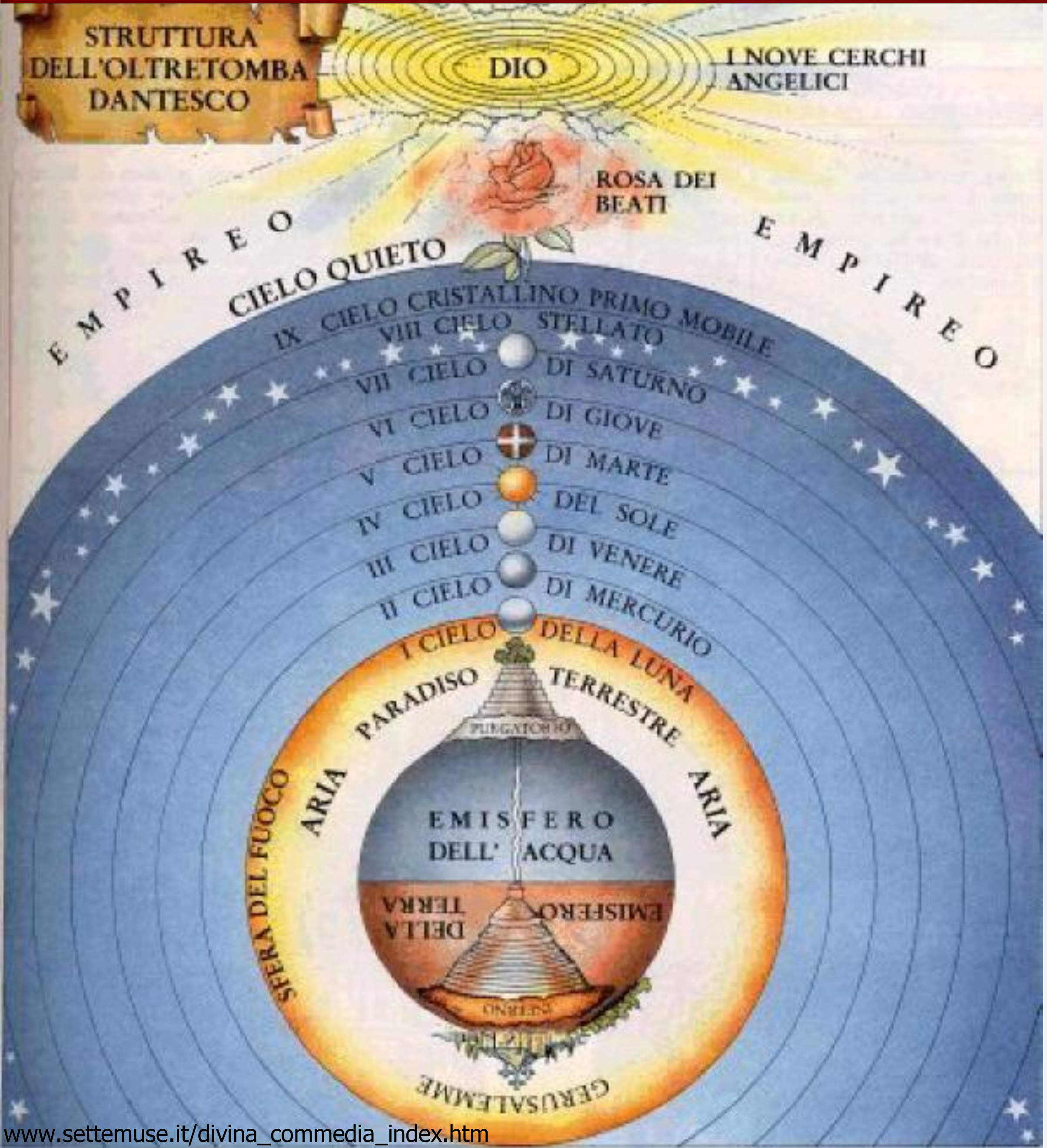
Conceitos Básicos no Ensino de Astronomia - MPA5001

Enos Picazzio - IAGUSP

MECÂNICA DO SISTEMA SOLAR, ÓRBITAS E GRAVIDADE

Paraíso: Divina Comédia (Dante Alighieri- 1265-1321)



www.settemuse.it/divina_commedia_index.htm

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

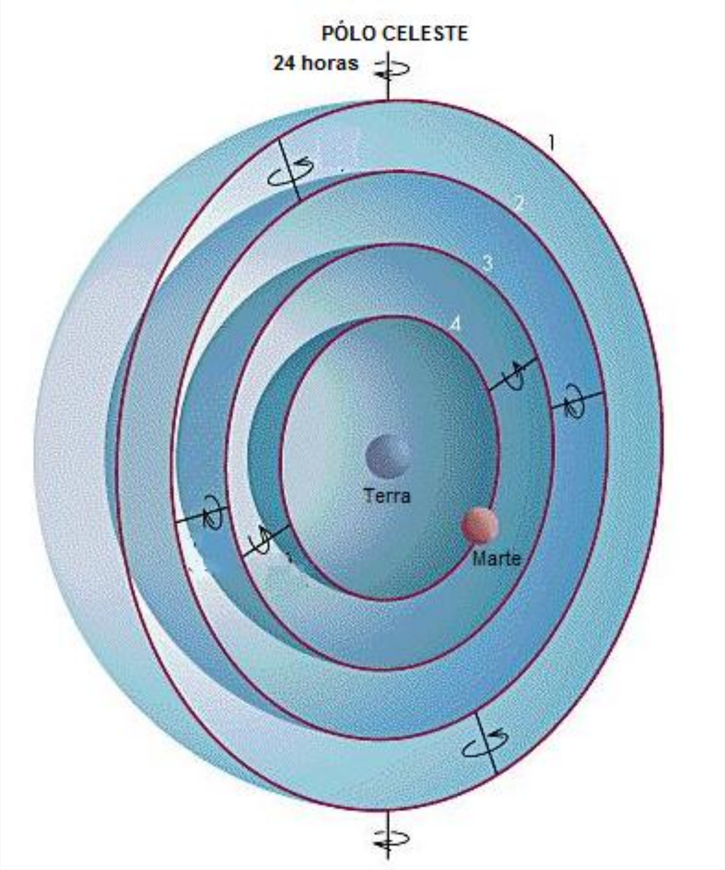
O "calcanhar de Aquiles":
- ✓ **"Laçadas" dos planetas (O→ L → O → L)**
- ✓ **Fases dos planetas**

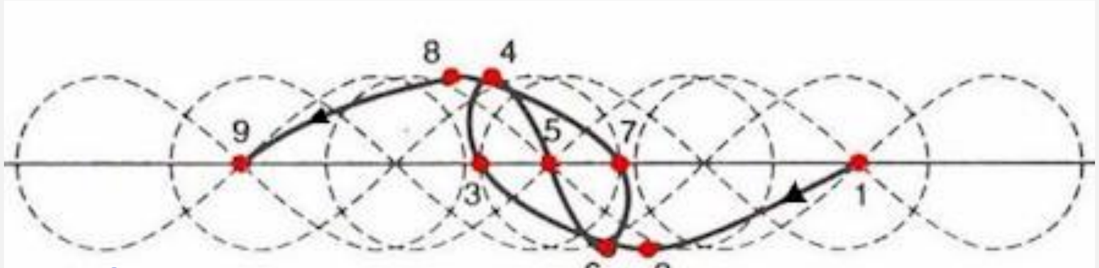
Os equívocos:
- ✓ **Órbitas circulares**
- ✓ **Movimentos uniformes**
- ✓ **Terra no centro**

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

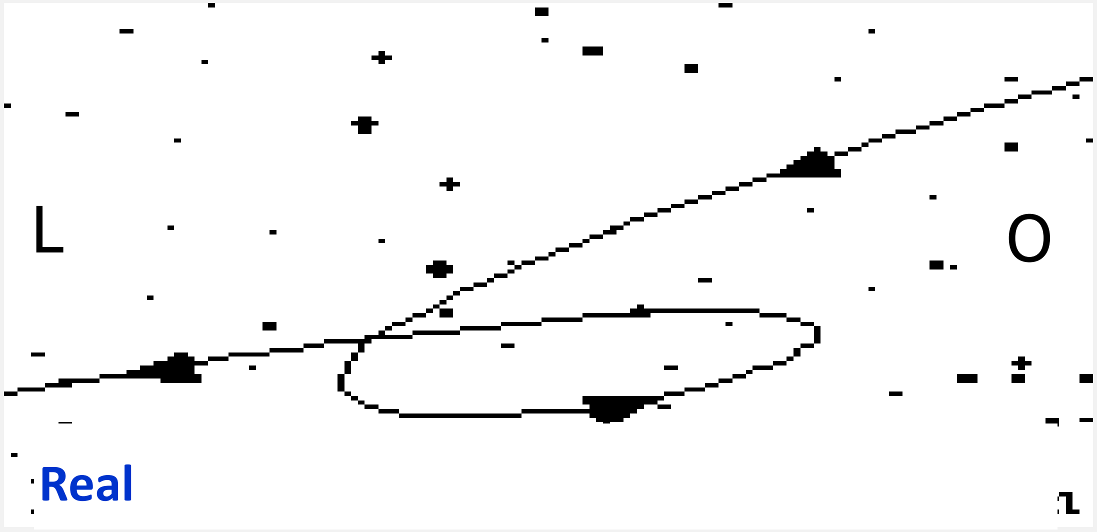
Eudóxio de Cnidus (390 – 337 a.C.)

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





Eudóxio



Real

Claúdio Ptomoleu (87 – 151 d.C)

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

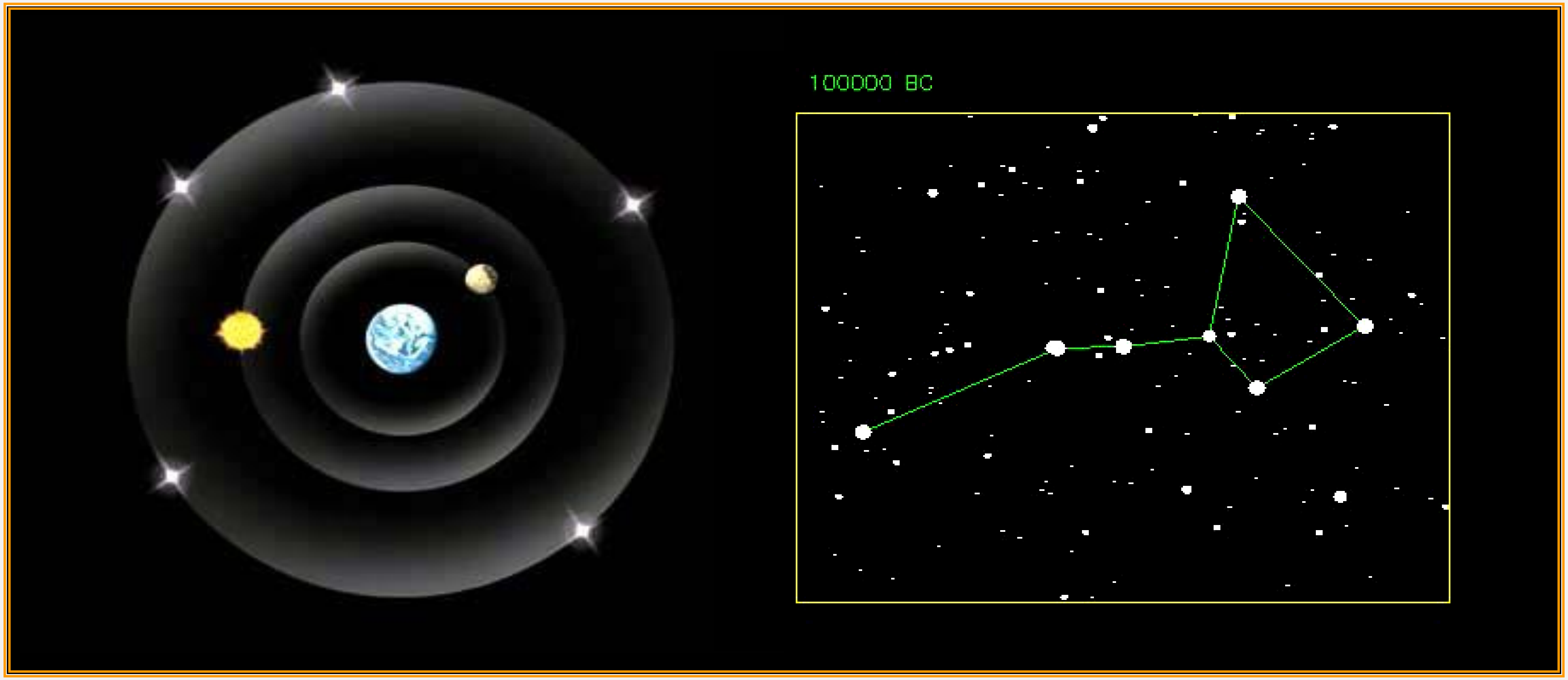
Almagesto

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

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

Claúdio Ptomoleu (87 – 151 d.C)

A estrutura de mundo da época



Esferas concêntricas com a Terra no centro. A última esfera, a grande motora, era a das estrelas; estas permaneciam fixas sobre ela.

O movimento próprio*, mostrado acima por setas em vermelho) das estrelas não era perceptível com os instrumentros rudimentares da época

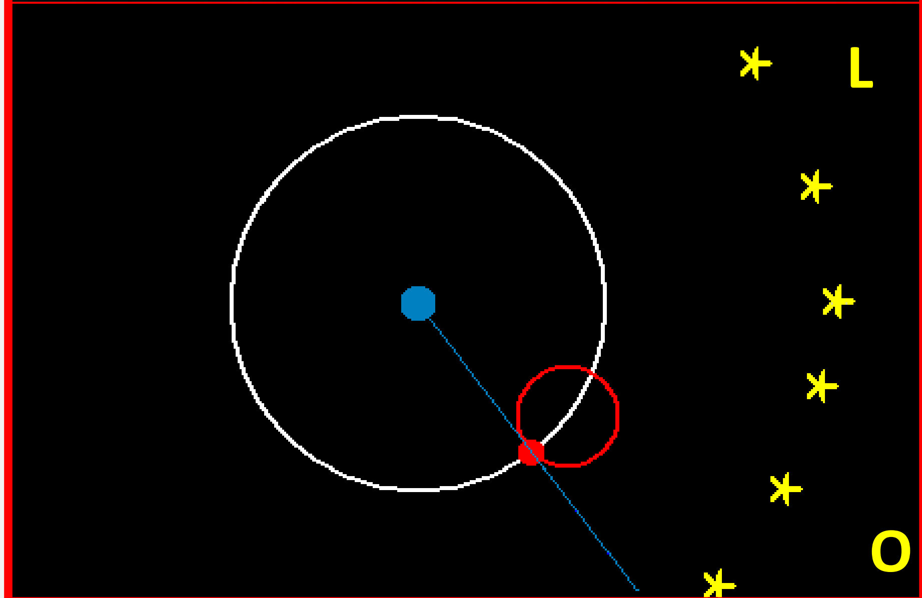
(*) é o movimento aparente das estrelas, perpendicular à linha de visada, medido em segundos de arco por ano.

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.

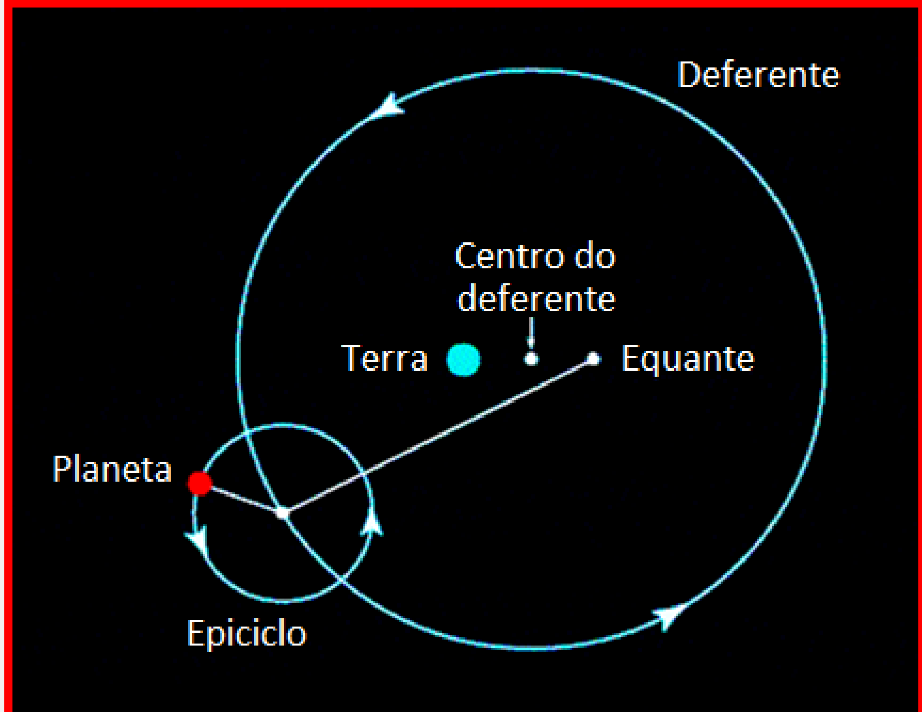


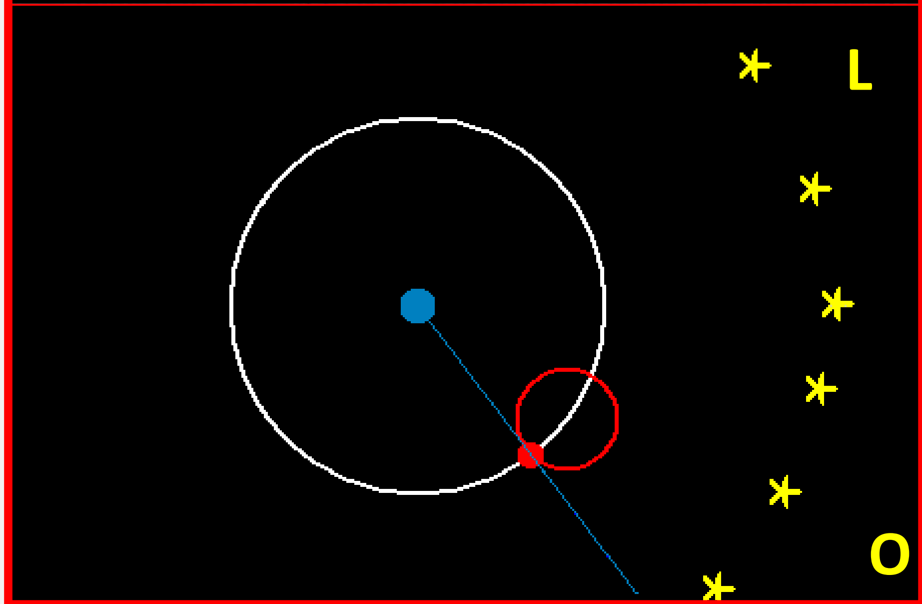
Claúdio Ptomoleu (87 – 151 d.C)

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

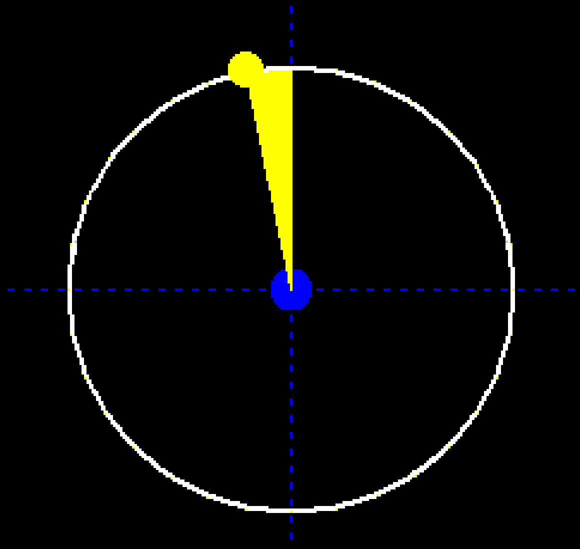
Visto do equante o movimento era uniforme.

