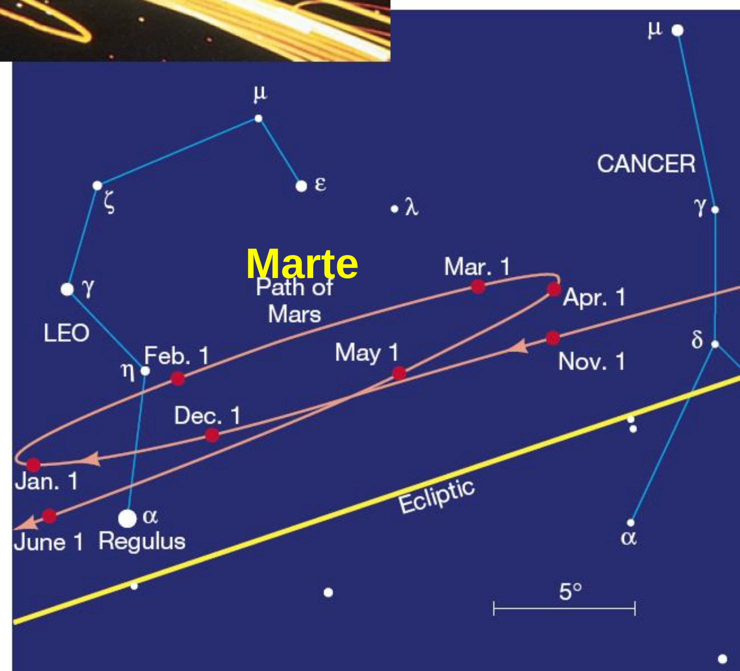
(Adaptado do curso AGA0215 da **Profa. Thais Idiart**)

SISTEMA SOLAR: O MOVIMENTO DOS PLANETAS E SATÉLITES

O UNIVERSO GEOCÊNTRICO

Sol, Lua e estrelas possuem todos movimentos simples no céu.



Planetas (errantes):

- **Movem-se com respeito as estrelas :**

1) Na maior parte das vezes movimento prógrado (oeste-leste em relação às estrelas distantes)

2) Por vezes (~1 vez por ano) apresentam movimento retrógrado (leste –oeste)

- **Variam em brilho**
- **Variam em velocidade**

Sistema mais simples

Sistema Geocêntrico

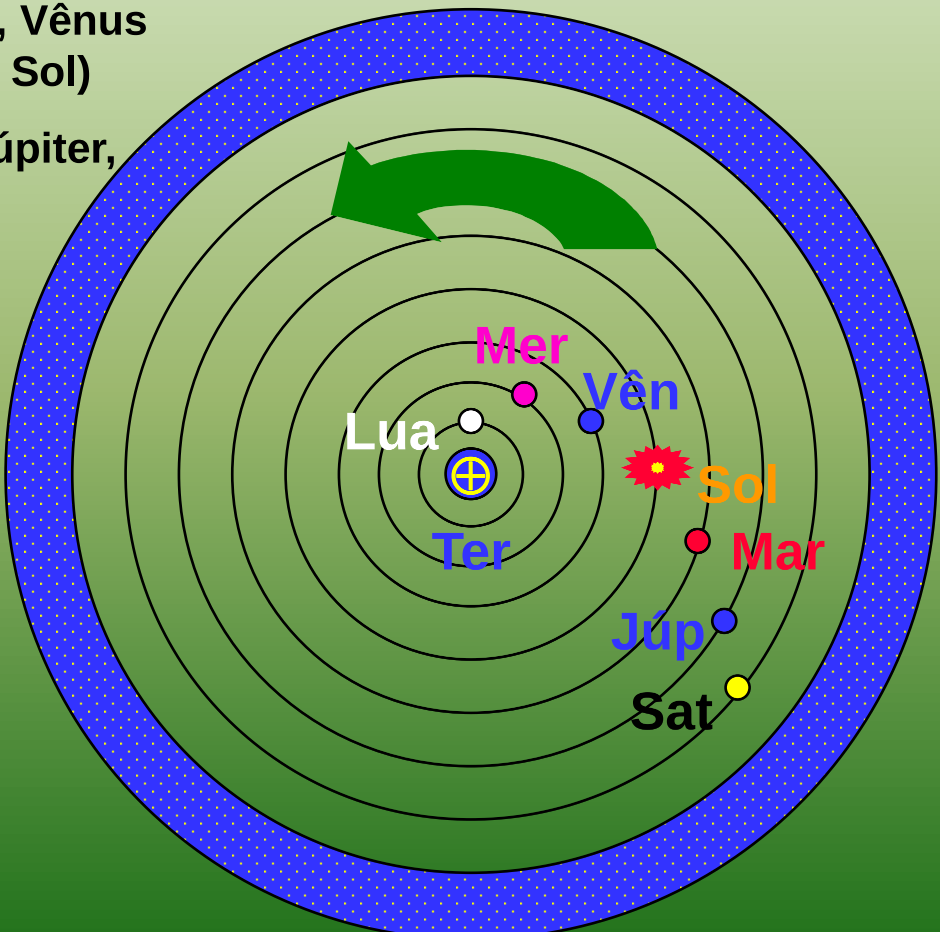
(publicado por Ptolomeu , séc. II DC)

• Planetas inferiores : Mercúrio, Vênus (acompanham o movimento do Sol)

• Planetas superiores: Marte, Júpiter, Saturno

Neste sistema, tudo gira em torno da Terra (até o sol)

Esfera das estrelas fixas: também gira



O UNIVERSO GEOCÊNTRICO

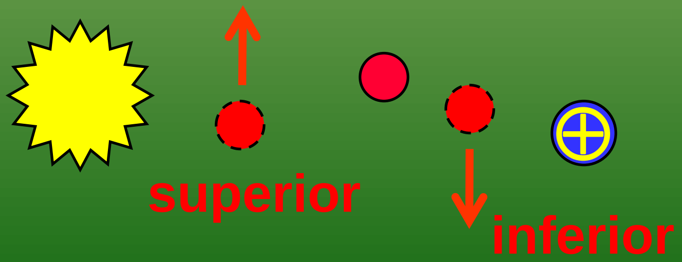
Observação 1:

- **Planetas inferiores acompanham o movimento do Sol e fazem duas conjunções: inferior e superior**

Conjunção = planeta e Sol estão na mesma direção na esfera celeste.

Inferior = planeta está mais próximo à Terra e apresenta movimento retrógrado (leste-oeste).

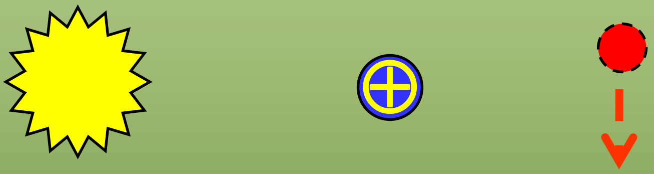
Superior = planeta está mais afastado da Terra e apresenta movimento prógrado (oeste-leste).



O UNIVERSO GEOCÊNTRICO

Observação 2:

• Planetas superiores não acompanham o Sol e possuem movimento retrógrado (leste-oeste) quando estão em oposição (diametralmente opostos ao Sol na esfera celeste).

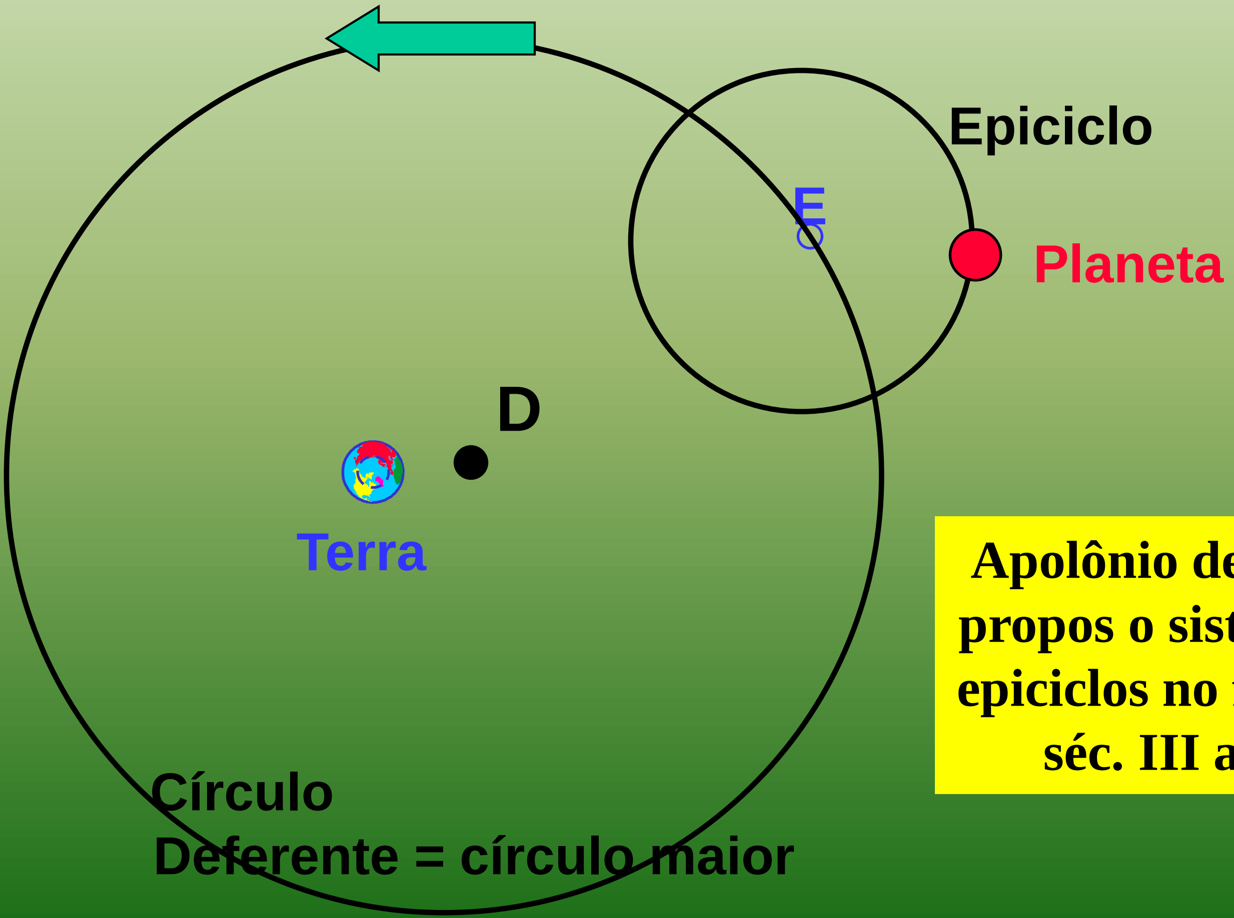


Observação 3:

• Planetas superiores são mais brilhantes em oposição durante o movimento retrógrado. Planetas inferiores são mais brilhantes algumas semanas antes e depois da conjunção inferior.

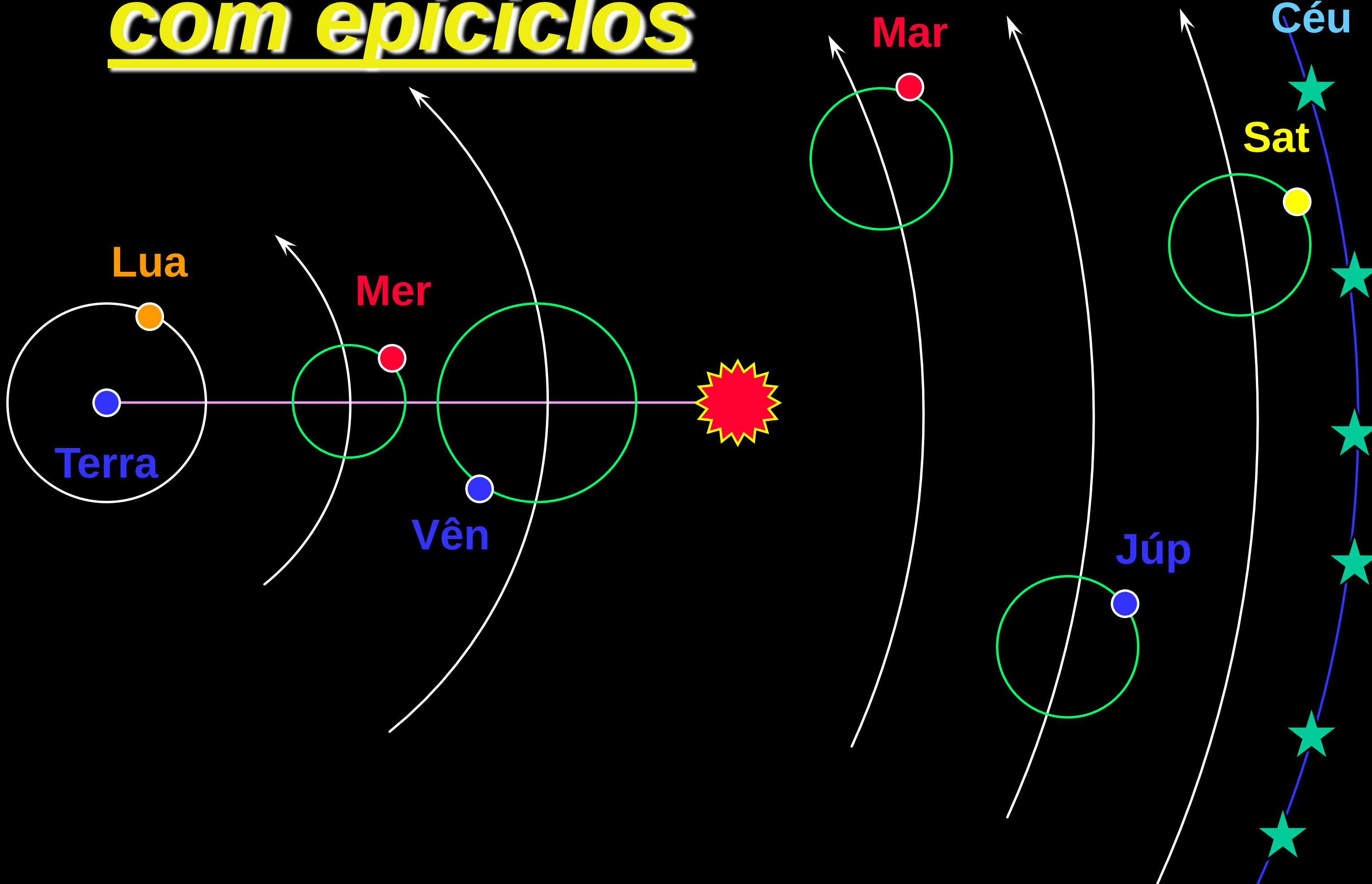
Modelos geocêntricos requerem movimentos mais complexos para explicar as trajetórias observadas dos planetas.

Sistema de Epiciclos

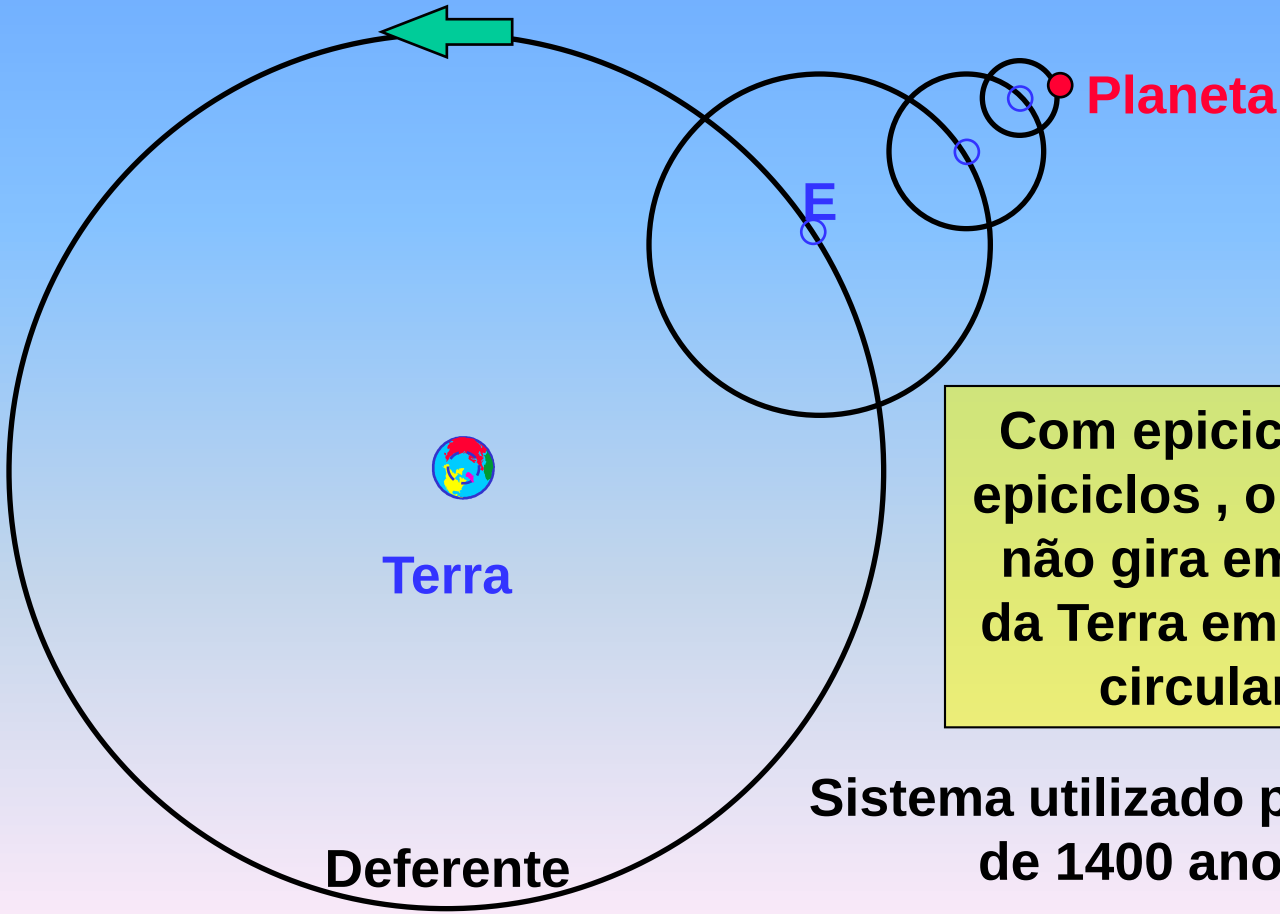


Apolônio de Perga propos o sistema de epiciclos no final do séc. III a .C.

Geocentrismo com epiciclos



Sistema Complexo de Epiciclos: melhorando a precisão das posições observadas dos planetas



Com epiciclos em epiciclos , o planeta não gira em torno da Terra em órbitas circulares

Sistema utilizado por mais de 1400 anos

O Modelo Heliocêntrico do Sistema Solar

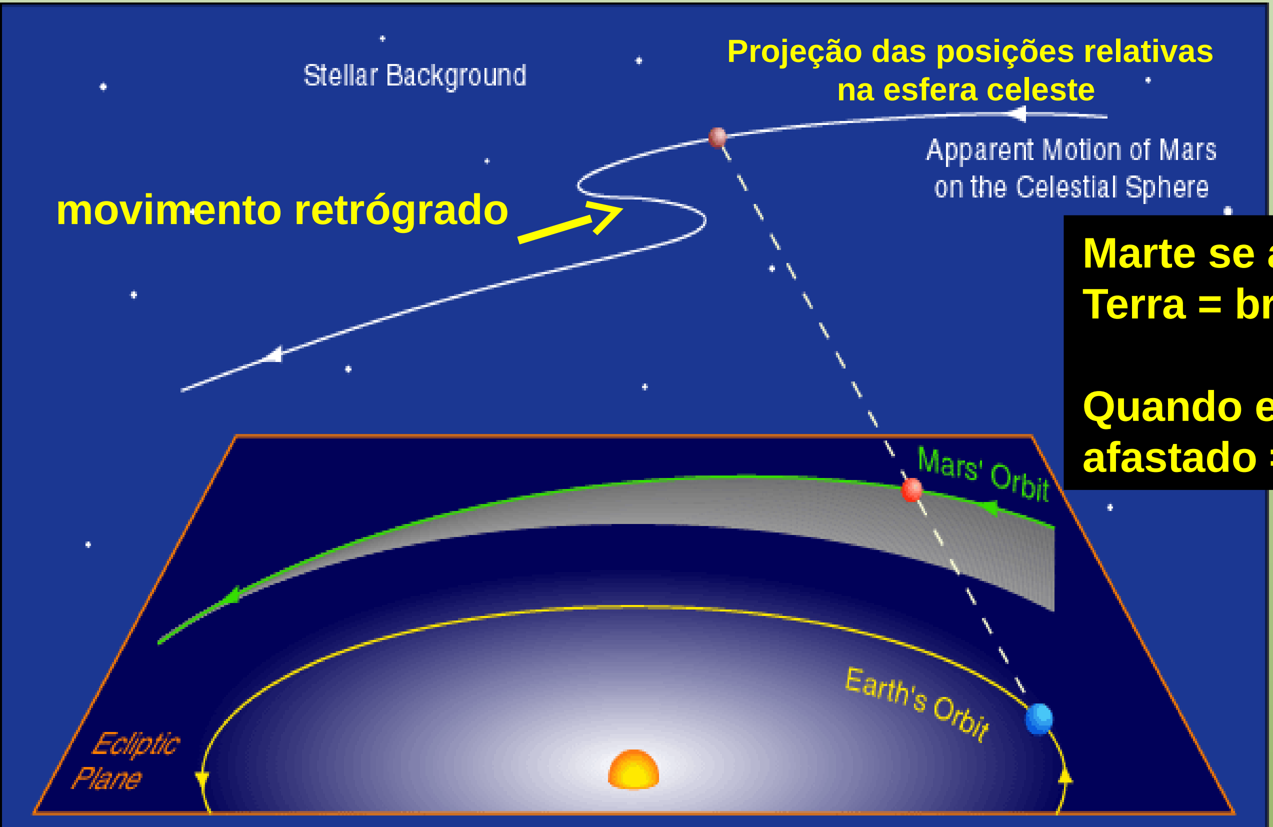
O MODELO DE NICOLAU COPÉRNICO (1473-1543): o Sol está no centro do sistema solar. Somente a Lua orbita em torno da terra; planetas orbitam em torno do Sol.

