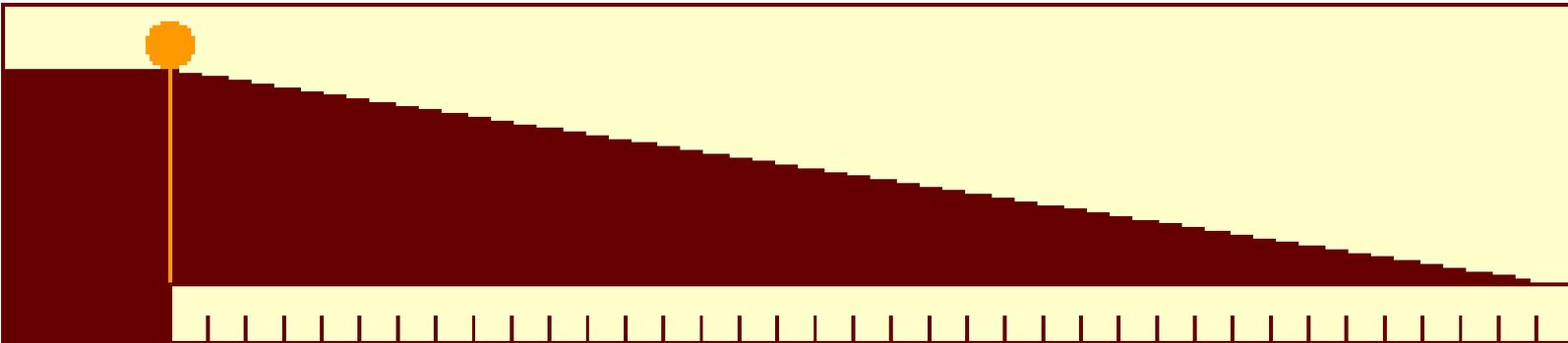
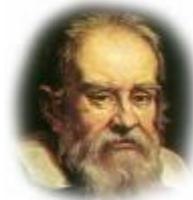
Galileo Galilei
(1564-1642)



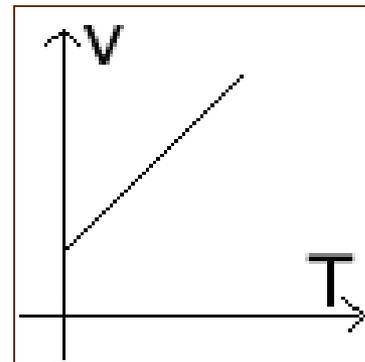
Isaac Newton
(1642-1727)



Estudos de Galileu

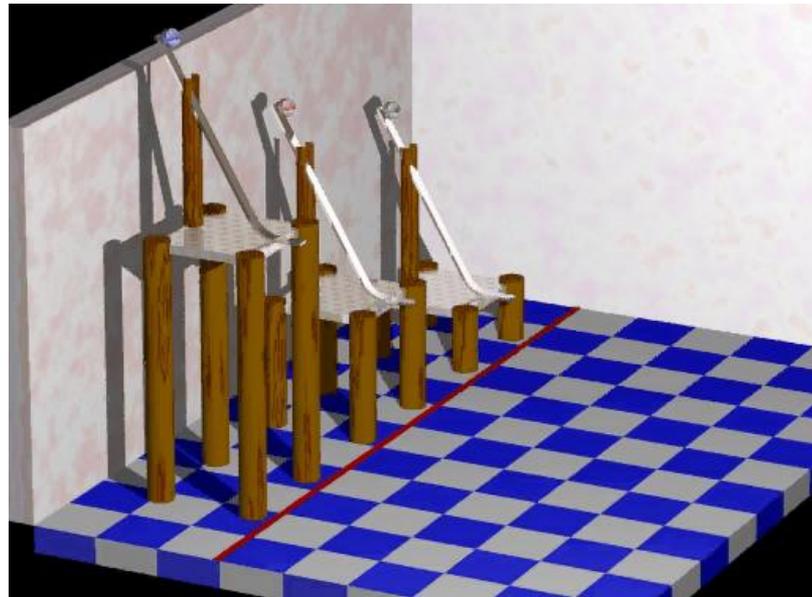
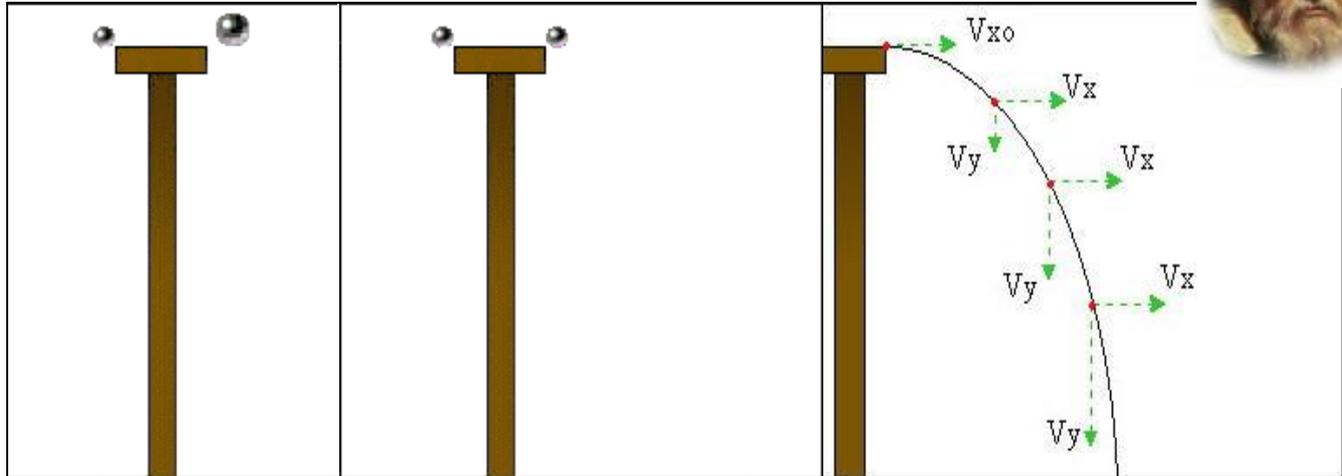
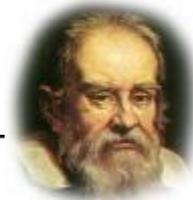