Visto da Terra a velocidade do planeta é variável.

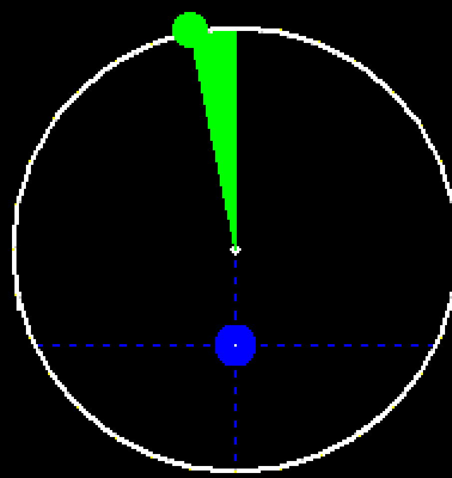




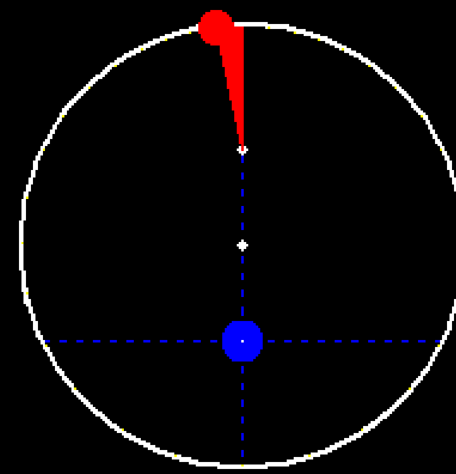
Movimentos circulares



Centro na Terra

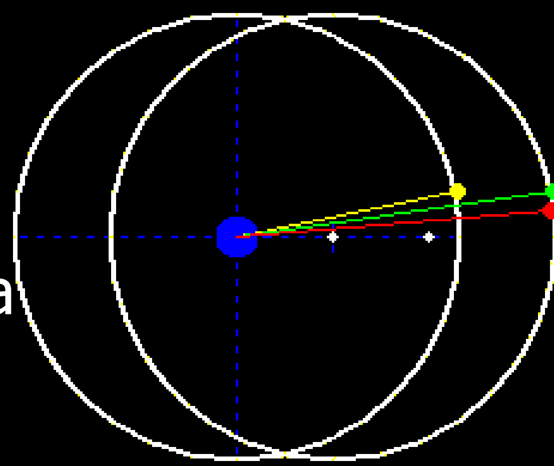


Terra fora do centro



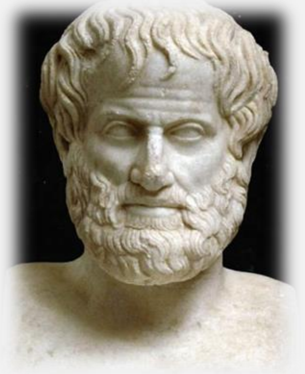
Terra e Equante
fora do centro

animação Antikitera

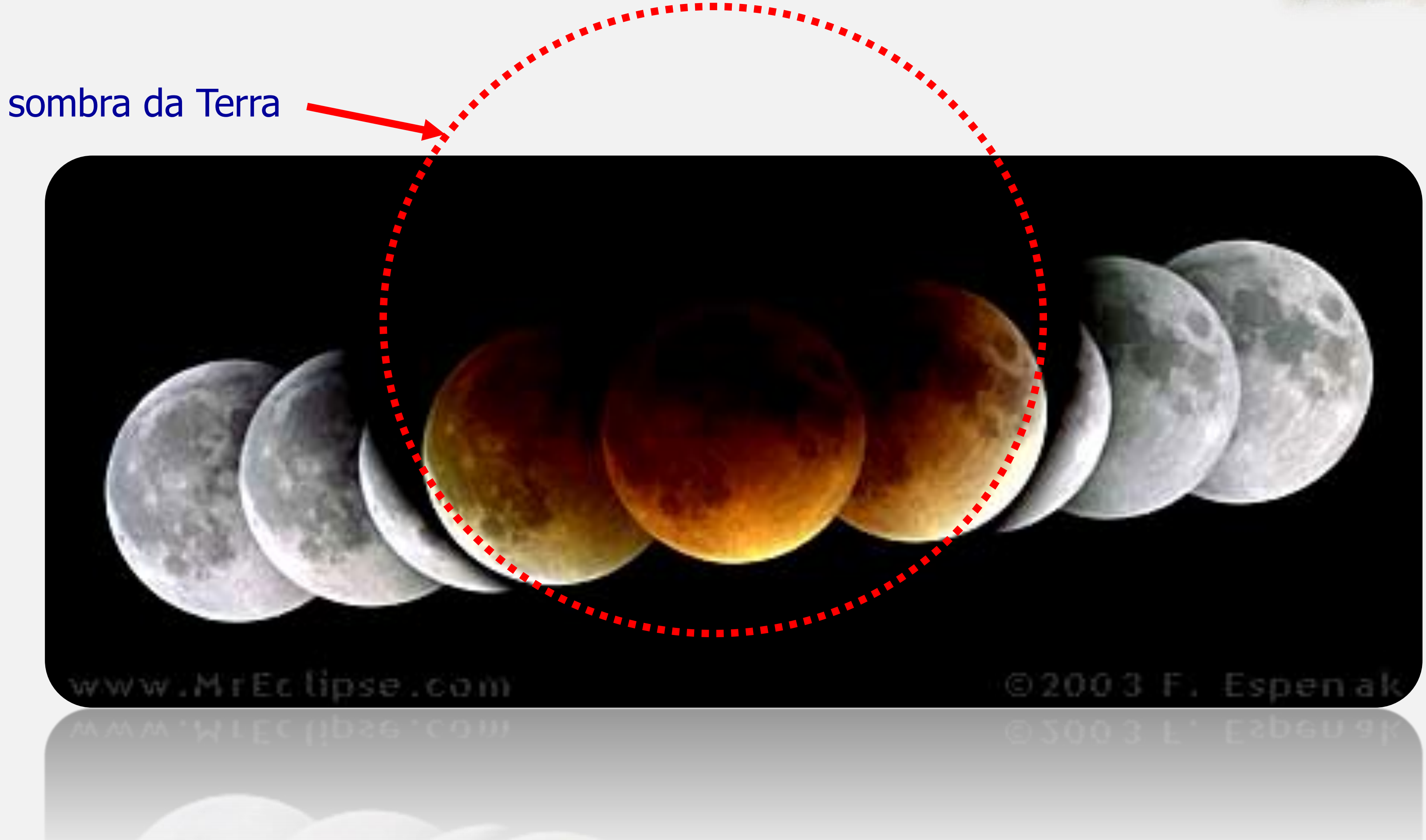


Visão da Terra

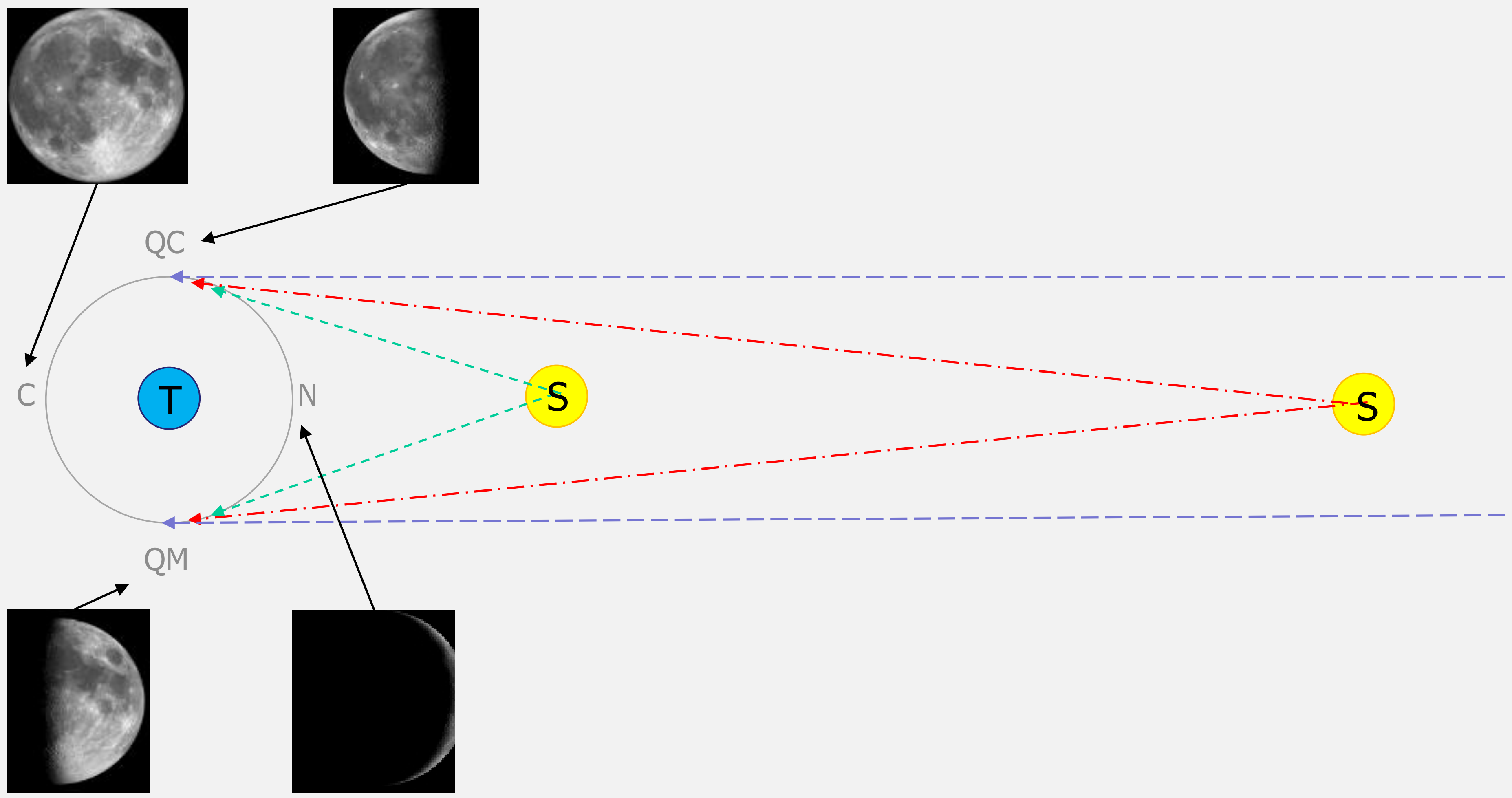
Aristóteles (324-322 a.C)



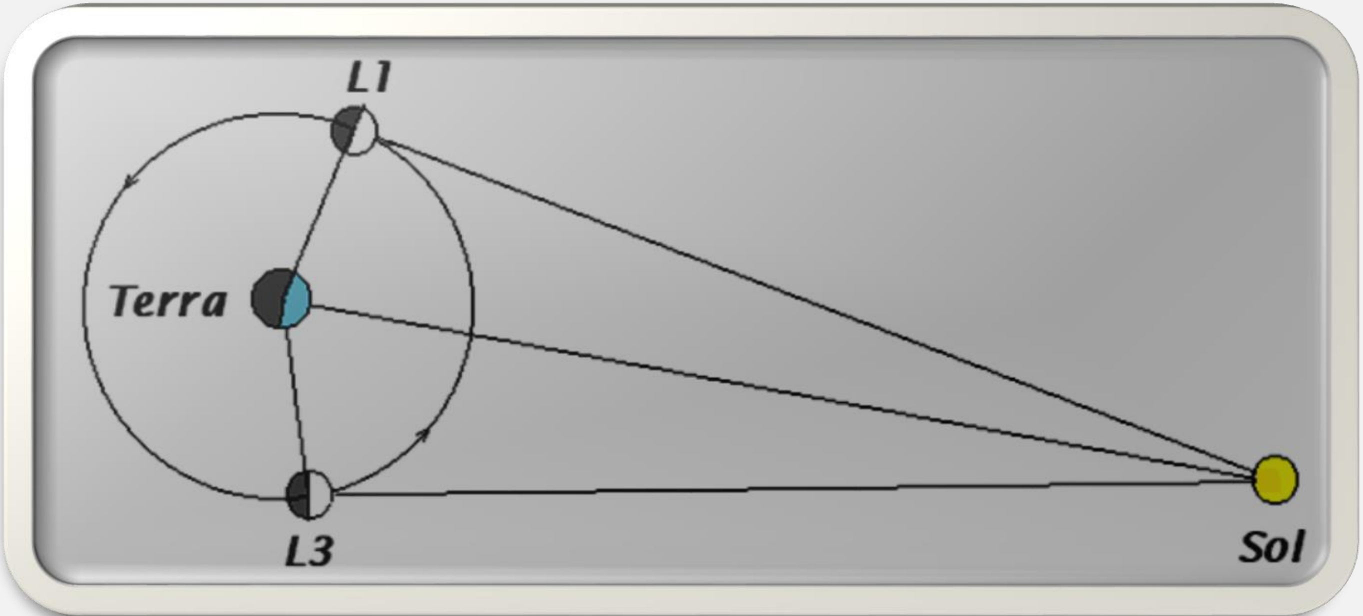
Usou a forma aparente da sombra da Terra para mostrar que ela era uma esfera.



Configuração das fases lunares



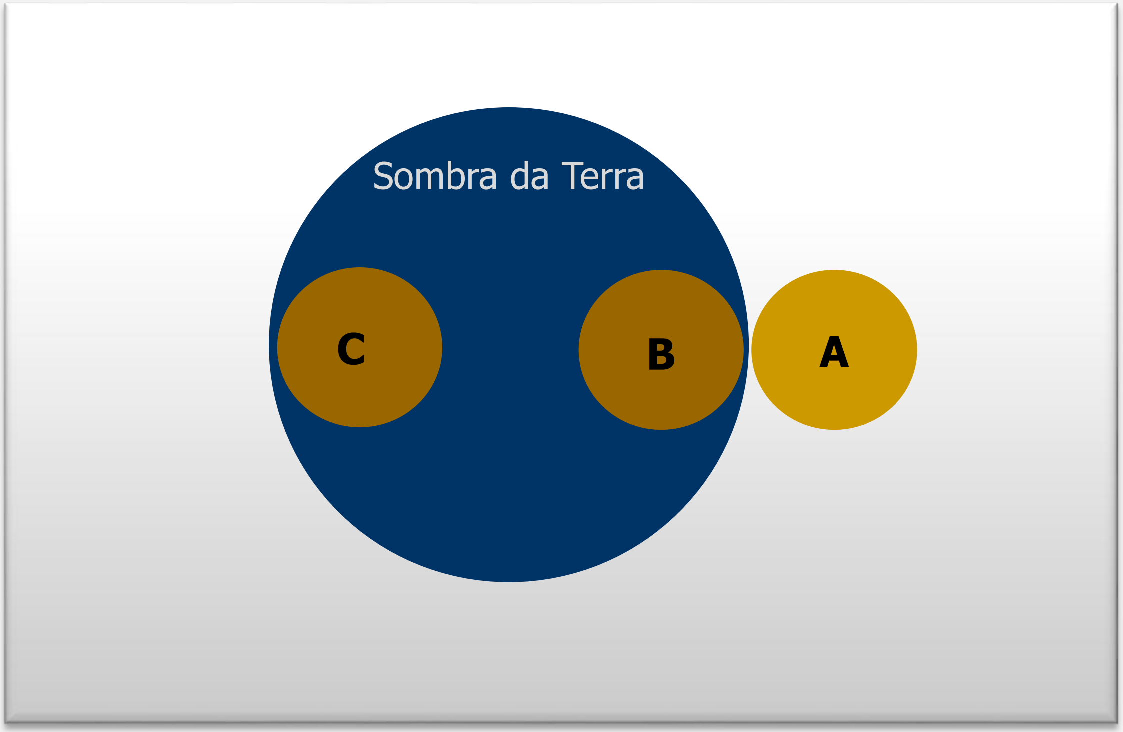
Aristarco de Samos (280 a.C.)



- 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.

Aristarco de Samos (280 a.C.)

- **Aristarco de Samos (280 a.C.):** criou um método para medir tamanhos e distâncias relativos da Lua, Terra, Sol: *a Terra tem quase o tamanho da sombra, e esta é quase 3 vezes o diâmetro da Lua*.
- Valor real: 6.378km / 1.738km = 3.7 vezes)



- Tempo decorrido entre A e B é proporcional ao diâmetro da Lua.
- Tempo decorrido entre B e C é proporcional ao diâmetro da sombra da Terra (~ Terra).