ARISTARCO de Samos (310-230 a.C) já tinha proposto que todos os planetas (Terra inclusa) rotavam em torno do Sol e a Terra girava em torno do seu próprio eixo → movimento aparente do céu.

O Modelo Heliocêntrico do Sistema Solar

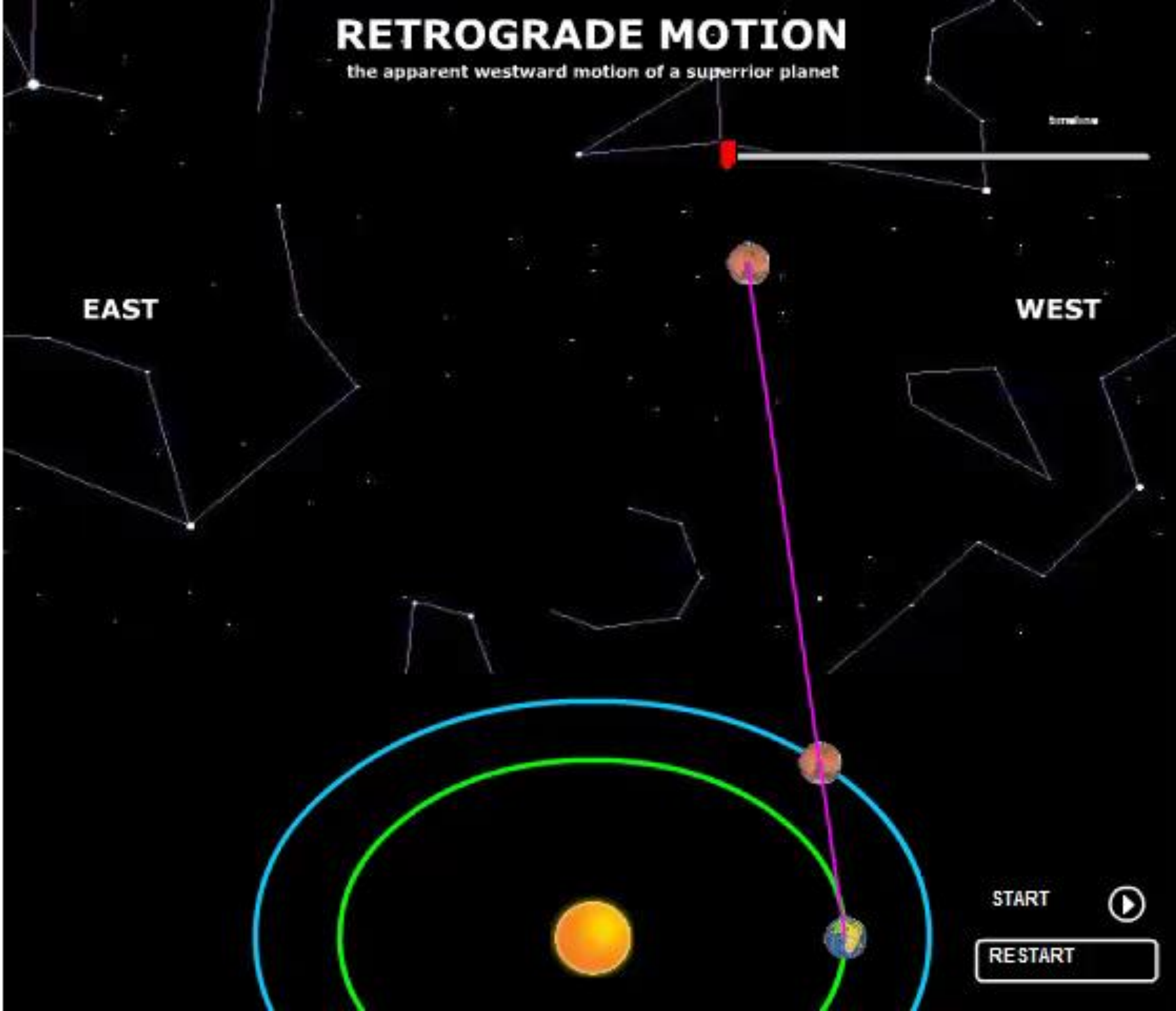
Planetas superiores não acompanham o Sol e possuem movimento retrógrado quando estão em oposição (diametralmente opostos ao Sol na esfera celeste).

Planetas superiores são mais brilhantes em oposição durante o movimento retrógrado.

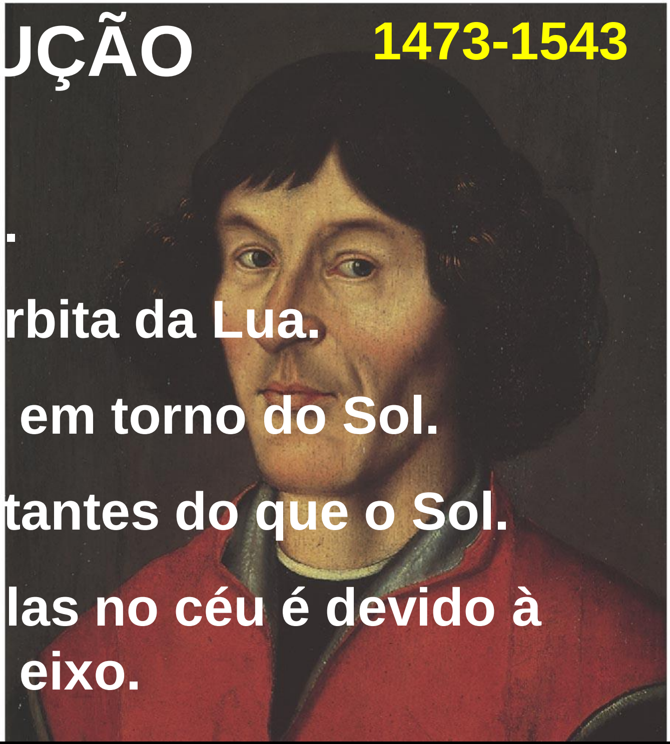


Marte se aproxima + da Terra = brilha mais

Quando está mais afastado = brilha menos


RETROGRADE MOTION
the apparent westward motion of a superrior planet
EAST
WEST
START
RESTART

FUNDAÇÕES DA REVOLUÇÃO COPERNICANA



1. Terra não é o centro do universo.
2. o centro da Terra é o centro da órbita da Lua.
3. Todos os planetas revolucionam em torno do Sol.
4. As estrelas estão muito mais distantes do que o Sol.
5. O movimento aparente das estrelas no céu é devido à rotação da Terra em torno de seu eixo.
6. O movimento aparente do Sol visto da Terra é devido à rotação da Terra em torno de seu eixo.
7. O movimento retrógrado dos planetas é consequência do movimento da Terra em torno do Sol.

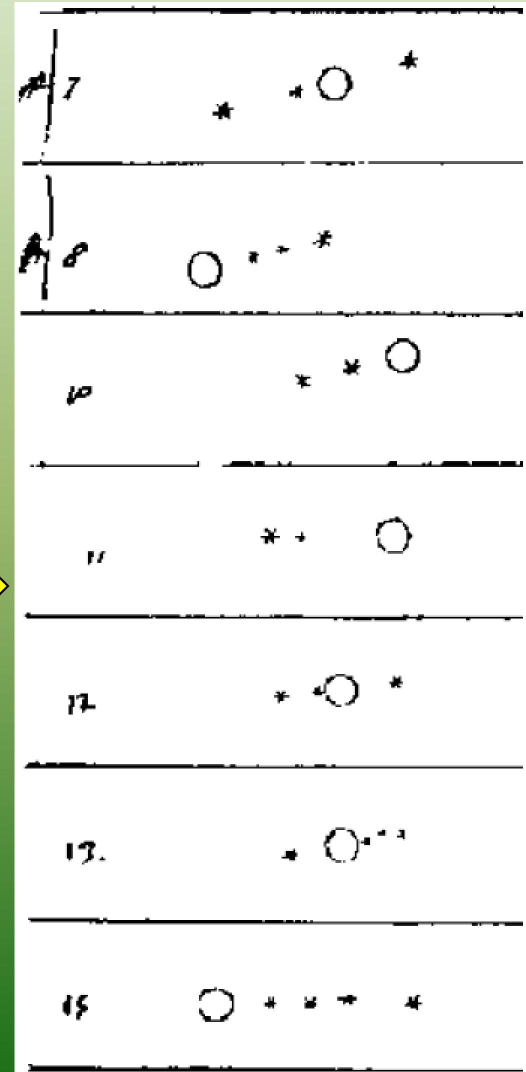
De Revolutionibus Orbium Coelestium (publicado após sua morte)

O NASCIMENTO DA ASTRONOMIA MODERNA

Telescópio foi inventado ~1600

Observações de Galileo:

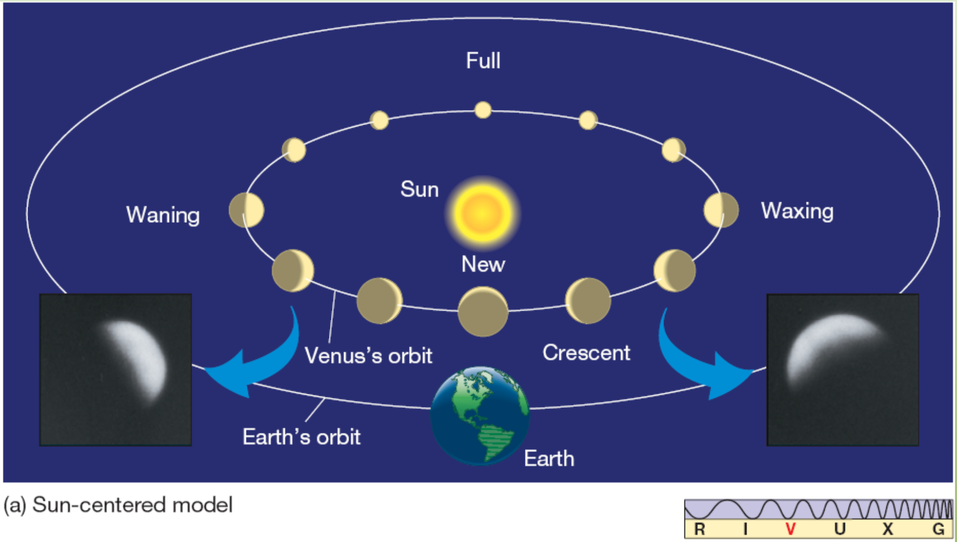
- **Lua possui montanhas e vales.**
- **Sol possui manchas e gira em torno de seu próprio eixo.**
- **Júpiter tem luas**
- **Vênus tem fases.**
- **Saturno possui anéis**



Os modelos de Ptolomeu e Copérnico podem predizer que Vênus apresenta fases

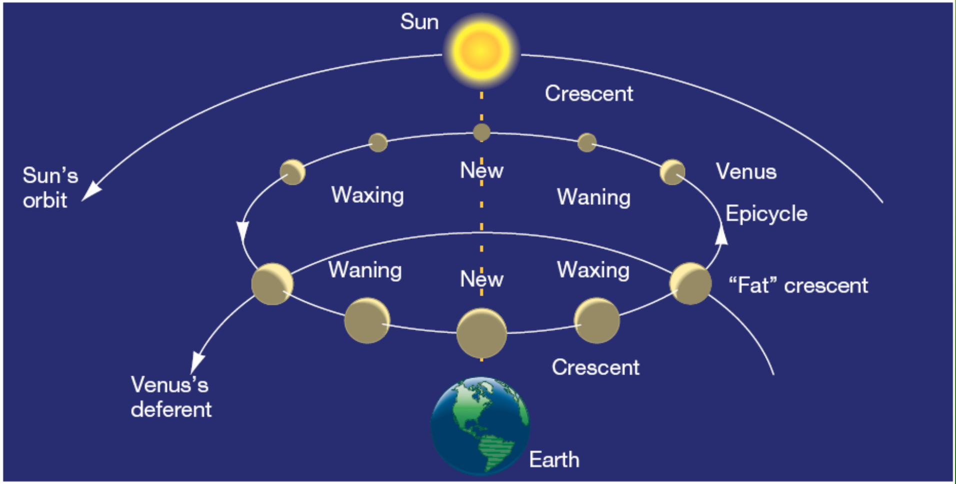
Fase cheia = tamanho menor

Fase crescente = tamanho maior



(a) Sun-centered model

Waxing = crescente **Waning = minguante**

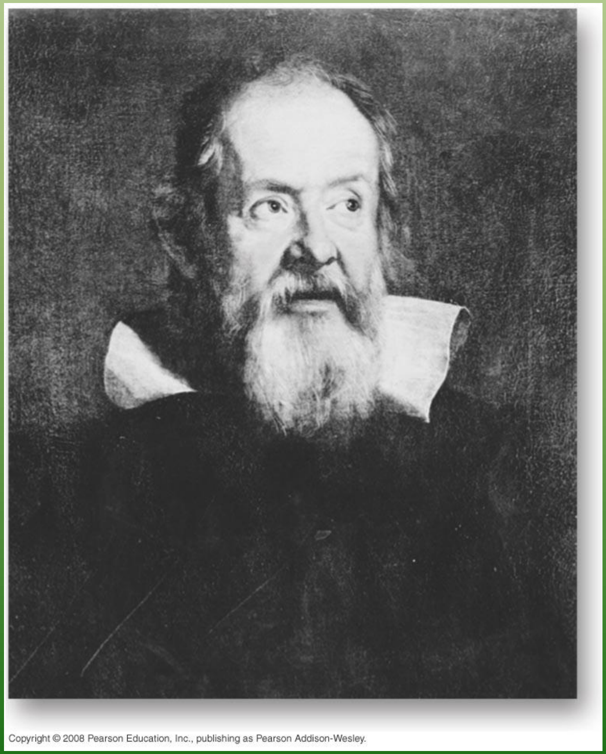


(b) Ptolemy's model

A fase cheia não pode ser explicada pelo modelo geocêntrico

LEIS DO MOVIMENTO PLANETÁRIO

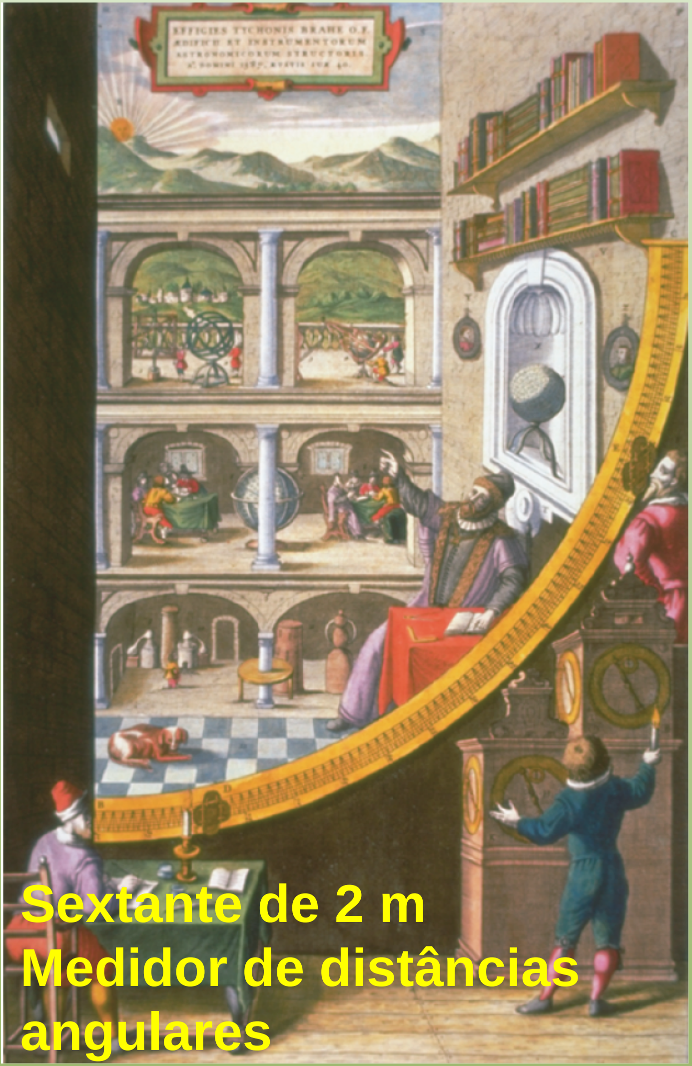
- Galileo (1564- 1642) foi o primeiro observador moderno : uso do telescópio. Promoveu o sistema de Copérnico.
- Kepler (1571-1630) astrônomo e matemático: obteve as leis físicas (empíricas) do movimento planetário.



LEIS DO MOVIMENTO PLANETÁRIO

Leis de Kepler foram derivadas usando observações feitas por Tycho Brahe

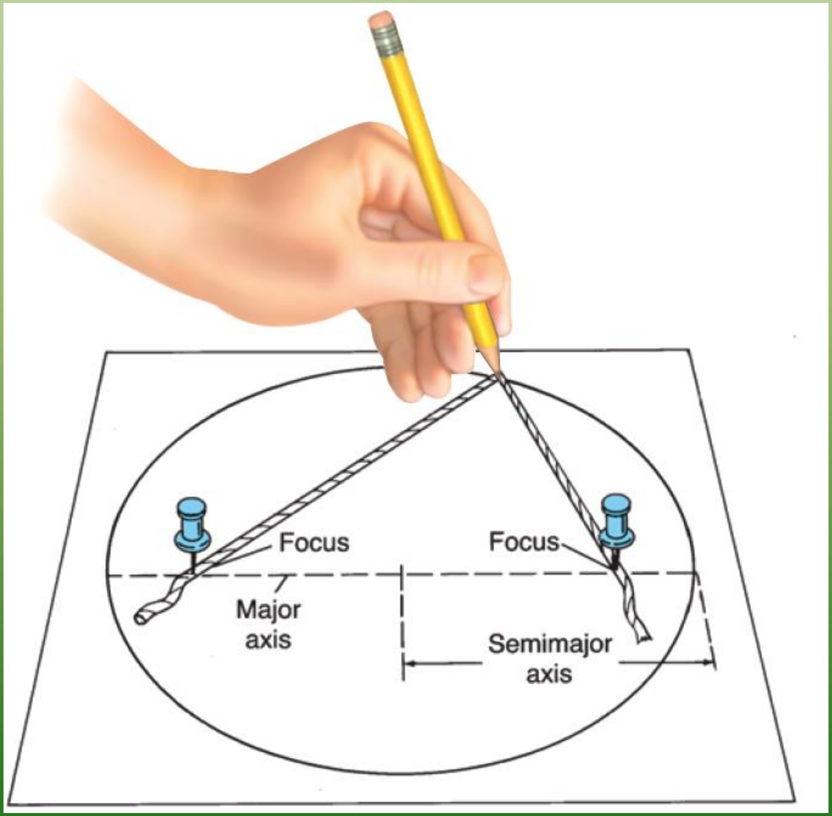
Observatório de Uraniborg (Hven- Dinamarca). O catálogo de posições de estrelas e planetas era o mais completo e preciso feito a olho nú.



