

2. A Terra e a Lua

Elisabete M. de Gouveia Dal Pino
AGA 215

Astronomy: A Beginner's Guide to the Universe, E. Chaisson & S. McMillan (Caps. 1 e 5)

Introductory Astronomy & Astrophysics, M. Zeilek, S. A. Gregory & E. v. P. Smith (Caps. 3 e 4)

Apostila (www.iag.usp.br/~dalpino/aga215)

Dinamica da Terra

- Unidades de medida de tempo: convencionadas pelos movimentos principais da Terra e Lua
- s, m, h, d: em termos da rotacao da T
- Semana, mes: movimento orbital da Lua em torno da T
- Ano: revolucao da T em torno do Sol

Evidências da rotação da Terra

- O fato de vermos EC “girando” para O não serve por si so como prova de que a T esta girando para L. Por que?
- Porque este argumento tambem valido se a T estivesse realmente **ESTATICA!**

Evidências da Rotação da Terra (1)



sentido
da
rotação

Céline Péroux, ESO (hemisfério Sul) – 4 horas de exposição

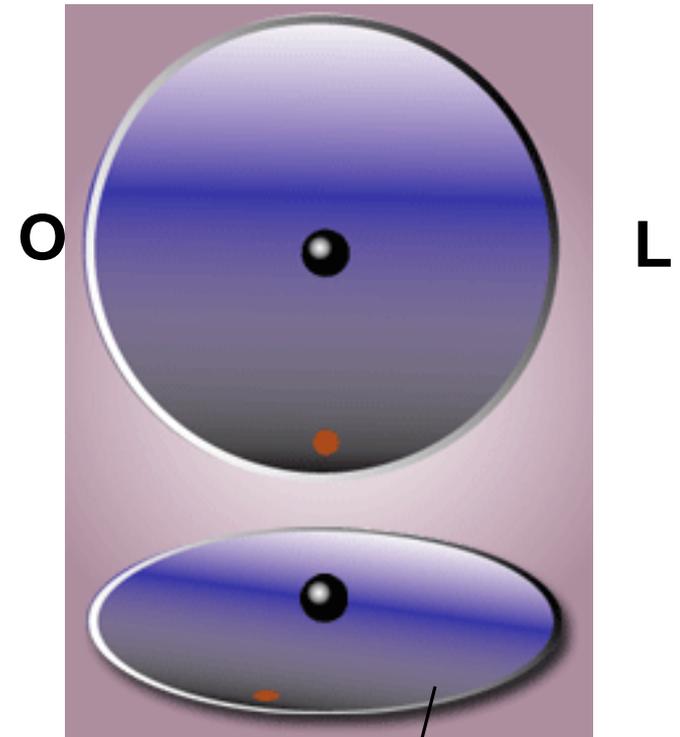
- Corresponde ao movimento aparente diário dos astros

Evidências da rotação da Terra (2)

• Força de Coriolis:

Lançando projétil desde PN para o Equador:

- Rotação transporta alvo para L
- Projétil atinge ponto a **O** do alvo, ao invés de mover-se direto para o S
- Pois durante seu voo: T girou de O para L
- Esta aceleração fictícia (perpendicular à direção do movimento): **Força de Coriolis** (1792-1843)