Nicolau Copérnico (1472-1543)

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

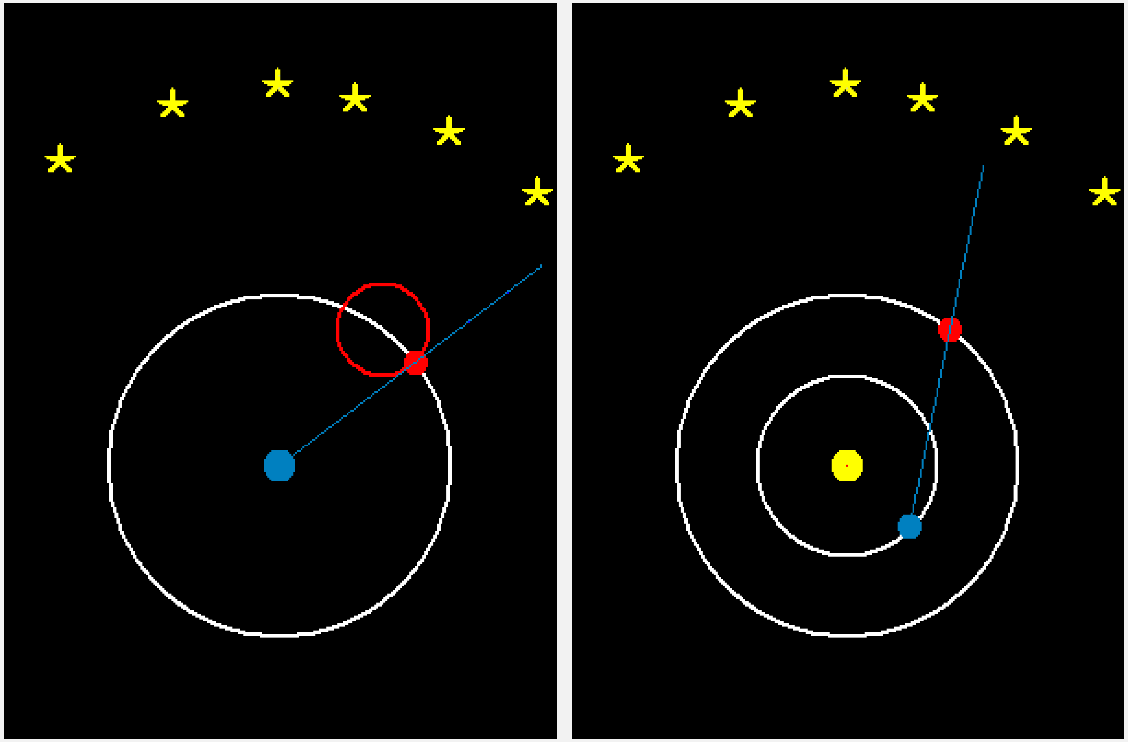
- Aprimorou o sistema discutido por Aristarco de Samos, com o Sol no centro do movimento

- 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



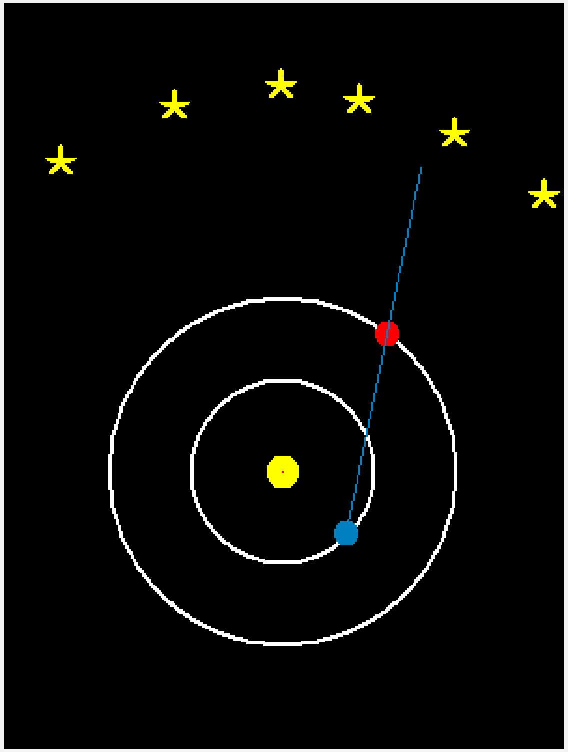
- No heliocentrismo, a explicação do movimento retrógrado aparente é mais simples.
- A precisão crescente na determinação das posições implicava em maiores dificuldades de explicação.

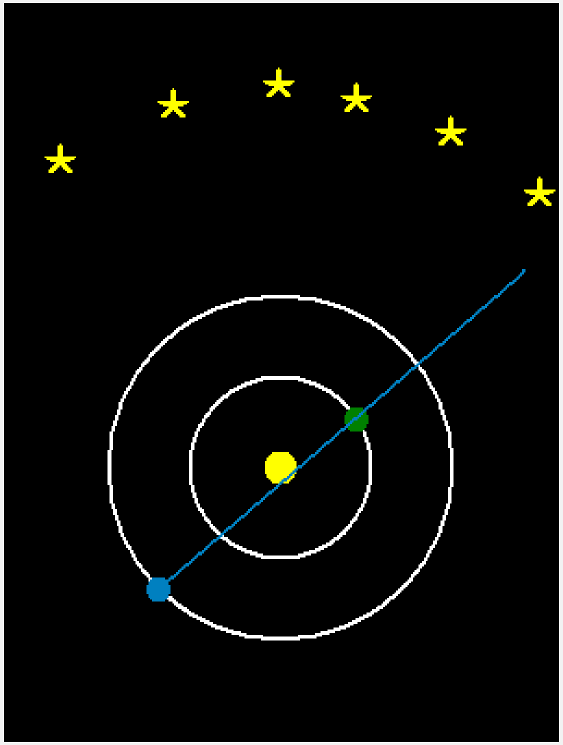
Movimento Retrógrado

Marte

Vênus

Modelo Copernicano





Fases de Vênus

Ptolomaico

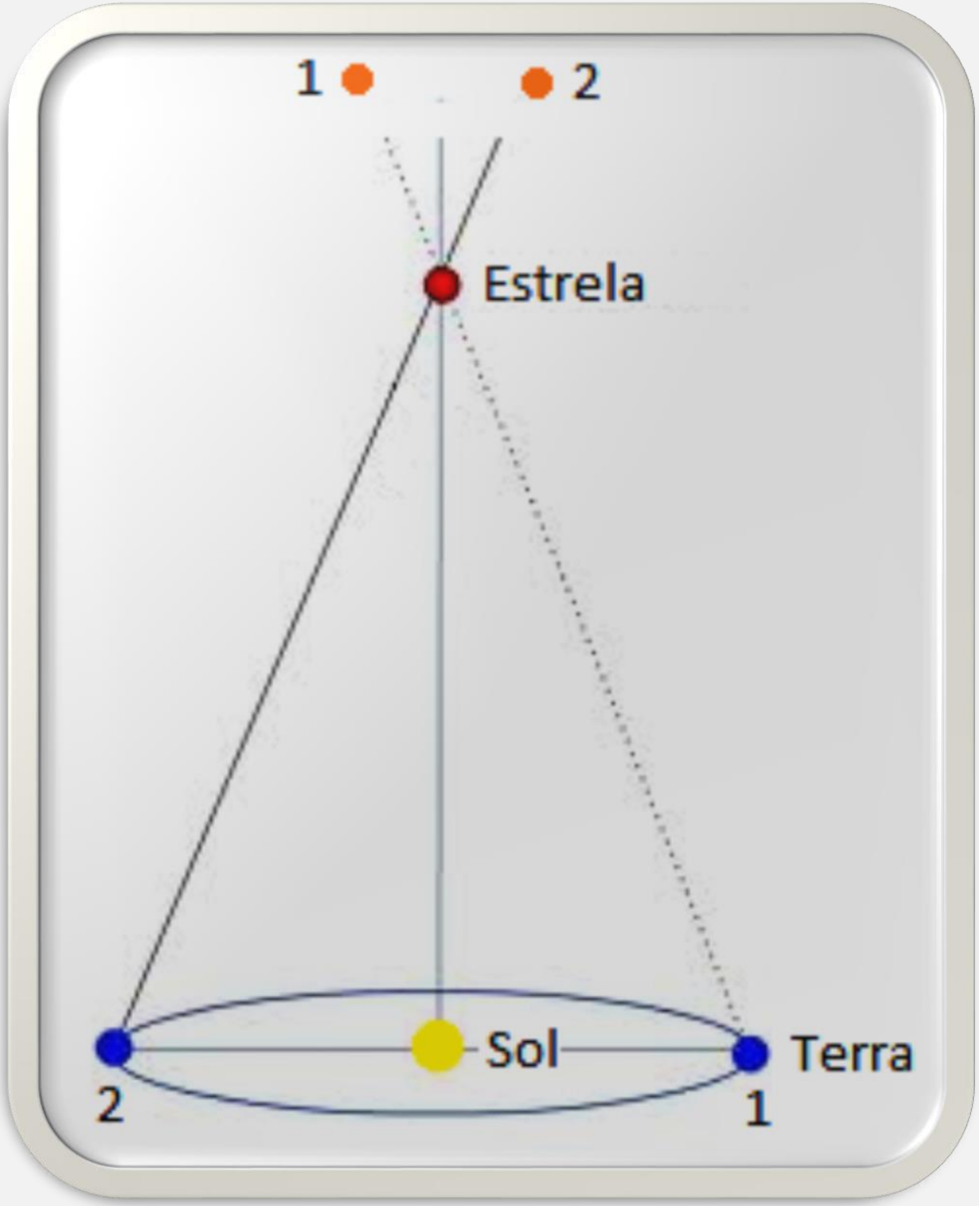
http://astro.unl.edu/classaction/animations/renaissance/ptolemaic.html

Copernicano

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

Heliocentrismo explica melhor as fases observadas

O problema da paralaxe



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

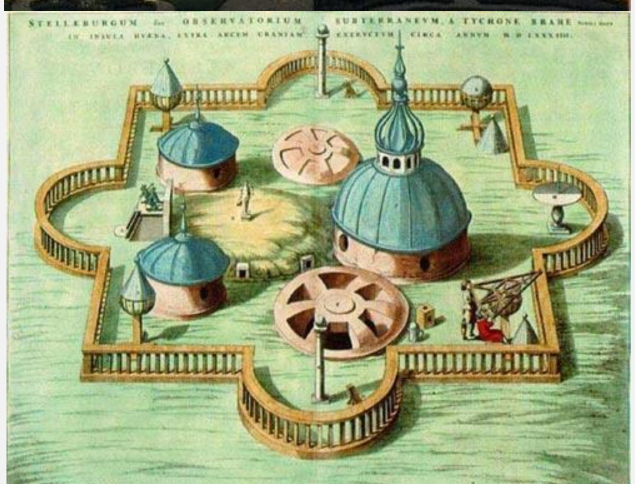
Por que a posição aparente das estrelas não mudava durante o movimento da Terra em torno do Sol?

Tycho Brahe (1546-1601)

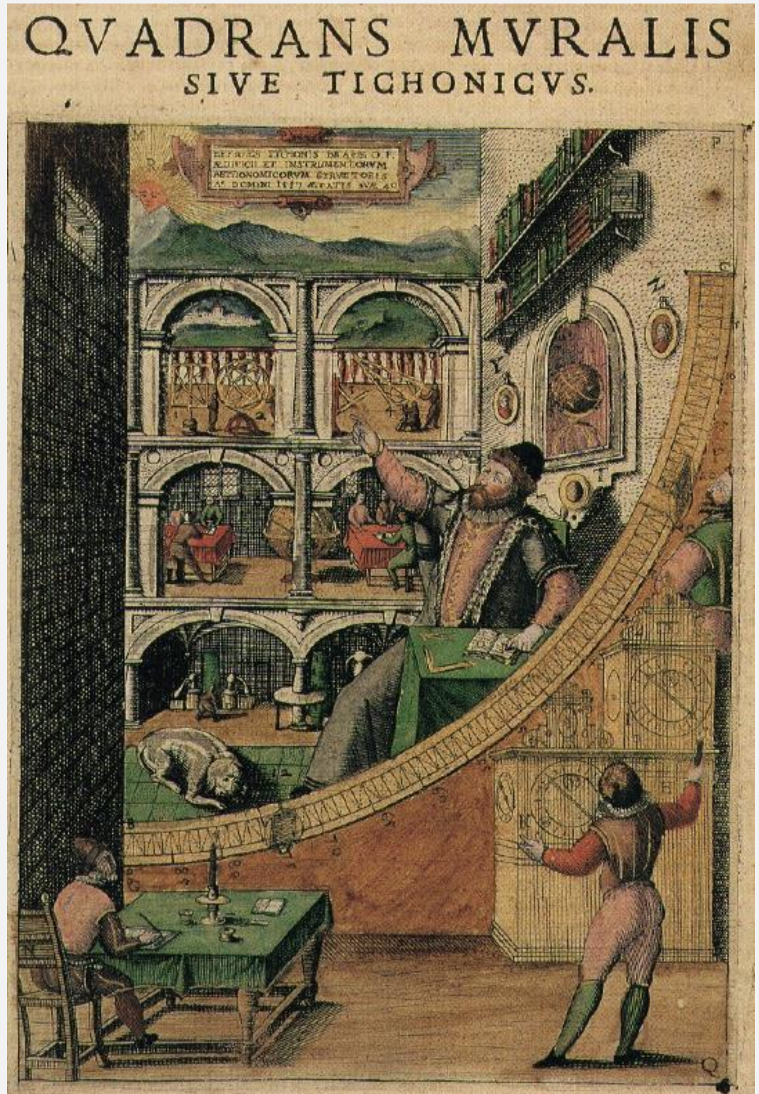
Dinamarquês

Tycho Brahe (1546-1601)

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



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



Precisão:

Tycho Brahe:
2′

Satélite Hipparcos (1998):
0,001″ de arco
(8 milionésimos)

Satélite Gaia (futuro):
0,00001″
80 bilionésimos

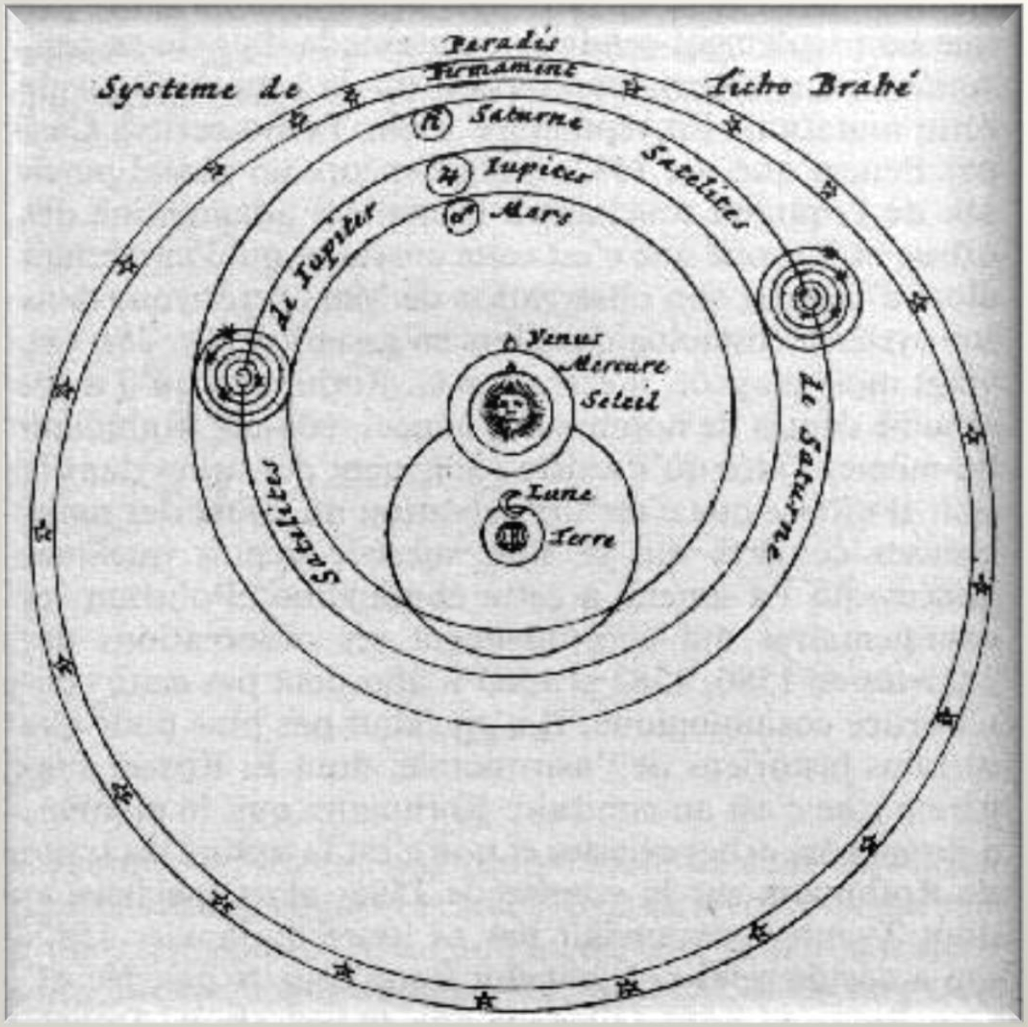
Tycho Brahe (1546-1601)

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

Sistema Ticônico



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

Equivalências dos Modelos

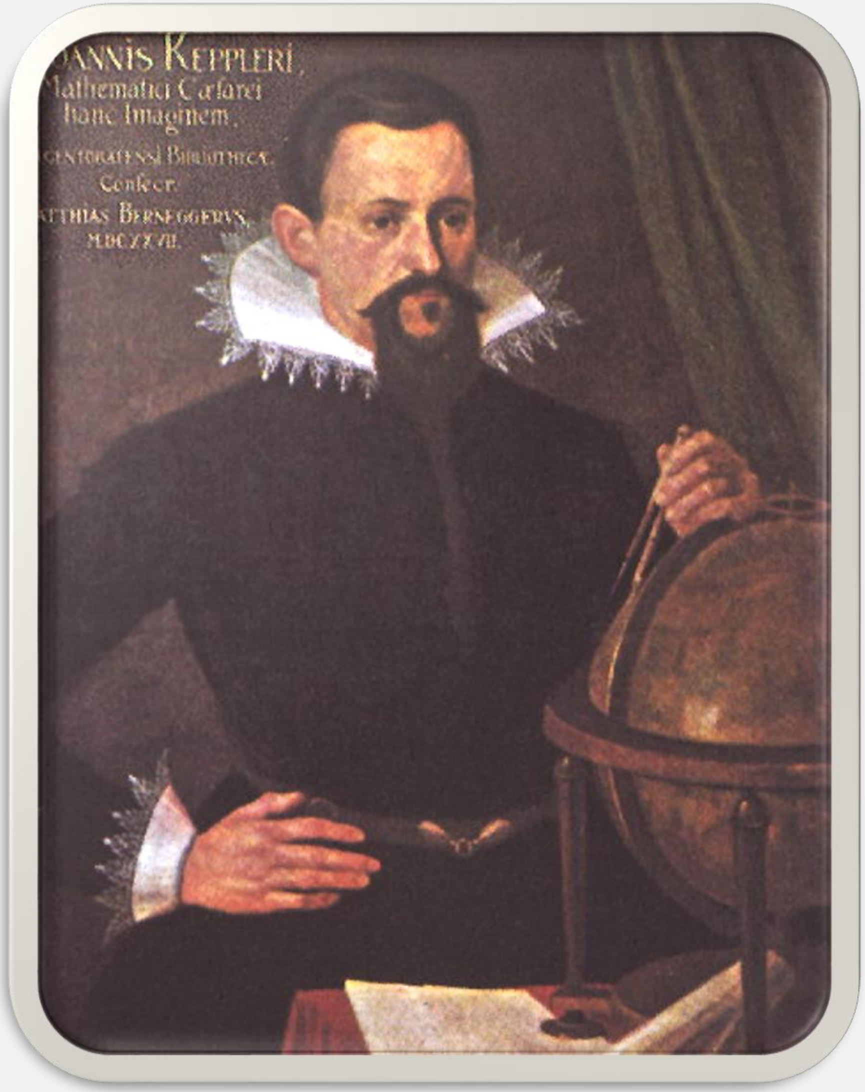
EQUIVALÊNCIA DE HIPÓTESES

http://science.larouchepac.com/kepler/newastronomy/part1/MegaEquivalence.swf

A Máquina de Anticítera (Antikythera)

Computador analógico. Previa posições astronômicas, eclipses, calendário, jogos atléticos (semelhante à Olimpiada) e astrologia. Artefato datado de 87 a.C. (Grécia Antiga), resgatado em 1901, juntamente com outros artefatos, na costa da ilha grega Anticítera, entre as ilhas de Citera e de Creta.