$$S = s_0 + v_0t + \frac{at^2}{2}$$

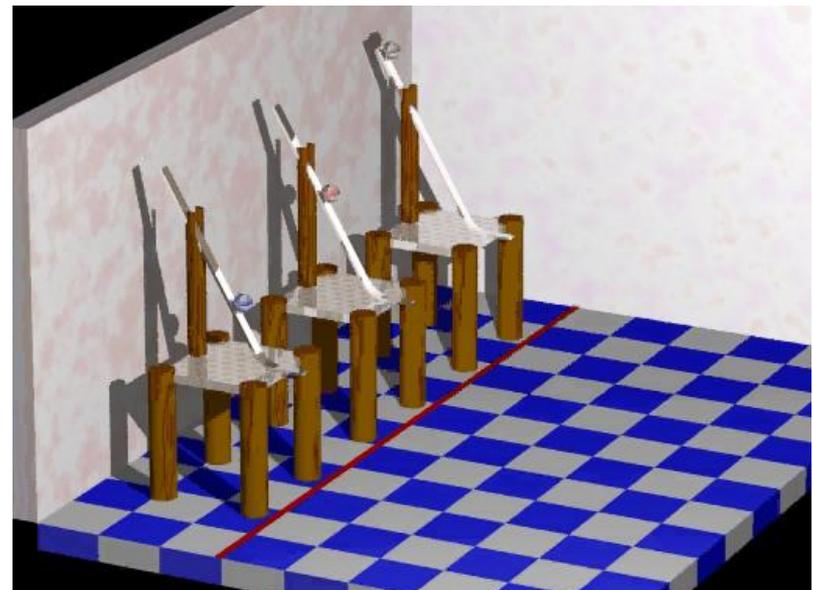


$$V = v_0 + at$$

Estudos de Galileu

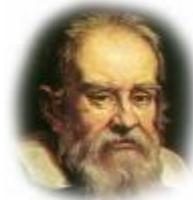
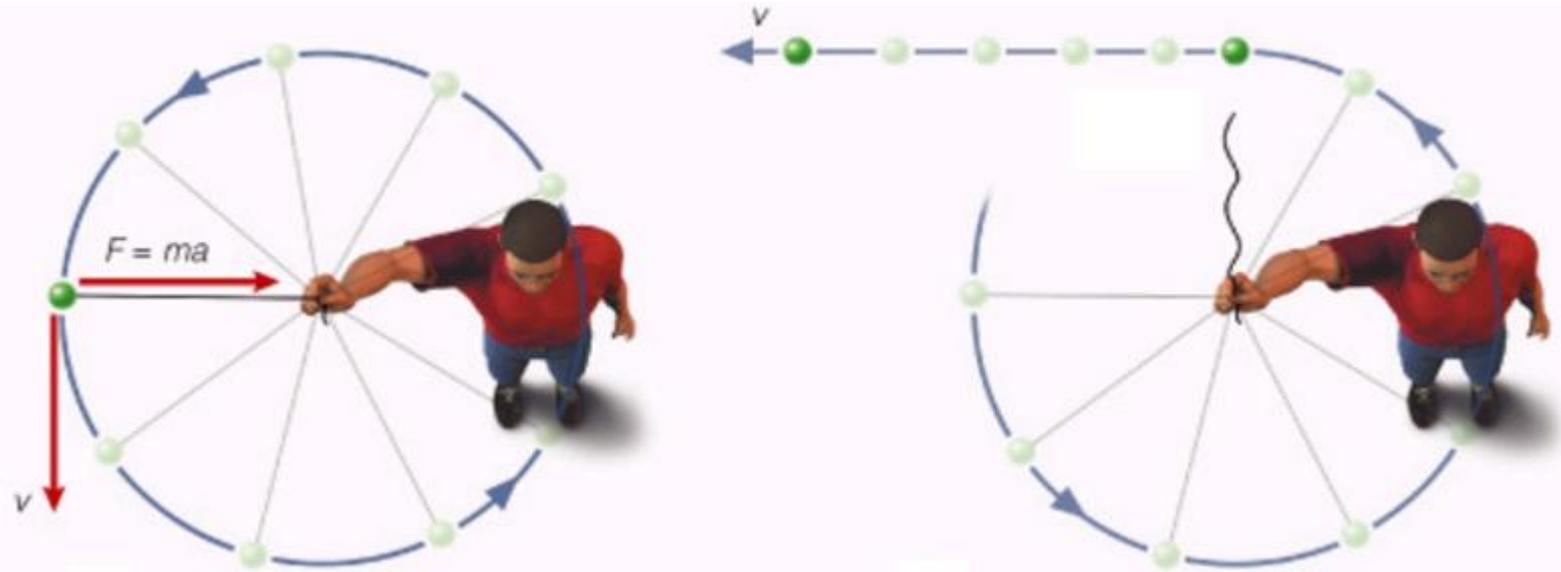