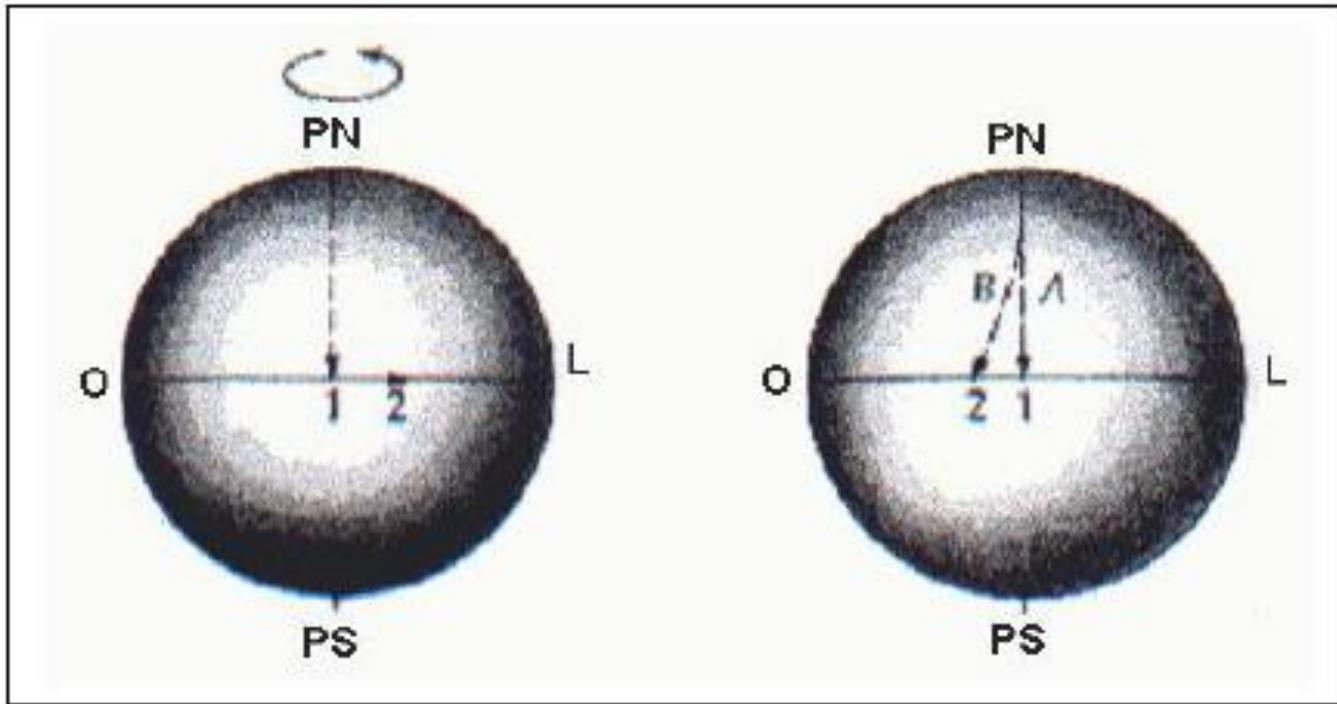
Observador no referencial girante

Evidências da rotação da Terra (2)

- **Força de Coriolis:**

Referencial externo

Referencial girante



No instante 1: temos o alvo na posicao 1
No instante 2: temos o alvo na posicao 2

No instante 1: temos o alvo em 1
No instante 2: temos o proj. em 2

Efeito de Coriolis

Direcao da rotacao do prato de O para L

- $v = dr/dt$ (v do proj.)
- $ds = dr d\theta$ (desloc. do alvo)
- $ds = (v dt) (\omega dt) = v \omega (dt)^2$

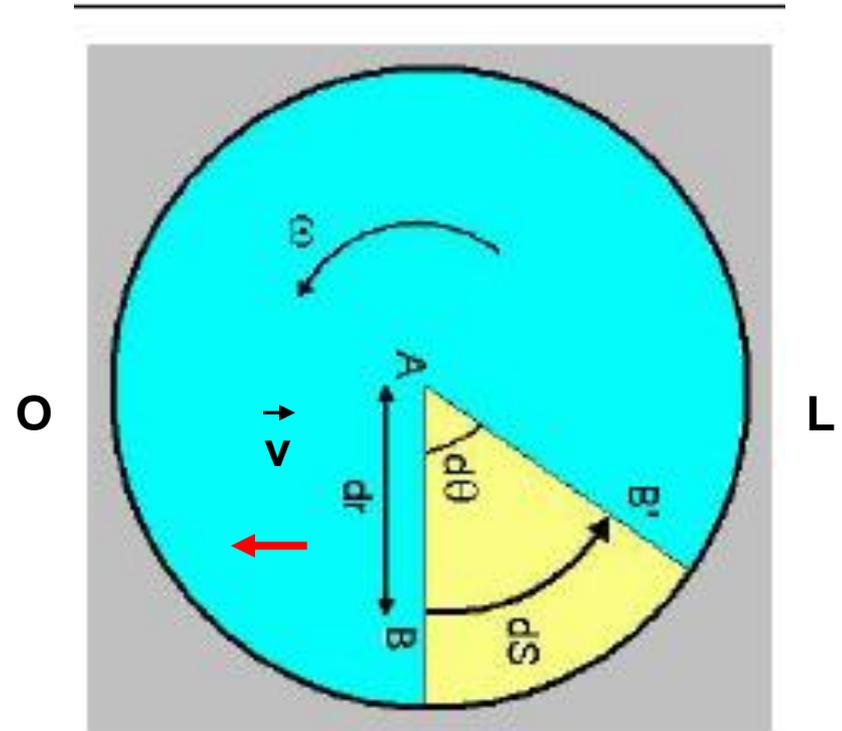
2° Lei de Newton: corpo com aceleracao a , percorre ds em dt :