Sextante de 2 m
Medidor de distâncias angulares

LEIS DE KEPLER

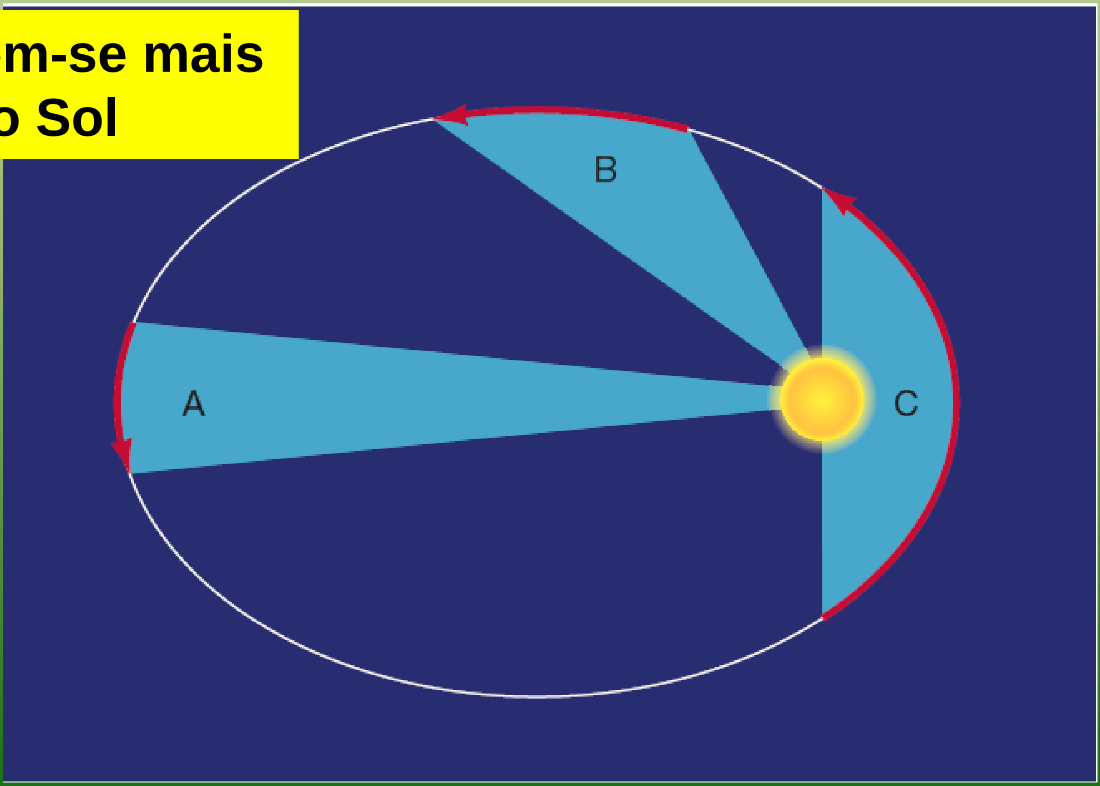
1. Órbitas planetárias são elipses, com o Sol ocupando um de seus focos



LEIS DE KEPLER

2. Uma dada linha imaginária que conecta o Sol a um planeta descreve áreas iguais ($A_A = A_B = A_C$) em tempos iguais.

Planetas movem-se mais rápido perto do Sol

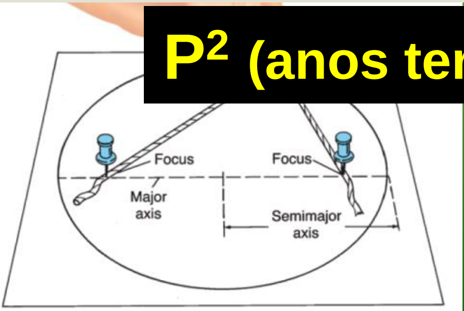


LEIS DE KEPLER

3. O quadrado do período do movimento orbital do planeta é proporcional ao cubo do seu semi-eixo maior.

TABLE 2.1 Some Solar System Dimensions

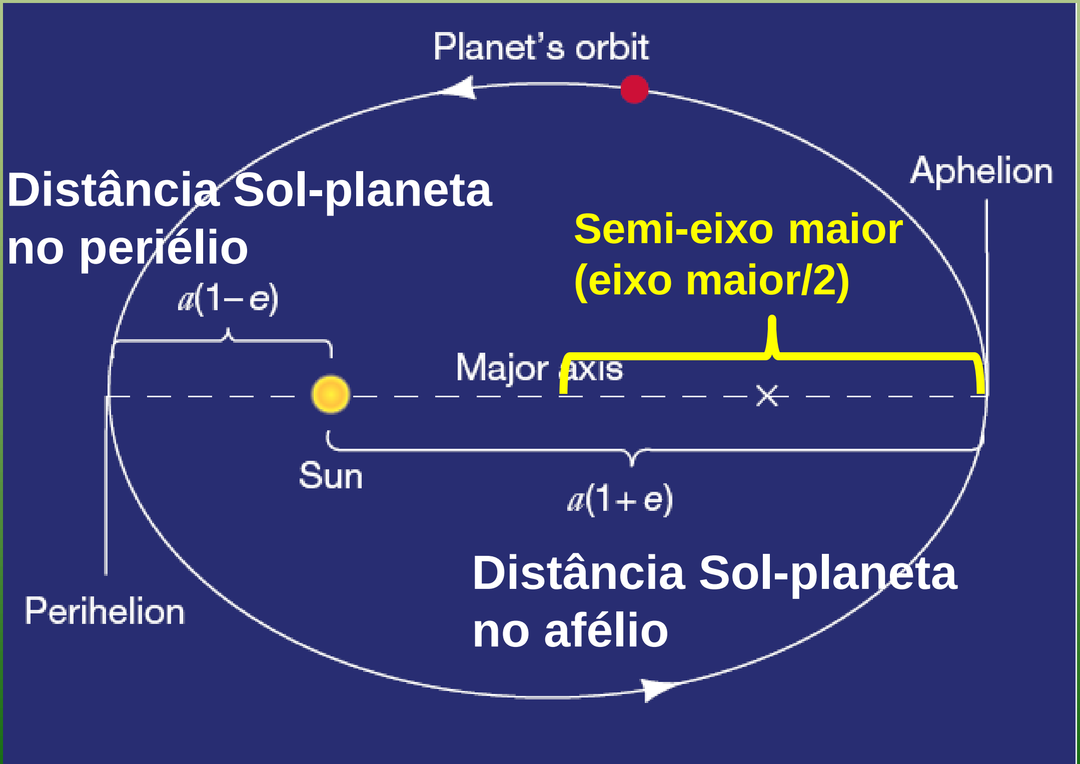
Planet	Orbital Semimajor Axis, *a* (astronomical units)	Orbital Period, *P*. (Earth years)	Orbital Eccentricity, *e*	P^2/a^3
Mercury	0.387	0.241	0.206	1.002
Venus	0.723	0.615	0.007	1.001
Earth	1.000	1.000	0.017	1.000
Mars	1.524	1.881	0.093	1.000
Jupiter	5.203	11.86	0.048	0.999
Saturn	9.537	29.42	0.054	0.998
Uranas	19.19	83.75	0.047	0.993
Neptune	30.07	163.7	0.009	0.986



P^2 (anos terrestres) = a^3 (unidades astronômicas)

PROPRIEDADES DAS ÓRBITAS PLANETÁRIAS

- **Semi-eixo maior** e **ecentricidade** descrevem totalmente o tamanho e formato da órbita.
- **Periélio: mais próximo do Sol**
- **Afélio: mais afastado do Sol.**



Dimensões do sistema solar

Leis de Kepler: modelo em escala do sistema solar

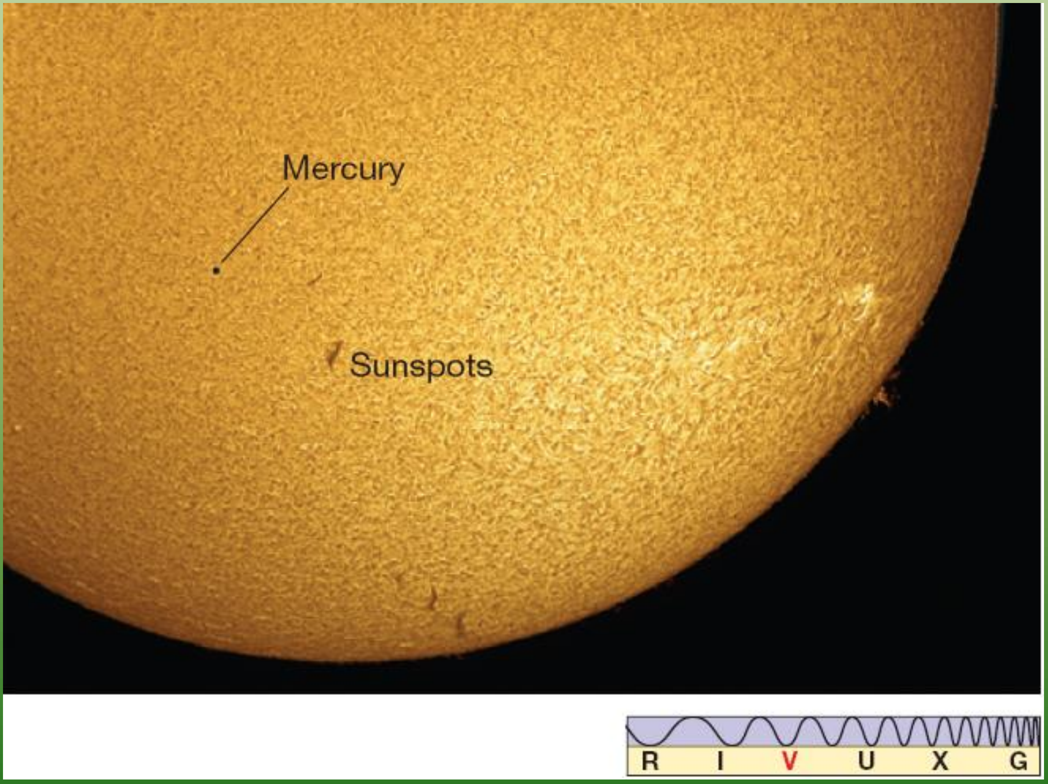
Formas e tamanhos relativos das órbitas planetárias

~~**Tamanho real das órbitas (distâncias)**~~

Somente distâncias relativas à distância Terra-Sol

Determinação da unidade astronômica

Desde Aristarco (mediu distância Sol+Terra usando as fases da Lua), as primeiras medidas de distância por triangulação (paralaxe) foram durante os trânsitos de Mercúrio e Vênus (1761-1769)



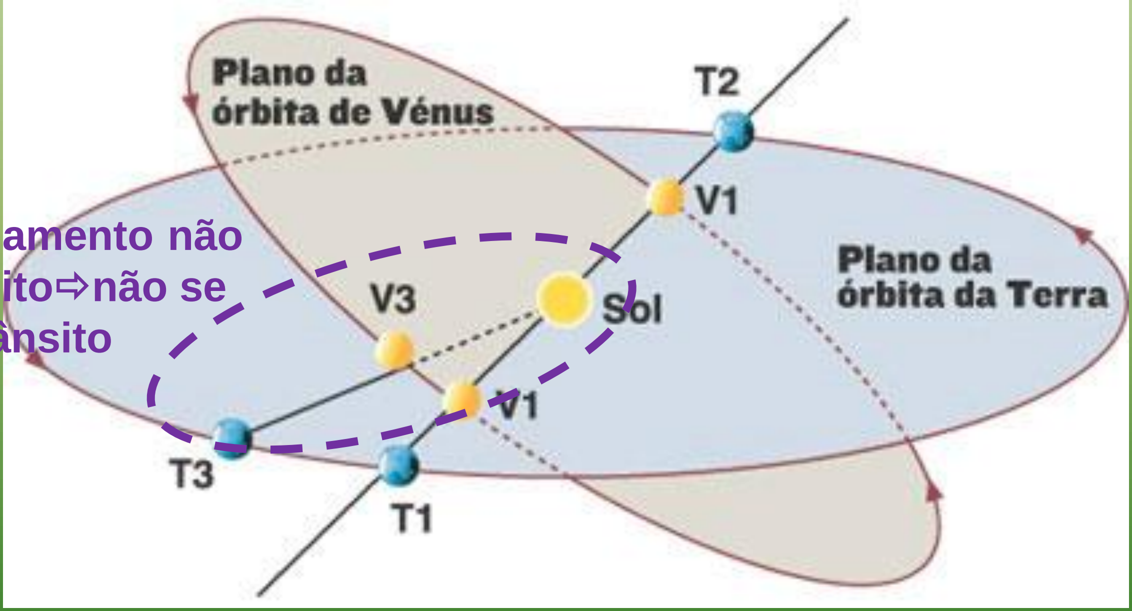
Trânsitos são raros

Trânsitos de Mercúrio = 1 vez por década

Vênus = 2 vezes por século

Determinação da unidade astronômica

Trânsitos são raros ⇨ planos das órbitas não coincidentes com a eclíptica, por isso os trânsitos são mais raros.)

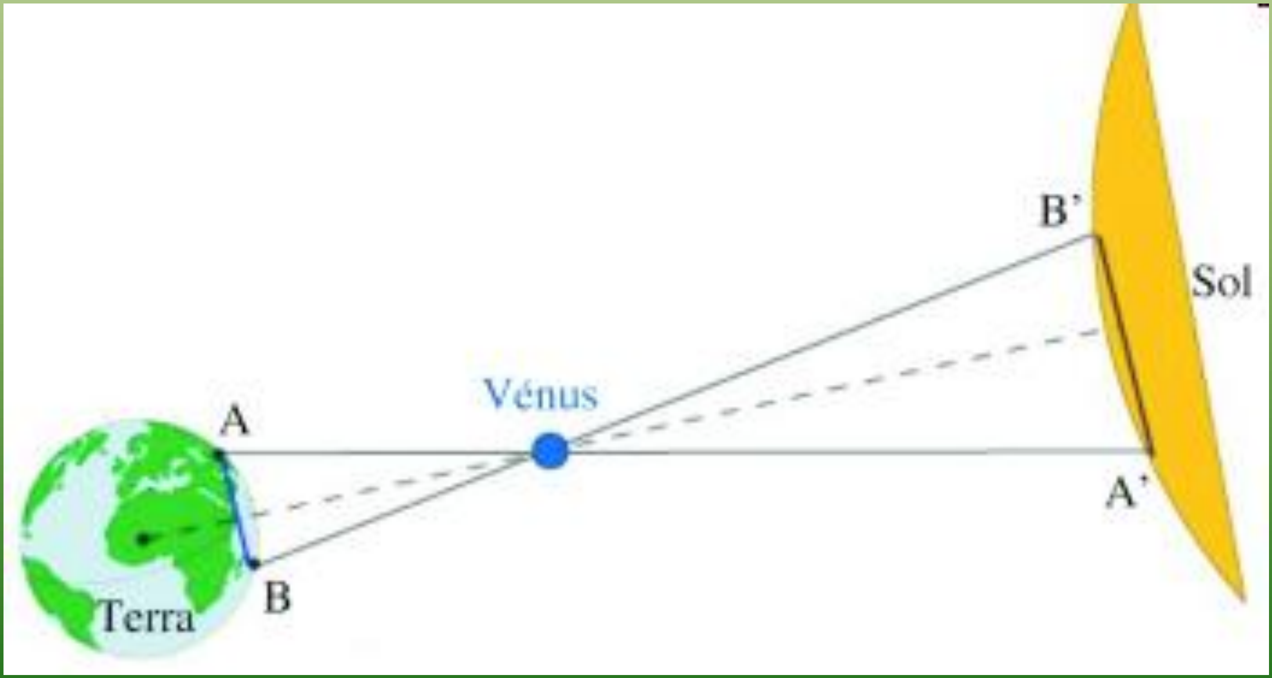


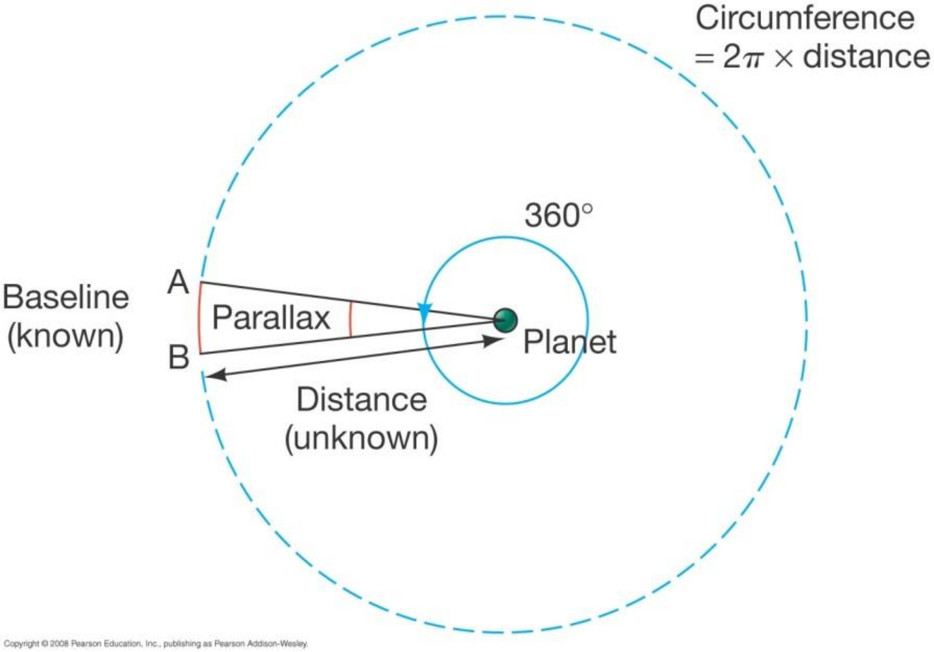
Alinhamento não perfeito⇨não se vê trânsito

Planos orbitais vênus e Terra ângulo ~ 3,4º

Determinação da distância Sol-Terra por paralaxe: unidade astronômica

Posição do planeta em relação às manchas solares





Se a paralaxe de Vênus medida na sua maior aproximação em dois pontos diametralmente opostos da Terra é 1´ então:

$$\frac{linha\ de\ base}{2\pi \times distância} = \frac{paralaxe}{360^o}$$

linha de base ~ 13.000 km
paralaxe ~ 1´
distância Terra-Venus~ $45\text{x}10^6$ km

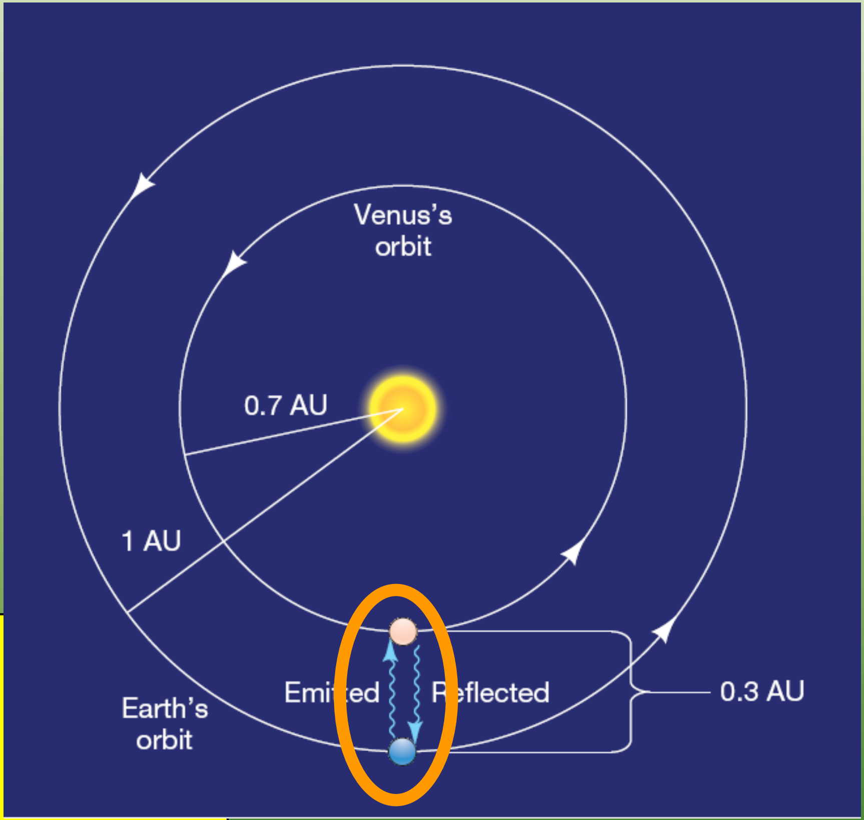
Sabendo que sol-Terra=1UA e Venus-Sol~0,7 UA
⇨ Terra-Venus=0,3 UA

D=$45\text{x}10^6$ /0,3 =150×10^6 km

UA =150×10^6 km

Dimensões do sistema solar

Usando radar:



Tempo : 300 s ida e volta

$c=3\times10^5$ km/s

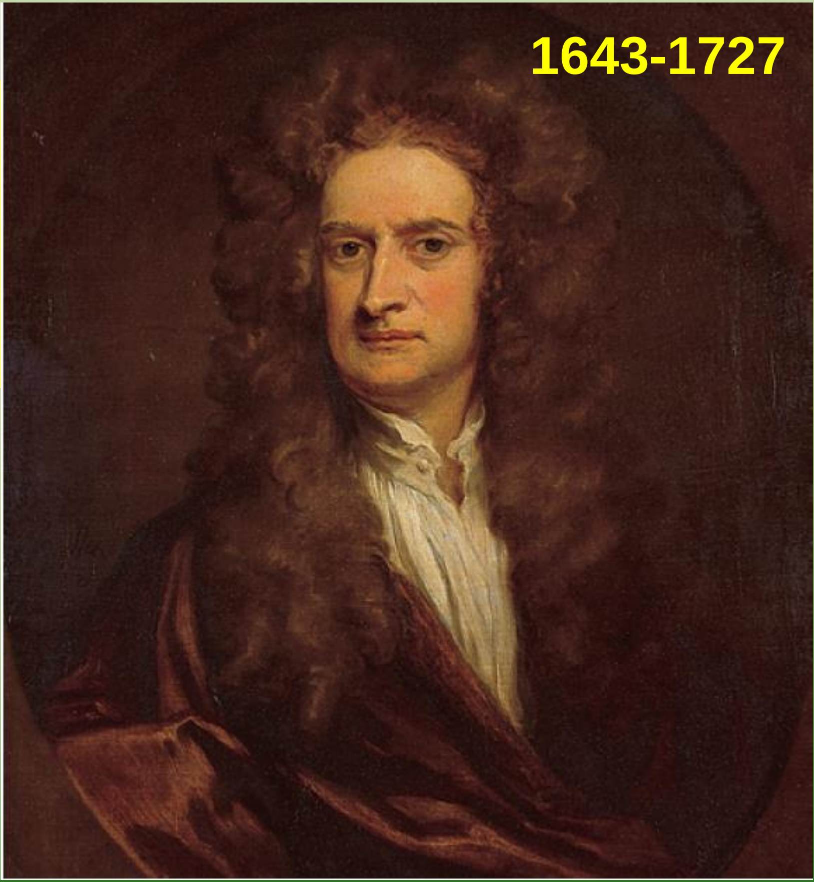
$D=150 \times 3\times10^5 = 45\times10^6$ km

Dsol-terra = $45\times10^6/0,3 = 150\times10^6$ km

LEIS DE NEWTON

LEIS DE NEWTON do movimento:

explicação de como a matéria interage com a matéria



LEIS DE NEWTON

Primeira lei: INÉRCIA

Na ausência de forças externas, um objeto em repouso permanece em repouso. Um objeto em movimento uniforme permanece em movimento uniforme, até que uma outra força atue sobre ele ⇨ <u>na ausência de forças externas não há variação de velocidade</u>

Medida da inércia de um corpo: <u>momentum ou quantidade de movimento</u>.