Variando altura



Variando velocidade

Estudos de Galileu



Princípio da inércia:

Um corpo mantém seu estado dinâmico na ausência de força externa.

Se estiver em movimento, a velocidade será constante e a trajetória uma reta.

Leis de Newton



Sir Isaac Newton
(1642-1727)

1. Primeira lei de Newton ou princípio da inércia:

Um corpo que esteja em movimento ou em repouso, tende a manter seu estado inicial

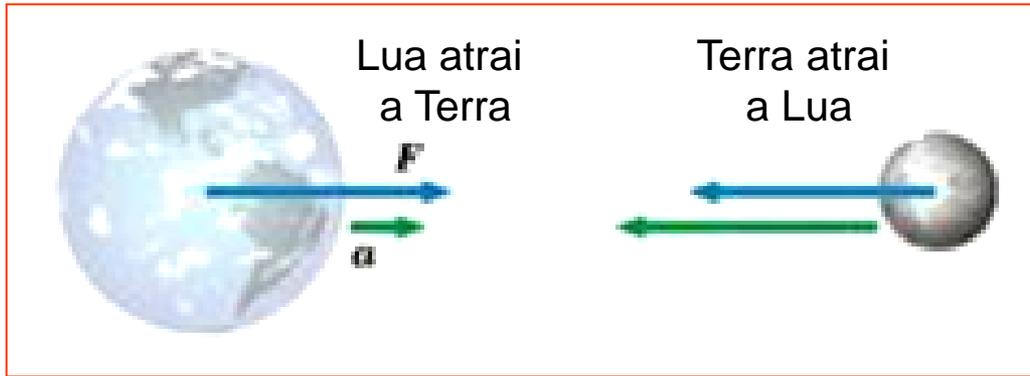
2. Segunda lei de Newton ou princípio fundamental da mecânica:

A resultante das forças de agem num corpo é igual ao produto de sua massa pela aceleração adquirida [$\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$]

3. Terceira lei de Newton ou lei de ação e reação:

Para toda força aplicada, existe outra de mesmo módulo, mesma direção e sentido oposto

Lei da Gravitação



Sir Isaac Newton
(1642-1727)

$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

<http://astro.unl.edu/classaction/animations/renaissance/kepler.html>

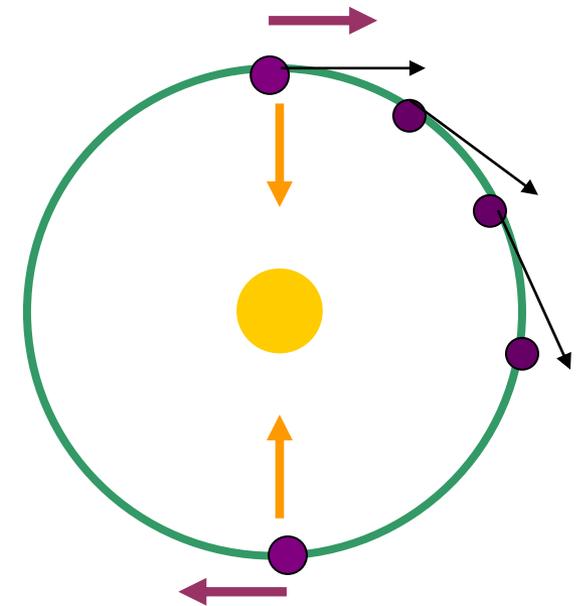
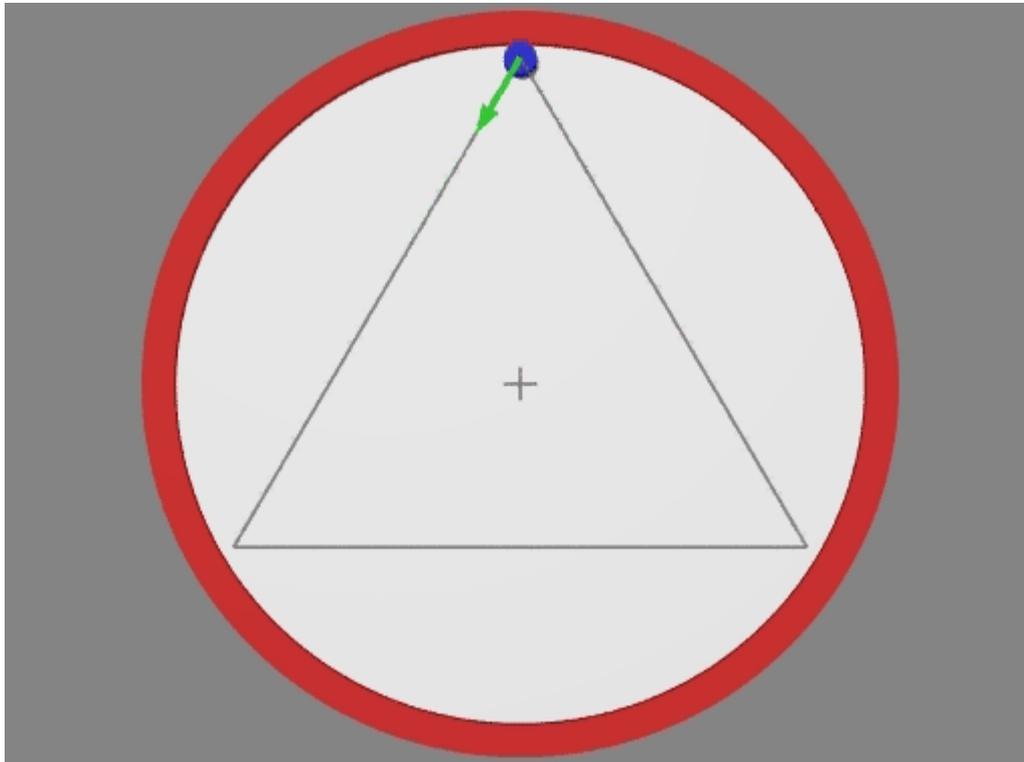
Lei da Gravitação