$$ds = \frac{a(dt)^2}{2}$$

Comparando:

$$a = 2 v \omega$$

→ Aceleracao de Coriolis:
“desvia” o projeltil de L para O

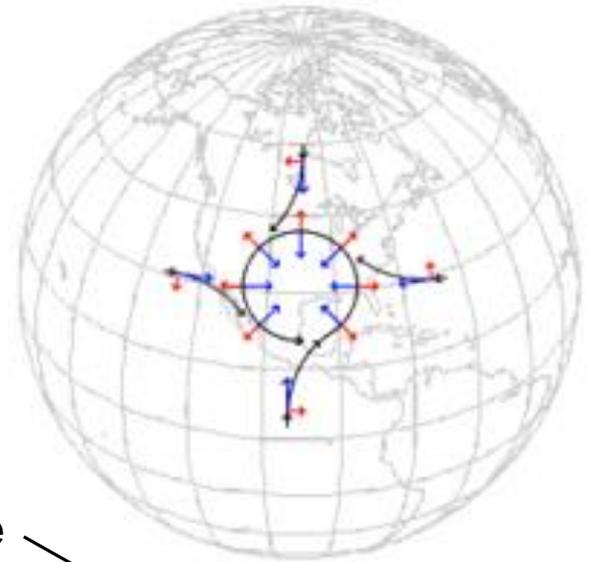


Vetor $\vec{\omega}$ aponta perpendicularmente a este slide (para fora)

$$\vec{a}_{\text{Coriolis}} = 2 \vec{v} \times \vec{\omega}$$

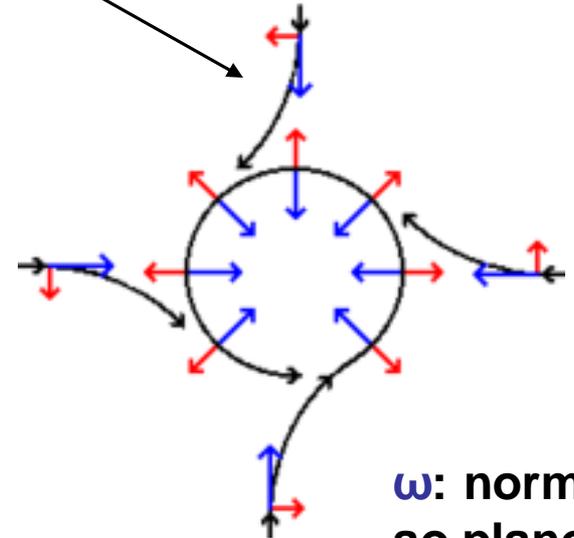
Efeito de Coriolis

Controla padrão de ventos na atmosfera da T.
Ex. 1 **ciclone é circulação de ar (de L para O) produzida pela deflexão de Coriolis de ar fluindo em direção ao centro de uma região de baixa pressão**



Deflexão de Coriolis

Representação esquemática de fluxo em torno de uma zona de baixa pressão. A força de gradiente de pressão é representada pelas flechas azuis. A força de Coriolis, sempre perpendicular à velocidade, em vermelho



ω : normal ao plano

Evidências da rotação da Terra (3)

Pendulo de Foucault

Pêndulo com $l = 60$ m no Pantheon (Paris 1851)