Definição de Newton: momentum de um objeto é proporcional à sua velocidade. A constante de proporcionalidade = propriedade que resiste à mudança = massa:

$$\boxed{\vec{p} = m\vec{v} = \text{cte se } \vec{F} = 0}$$

LEIS DE NEWTON

Segunda Lei: Lei da Força

Relaciona a mudança de velocidade do objeto com a força aplicada sobre ele. A força líquida aplicada a um objeto = massa do objeto × aceleração causada ao corpo por esta força. A aceleração é na mesma direção da força.

$$\vec{F} = m \times \vec{a} = m \times \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Terceira Lei: Ação e Reação

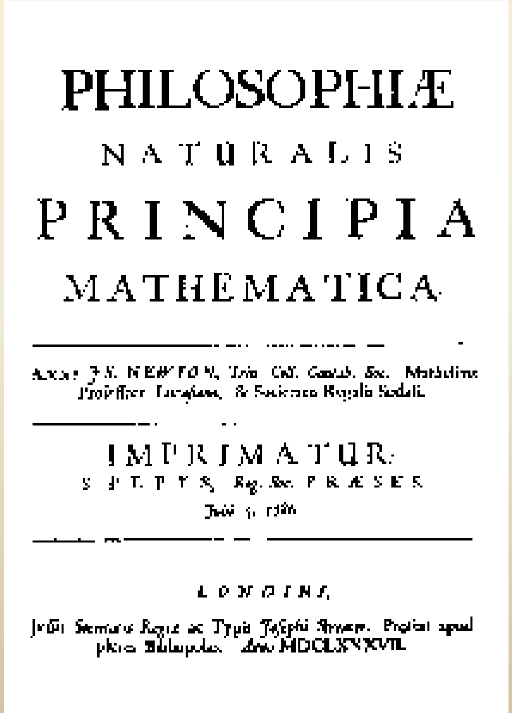
Estabelece que se o objeto exerce uma força sobre outro objeto, este outro objeto exerce uma força de igual intensidade e direção contrária.

Newton pôde explicar o movimento dos planetas em torno do Sol, assumindo a hipótese de uma força dirigida ao Sol, que produz uma <u>aceleração que força a velocidade do planeta a mudar de direção continuamente.</u>

<u>Como foi que Newton descobriu a Lei da Gravitação Universal?</u>
Considerando o movimento da Lua em torno da Terra e as leis de Kepler.

Aceleração em órbitas circulares: o holandês Christiaan Huygens (1629-1695) em 1673 e, independentemente, Newton, em 1665 (mas publicado apenas em 1687, no *Philosophiae naturalis principia mathematica*) descreveram a

aceleração centrípeta

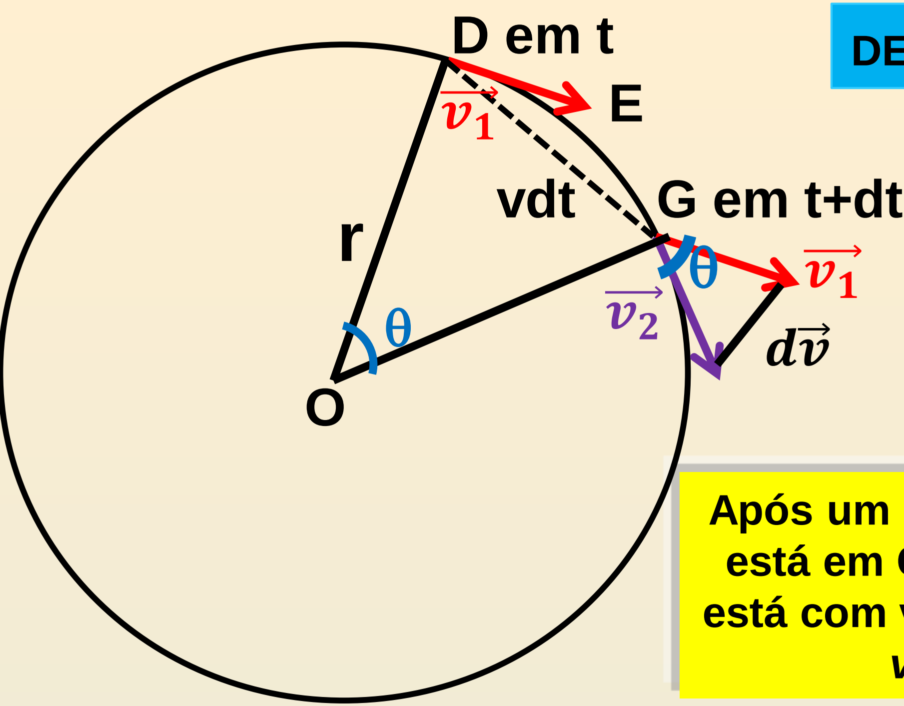

PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J.S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

DETERMINAÇÃO DA $a_{centrípeta}$



No instante *t* a partícula está em D, com velocidade $\underline{V}_1$ de módulo v na direção DE. Pela 1ª. lei de Newton, se não existe uma força agindo sobre o corpo, ele continuará em movimento na direção DE.

Após um intervalo de tempo *dt*, a partícula está em G, e percorreu a distância *v.dt*, e está com velocidade $\underline{V}_2$, de mesmo módulo *v*, mas em outra direção.

Considerando infinitésimos Δt=dt e Δv=dv e θ o ângulo entre D e G.

θ é também o ângulo entre $\vec{v_1}$ e $\vec{v_2}$, já que as mesmas são ⊥ a OD e OG respectivamente.

Considerando θ pequeno (rad):

$$\theta = \frac{v\Delta t}{r}$$

$$\theta = \frac{\Delta v}{v}$$

$$\boxed{a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}$$

Se a partícula tem massa m, a força central necessária para produzir uma aceleração é:

$$F = m\frac{v^2}{r}$$

A dedução é válida se Δv e Δt forem extremamente pequenos e é um exemplo da aplicação do <u>cálculo diferencial</u>, que foi desenvolvido pela primeira vez por Newton [e simultaneamente por Gottfried Wilhelm von Leibniz (1646-1716)].

LEI DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

Newton inferiu de que a força obtida se estendia até a Lua $\Rightarrow$ produz a aceleração centrípeta necessária para manter a Lua em órbita $\Rightarrow$ o mesmo vale para o Sol e os planetas.

$\Downarrow$

Hipótese da existência de uma força de atração universal entre os corpos em qualquer parte do Universo.

A força centrípeta que o Sol exerce sobre um planeta de massa *m*, que se move com velocidade *v* à uma distância *r* do Sol é :

$$\boxed{F = m\frac{v^2}{r}}$$

Assumindo uma órbita circular: $v = \frac{2\pi r}{P}$ **onde P é o período**

LEI DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

$$v = \frac{2\pi r}{P} \Rightarrow F = \frac{4\pi^2 r^{\cancel{2}}}{P^2 \cancel{r}} m = \frac{4\pi^2 r}{P^2} m \quad (1)$$

Pela 3ª lei de Kepler: **O quadrado do período do movimento orbital do planeta é proporcional ao cubo do seu eixo semi-maior.**

$$K = \frac{r^3}{P^2}$$

K depende das unidades de P e r

Substituindo P em (1): $$F = \frac{4\pi^2 K}{r^2} m \quad (2)$$

De acordo com a 3ª lei (ação e reação) o planeta exerce uma força igual intensidade e de direção contrária sobre o Sol, ou seja:

$$F = \frac{4\pi^2 K'}{r^2} M$$

Logo: $$\frac{4\pi^2 K}{M} = \frac{4\pi^2 K'}{m} \Rightarrow \boxed{\frac{4\pi^2 K}{M} = G} \quad (3)$$ **é uma constante**

Substituindo (3) em (2) : $$\boxed{F = G\frac{Mm}{r^2}}$$

LEI DA GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

$$F = G\frac{Mm}{r^2}$$

onde G é uma constante de proporcionalidade.

G **= 6,67 x 10^{-11} N m^2/kg^2**

A constante de proporcionalidade *G* depende das unidades das massas e distância.

• Tanto o Sol quanto o planeta que se move em torno dele experimentam a mesma força, mas o Sol permanece aproximadamente no centro do Sistema Solar porque a massa do Sol é muito maior.

O planeta e o Sol atuam um sobre o outro com a mesma força gravitacional, mas a aceleração do Sol é muito menor.

•Conclusão de Newton: existe uma força atrativa entre pares de objetos em qualquer região do universo, e esta força deve ser proporcional as suas massas e inversamente proporcional ao quadrado de suas distâncias.

LEIS DE KEPLER REVISTAS

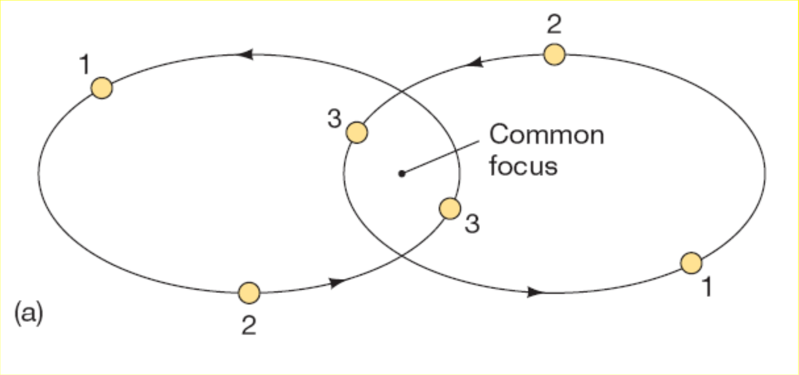
Explicação teórica das leis empíricas de Kepler $\Rightarrow$ leis de Newton do movimento e da gravitação.

Correções para a 1ª e a 3ª leis de kepler

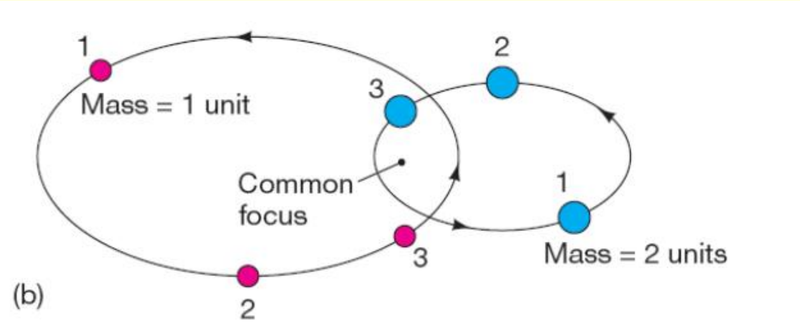
1a lei: A órbita do planeta ao redor do sol é uma elipse com o CENTRO DE MASSA do sistema planeta-sol ocupando um dos focos.

LEIS DE KEPLER REVISTAS

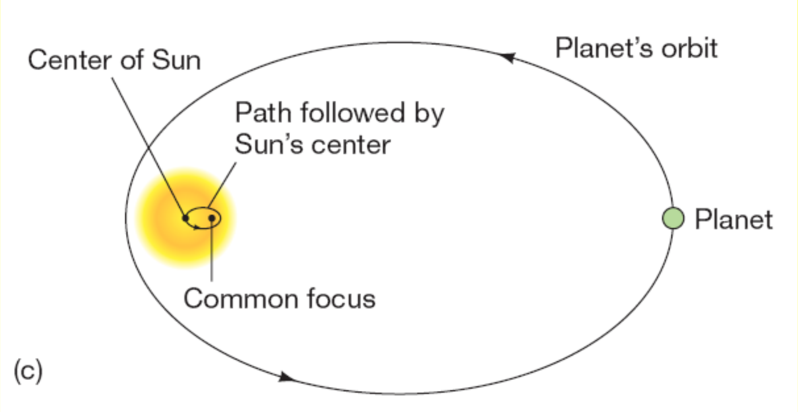
a) mesma m: órbitas são elipses idênticas com o foco comum (CM) situado entre os dois objetos (mesma distância no periélio)



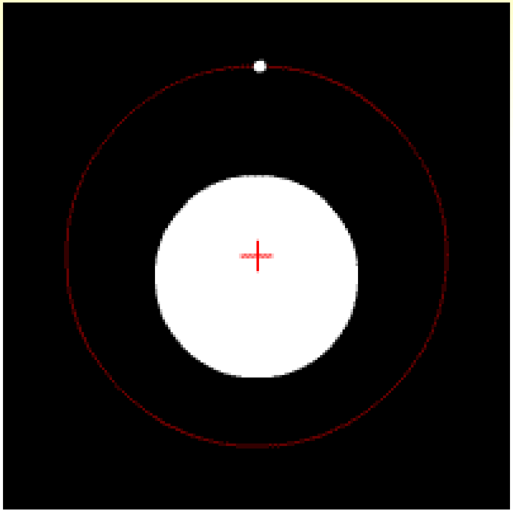
b) M > m : foco comum e elipses com mesma excentricidade, M move-se mais lentamente numa órbita menor. CM situada mais perto de M (no periélio).



LEIS DE KEPLER REVISTAS

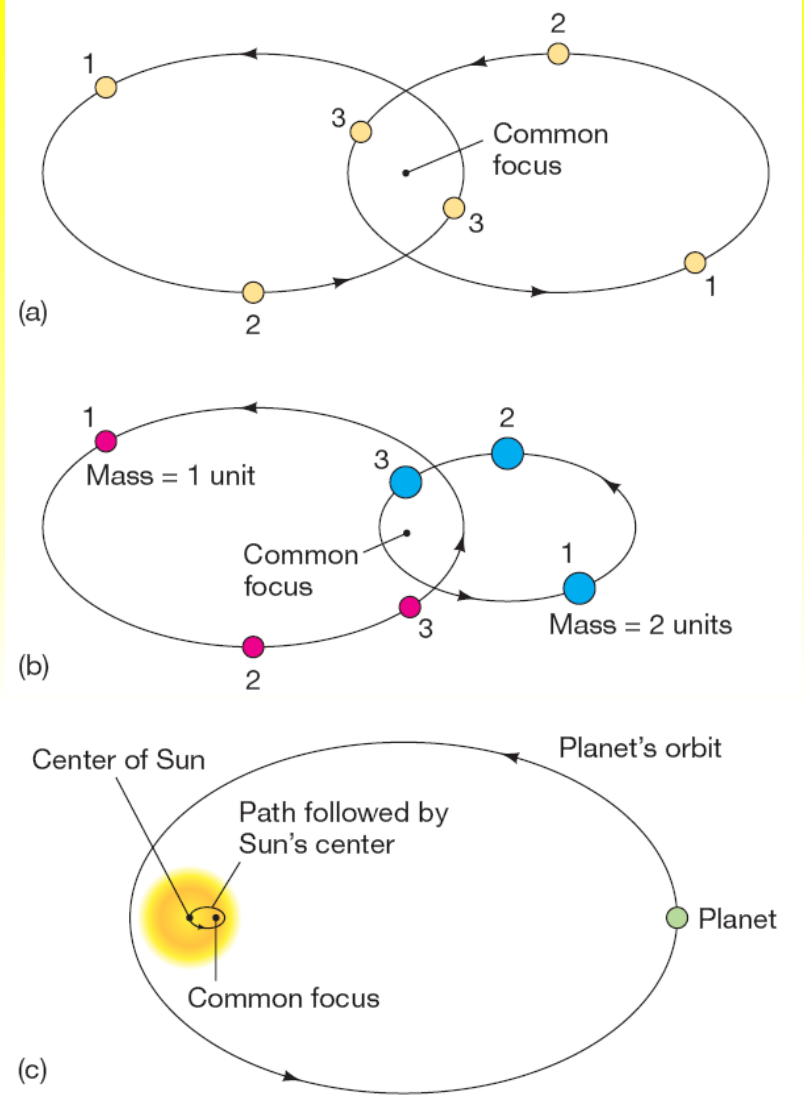


c) M >> m : CM (foco) muito próxima ao centro do Sol (por isso 1a lei de kepler válida para sistema sol-planeta!)



LEIS DE KEPLER REVISTAS

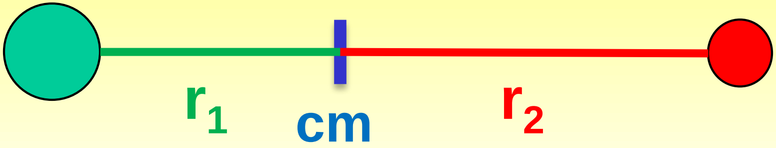
b) 2a lei se aplica sem modificações para cada órbita separadamente.



LEIS DE KEPLER REVISTAS
(3a lei)

Derivação da constante K:

Supondo dois corpos m_1 e m_2 num sistema isolado, separados do centro de massa por r_1 e r_2 :



As equações de movimento destes dois corpos podem ser dadas por :

$$\vec{F}_{12} = m_1\vec{a}_1$$

$$\vec{F}_{21} = m_2\vec{a}_2$$

A aceleração do cm de um sistema isolado é zero : $m_1\vec{a}_1 + m_2\vec{a}_2 = 0$

$$F_{12} = -F_{21}$$

LEIS DE KEPLER REVISTAS

Derivação da constante K:

O problema de duas massas pode ser reduzido a um problema de uma massa com aceleração $\vec{a}_{12} = \vec{a}_1 - \vec{a}_2$

$$F_{12} = -F_{21} \quad \Rightarrow \quad a_{12} = \frac{F_{12}}{m_1} - \frac{F_{21}}{m_2} = \frac{F_{12}}{m_1} + \frac{F_{12}}{m_2}$$

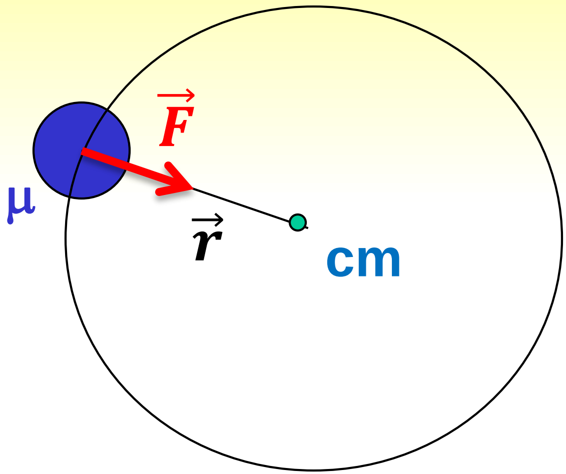
$$\vec{a}_{12} = \vec{F}_{12}\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}\right) \qquad \frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2}$$

Onde μ é a massa reduzida do sistema, a equação do movimento fica:

$$\mu\vec{a}_{12} = \vec{F}_{12}$$

Derivação da constante K:

O movimento relativo de duas partículas submetidas unicamente a sua interação mútua é equivalente ao movimento relativo a um observador inercial de um corpo de massa = μ sob ação de uma força = F_G.



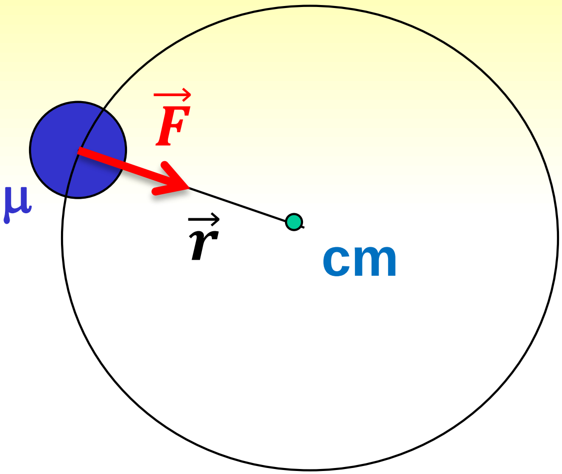
Usando a lei da Gravitação Universal:

$$\boxed{\mu\vec{a} = G\frac{m_1 m_2}{r^2}\hat{r}}$$

Derivação da constante K:

Escrevendo a aceleração em função da velocidade linear:

$$\mu \frac{\mathrm{v}^2}{r} = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$$



Sabendo que o período de uma órbita circular vale: $\mathrm{P} = \dfrac{2\pi \mathrm{r}}{\mathrm{v}}$

Substituindo v acima:

$$\left(\frac{\cancel{m_1} m_2}{m_1 + m_2}\right) \frac{4\pi^2 \cancel{r^2}}{P^2 \cancel{r}} = \frac{G \cancel{m_1} m_2}{r^2}$$

Derivação da constante K:

Então o período fica: $$P^2 = \underbrace{\boxed{\frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)}}}_{K} r^3$$

- Isso nos diz que a "constante" K, definida como a razão P^2/a^3, só é constante realmente se (m_1+m_2) permanece constante.