Por que a Terra não cai no Sol?

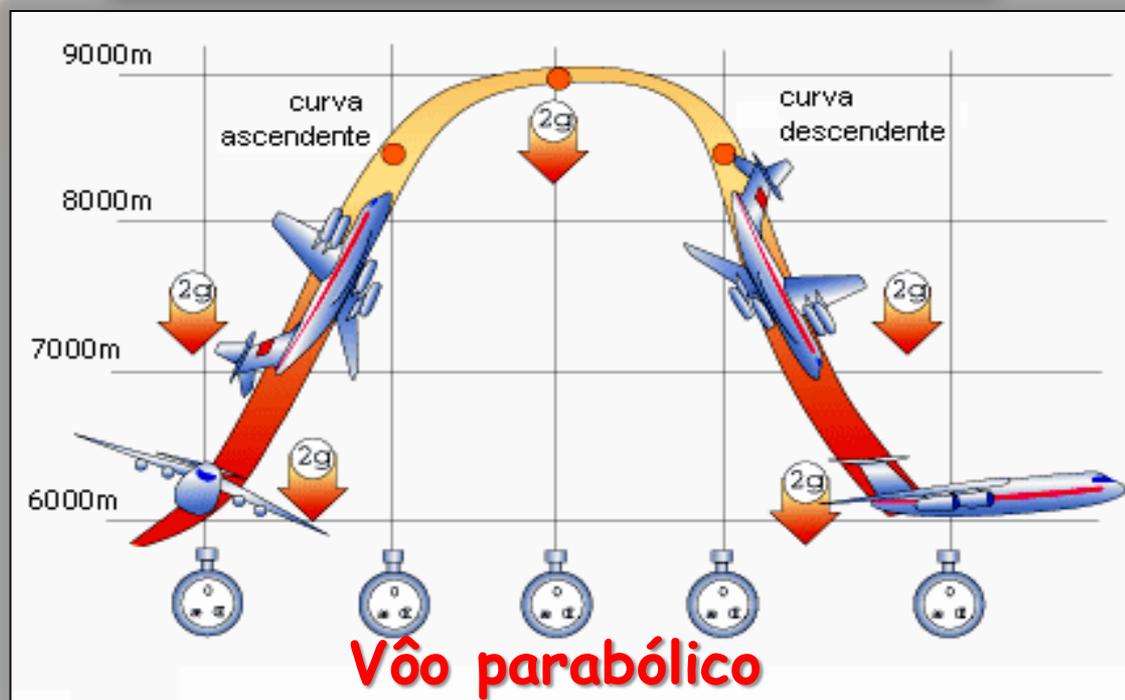


Sir Isaac Newton
(1642-1727)

Na realidade ela cai, e sempre!