Plano de oscilação gira para O no decorrer de um dia

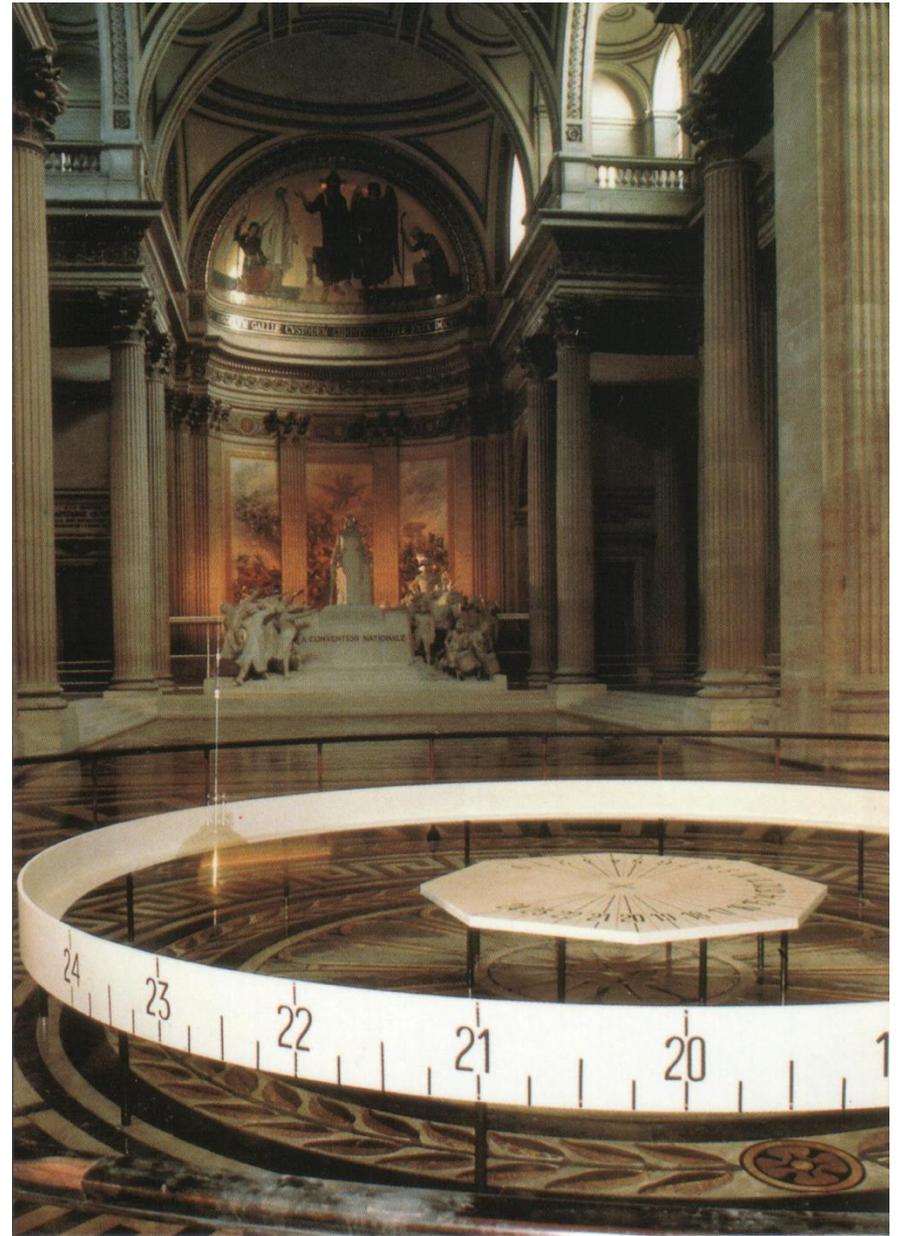
Se a Terra não girasse:

o plano de oscilação do pêndulo permaneceria imóvel pois forças presentes

(tensão e gravidade) permanecem no plano de oscilacao

Como a T gira (de O para L):

Observemos “fora” e sobre a T o que ocorre



Pendulo de Foucault

No PN:

T (sob pendulo) gira com **P = 24 hs para L**

pendulo (visto do chao) parece ter rodado por **24hs para O**

Na latitude θ :

T gira para L

pendulo parece girar para O com

$$\Omega_p = \Omega \sin \theta$$

$$P_p = \frac{2\pi}{\Omega \sin \theta} = \frac{24 \text{ hs}}{\sin \theta}$$

Pendulo de Foucault

<http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/RefTerre/Foucault0.html>

Que Força faz o plano de oscilacao girar ?