Derivação da constante K:

$$P^2 = \boxed{\frac{4\pi^2}{G(M_{sol} + m_{planeta})}} r^3$$

$K_\odot$

Isso é o que acontece no caso dos planetas do sistema solar: como todos têm massa << Sol (Júpiter m~0,001M$_\odot$) a soma da massa do Sol com a massa do planeta é sempre aproximadamente a mesma, independente do planeta.

Derivação da constante K:

$$P^2 = \underbrace{\boxed{\frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)}}}_{K} r^3$$

- **K depende da massa do sistema!**

Ex.: considerando júpiter e seus satélites ⇨ todos os satélites de Júpiter têm ~ a mesma razão $P^2/a^3 = K_J$

mas $K_J \neq K_\odot$.

MASSAS

As massas do Sol, planetas, estrelas podem ser estimadas usando a 3a lei de Kepler na forma derivada por Newton, ou seja:

$$(M + m) = \frac{4\pi^2}{G}\frac{a^3}{P^2}$$

Podemos estimar a massa de uma estrela/planeta se conhecermos os dados orbitais de um planeta/satélite que orbita em torno dela(e).

Unidades CGS: $G=4\pi^2$ UA^3/(M$_\odot$ano^2) ou $G=4\pi^2$ D$_{\oplus☽}$^{3}/(M$_\oplus$ mes$_{sid}$^{2})

- **M em M$_\odot$, P em anos terrestres e <u>a</u> em UA ou**
- **M em M$_\oplus$, P em meses siderais (estrelas fixas- 27,33 dias) e <u>a</u> em distância Terra-Lua**

Sendo $G/4\pi^2$ =1 UA^3/(M$_\odot$ano^2) = 1 D$_{\oplus☽}$^{3}/(M$_\oplus$mes$_{sid}$^{2})

$$(M + m) = \frac{a^3}{P^2}$$

Se M >> m ⇨ $M \sim \frac{a^3}{P^2}$

Para dar M em kg, as unidades deverão estar no MKS

G = 6,67 x 10^{-11} N m^2/kg^2

VELOCIDADE DE ESCAPE

A lei da gravidade que descreve as órbitas dos planetas ao redor do Sol também se aplica igualmente aos satélites naturais (luas) e satélites artificiais que orbitam qualquer planeta.

Velocidade de escape: v necessária para uma massa escapar de uma F_G.

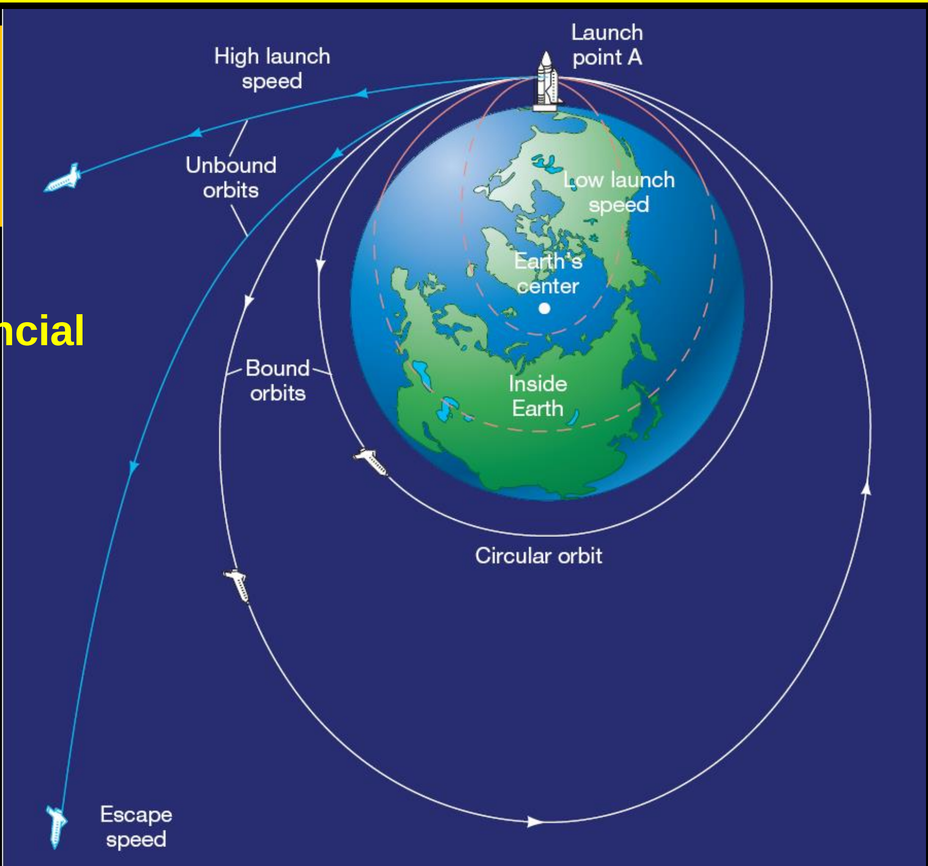
K = |U|

energia cinética = energia potencial

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{GmM}{R} \Rightarrow$$

$$v_{escape} = \sqrt{2GM/R}$$

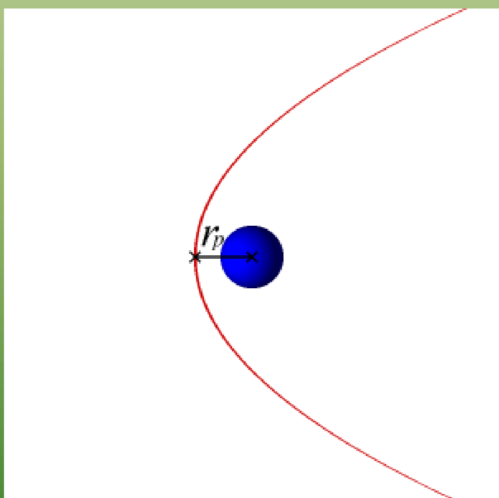
(m = massa do corpo)
M = massa do planeta
R = raio do planeta



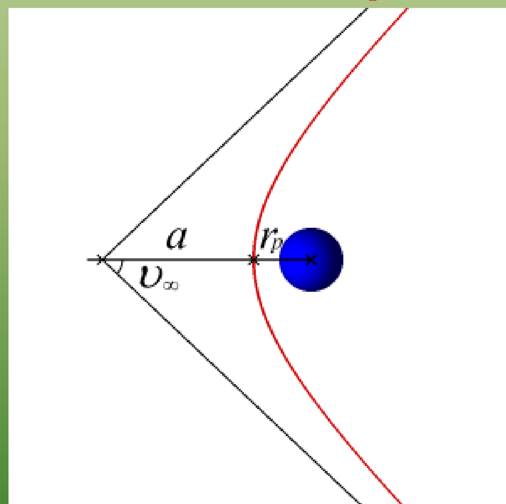
VELOCIDADE DE ESCAPE

Definição: velocidade com a qual o corpo chega com velocidade zero no infinito ($v \to 0$ em $r \to \infty$) $\Rightarrow$ órbita parabólica, já que energia resultante (E= K-|U|) = 0 e e=1.

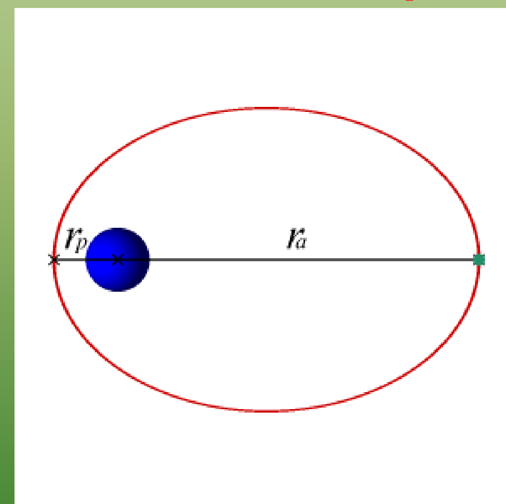
E=0 e e=1 parábola



E>0 e e > 1 hipébole



E<0 e e<1 elipse



e >=1 movimento infinito (não se repete)

Periódica = elipse

Velocidade de um satélite numa órbita circular um pouco acima da superfície de um planeta.

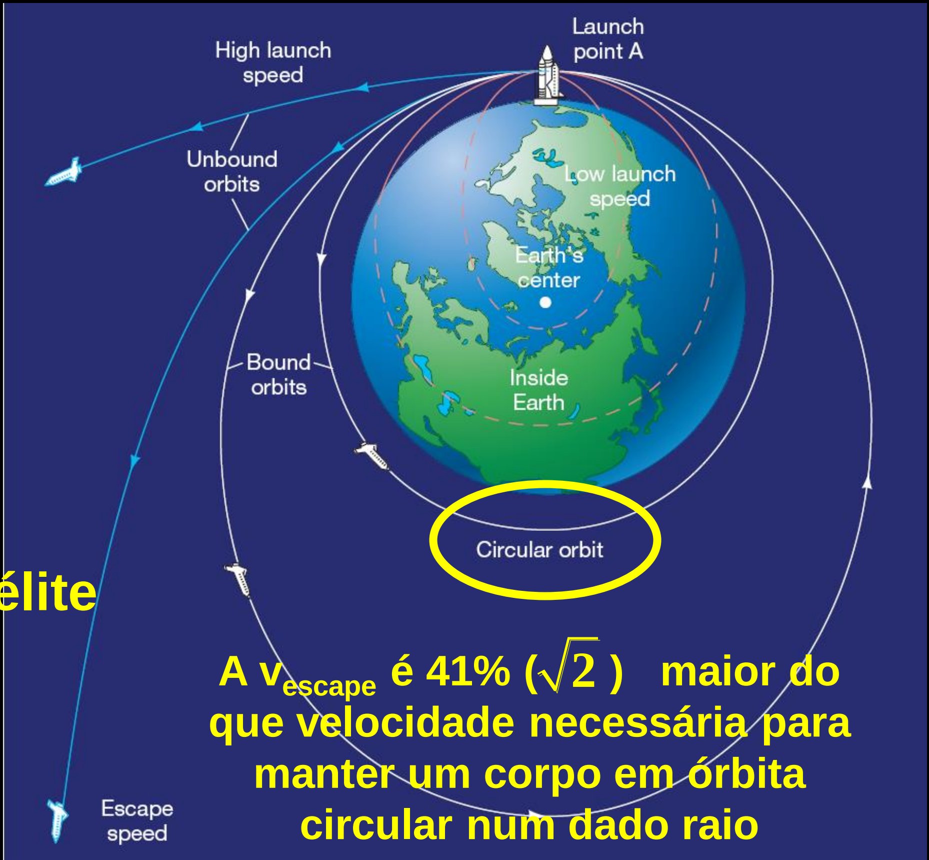
$$F_{centripeta} = F_{gravitacional}$$

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{GmM}{r^2} \Rightarrow$$

$$v = \sqrt{GM / r}$$

(m = massa do corpo)
M = massa do planeta
r = raio da órbita do satélite

$$v_{escape} = \sqrt{2GM / R}$$



A v_{escape} é 41% ($\sqrt{2}$) maior do que velocidade necessária para manter um corpo em órbita circular num dado raio

(Adaptado do curso AGA0215 da **Profa. Thais Idiart**)

Movimentos e fases da Lua

Fases da Lua

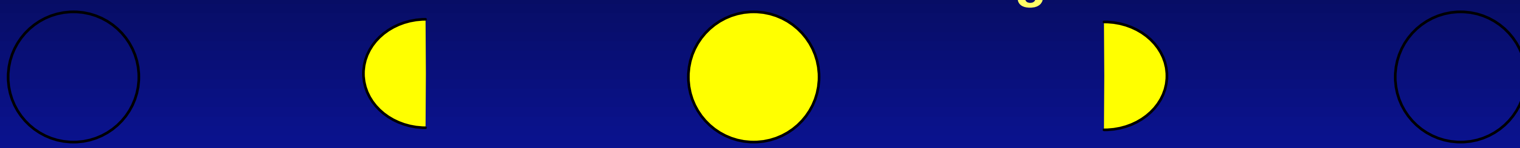
Nova

Quarto Crescente

Cheia

Quarto Minguante

Nova



Nova	Crescente	Cheia	Minguante

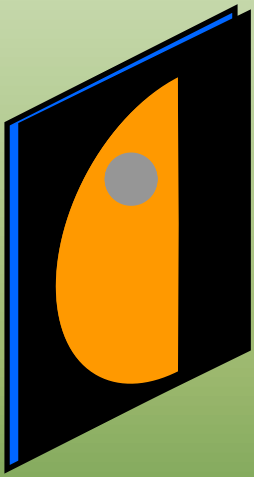
Crescente	Minguante

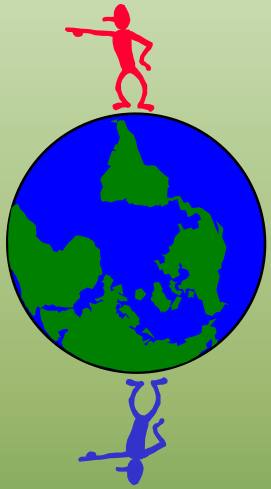
Lunação ou Mês Sinódico

29,530589 dias ~ 29 d 12 h 44 m 03 s

O período compreendido entre duas luas novas consecutivas é denominado de Lunação, ou Mês Sinódico, e dura aproximadamente 29,530589 dias. Isso permitiu que se agrupasse os dias em blocos de 29 ou 30, com o nome de **Mês Lunar**.

Visão da Lua

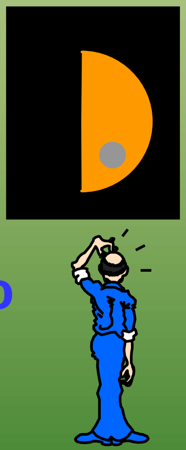




Hemisfério
Sul

Lua Quarto
Crescente

Hemisfério
Norte

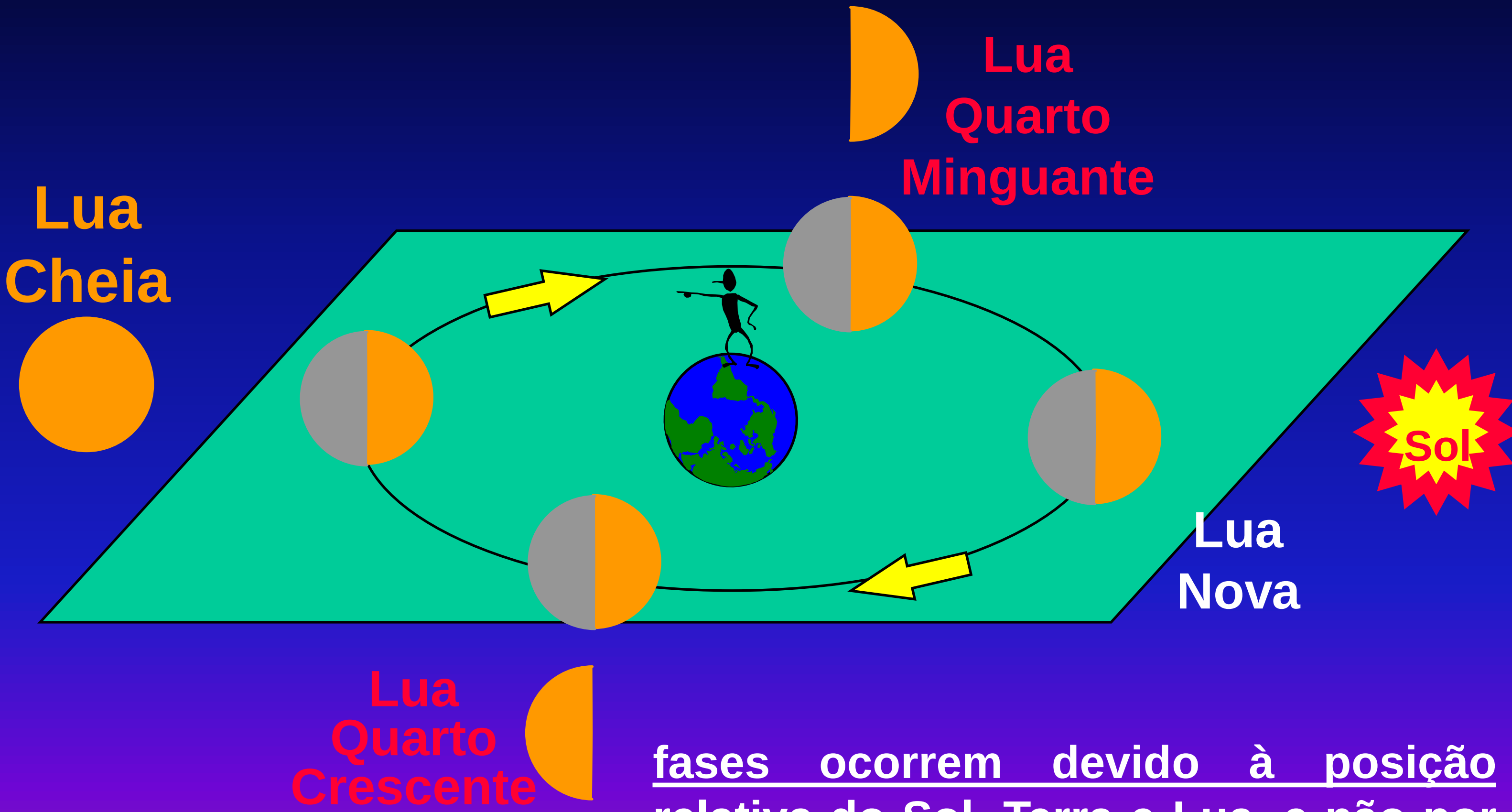


Lua Quarto
Crescente

No hemisfério Sul

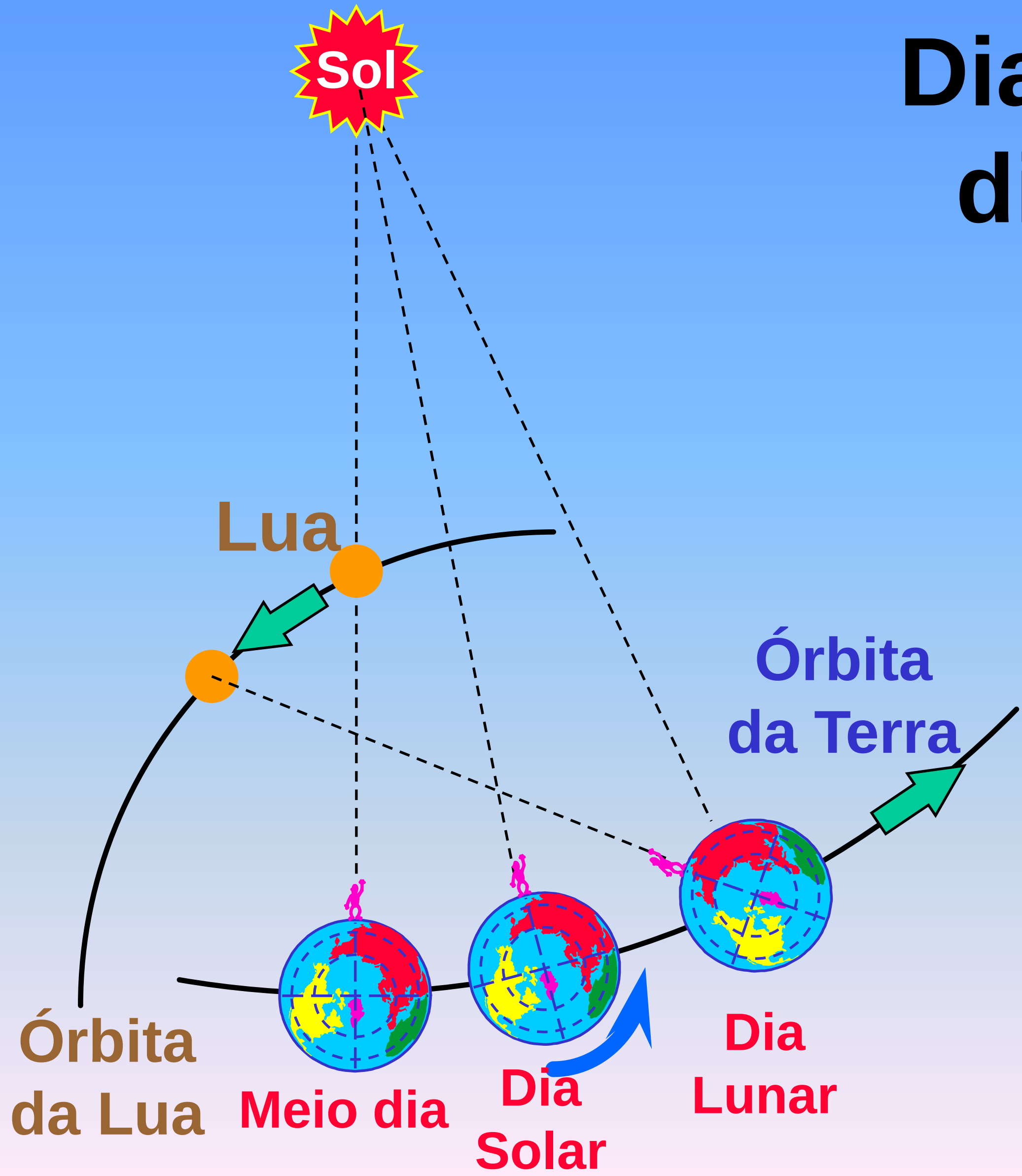
Lua Cheia	Lua Quarto Minguante	Lua Nova	Lua Quarto Crescente

Motivo das fases da Lua = ângulo formado no espaço entre o Sol + Terra + Lua



fases ocorrem devido à posição relativa do Sol, Terra e Lua, e não por estar a Lua mais ou menos iluminada.