Lei da Gravitação - Microgravidade

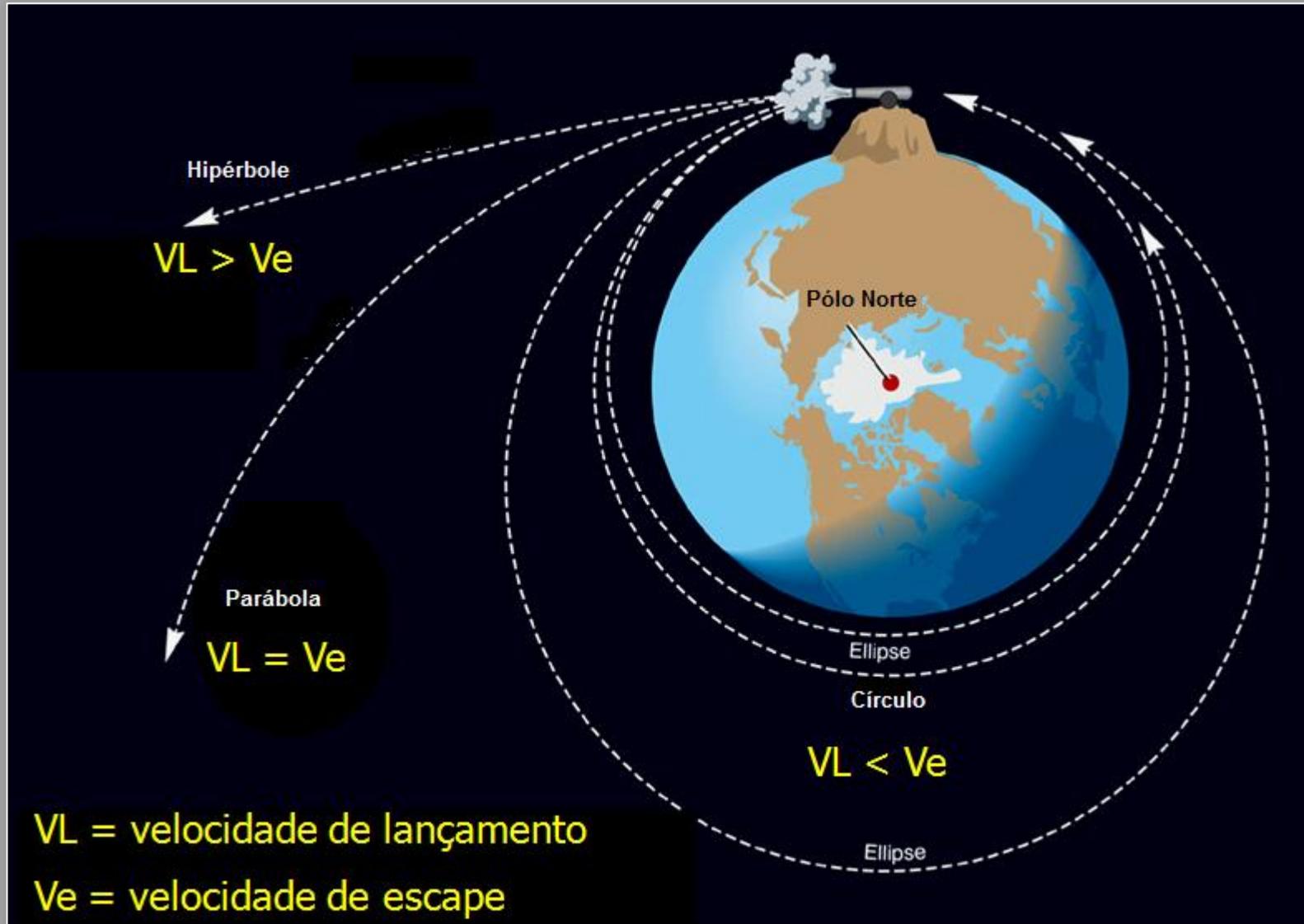


Lei da Gravitação

Canhão de Newton



Sir Isaac Newton
(1642-1727)

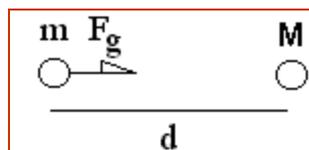


Sumário

- Kepler descobriu leis empíricas que descrevem o movimento dos planetas, mas não explica o motivo
- Galileu estudou o movimento dos planetas, através do conceito de inércia
- Newton desenvolveu 3 leis da Natureza que descrevem como os planetas se comportam, e como as coisas atuam sobre a Terra
- A gravidade é a atração de 2 objetos com massa
 - ela é responsável pelo "balé" de movimento do Universo

Sumário

Lei de Gravitação



$$F_g \equiv F_c = \frac{mv^2}{d} = m \frac{w^2 d^2}{d} = m \frac{4\pi^2 d}{p^2} = m \frac{4\pi^2 d}{kd^3}$$

$$F_g \propto \frac{m}{d^2}$$

1º Lei de Kepler → Órbita elíptica: Curva-se cte//

Existe força atuando para dentro da órbita

Força dirigida ao centro do Sol

1º Lei de Newton → Repouso ou MRU se não existir força

Raio vetor varre áreas iguais em tempos iguais

1º Lei de Kepler: Sol no foco

$$F_g \propto d^{-2}$$

$$F_g^a \propto \frac{m_a}{d} \Rightarrow F_g^a \propto \frac{k_a m_a}{d}$$

$$F_g^b \propto \frac{m_b}{d} \Rightarrow F_g^b \propto \frac{k_b m_b}{d}$$

2º Lei de Kepler

3º Lei de Newton

Ação → reação

$$F_g \propto \frac{Mm}{d^2}$$

mas $F_g^a = F_g^b$

$$k_a m_a = k_b m_b$$

$$\frac{k_a}{m_b} = \frac{k_b}{m_a} = K$$

$$\therefore k_a = Km_b ; k_b = Km_a$$

$$\Rightarrow F_g^a = F_g^b = F \propto \frac{m_a m_b}{d^2}$$

3º Lei de Kepler

$$\left(\frac{a_1}{a_2}\right)^3 = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^2$$

$$F_g \propto Mm$$

A Mecânica Newtoniana e a Teoria da Relatividade

Equivalência entre massa inercial e massa gravitacional

$$\mathbf{F} = \mathbf{M} \times \mathbf{a}$$

$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

Newton pensava que os valores das duas massas eram muito próximos, senão iguais.