Coriolis:

$$\vec{a}_{\text{Coriolis}} = 2 \vec{v} \times \Omega$$

v: velocidade do pendulo;
 Ω : velocidade angular de rotaçao da Terra

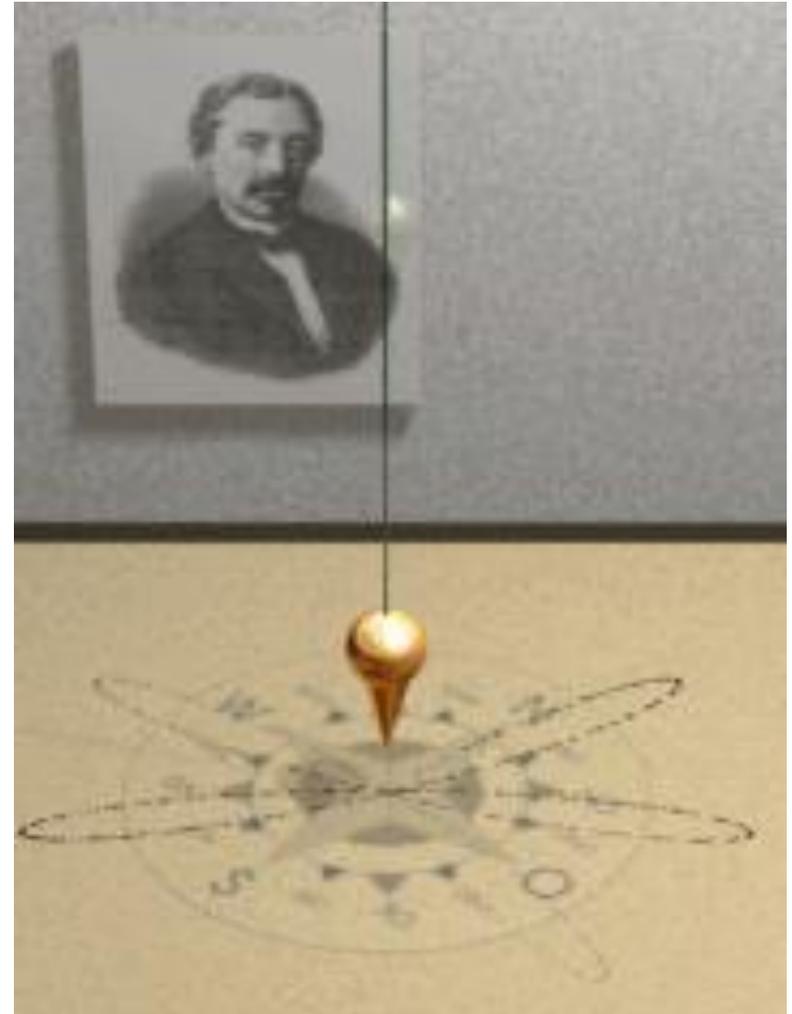
(Ω é muito menor que a oscilação própria ω do pêndulo).



Evidências da rotação da Terra (3)

Pendulo de Foucault

**...E o sentido de
rotacao do plano de
oscilacao do pendulo
no HS: de O para L**



Pendulo de Foucault

Oscilação própria do pêndulo simples:

$$\omega = \sqrt{g/l}$$

Com a rotação da Terra:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega^2 + \Omega^2 \sin^2(\theta)}$$

Mas frequência do pendulo (ω)
é muito maior que a de rotação
da Terra (Ω)