Dia solar e dia lunar



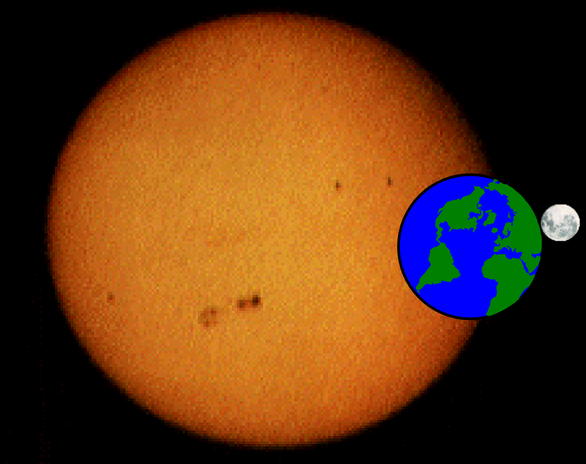
Dia Solar

24h00m00s

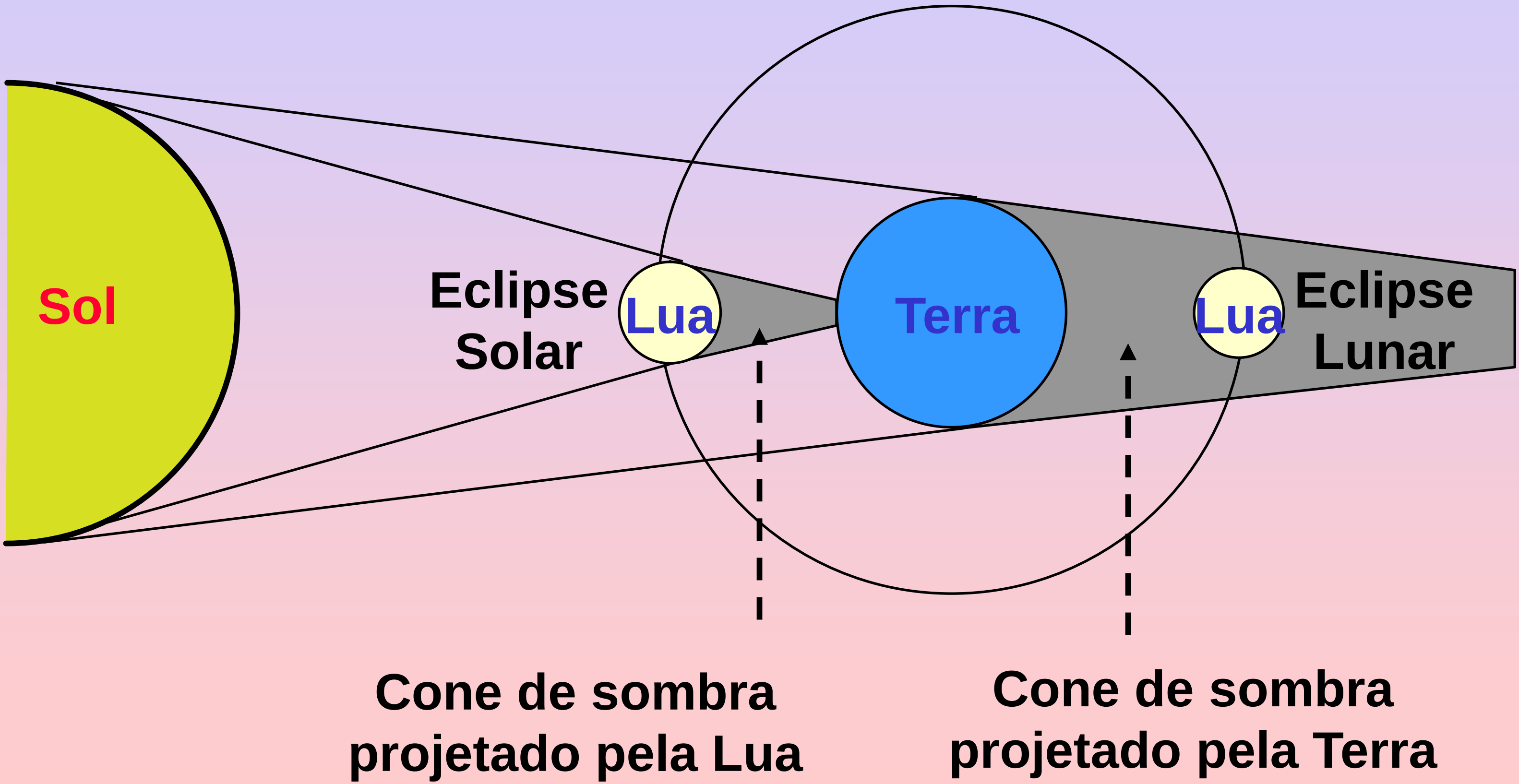
Dia Lunar

24h50m28s

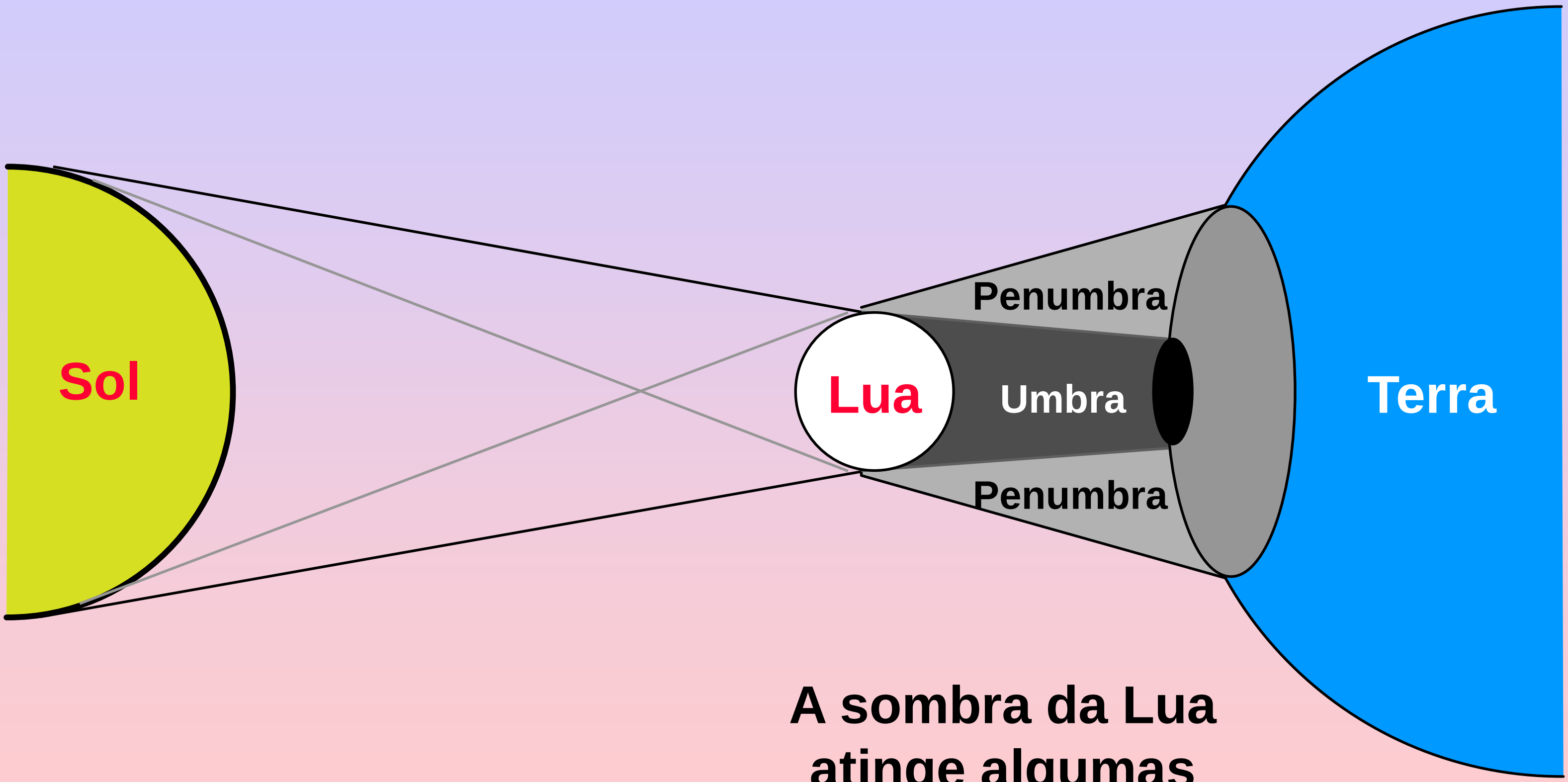
Eclipses



Tipos de Eclipses

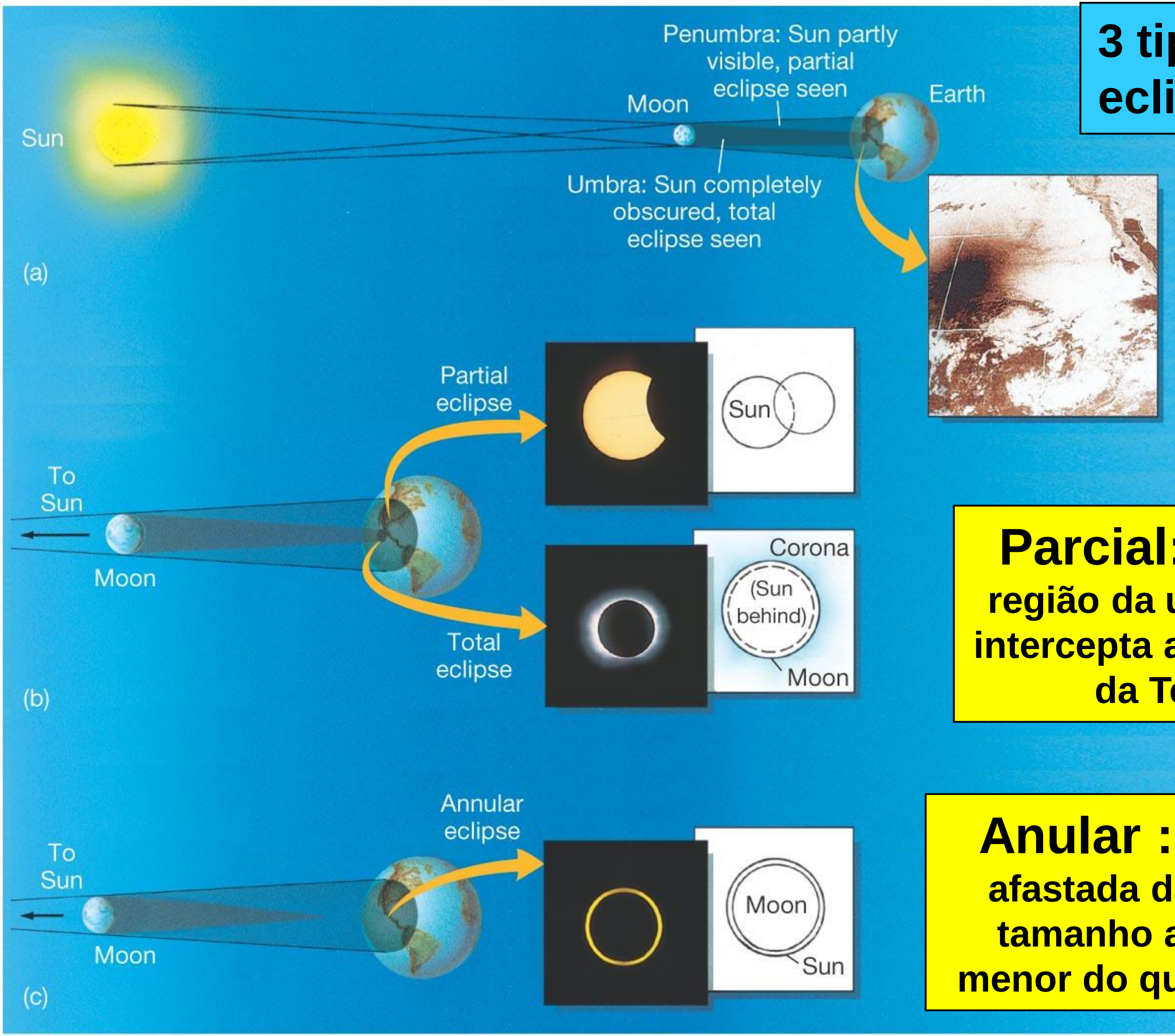


Eclipse Solar



A sombra da Lua atinge algumas regiões da Terra

3 tipos de eclipse solar

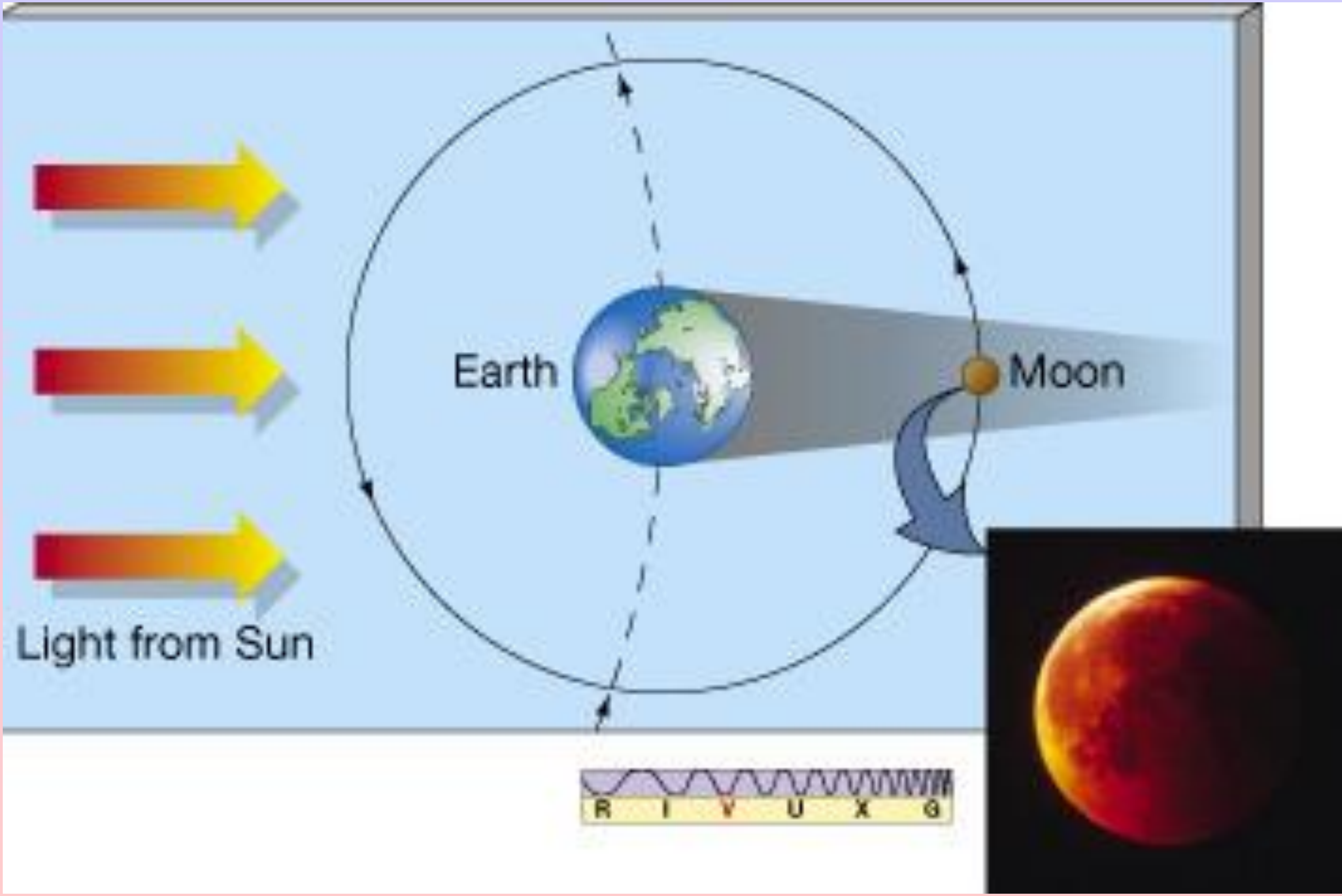


Total

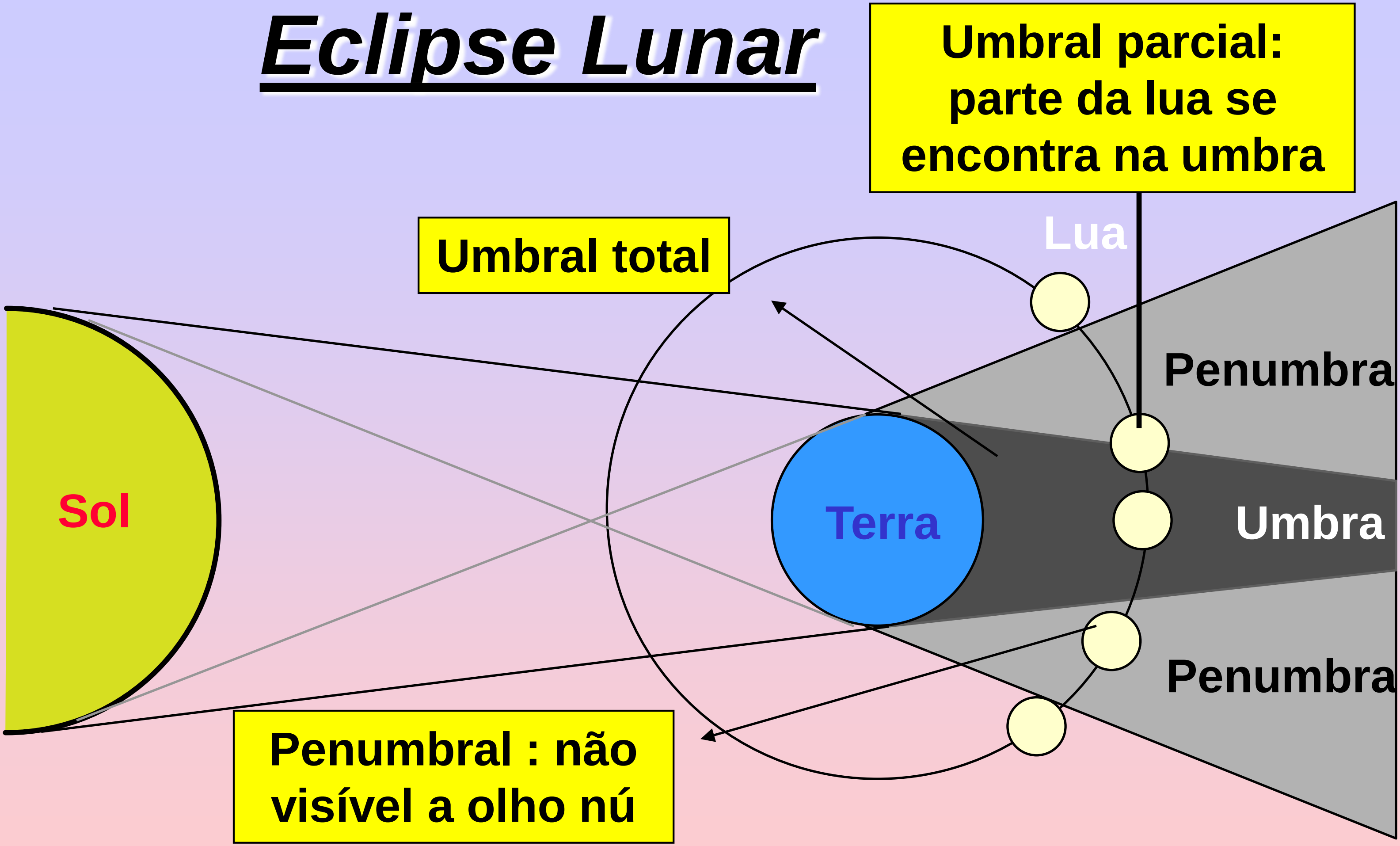
Parcial: parte da região da umbra não intercepta a superfície da Terra.