Johannes Kepler (1571 – 1630)



Alemão

Johannes Kepler (1571 – 1630)

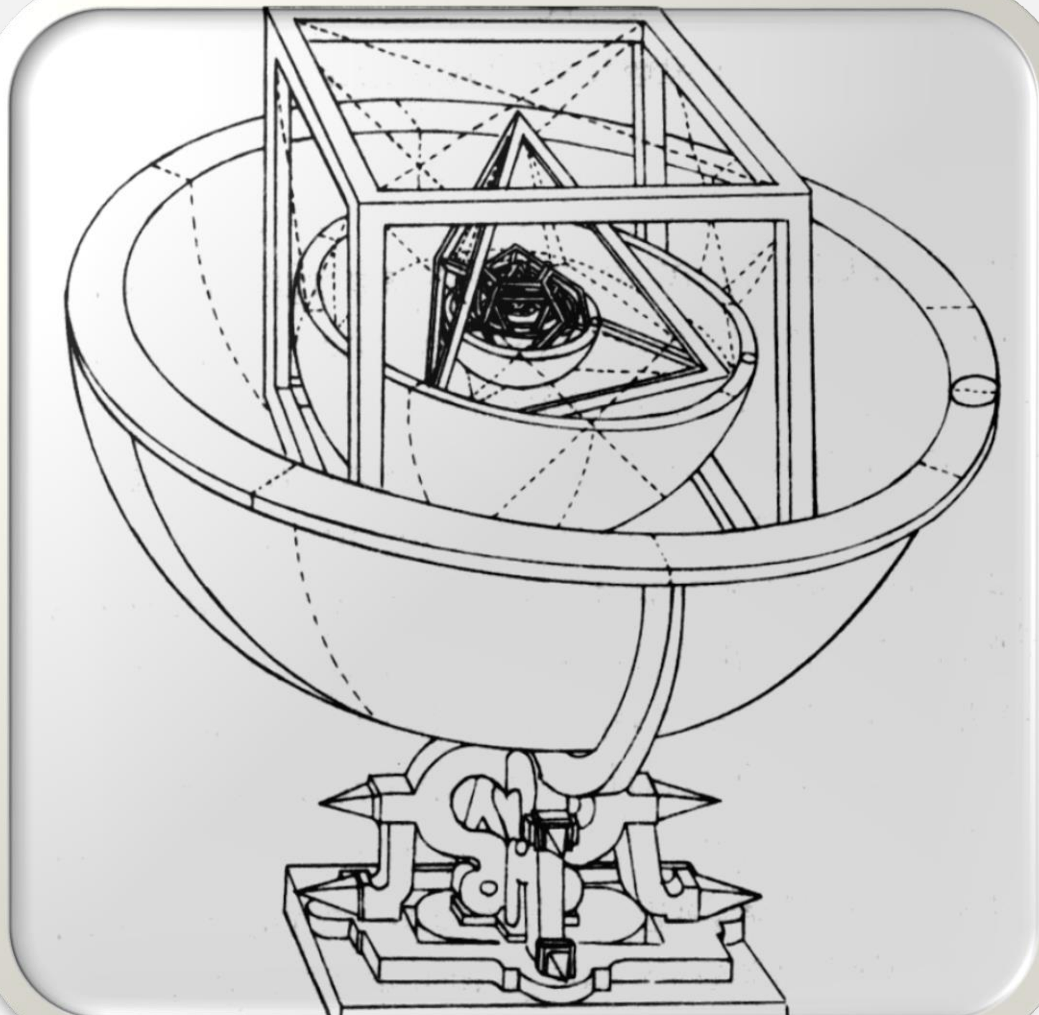
Fascinado pela simplicidade da teoria de Copérnico, pela geometria e pelos sólidos geométricos.

"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.

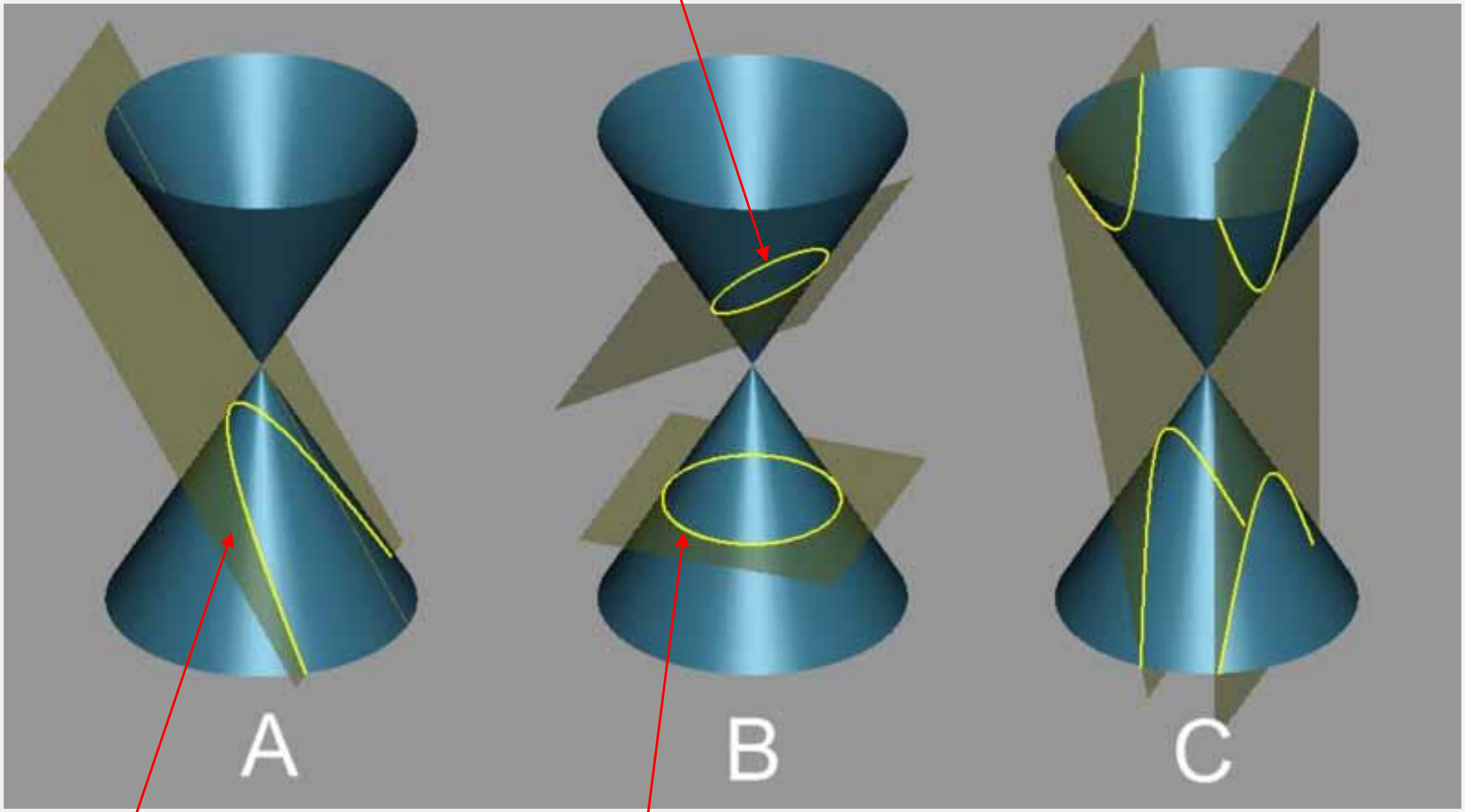
Constatou

- a órbita de Marte não se ajustava a um círculo

Obras:
Mysterium Cosmographicum - Dioptrice - Astronomiac 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)

Elipse

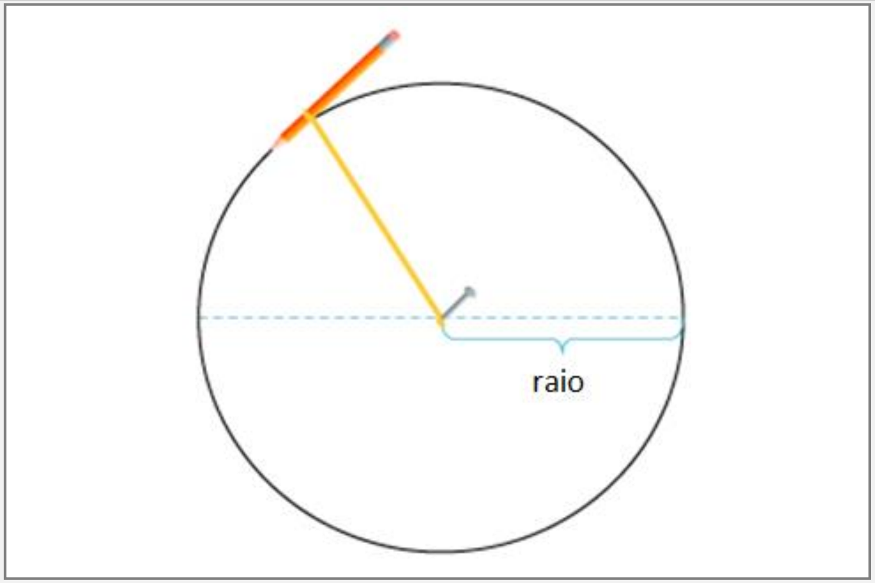


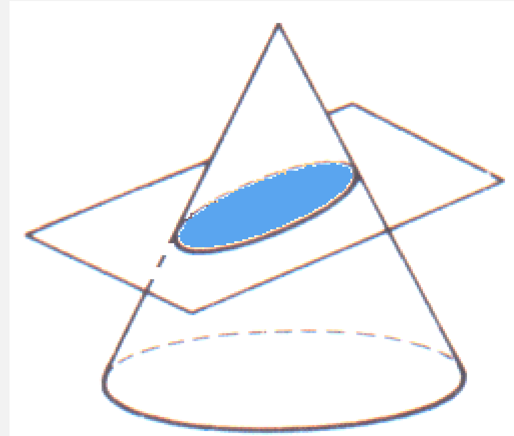
Parábola

Círculo

Hipérbole

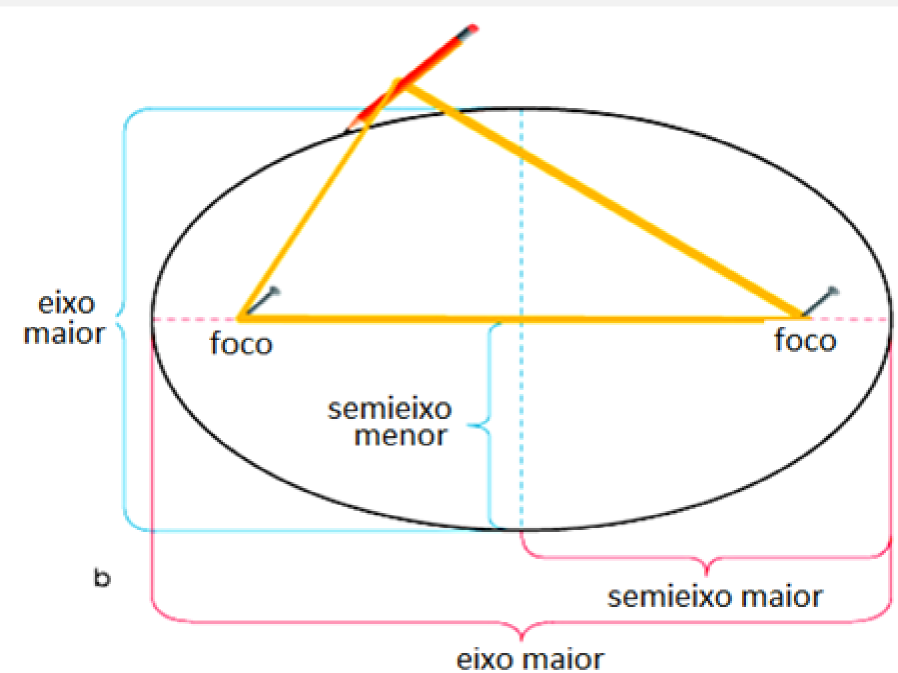
Elipse (Cônica)

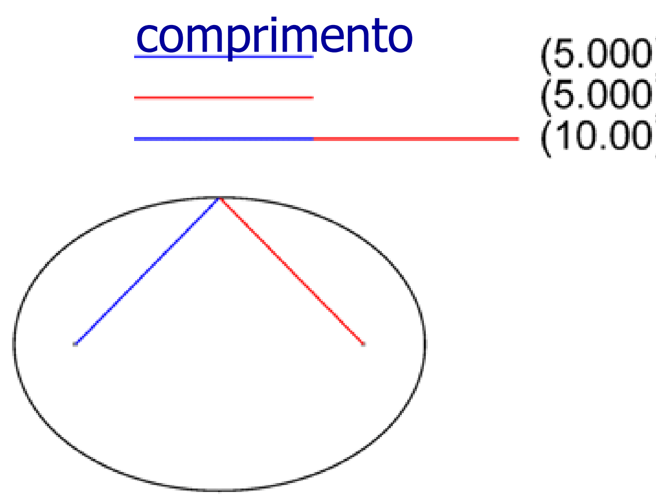




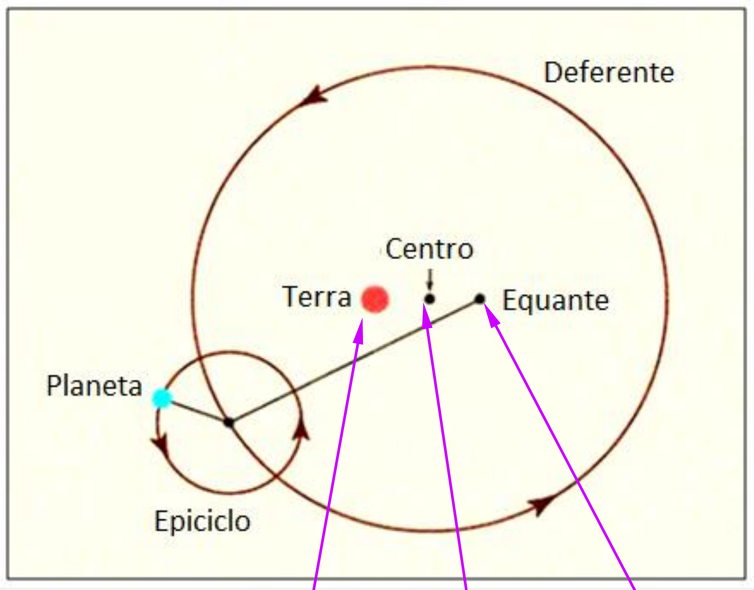
Círculo achatado não é elípse

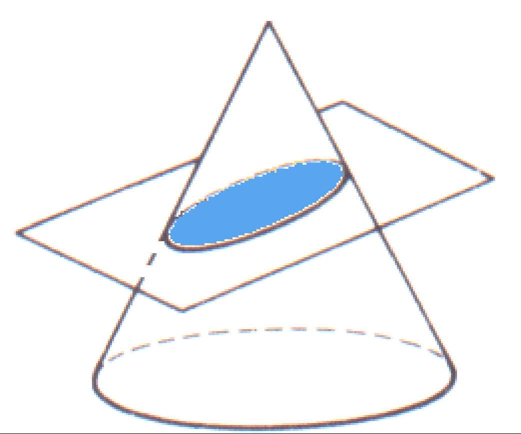
$$\text{excentricidade} = \frac{\text{distância entre pontos focais}}{\text{comprimento do eixo maior}}$$