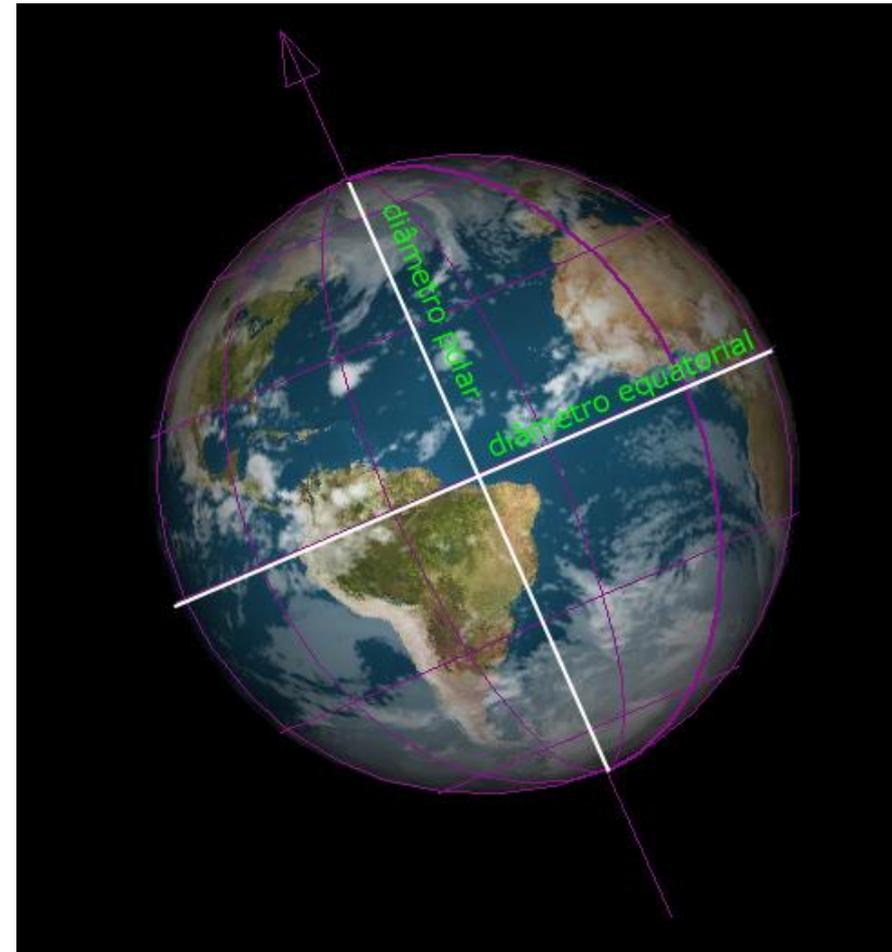


Evidências da rotação da Terra (4)

• Achatamento da Terra

- A Terra (e o Sol, os Planetas...) se comportam em grande escala como um fluido.
- Rotação provoca aumento do diâmetro equatorial em relação ao diâmetro polar.
- Na Terra:
 $R(p) = 6.356,8 \text{ km}$
 $R(eq) = 6.378,2 \text{ km}$
a razão entre estes raios é 0,997
(21km de diferença entre os raios).

- **Demonstracao matematica na lousa....**



Evidências da Revolucao da Terra ao redor do Sol

• Aberracao da Luz

- Consideremos luz proveniente de astro:
- Composicao do movimento:

observador + luz = aberracao da luz



- Em repouso: chuva vertical
- Se eu caminho com v_{pessoa} :

aparente inclinacao angular da chuva :

tanto > quanto > v_{pessoa}

Aberracao da Luz

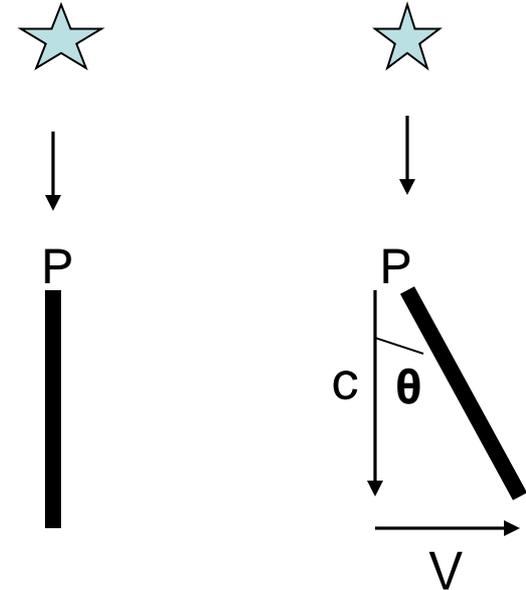
- T move-se com V em torno do Sol
- Para observar 1 estrela no zenite: telescopio deve ser inclinado de θ para que quando luz atinja P , o telescopio possa receber luz.
- James Bradley (1729): descobriu aberracao da luz:

$$\theta \sim \text{tg } \theta = V/c$$

- θ bem pequeno:

$$\theta \sim 20.49''$$

- Bradley explicou esse efeito como causado pelo movimento orbital da Terra
- fornece V



Telescopio em repouso

$$V = \theta^{\text{rad}} c = (9,934 \times 10^{-5} \text{ rad}) (3 \times 10^5 \text{ km/s}) = 29,80 \text{ km/s}$$

Evidências da Revolucao da Terra ao redor do Sol (2)