Barão von Roland Eötvös (húngaro): mediu com grande precisão a equivalência entre elas.

Einstein: “ Essa lei (de equivalência) atingia-me com todo seu impacto. Espantava-me sua persistência e imaginei que nela deveria residir a chave de mais profunda compreensão da gravitação e da inércia. Eu não tinha dúvidas sérias acerca de sua estrita validade...”

A Mecânica Newtoniana e a Teoria da Relatividade

Equivalência entre massa inercial e massa gravitacional

$$\mathbf{F} = \mathbf{M} \times \mathbf{a}$$

$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

Para compreender o princípio da equivalência podemos usar o “elevador de Einstein”: uma caixa fechada, colocada em um ponto do espaço, suscetível de ser içada por algo situado fora dela, que a puxa com força constante.

Os ocupantes do elevador sentem-se impelidos “para baixo”, na direção do piso. O princípio da equivalência assegura que essa força é idêntica à que poderia ser produzida por um campo gravitacional convenientemente construído que atuasse “de cima para baixo” sobre o elevador estacionário.

As pessoas que se acham no elevador não serão capazes de dizer se enfrentam uma situação ou outra.

A equivalência entre massa gravitacional e massa inercial é, na verdade, equivalência entre força gravitacional e força inercial.

Mecânica Clássica e Mecânica Relativística

Espaço (3D) e tempo são grandezas independentes e absolutas.

O referencial absoluto de tempo está no agente motor (Deus).

A velocidade que um corpo pode adquirir sob aceleração constante é infinita.

O valor da massa não muda com o estado dinâmico.

Espaço-tempo (4D) não são grandezas independentes.

Tempo é grandeza variável com o referencial.

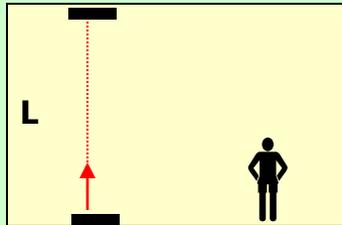
Velocidade é finita e o valor máximo é o da luz propagando-se no vácuo.

A massa inercial aumenta com a velocidade e tende a infinito na velocidade da luz.

Mecânica Clássica e Mecânica Relativística

Dilatação do tempo

Referencial em repouso: o que a pessoa vê de dentro



veloc = 0

Tempo:

$$t = \frac{2L}{c}$$

$$t^2 = \frac{4L^2}{c^2}$$

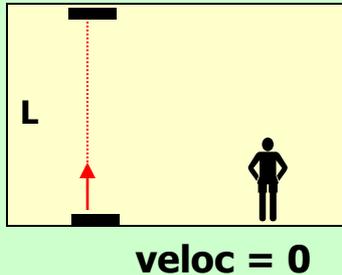
Pensemos nesta situação:

Uma pessoa dentro de uma caixa, com dois espelhos: um no piso e outro no teto, alinhados com a vertical. **L** é a altura da caixa. Do espelho do piso sai um raio de luz em direção ao espelho do teto, reflete e volta para o espelho do piso.

Mecânica Clássica e Mecânica Relativística

Dilatação do tempo

Referencial em repouso: o que a pessoa vê de dentro

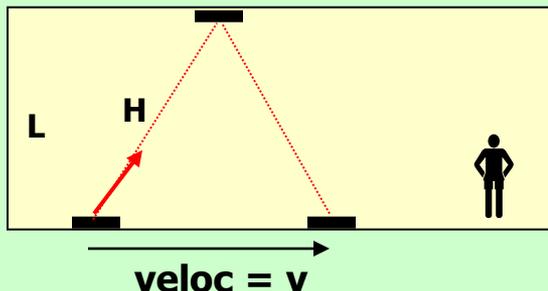


Tempo:

$$t = \frac{2L}{c}$$

$$t^2 = \frac{4L^2}{c^2}$$

Referencial em movimento: o que uma pessoa vê de fora



Tempo:

$$t' = \frac{2H}{c}$$

$$t'^2 = \frac{4H^2}{c^2}$$

Pensemos nesta situação:

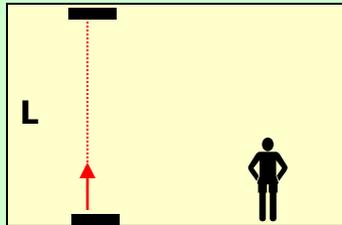
Uma pessoa dentro de uma caixa, com dois espelhos: um no piso e outro no teto, alinhados com a vertical. **L** é a altura da caixa. Do espelho do piso sai um raio de luz em direção ao espelho do teto, reflete e volta para o espelho do piso.