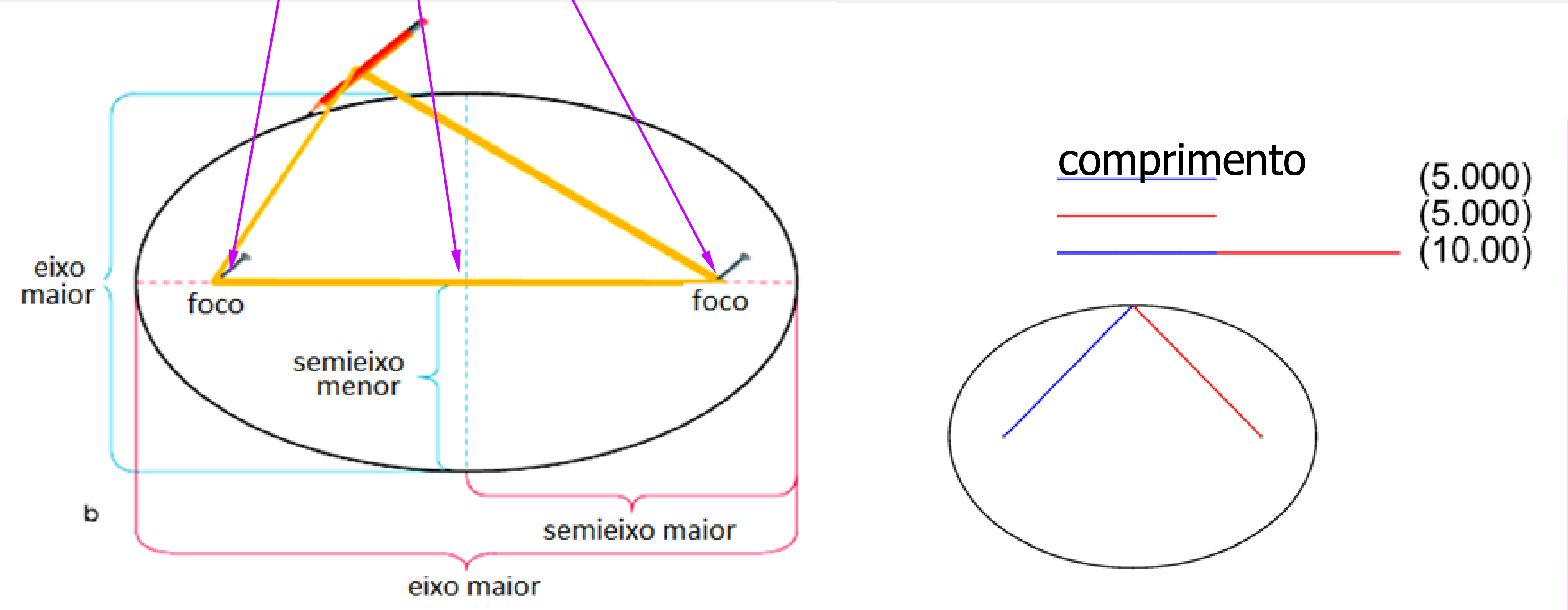
Elipse (Cônica)





Círculo achatado não é elípse

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

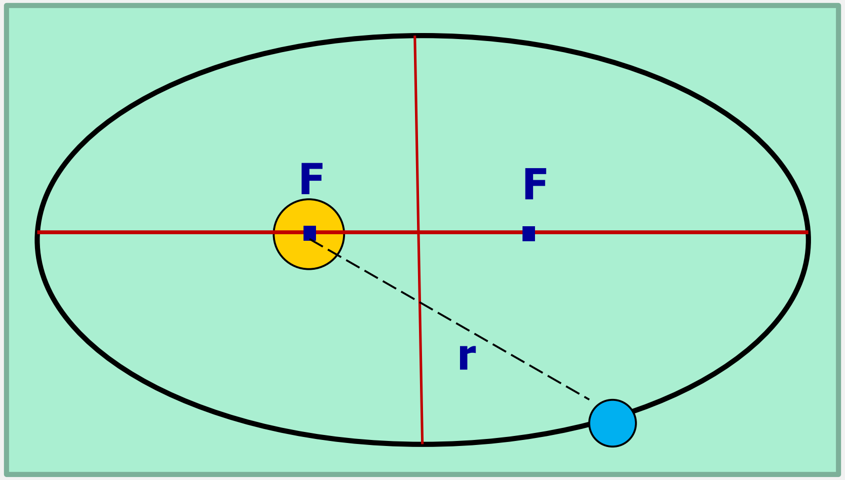


Primeira Lei de Kepler (1609)

- 1a. Lei de Kepler do movimento planetário

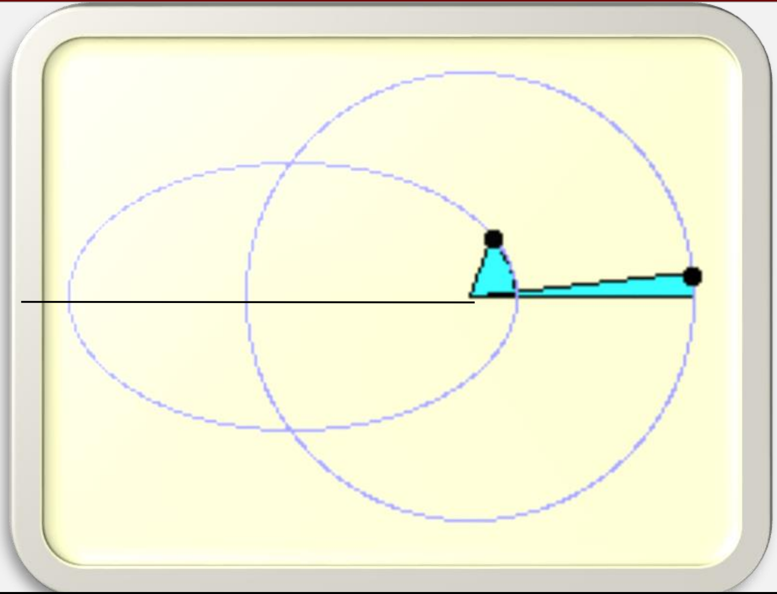
Planetas movem-se em órbitas elípticas, com o Sol em um dos pontos focais

- Esta é uma conclusão empírica



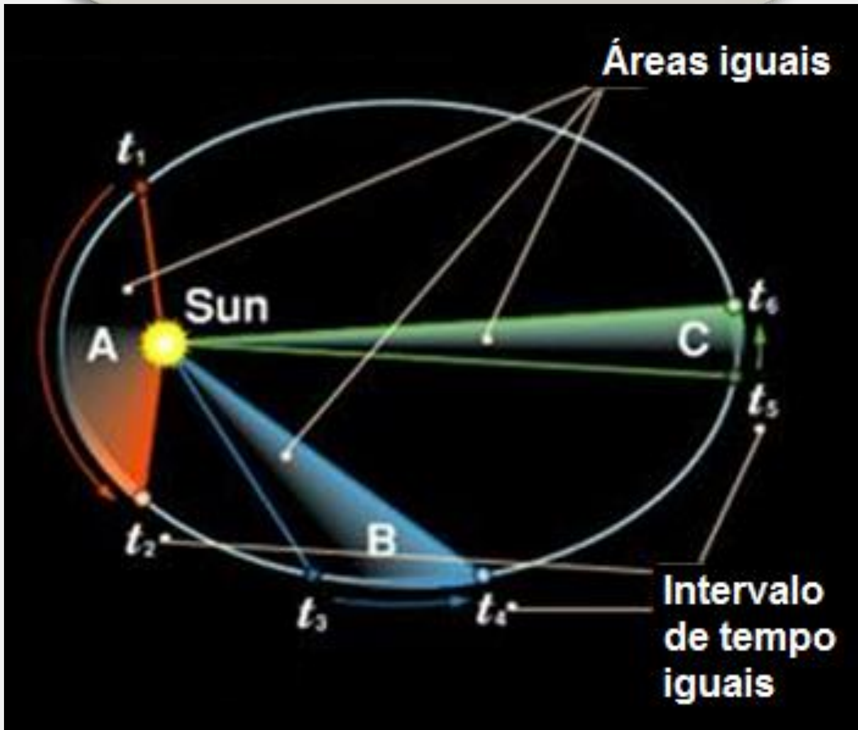
Segunda Lei de Kepler (1609)

Planetas descrevem áreas iguais em tempos iguais



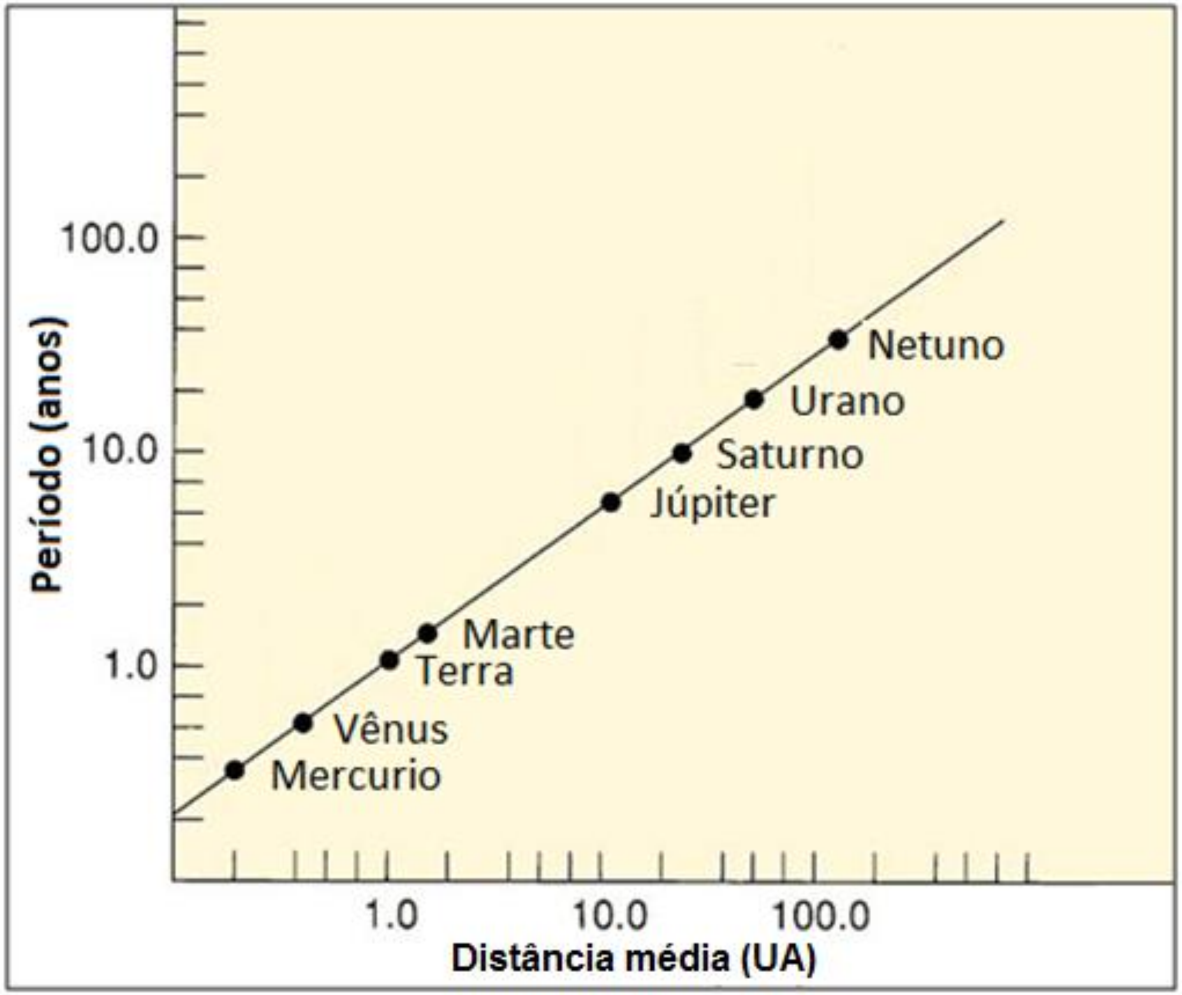
Os planetas:

- movem-se mais rápido quando estão mais próximos do Sol,
- e mais devagar quando estão mais distantes do Sol



Terceira Lei de Kepler (1619)

Lei Harmônica



O quadrado do período orbital do planeta é igual ao cubo do semieixo maior da sua órbita

$$(P_{anos})^2 = (A_{UA})^3$$

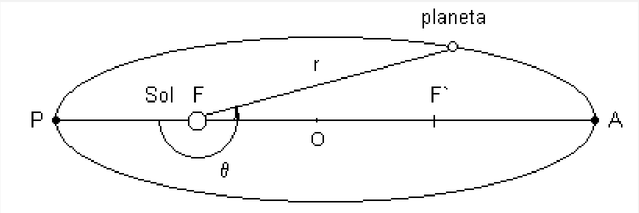
Leis de Kepler

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

Leis de Kepler

Representação matemática

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



2a. Lei: $$\frac{dA}{dt} = \frac{r^2}{2}\frac{d\theta}{dt} = \frac{r^2\dot{\theta}}{2} = \frac{h}{2}$$

const.

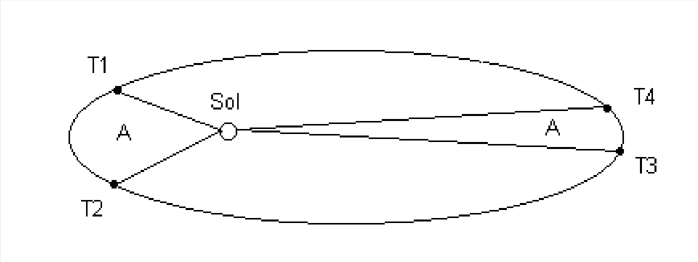
dist.

veloc. angular

const.

variáveis

momento angular

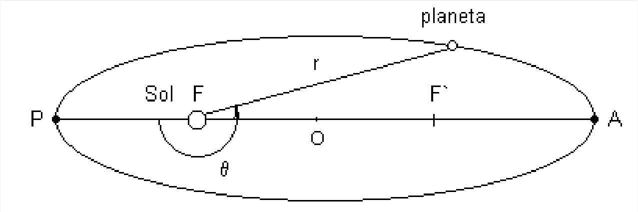


conservação do momento angular: velocidade aumenta quando distância diminui, vice-versa

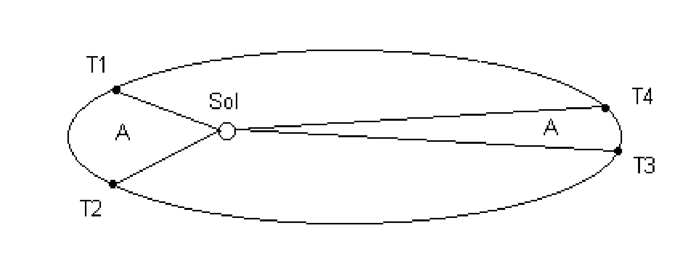
Leis de Kepler

Representação matemática

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



2a. Lei: $$\frac{dA}{dt} = \frac{r^2}{2}\frac{d\theta}{dt} = \frac{r^2\dot{\theta}}{2} = \frac{h}{2}$$



3a. Lei: $a^3 = const.P^2$ ou

$n^2a^3 = const.$ com $n = \dfrac{2\pi}{P}$

A Explicação

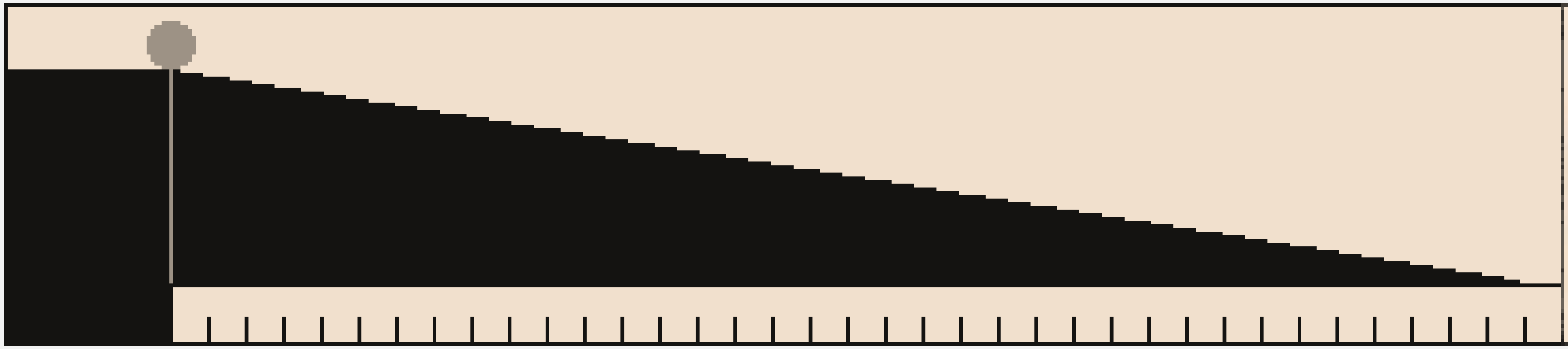
- **Leis de Kepler**
  - **são excelentes para descrever o movimento dos planetas**
  - **mas não dizem por que eles se movimentam dessa forma**

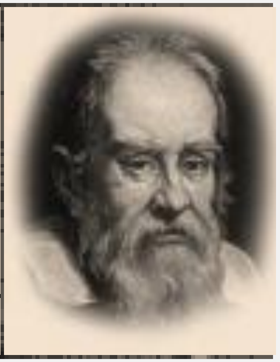
- **A resposta veio através de**

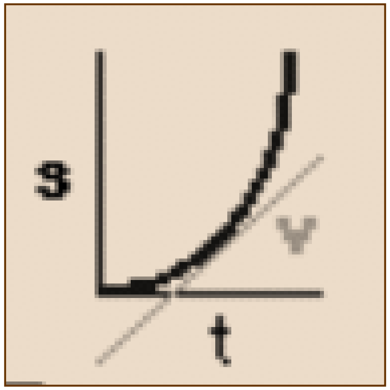
Galileo Galilei
(1564-1642)

Isaac Newton
(1642-1727)

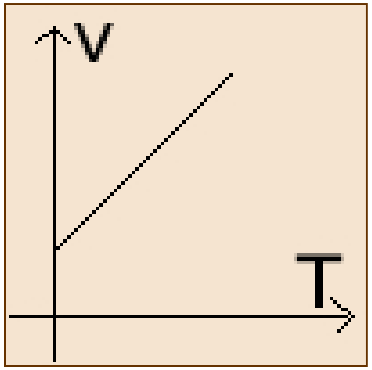
Estudos de Galileu





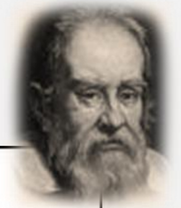


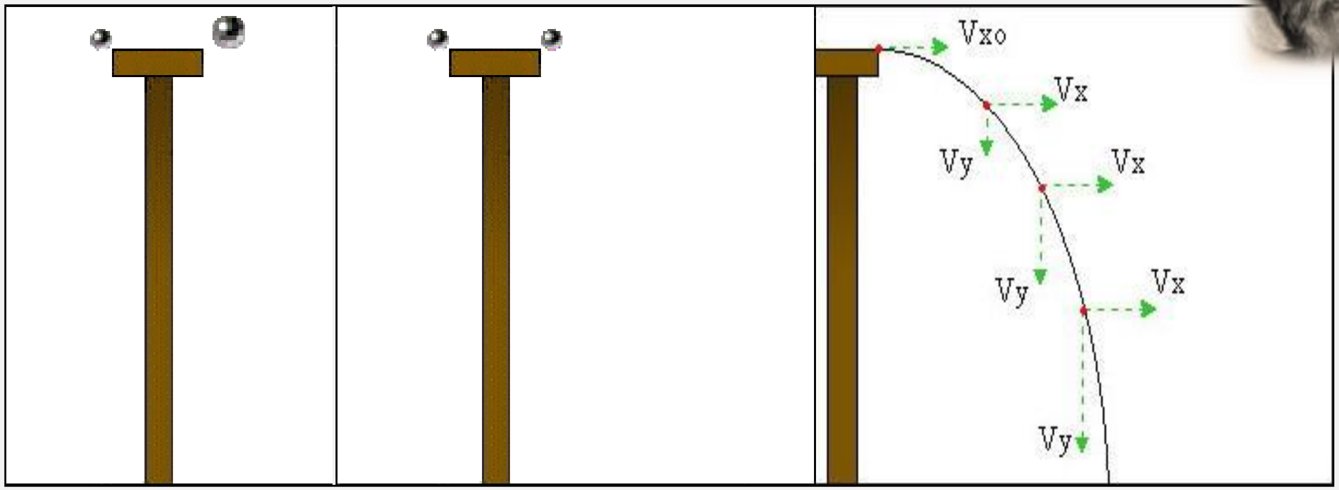
$$S = s_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}$$