Anular : lua mais afastada da Terra = tamanho aparente menor do que o do sol

Eclipse Lunar

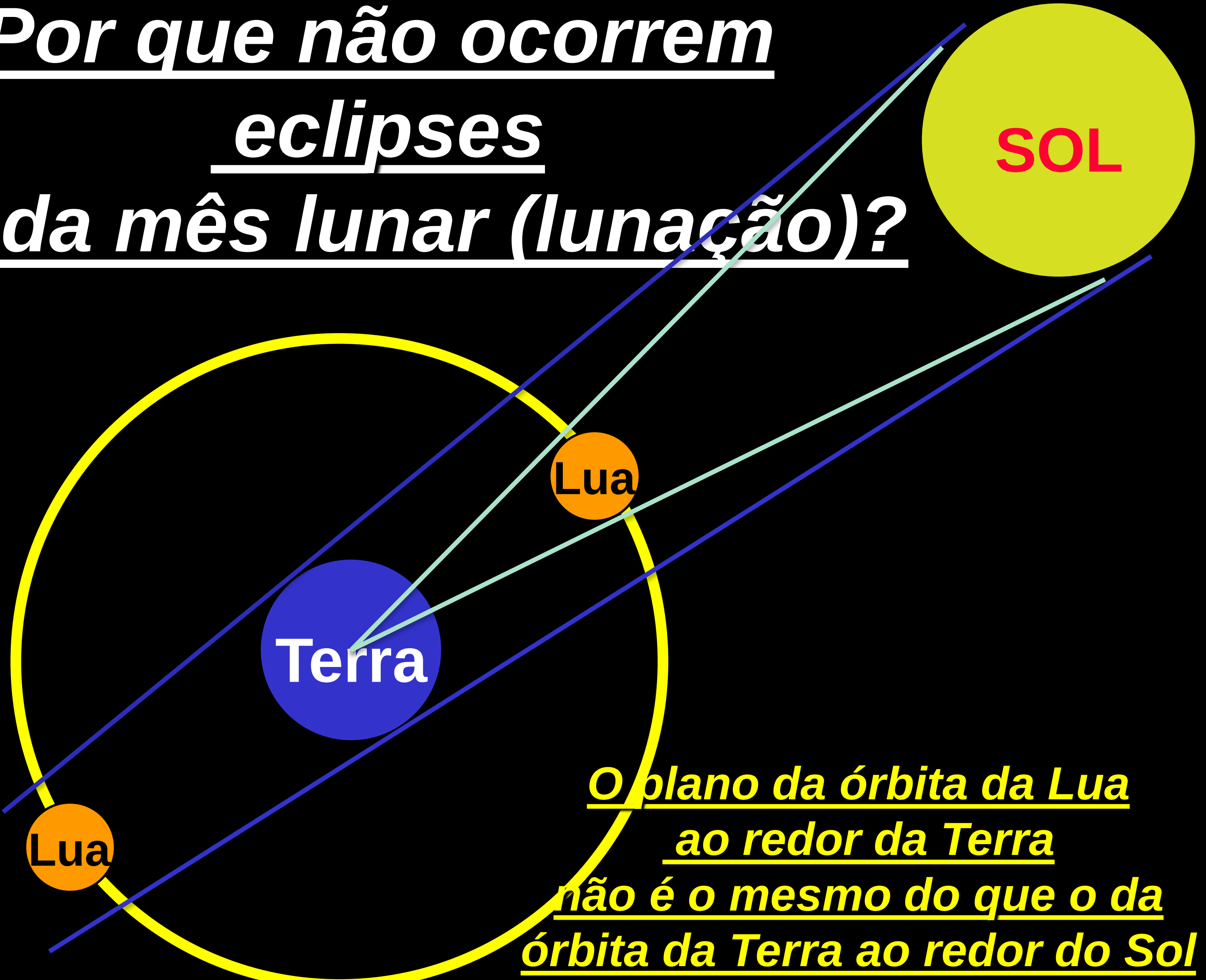


Eclipse Lunar



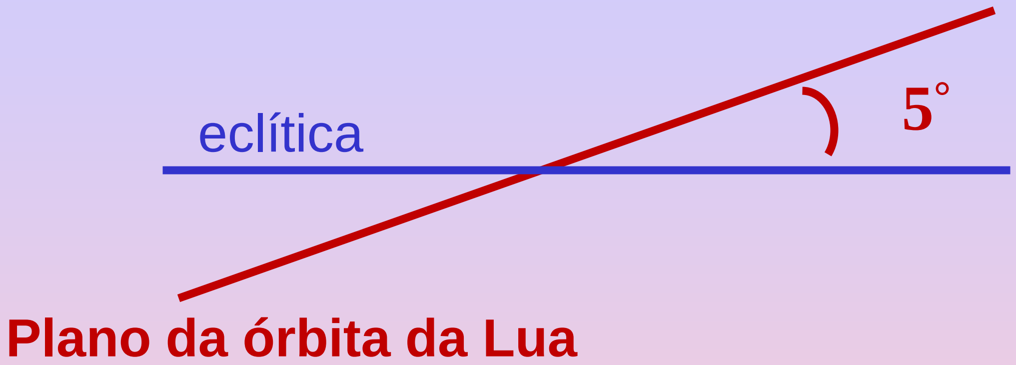
A Terra projeta um cone de sombra (umbra) no espaço

Por que não ocorrem eclipses a cada mês lunar (lunação)?

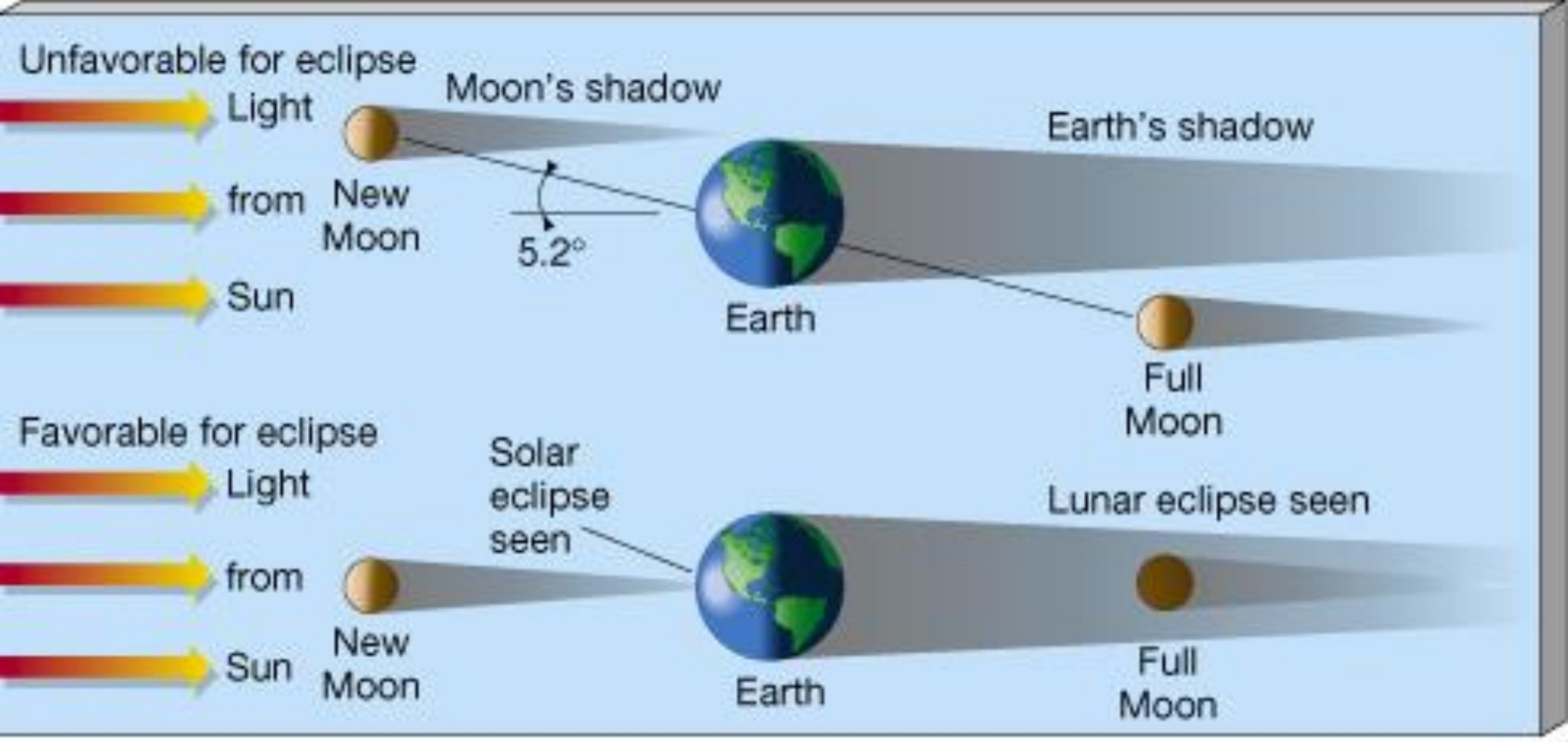


O plano da órbita da Lua ao redor da Terra não é o mesmo do que o da órbita da Terra ao redor do Sol

O plano da órbita da Lua em torno da Terra não é o mesmo da órbita da Terra ao redor do Sol: há uma diferença de 5°.



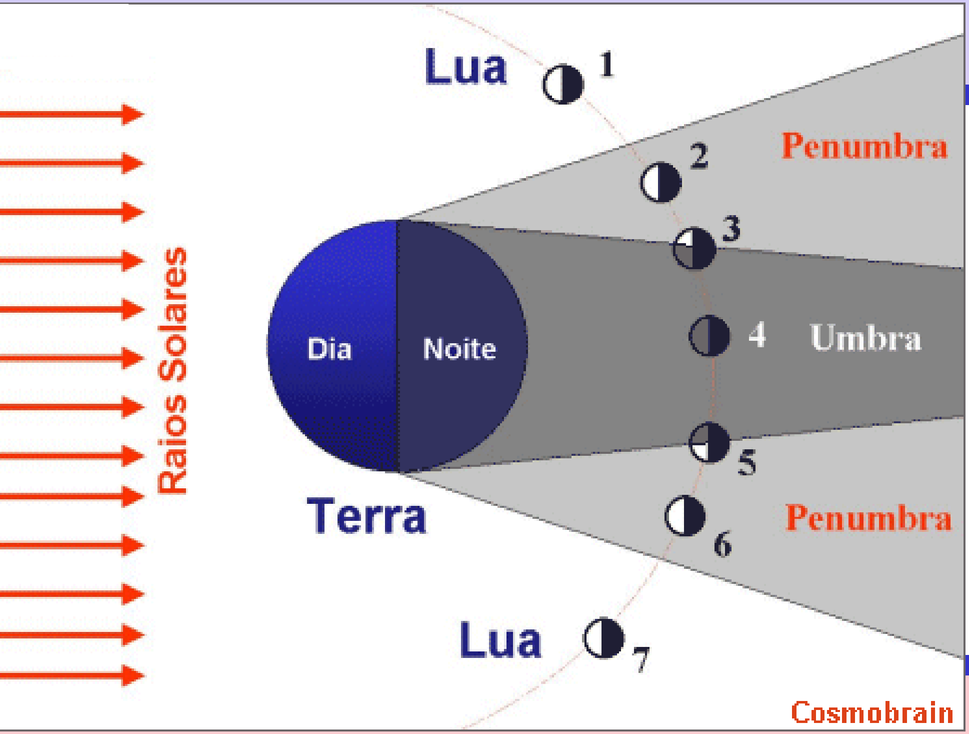
- ⇒ **a Lua pode não estar exatamente entre o Sol e a Terra quando temos Lua Nova, mas um pouco acima ou um pouco abaixo.**
- ⇒ **Apenas em alguns casos acontece o alinhamento dos três astros ⇨ e aí teremos um eclipse.**



<u>Nem toda a lua nova ocorre eclipse solar, nem toda a lua cheia ocorre eclipse lunar</u>.

Apenas quando a reta interseção entre esses dois planos (translação da Terra e da Lua) passar pelo Sol ⇨ **algumas vezes por ano podemos ter um eclipse.**

Eclipse lunar



A atmosfera terrestre também funciona como um filtro: deixa passar a componente vermelha da luz solar em direção à Lua e espalha a componente azul.

Wednesday, 31 January 2018
11:50am UK
06:50am New York, USA
03:50am Los Angeles, USA
Thursday, 1 February 2018
12:50am NZ
(31st) 10:50pm Sydney, AU
(31st) 07:50pm Perth, AU
N
E
Astronomy Now

Esfericidade da Terra

Lua Cheia

Aristóteles (384-322 ac)

Lua

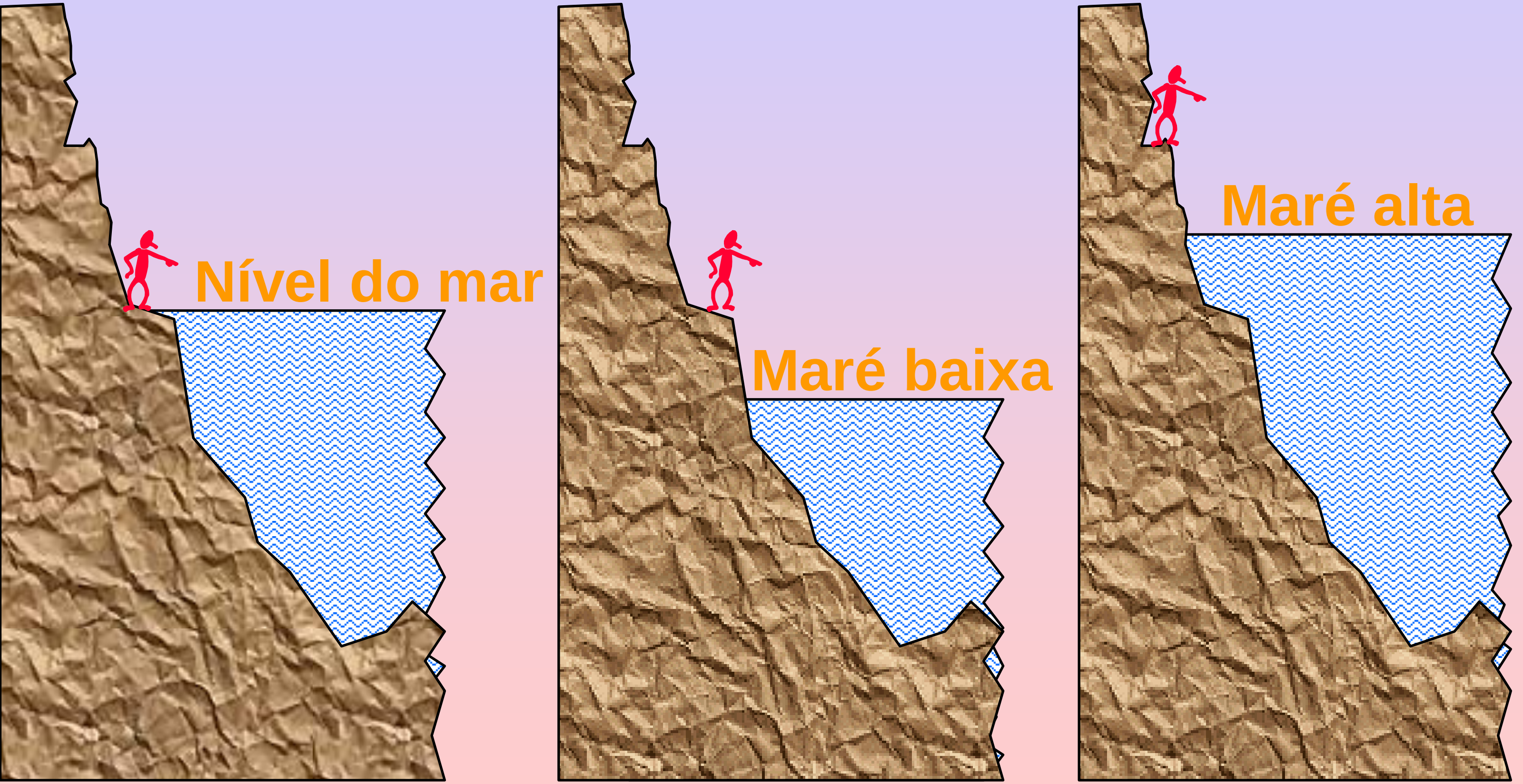
Durante um eclipse lunar (umbral parcial) vemos a sombra da Terra projetada na Lua

Sombra da Terra

FORÇAS DE MARÉ

Observando o nível do mar

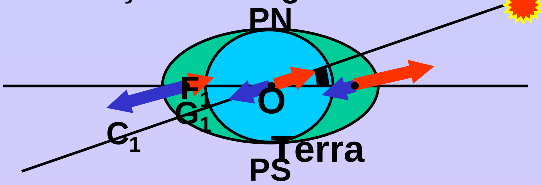
Causa das marés : força gravitacional exercida pela Lua e Sol sobre a Terra (Sol o efeito é menor)

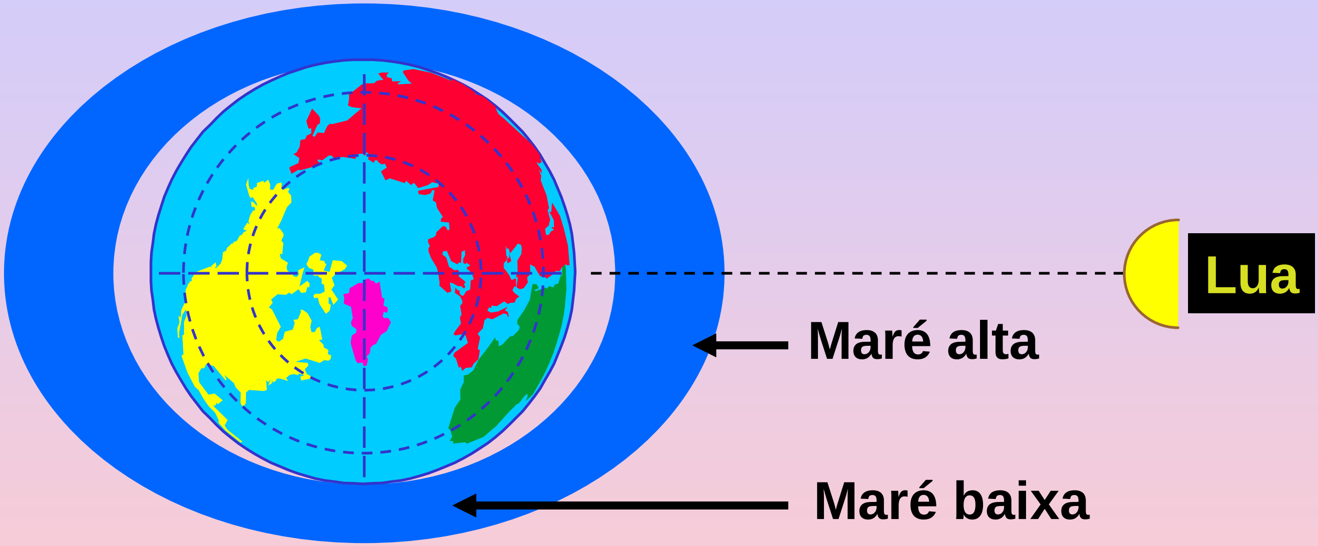


Forças causadoras das Marés

F = força gravitacional (Sol –Terra)

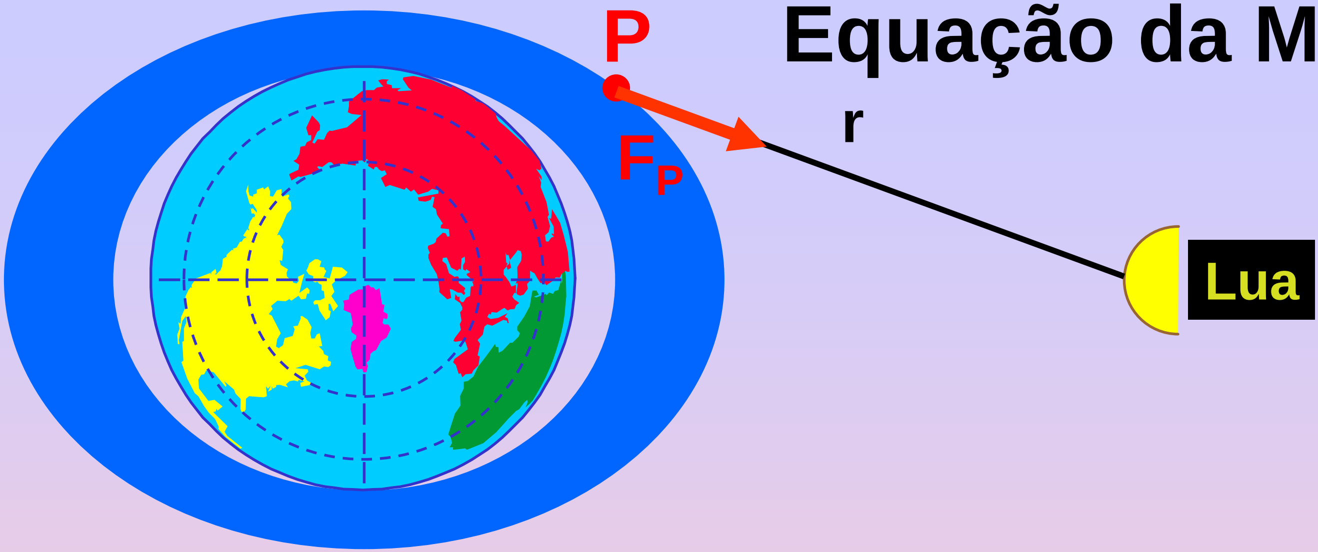
C = força centrífuga devido à translação





As marés variam diariamente em qualquer ponto da Terra ⇨ a Terra gira: um dado ponto é levado até uma região de maré alta ou baixa.