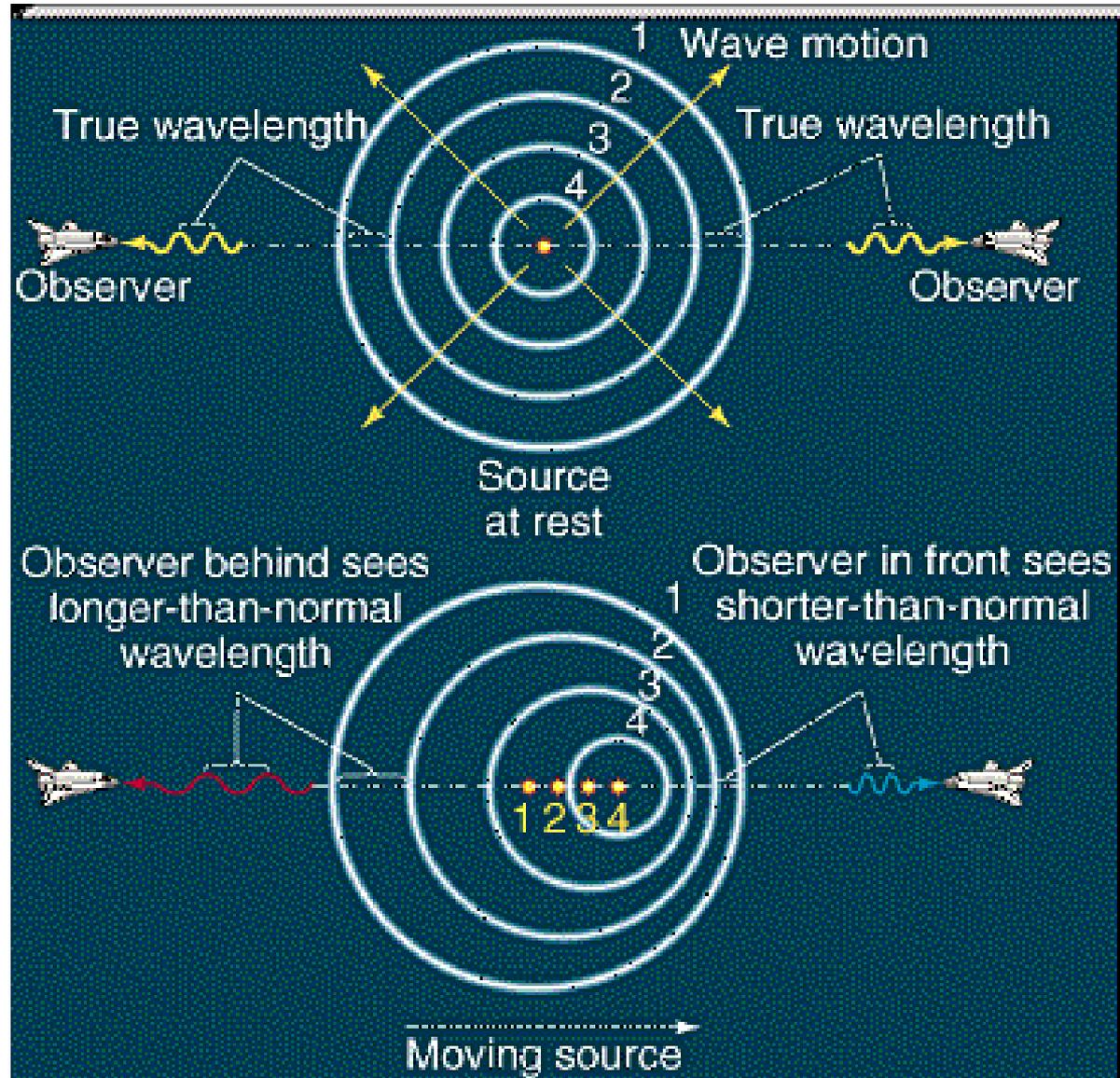
• Efeito Doppler

- Luz dos astros: radiação com comprimento de onda natural λ_0
- Quando ha movimento entre fonte emissora de uma onda e o observador:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

v : velocidade radial do astro relativo à Terra

λ : comprimento de onda medido



Efeito Doppler

T roda em torno do S na eclíptica (E):