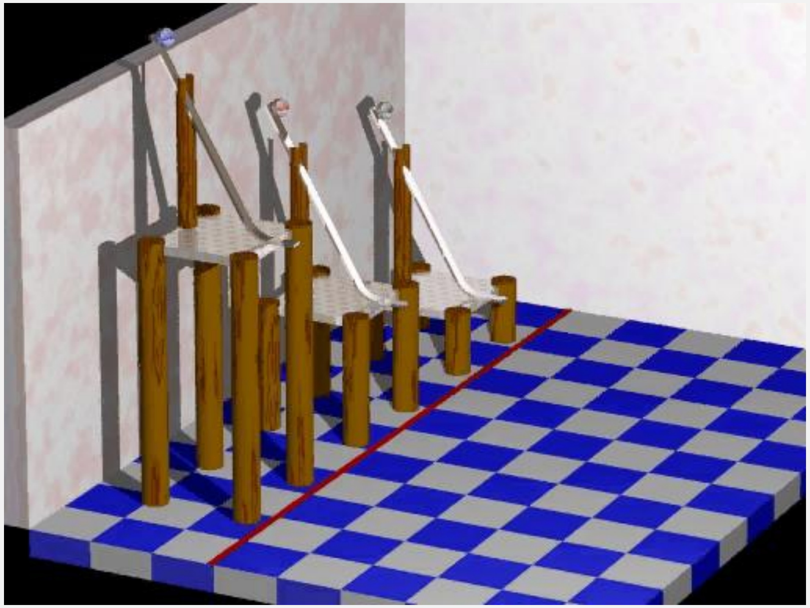


$$V = v_0 + at$$

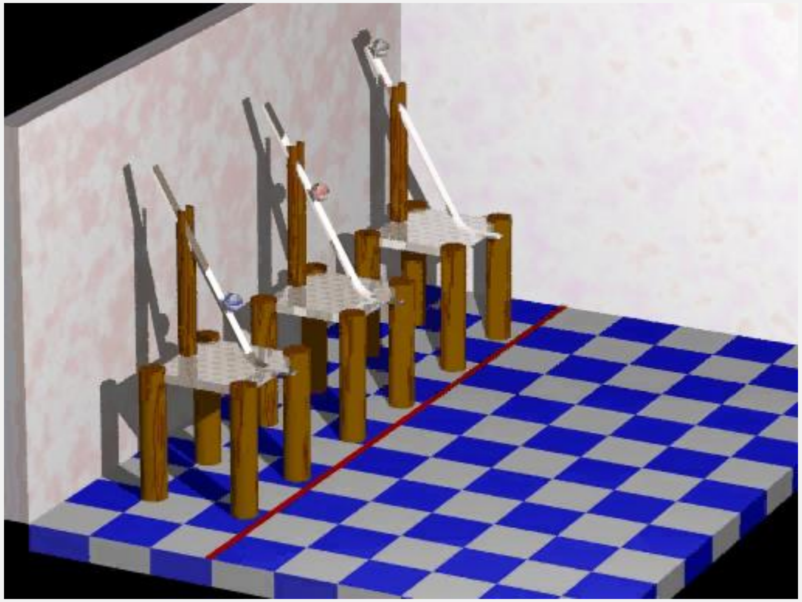
Estudos de Galileu





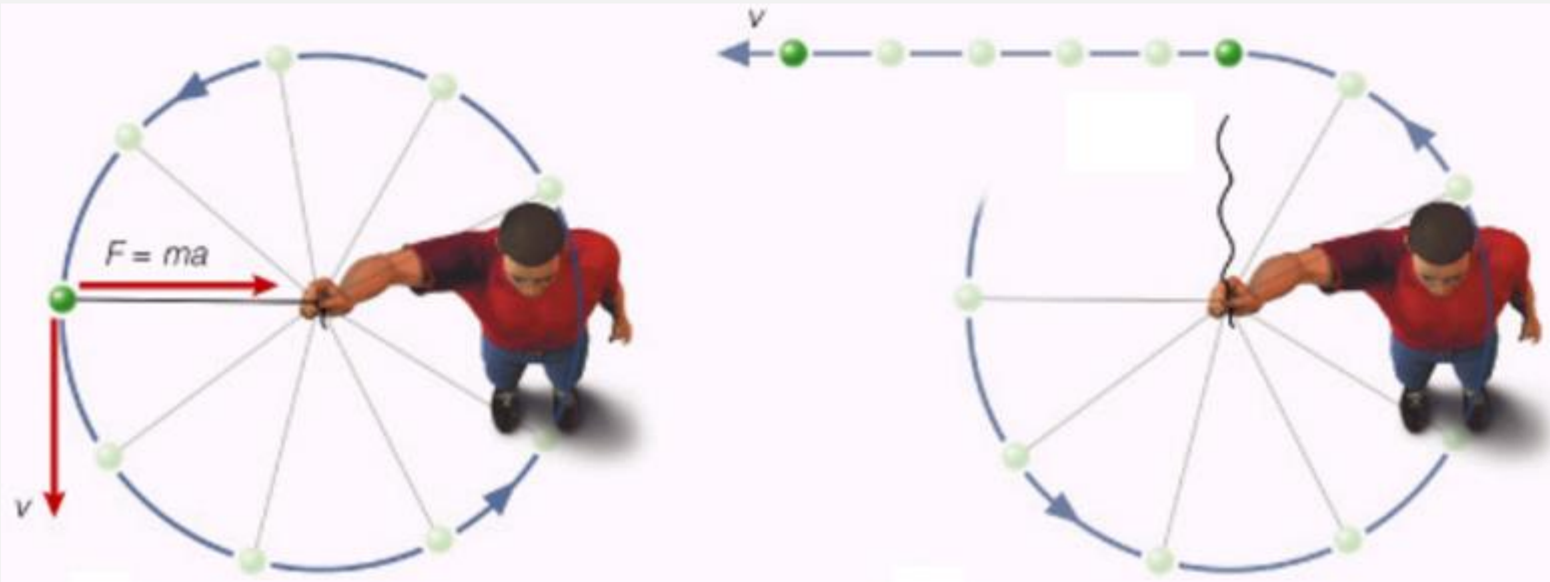


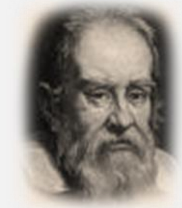
Variando altura



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

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 [**a = 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

Medindo a massa da Terra

- Newton: $$F = ma \; ; \qquad F = G\frac{M_1 M_2}{r^2}$$

- Também sabemos
  - Galileo: todos os objetos são acelerados em direção à Terra com a mesma taxa (a = 9,80 m/s^2)
  - Laboratório: $G = 6{,}67\times10^{-11}$ Nm^2/kg^2
  - Medidas da curvatura da Terra:

    $r = 6{,}38\times10^{6}$ m,
  - $M_1 = m$ = massa de um objeto na Terra
  - $M_2 = M_e$ = massa da Terra

$$ma = G\frac{m M_e}{r^2}$$

$$M_e = \frac{a r^2}{G}$$

- Com isso medimos a massa da Terra: $5{,}98\times10^{24}$ kg

Medindo a massa da Lua

3ª Lei de Kepler e movimento de um satélite

Lei generalizada

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G} \cdot \frac{a^3}{(m+M)} = k \times a^3 \quad \text{com} \quad k = \frac{4\pi^2}{G(m+M)}$$

satélite *Lua*

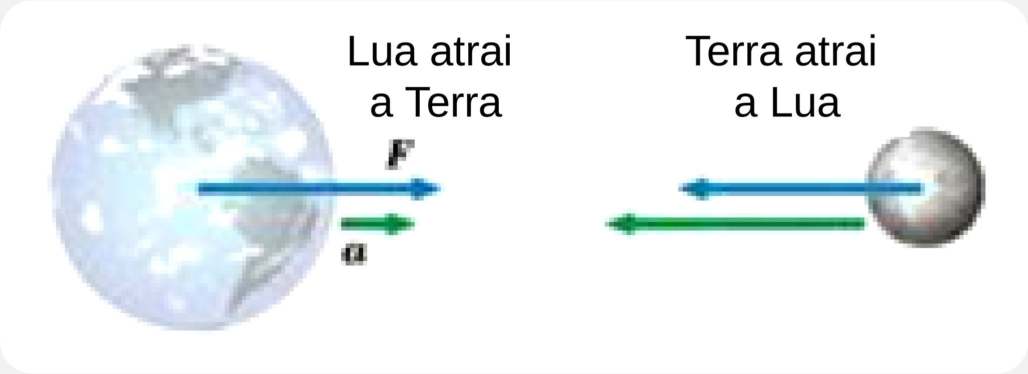
$$\left.\begin{aligned} m_s + M_m &= \frac{4\pi^2}{G}\frac{a^3}{P^2} \\ m_s + M_m &\approx M_m \end{aligned}\right\} \quad M_m = \frac{4\pi^2}{G}\frac{a^3}{P^2}$$

Lei generalizada

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G(M_{SUN} + m_{planet})} a^3$$

$$\frac{P_1^2}{P_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

Lei da Gravitação



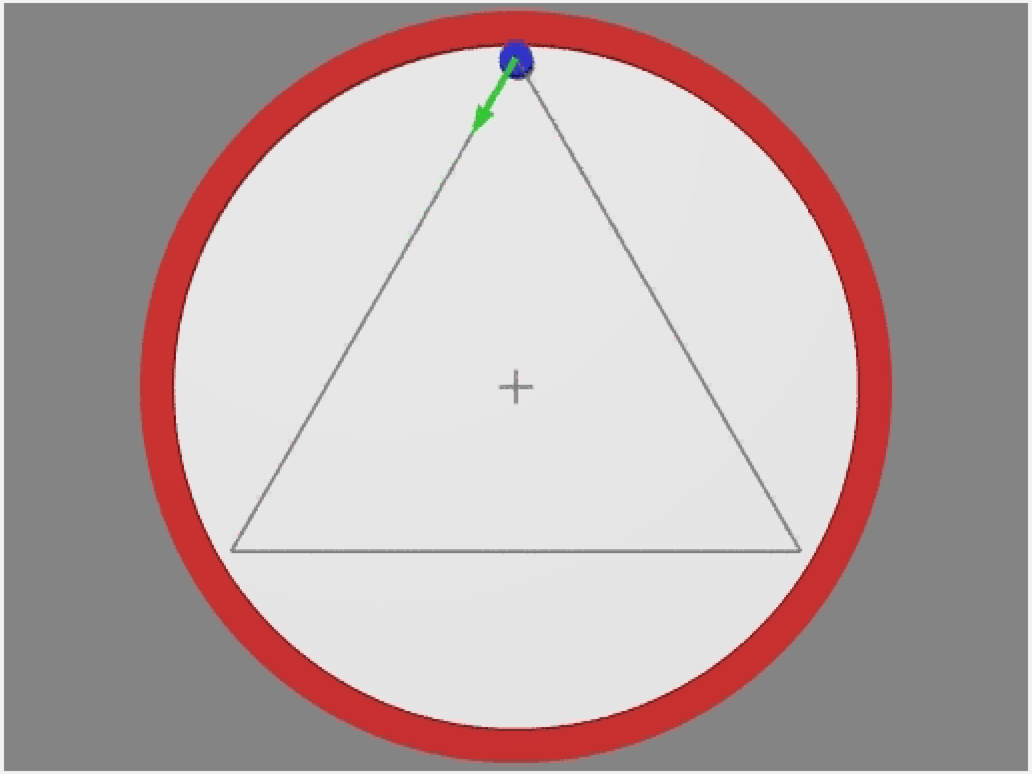
$$F = G\frac{M_1 M_2}{r^2}$$

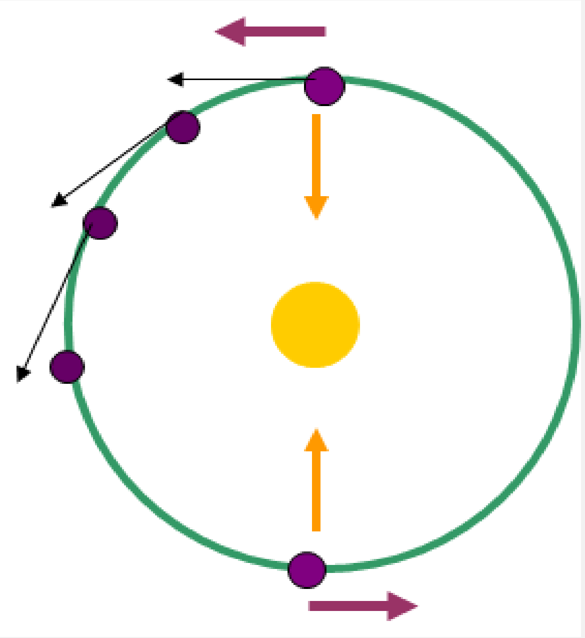
http://astro.unl.edu/classaction/animations/renaissance/kepler.html

Lei da Gravitação

Por que a Terra não cai no Sol?

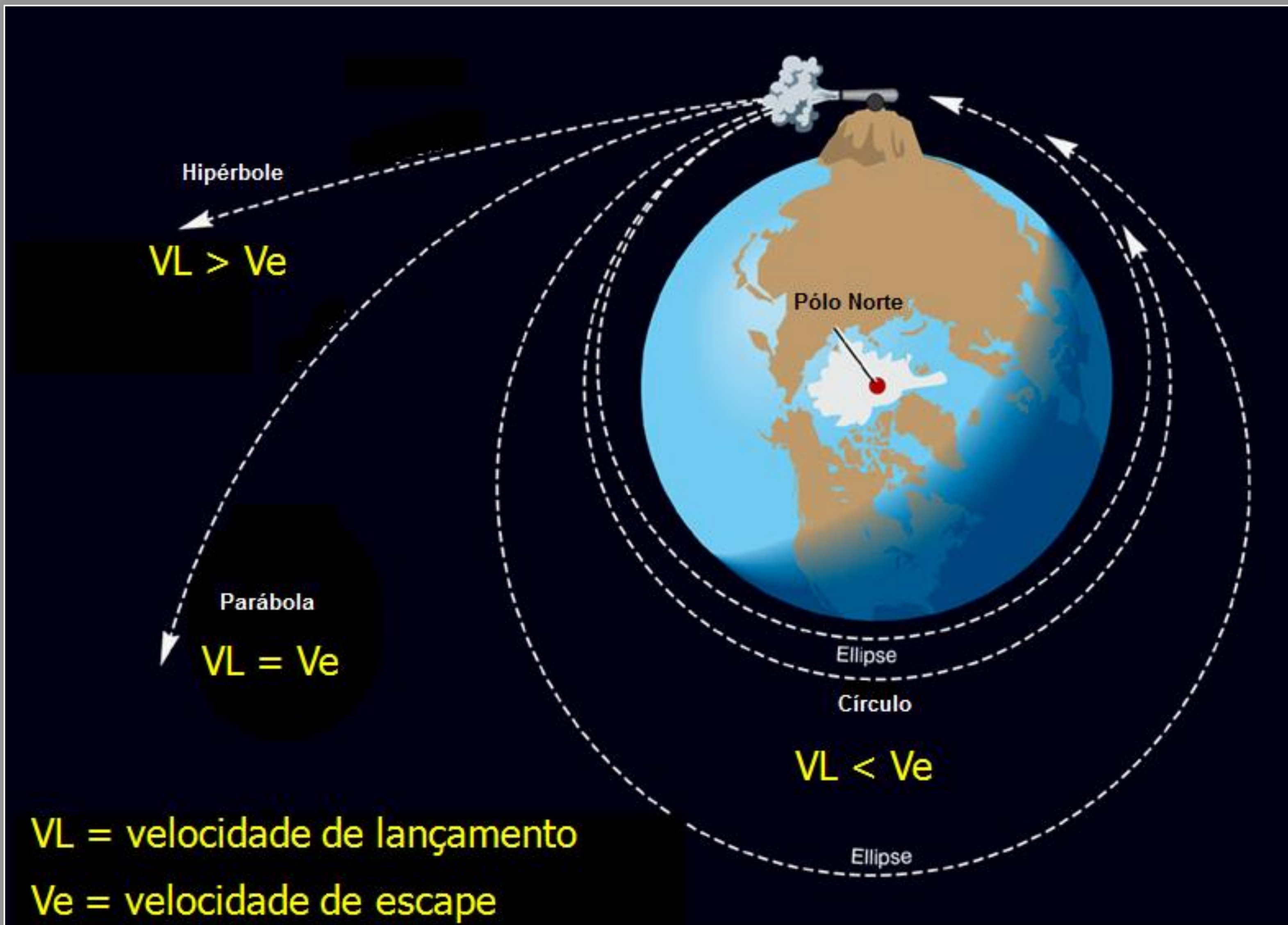
Na realidade ela cai, e sempre!