Equação da Maré



1) Considerando a força gravitacional sentida por uma massa no ponto P situada a uma distância r da Lua:

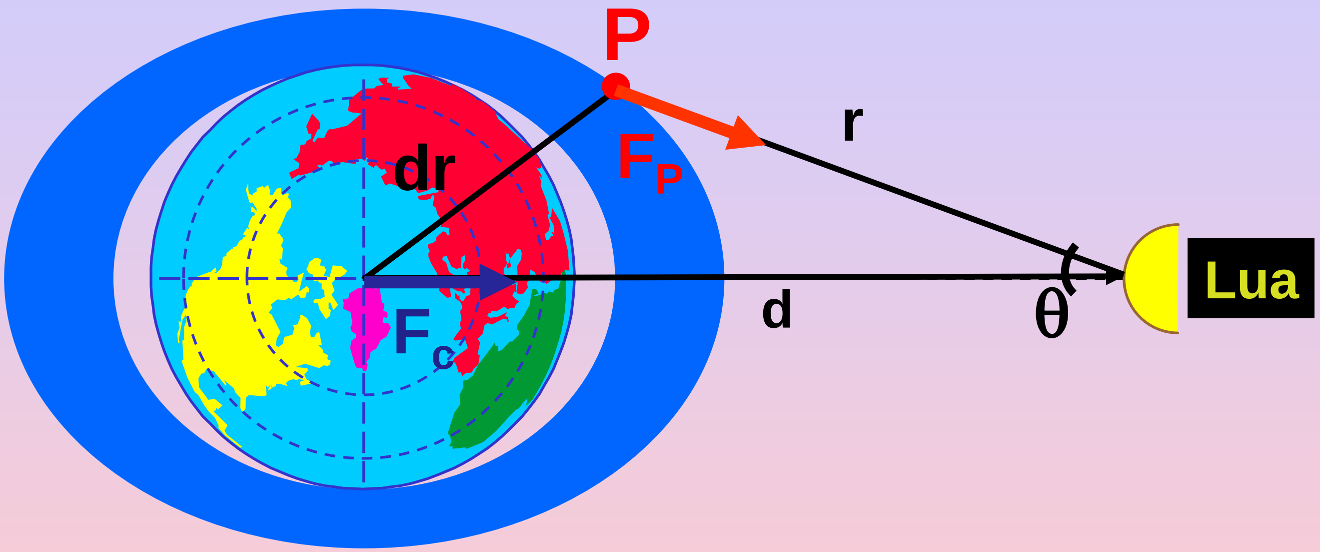
$$F = -\frac{G M_{☾} m}{r^2}$$

m = massa de uma partícula em P

$M_{☾}$ = massa da Lua

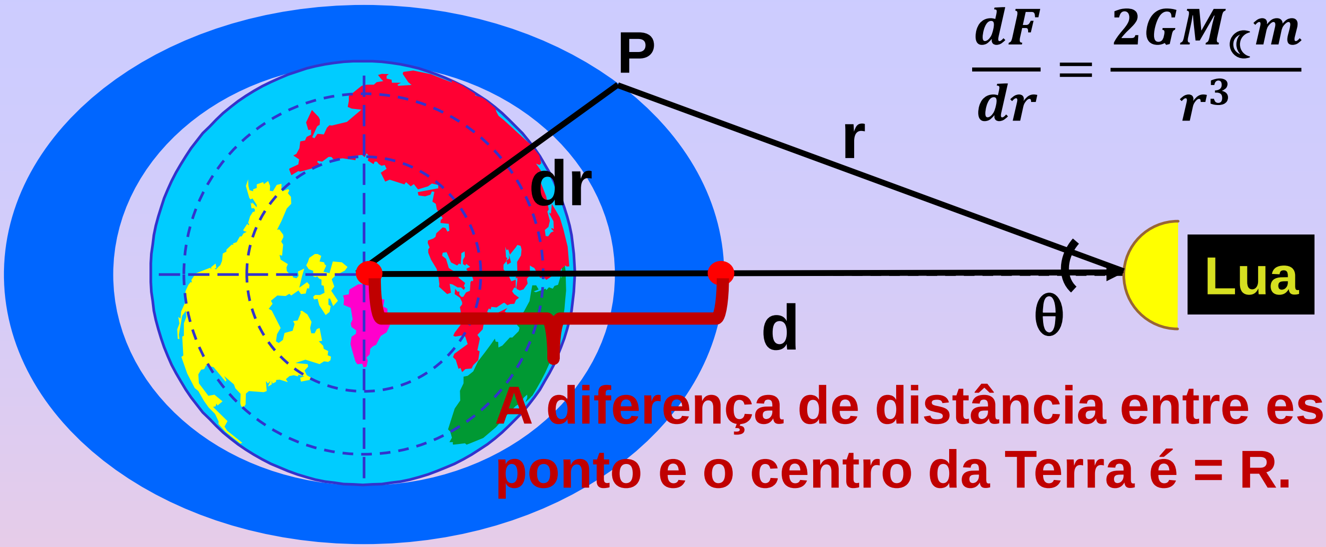
r = distância P-Lua

Podemos calcular a força diferencial em qualquer ponto P em relação ao centro da Terra dF = F_P – F_c :



$$\frac{dF}{dr} = GM_{☾}m\frac{d(-\frac{1}{r^2})}{dr} = \frac{2GM_{☾}m}{r^3}$$

onde dr é a separação dos pontos nos quais queremos calcular a força diferencial dF.



$$\frac{dF}{dr} = \frac{2GM_{☾}m}{r^3}$$

A diferença de distância entre esse ponto e o centro da Terra é = R.

A variação máxima nessa força acontece para os pontos que estão sobre a superfície da Terra, na direção que une os centros da Terra e da Lua ($\theta \rightarrow 0$).

$$dr \sim R \;\; e \;\; r \sim d \; (R \ll d)$$

A máxima aceleração de Maré:

$$\frac{dF}{m} = \frac{2GM_{☾}R}{d^3}$$

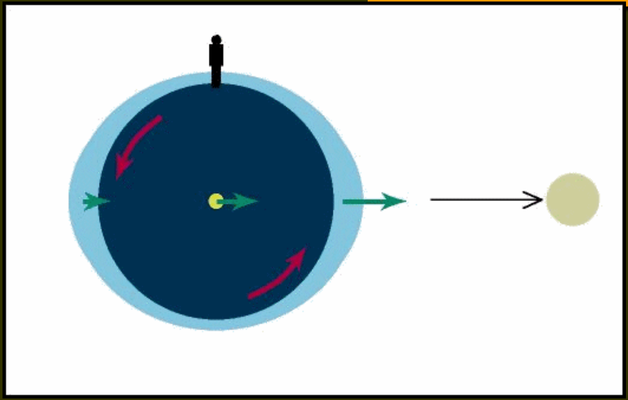
COMPARAÇÃO SOL-LUA

$$dF = \frac{2GmMR}{d^3}$$

- $M_{\odot} = 1{,}9887973 \times 10^{30}$ kg
- $M_{☾} = 7{,}3474271 \times 10^{22}$ kg
- $d_{☾} = 384.000$ km
- $d_{\odot} = 1{,}5 \times 10^{8}$ km

$$dF_{☾} \sim 2 \times dF_{\odot}$$

Sequência da Maré



1) Enquanto a Terra gira no seu movimento diário: o bojo de água continua sempre apontando aproximadamente na direção da Lua.

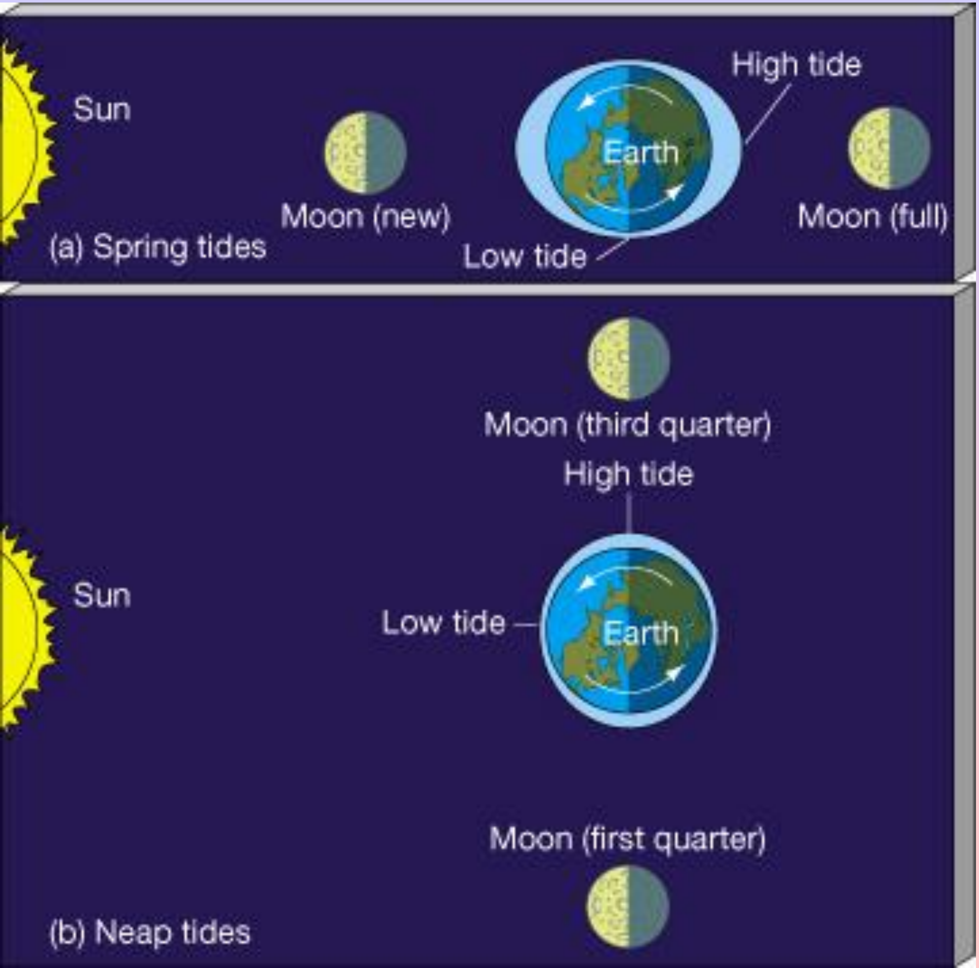
2) Em um dado tempo, um certo **ponto da Terra estará em maré alta**.

3) 6h 12m 30s mais tarde, a rotação da Terra terá levado esse ponto a 90° da Lua ⇨ maré baixa.

4) Depois de + 6h 12m 30s , o mesmo ponto estará a 180° da Lua ⇨ maré alta novamente.

5) Portanto **as marés alta e baixa acontecem duas vezes a cada 24h 50m, que é a duração do dia lunar**.

<u>Seqüência da Maré</u>



Efeito combinados do Sol + Lua ⇨ Luas Nova e Cheia produzem as <u>marés mais altas</u>

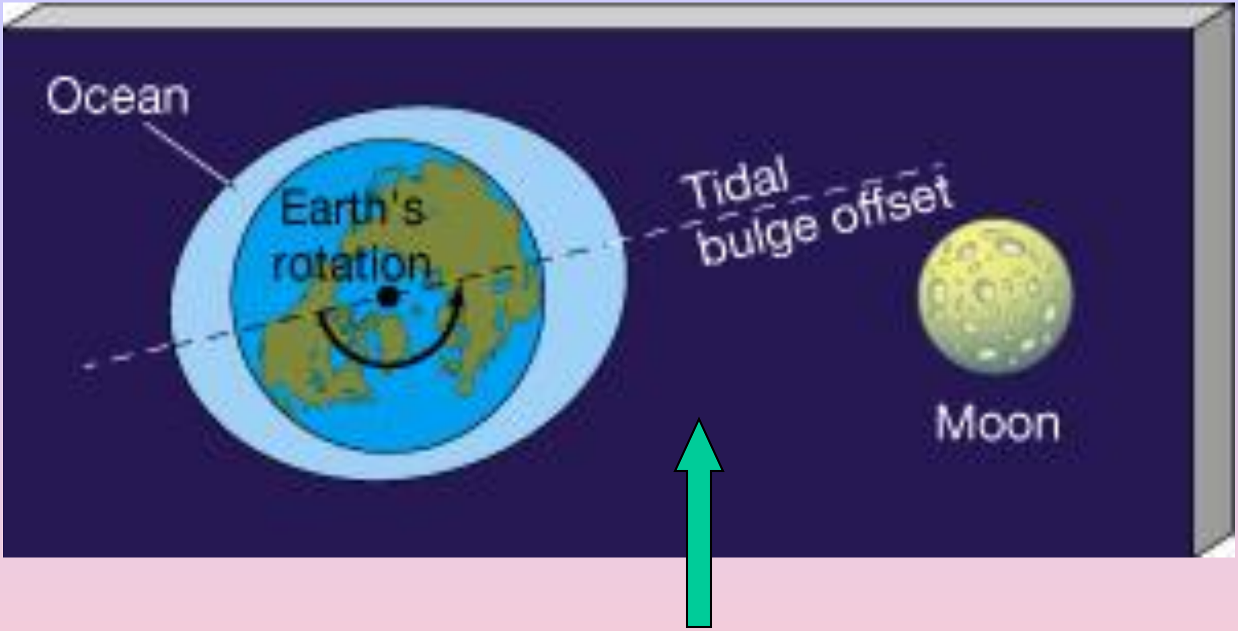
Efeito combinados do Sol + Lua ⇨ Luas Quarto Crescente e Quarto Minguante produzem as marés <u>um pouco mais baixas</u> nos pontos onde deveriam estar mais altas.

Efeitos das Marés

O atrito das águas com o fundo dos oceanos + força gravitacional da Lua causam a desaceleração da rotação da Terra.

1) <u>A massa de água mais alta (bojo) não aponta diretamente para a Lua.</u> Efeitos de atrito da crosta terrestre com os oceanos fazem com que a rotação da Terra mova o bojo junto com a mesma. Isso causa um deslocamento do bojo de um pequeno ângulo em relação a linha Terra-Lua, na mesma direção da rotação.

Efeitos das Marés



2) O efeito líquido da força gravitacional da Lua é reduzir a velocidade de rotação da Terra. Taxa = 1,5 ms por século. Aumenta o dia em 0,002 segundos por século.

Este processo continuará até a Terra rotar com a mesma velocidade com que a Lua gira em torno da Terra: rotação síncrona. Terra terá a mesma face voltada para a Lua. Alguns bilhões de anos para que isso ocorra.

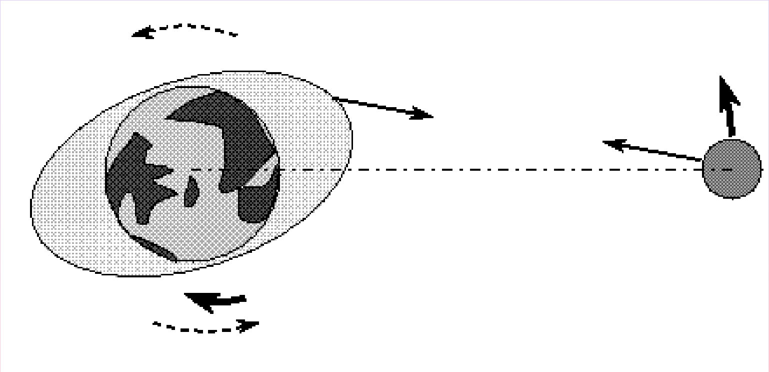
Efeitos das Marés

3) Ao mesmo tempo a Lua vai "espiralando" cada vez mais para longe da Terra, afastando-se na taxa de 4 cm por ano.
Período de rotação (síncrona) da Terra = 47 dias (dia e mês de mesma duração) e distância Terra-Lua = 43% maior que a atual (~549.000 km [hoje 384.000 km]).

⬇

<u>Conservação do momentum angular do sistema Terra-Lua</u>: se o momentum angular de rotação da Terra diminui → Lua aumenta o seu momentum angular orbital.

- **A força que "empurra" a Lua para fora é a gravidade exercida pelo bojo de maré mais próximo da Lua, que fica sempre um pouco "adiantado" em relação à Lua porque é arrastado junto com a Terra no movimento de rotação.**
- **A massa de água do bojo acelera a Lua, que ganha velocidade tangencial, se afastando da Terra.**



- Daqui a alguns bilhões de anos, a sincronização da órbita da Terra com a Lua implicará em que o dia e o mês terão a mesma duração, que será igual a aproximadamente **47 dias atuais**.

Conservação do Momentum angular total

$$\vec{l}_{total} = \vec{l}_{\oplus}^{rotação} + \vec{l}_{Lua}^{rotação} + \vec{l}_{Lua-\oplus}^{revolução}$$

Se o $\vec{l}_{\oplus}^{rotação}$ da Terra diminui ($\vec{l}_{Lua}^{rotação}$ constante) ⇒ Lua aumenta seu momentum angular orbital (revolução) .

$$\vec{l}_{Lua-\oplus}^{revolução} = m \cdot \vec{r} \times \vec{v}$$

Onde r é o raio da órbita e v a velocidade orbital.

Como $v = \frac{2\pi r}{P}$ e $P^2 = Kr^3$, então:

$$v = \frac{2\pi r}{K^{1/2} r^{3/2}} = \frac{2\pi r}{K^{1/2}} r^{-1/2} \quad \Rightarrow l = m \frac{2\pi}{K^{1/2}} r \cdot r^{-\frac{1}{2}} = m \frac{2\pi}{K^{1/2}} r^{1/2}$$

$$l_{Lua-\oplus}^{revolução} = m \frac{2\pi}{K^{1/2}} r^{1/2}$$

$$l_{Lua-\oplus}^{revolução} \propto r^{1/2}$$

Ou seja, para aumentar l é necessário aumentar r, compensando assim a redução do momentum angular de rotação.

RESUMINDO ....
CONSEQUÊNCIAS DAS FORÇAS DE MARÉS DA LUA

- **Precessão do eixo de rotação da Terra**
- **Aumento do dia**
- **Afastamento da Lua**

MOVIMENTO SÍNCRONO DA LUA

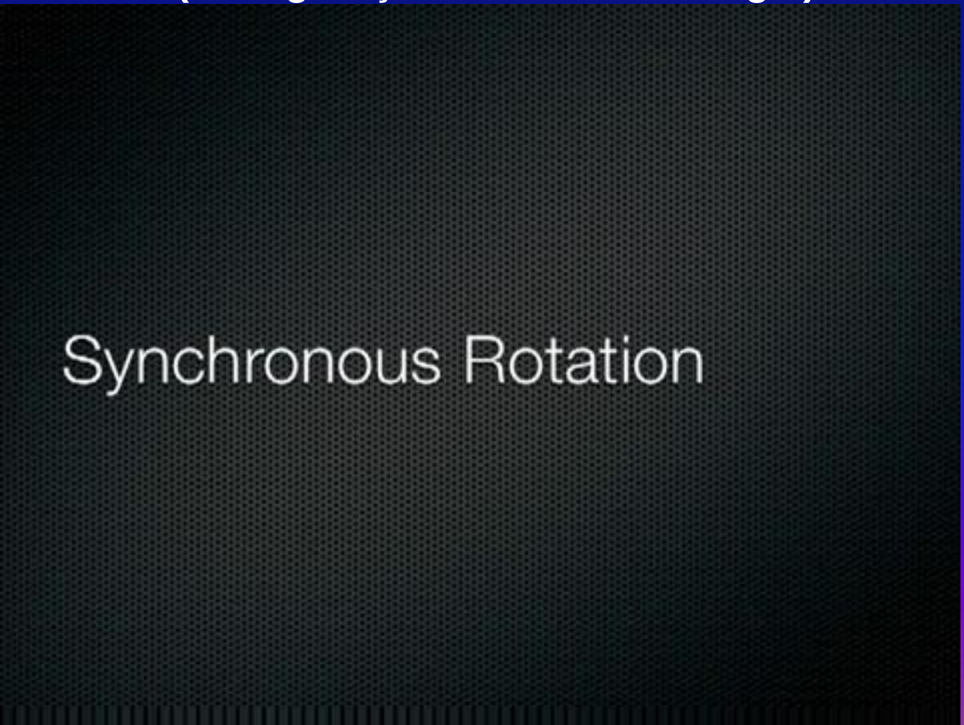
No passado: o período de rotação da Lua (lua líquida) era **menor** do que o seu período atual de revolução em torno da Terra.

Ao girar, ela tentava arrastar consigo os bojos de maré, que sempre ficavam alinhados na direção da Terra: **movimento relativo entre as diferentes partes da Lua ⇨ gerava atrito ⇨ freamento da rotação.**

Devido a esse atrito a Lua foi perdendo energia de rotação até ficar com a *rotação sincronizada* ⇨ período de rotação em torno do seu próprio eixo é exatamente igual ao período de revolução em torno da Terra.

Lua tem rotação **sincronizada com a revolução:** observa-se da Terra sempre a mesma face da Lua.

- **A Lua gira em torno de seu eixo exatamente no mesmo intervalo de tempo em que completa uma volta em torno da Terra.**
- **Nesta configuração as marés na Lua, produzidas pela Terra, ocorrem sempre no mesmo ponto não gerando atrito nem perda de energia (configuração de mínima energia).**



A Terra sempre é vista da Lua num mesmo ponto nas posições da sua face voltada para a Terra.

Quando a Terra ficar com sua rotação sincronizada com a revolução da Lua em torno da Terra acontecerá o mesmo: <u>a Lua sempre será vista num mesmo ponto nas posições da face da Terra voltada para a Lua</u>.

A Lua não será mais vista na outra face da Terra.

MOVIMENTO DE LIBRAÇÃO
(movimento oscilatório)

1) Libração em longitude: órbita da Lua em torno da Terra não é perfeitamente esférica.

2) Libração em latitude: inclinação do eixo de rotação da Lua e o plano da órbita em torno da Terra (< 1º)
(~ 1,5º de inclinação do equador lunar em relação a eclíptica).

PODEMOS OBSERVAR MAIS 9% DA FACE OCULTA DA LUA!