Agora, imaginemos uma pessoa fora da caixa, vendo esta se deslocar com velocidade **v**. Para que a luz atinja o espelho do teto, o raio deverá se inclinar na direção do movimento. Na volta, deverá se inclinar novamente na direção do movimento para atingir o espelho do piso.

Mecânica Clássica e Mecânica Relativística

Dilatação do tempo

Referencial em repouso: o que a pessoa vê de dentro



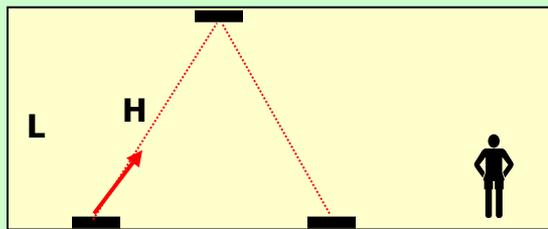
veloc = 0

Tempo:

$$t = \frac{2L}{c}$$

$$t^2 = \frac{4L^2}{c^2}$$

Referencial em movimento: o que uma pessoa vê de fora

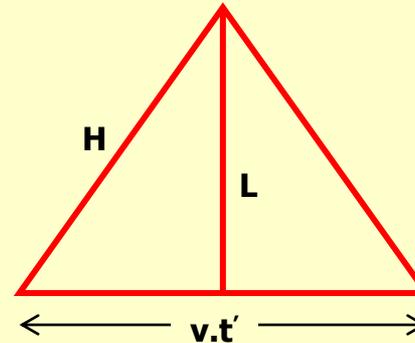


veloc = v

Tempo:

$$t' = \frac{2H}{c}$$

$$t'^2 = \frac{4H^2}{c^2}$$



Pitágoras

$$H^2 = L^2 + \left(\frac{v \cdot t'}{2}\right)^2$$

$$t'^2 = \frac{4H^2}{c^2} = \frac{4 \left[L^2 + \frac{v^2 \cdot t'^2}{4} \right]}{c^2} = \frac{4L^2 + v^2 \cdot t'^2}{c^2}$$

$$c^2 \cdot t'^2 = 4L^2 + v^2 \cdot t'^2 \Rightarrow t'^2 (c^2 - v^2) = 4L^2$$

mas $4L^2 = c^2 \cdot t^2$; então $t'^2 (c^2 - v^2) = c^2 \cdot t^2$

divide por c^2 : $t'^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = t^2$

ou: $t' = t \cdot \left[1 - \frac{v^2}{c^2}\right]^{-1/2}$

Mecânica Clássica e Mecânica Relativística

Variação da massa inercial

Nenhuma aceleração pode aumentar a velocidade de um objeto além da velocidade luz no vácuo:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{a} \cdot t; \quad \text{qdo } \mathbf{v} \rightarrow c, \quad \mathbf{a} \rightarrow 0$$

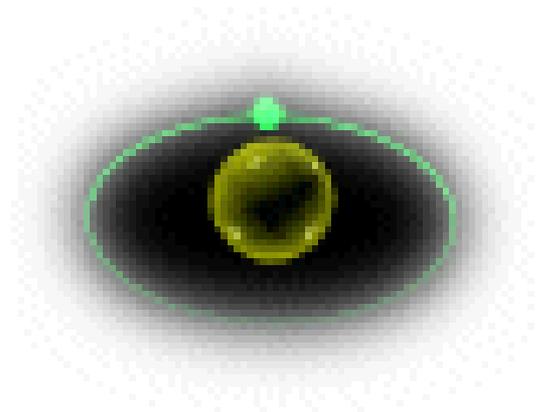
Isto equivale a dizer que sua massa inercial tende ao infinito quando sua velocidade tende a da luz no vácuo:

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m}; \quad \text{se } \mathbf{a} \rightarrow 0, \quad m \rightarrow \infty$$

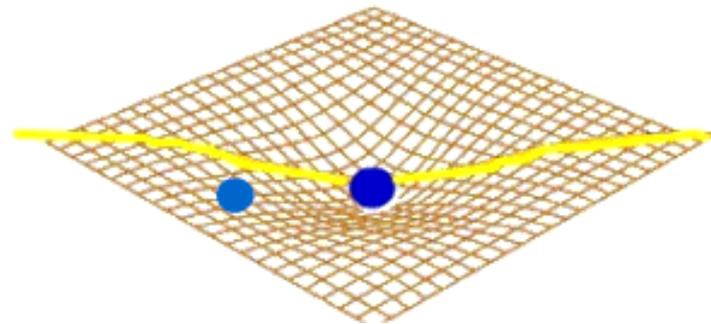
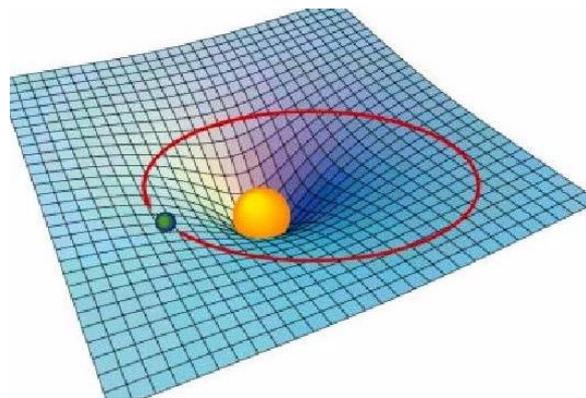
Dizer que a massa inercial aumenta com a velocidade equivale a dizer que a mesma força aplicada ao objeto terá resultado de aceleração cada vez menor na medida em que o objeto atingir a velocidade muito próxima a da luz, a força não terá qualquer resultado.