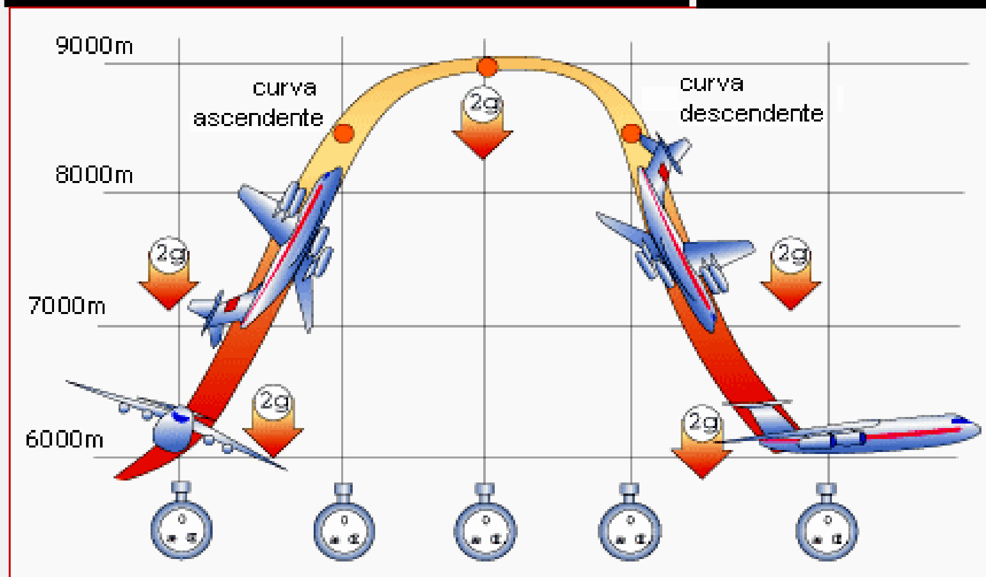


Lei da Gravitação

Canhão de Newton



Lei da Gravitação - Microgravidade



Vôo parabólico

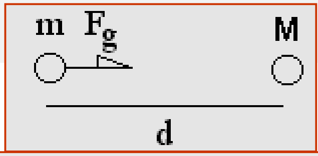
Sumário

Lei de Gravitação

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

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

Existe força atuando para dentro da órbita



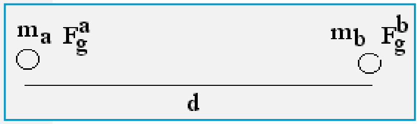
$$Fg \equiv Fc = \frac{mv^2}{d} = m\frac{w^2d^2}{d} = m\frac{4\pi^2 d}{P^2} = m\frac{4\pi^2 d}{kd^3}$$

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

Força dirigida ao centro do Sol

1º Lei de Kepler: Sol no foco

$F_g \propto d^{-2}$



2º Lei de Kepler → Raio vetor varre áreas iguais em tempos iguais

$$F_g^a \propto \frac{m_a}{d^2} \Rightarrow F_g^a \propto \frac{k_a m_a}{d^2}$$

$$F_g^b \propto \frac{m_b}{d^2} \Rightarrow F_g^b \propto \frac{k_b m_b}{d^2}$$

$$\text{mas} \quad F_g^a = F_g^b$$

$$k_a m_a = k_b m_b$$

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

$$\therefore \quad k_a = K m_b \; ; k_b = K m_a$$

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

3º Lei de Newton → Ação → reação

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

$$F_g \propto Mm$$

3º Lei de Kepler → $\left(\frac{a_1}{a_2}\right)^3 = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^2$

Parâmetros orbitais

i - Inclinação (**i** > 90º, movimento retrógrado).

Ω - Longitude do nodo ascendente ($0 \leq \Omega \leq 360^{\circ}$)

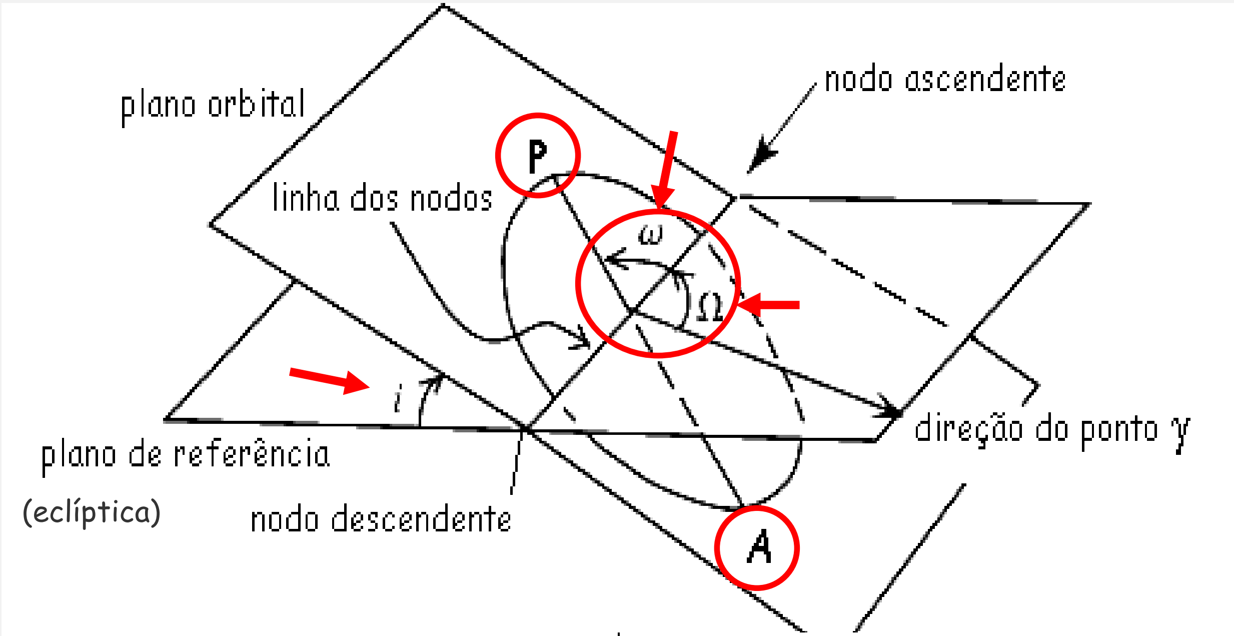
ω - Argumento do pericentro, contado no sentido do movimento do corpo ($0 \leq \omega \leq 360^{\circ}$)

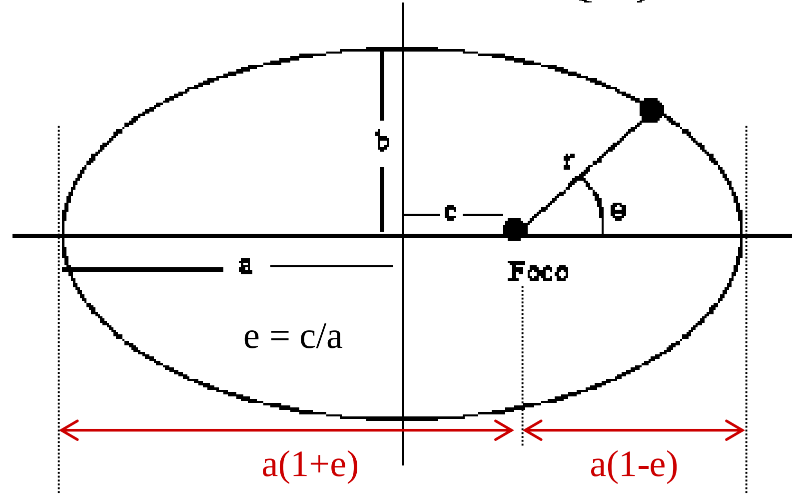
P, A - Pericentro e Apocentro

ϖ - Longitude do pericentro ($\Omega + \omega$)

n - movimento médio (velocidade angular média do corpo em torno do atrator: **n**=(2π/**período**)

e - Excentricidade da órbita (relação entre a semi-distância focal e o semi-eixo maior (**c/a**)





Sumário

Sugestões:

O Problema dos Três Corpos – análise e animações:

http://cmup.fc.up.pt/cmup/relatividade/3Corpos/3corpos.html

Simulação Computacional em Dinâmica Clássica:

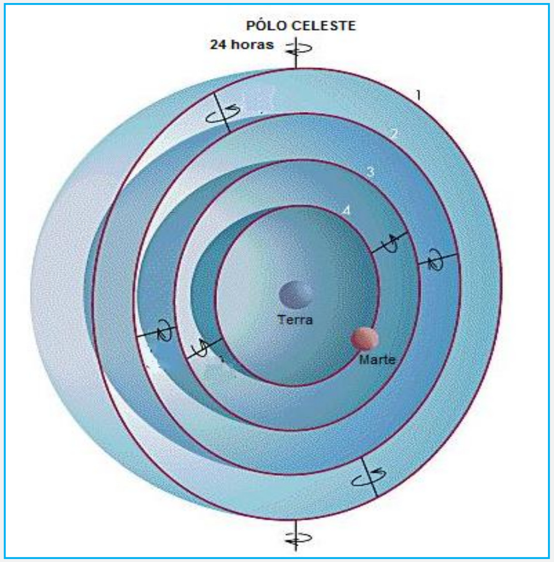
http://faculty.ifmo.ru/butikov/index.html

Problema gravitacional de 3 corpos

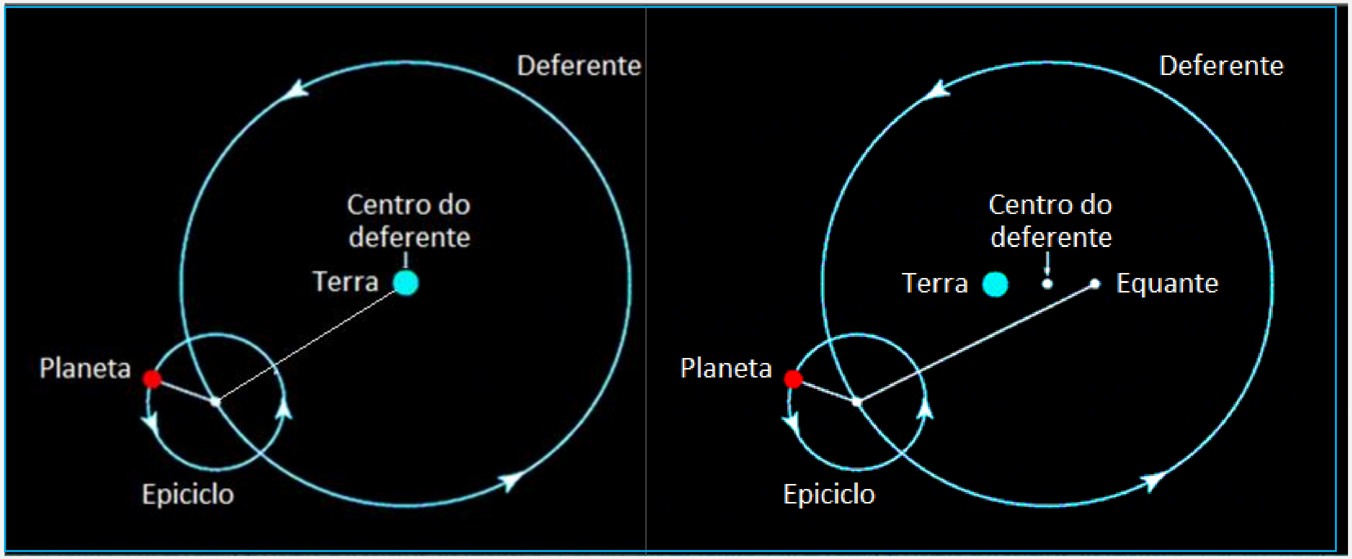
http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/Flash/Chaos/ThreeBody/ThreeBody.html

Sumário

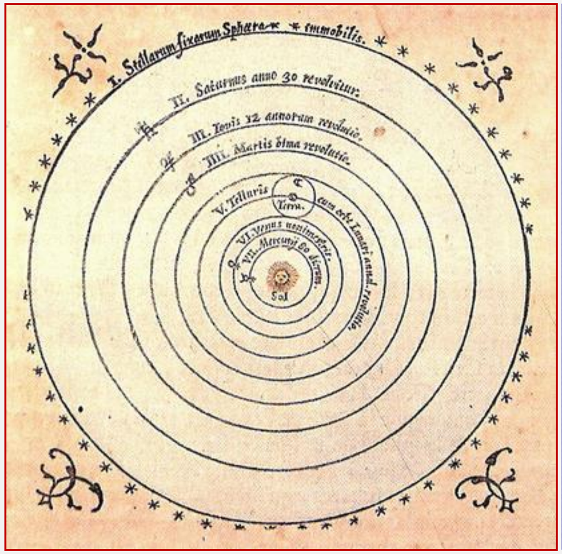
Eudóxio de Cnidus (390 – 337 a.C.)



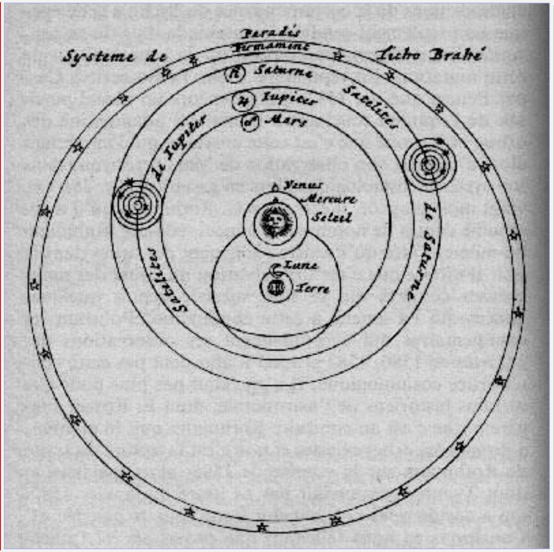
Cláudio Ptolomeu (87 – 151)



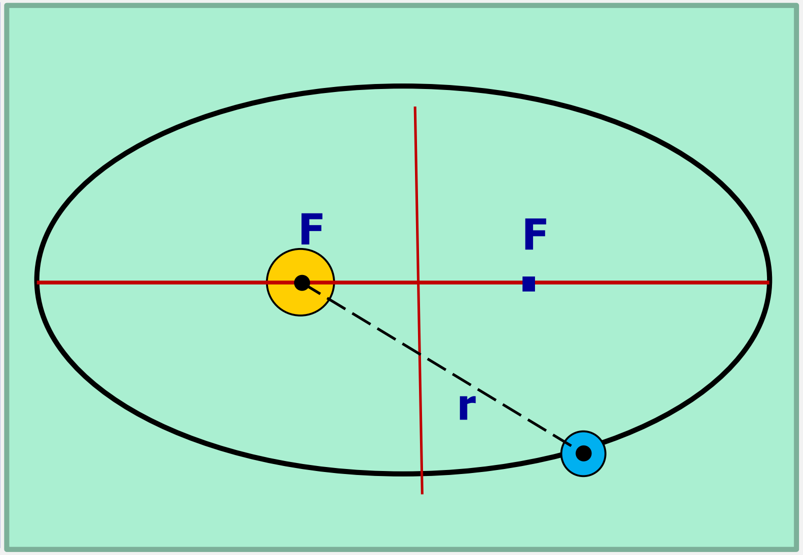
Nicolau Copérnico (1472-1543)



Tycho Brahe (1546-1601)

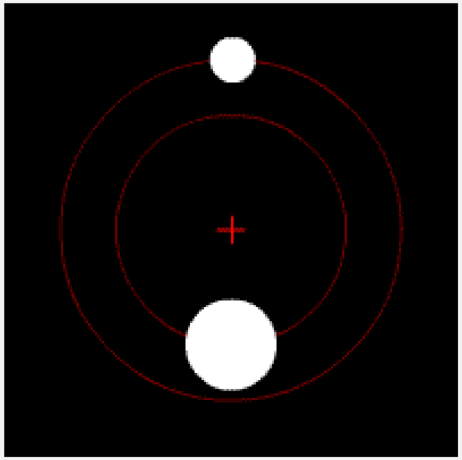


Johannes Kepler (1571 – 1630)

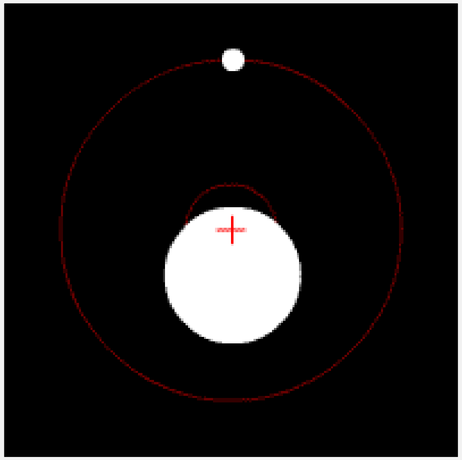


Sumário

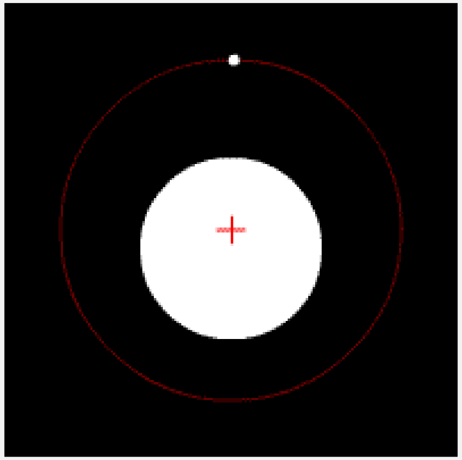
Isaac Newton (1643 - 1727)



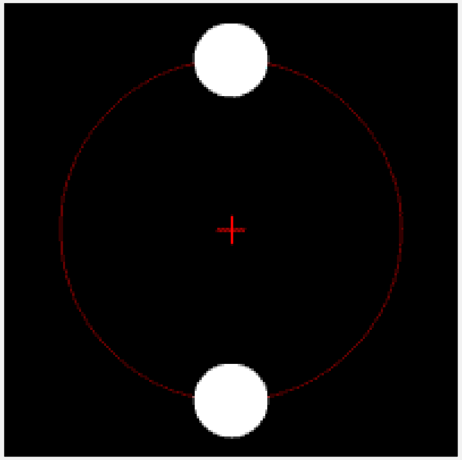
Plutão-Caronte



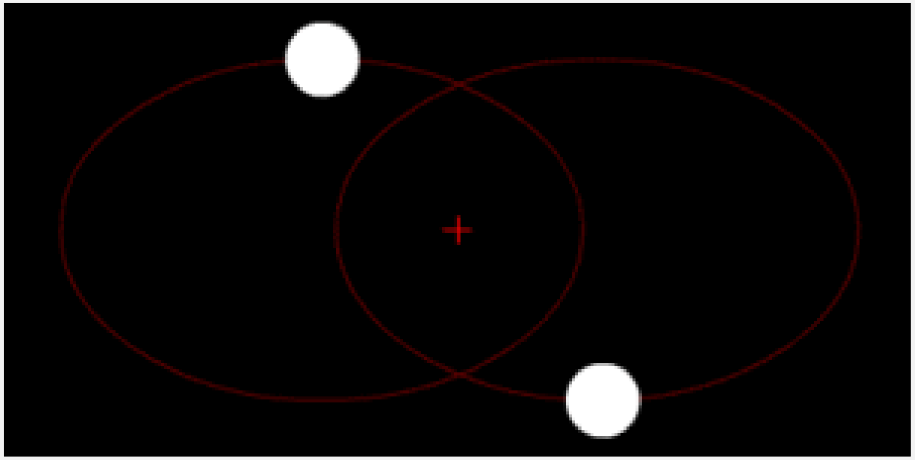
Terra-Lua



Sol-Terra



Sistema 90 Antiope

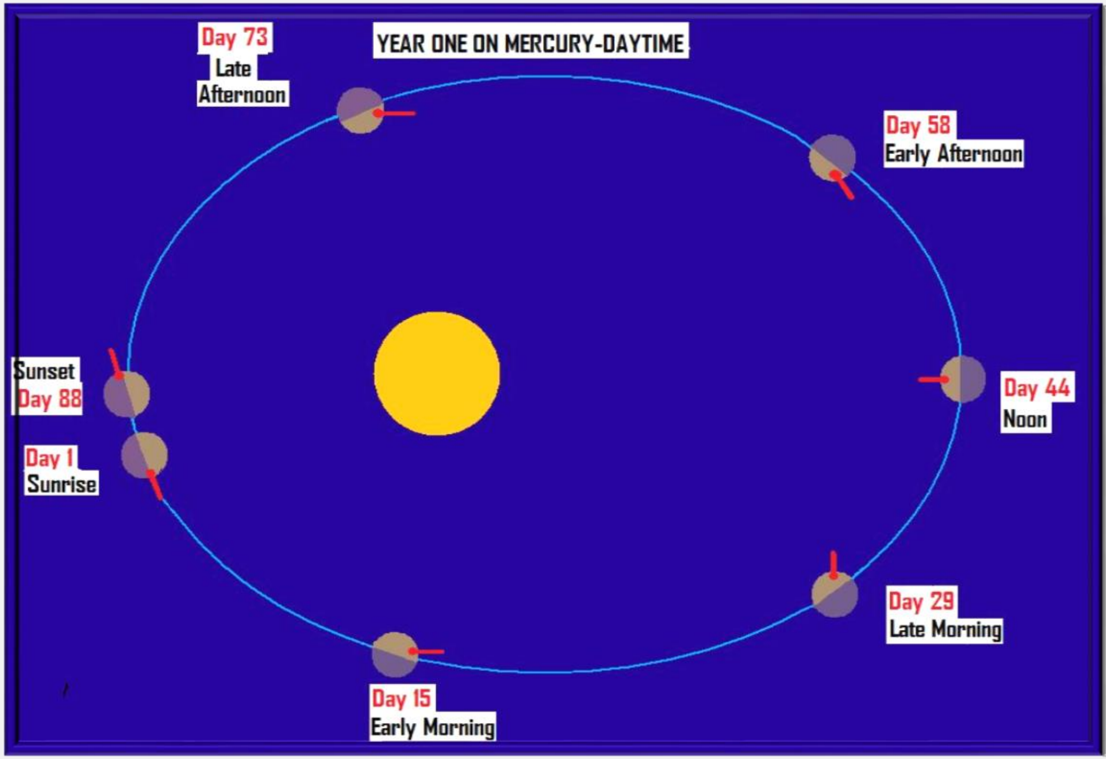


Sistema binário típico

Rotação x Translação

//www.newtonsapple.org.uk/wp-content/uploads/2014/11/one-year-on-Mercury.jpg

//pt.wikipedia.org/wiki/V ênus_(planeta)



Mercúrio: 1 ano equivale a 88 dias terrestres, e o dia local equivale a 176 dias terrestres

Vênus: o dia sideral (~243 dias terrestres) é mais longo do que o ano sideral (224,7 dias terrestres).

Mecânica Newtoniana e Teoria da Relatividade

Equivalência entre massa inercial e massa gravitacional

$$F = M \times a$$

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

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 validez..."

Mecânica Newtoniana e Teoria da Relatividade

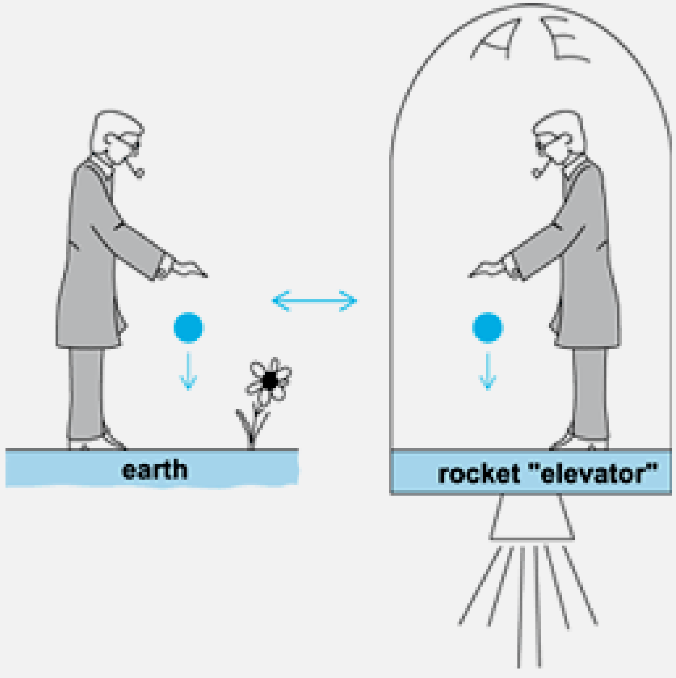
Equivalência entre massa inercial e massa gravitacional

$$F = M \times a$$

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

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 alguém situado fora dela, que puxa com força constante, uma corda ligada ao teto da mesma.

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.

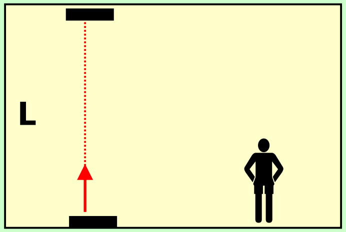
Mecânica Newtoniana e Teoria da Relatividade

Espaço (3D) e tempo são grandezas independentes e absolutas.	Espaço-tempo (4D) não são grandezas independentes.
O referencial absoluto de tempo está no agente motor.	Tempo é grandeza variável com o referencial.
A velocidade que um corpo pode adquirir sob aceleração constante é infinita.	Velocidade é finita e o valor máximo é o da luz propagando-se no vácuo.
O valor da massa não muda com o estado dinâmico.	A massa inercial aumenta com a velocidade e tende a infinito na velocidade da luz.

Mecânica Newtoniana e Teoria da Relatividade

Dilatação do tempo

Referencial em repouso: o que a pessoa vê de dentro



veloc = 0

Tempo:

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

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

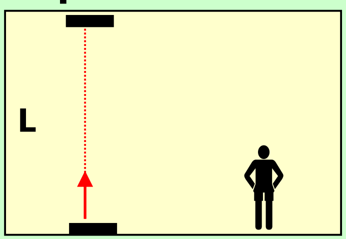
Pensemos nesta situação:

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 Newtoniana e Teoria da Relatividade

Dilatação do tempo

Referencial em repouso: o que a pessoa vê de dentro



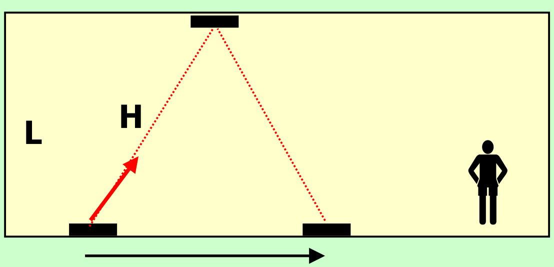
veloc = 0

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:

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

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

Pensemos nesta situação:

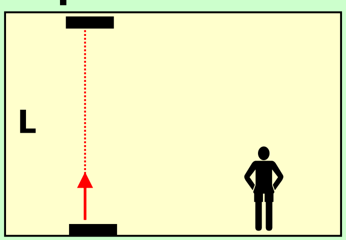
Uma pessoa dentro de uma caixa, com dois espelhos: um no piso e outro no teto, alinhados com a vertical. **L** é a altura da caixa. Do espelho do piso sai um raio de luz em direção ao espelho do teto, reflete e volta para o espelho do piso.

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 Newtoniana e Teoria da Relatividade

Dilatação do tempo

Referencial em repouso: o que a pessoa vê de dentro



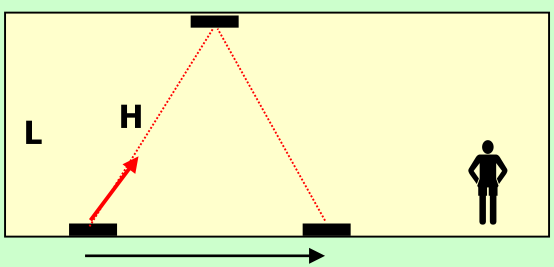
veloc = 0

Tempo:

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

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

Referencial em movimento: o que uma pessoa vê de fora

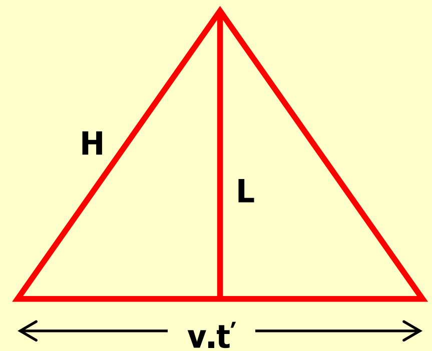


veloc = v

Tempo:

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

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



Pitágoras

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

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

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

$$\text{mas } 4L^2 = c^2 \cdot t^2\text{; então } t'^2\left(c^2 - v^2\right) = c^2 \cdot t^2$$

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

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

Mecânica Newtoniana e Teoria da Relatividade

Variação da massa inercial

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

$$\boxed{v = v_0 + a \cdot t; \quad \text{qdo} \quad v \to c, \quad a \to 0}$$

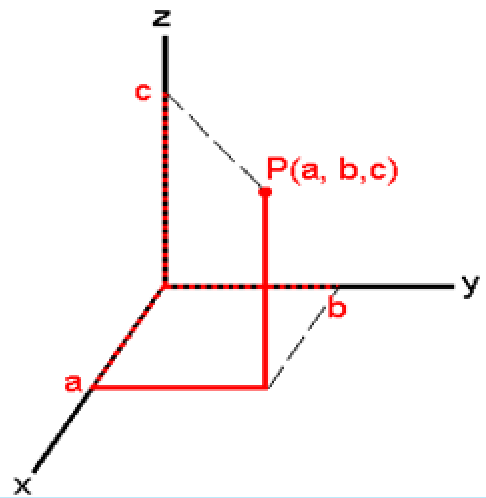
Isto equivale a dizer que sua massa inercial tende ao infinito quando sua velocidade tende a da luz no vácuo:

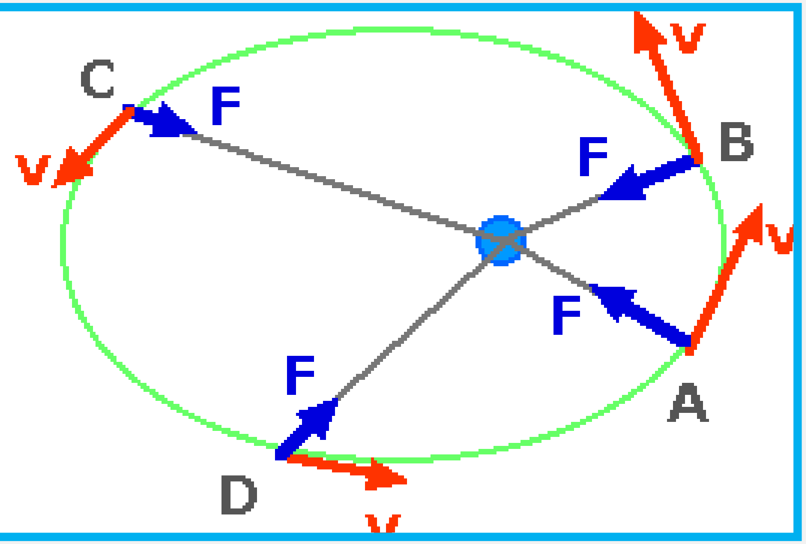
$$\boxed{a = \frac{F}{m}; \quad \text{se} \quad a \to 0, \quad m \to \infty}$$

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.

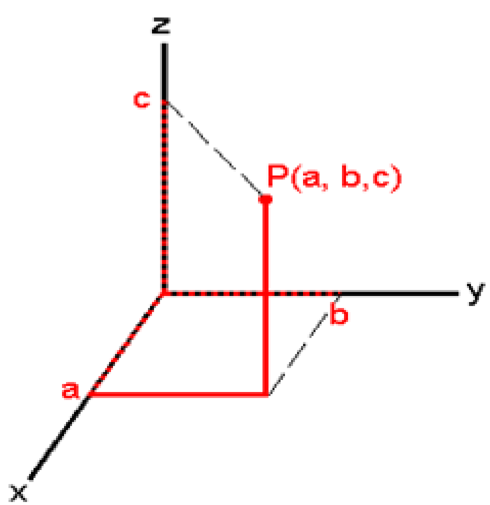
Mecânica Newtoniana e Teoria da Relatividade

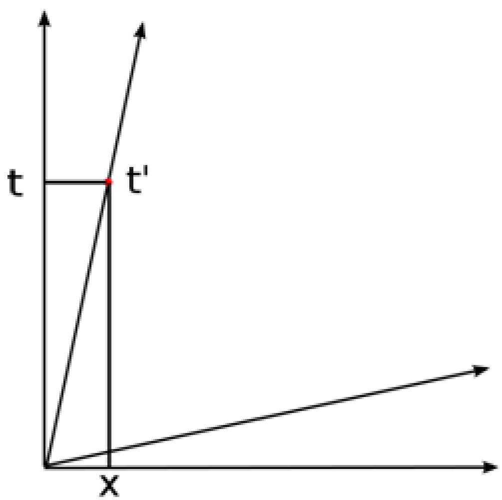
Visão clássica

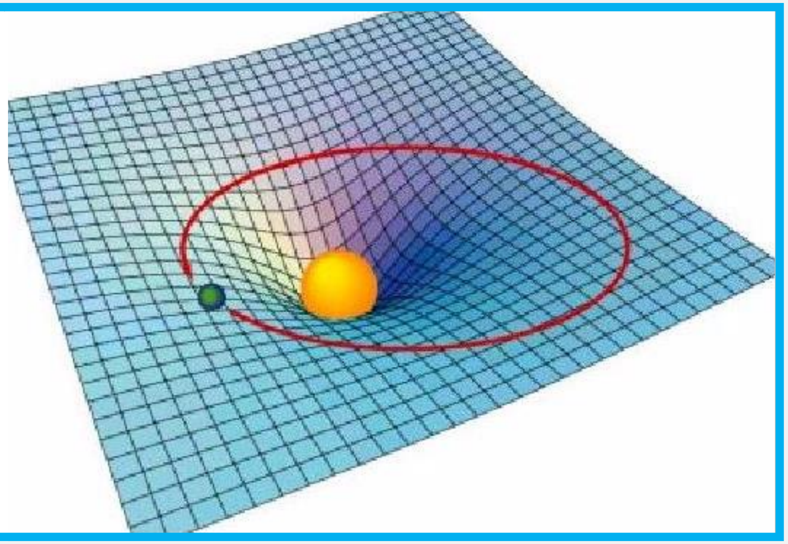




Visão relativística

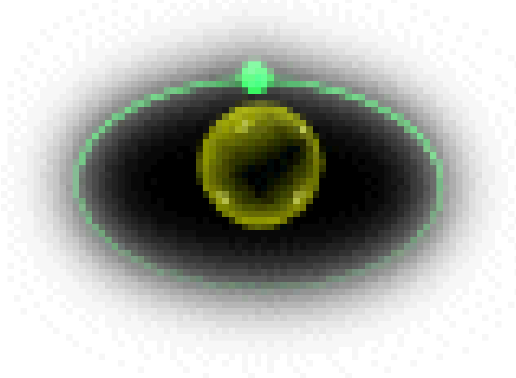




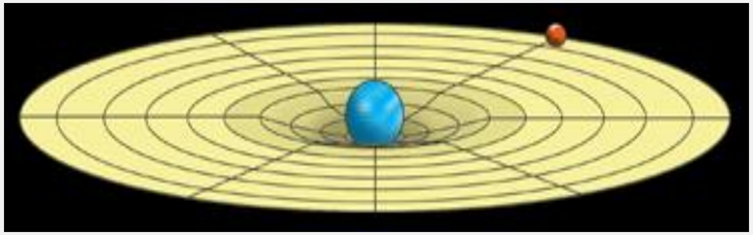


Mecânica Newtoniana e Teoria da Relatividade

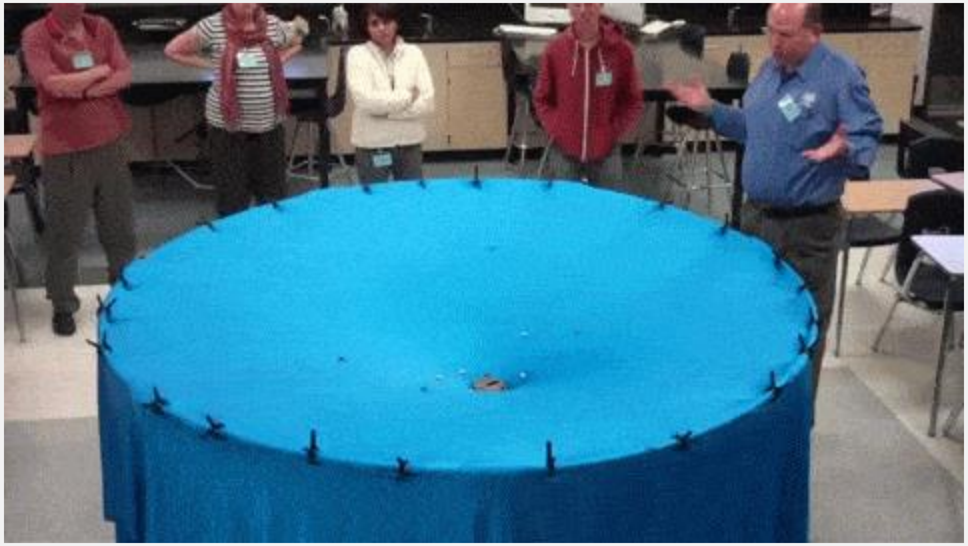
Visão clássica



Visão relativística



https://fundacaocarlsagan.wordpress.com/



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

Charles Chaplin