Mecânica Clássica e Mecânica Relativística

Visão clássica



Visão relativística



Precessão do periélio de Mercúrio

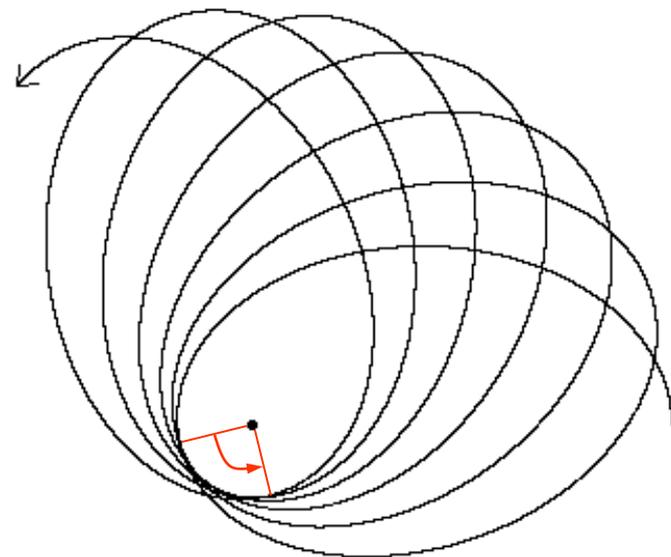
Física Newtoniana: objeto que orbita o Sol tem trajetória elíptica, com foco centrado no Sol. Posição do periélio é fixa.

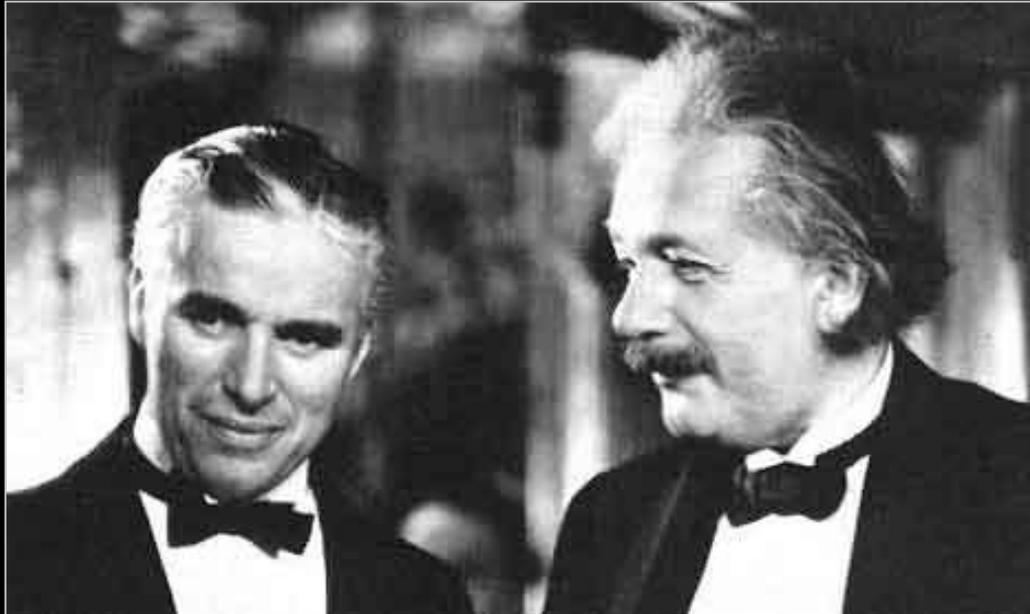
Perturbação gravitacional dos demais corpos e a não-esfericidade do Sol podem causar precessão do periélio.

1845 - Urbain LeVerrier constata a precessão do periélio de Mercúrio: 35'' / século

1915 - Relatividade Geral de Einstein preve precessão de 42.9'' / século

Valor aceito atualmente: 43,11'' \pm ,45'' / século (uma volta completa em 3.000.000 anos)





“Somos uma dupla imbatível: ninguém duvida dele, ninguém acredita em mim”

Charles Chaplin

Sugestões

■ Astronomia antiga

The Early History of Astronomy

<http://classweb.howardcc.edu/astronomy/Presentations/Chapter3/Chapter3.ppt>

Models of Planetary Motion from Antiquity to the Renaissance

<http://faculty.fullerton.edu/cmconnell/Planets.html>

Astronomia e Astrofísica (Kepler de Souza Oliveira Filho e Maria de Fátima Oliveira Saraiva)

<http://astro.if.ufrg.br>