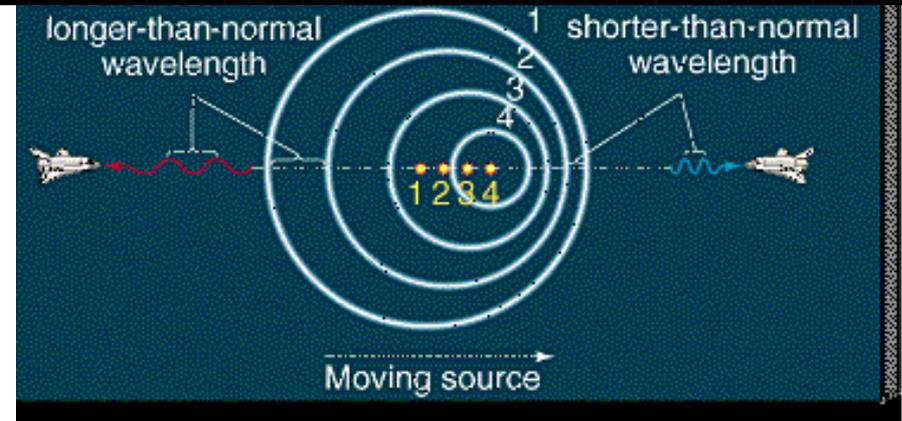
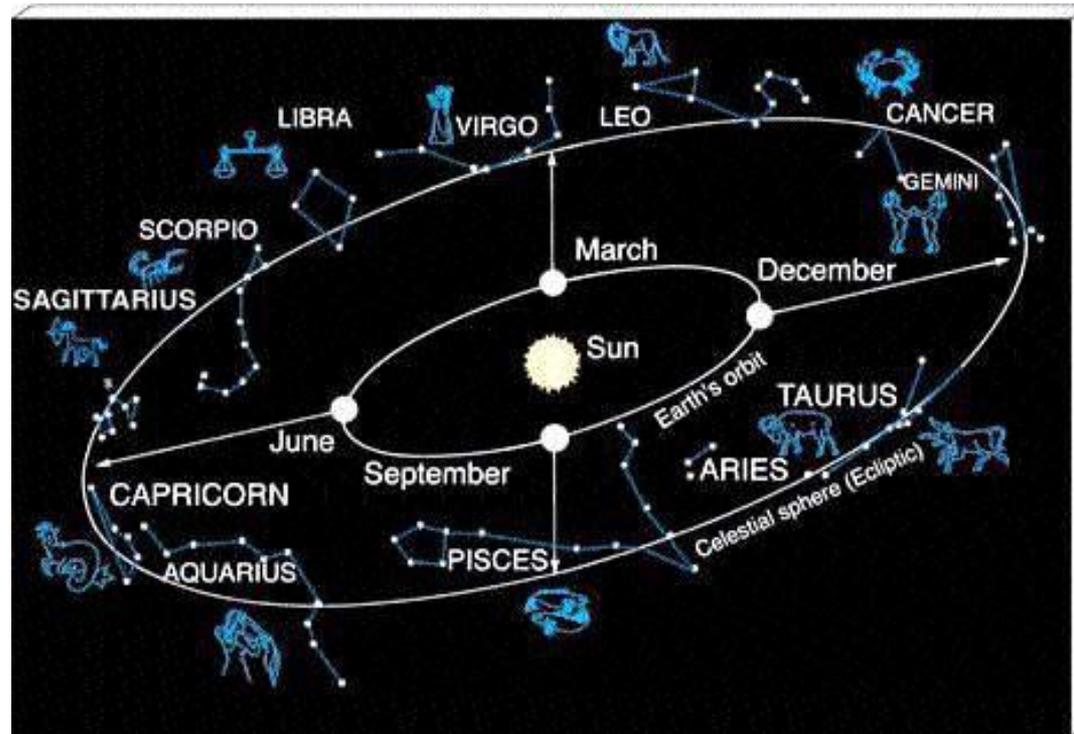
→ λ emitido pelos astros varia ao longo do ano à medida que T caminha por E

Quando afastamento ou aproximação máxima do astro:

$\Delta\lambda$ medido na luz do astro usado para determinar v orbital da Terra com a eq.:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

$$V = 29,80 \text{ km/s}$$



Forças gravitacionais diferenciais

- Atração entre 2 corpos esféricos: equivalente à exercida entre 2 partículas pontuais
- Quando corpos não-esféricos, ou elásticos, ou vários corpos envolvidos: existem **forças gravitacionais diferenciais** ao longo do **volume** dos corpos

Forças gravitacionais diferenciais

- **Marés:**

Normalmente: 2 marés altas e 2 baixas por dia

Altura das marés: desde cm até vários ms, dependendo da localização e época do ano

Altura típica da maré em mar aberto: 1m

O que as causam?

Pistas: variam diária, mensal e anualmente

Resposta: resultado da influência da gravidade da L e do S na Terra!

Atração da L: > no lado da T que está olhando para L

Forças gravitacionais diferenciais

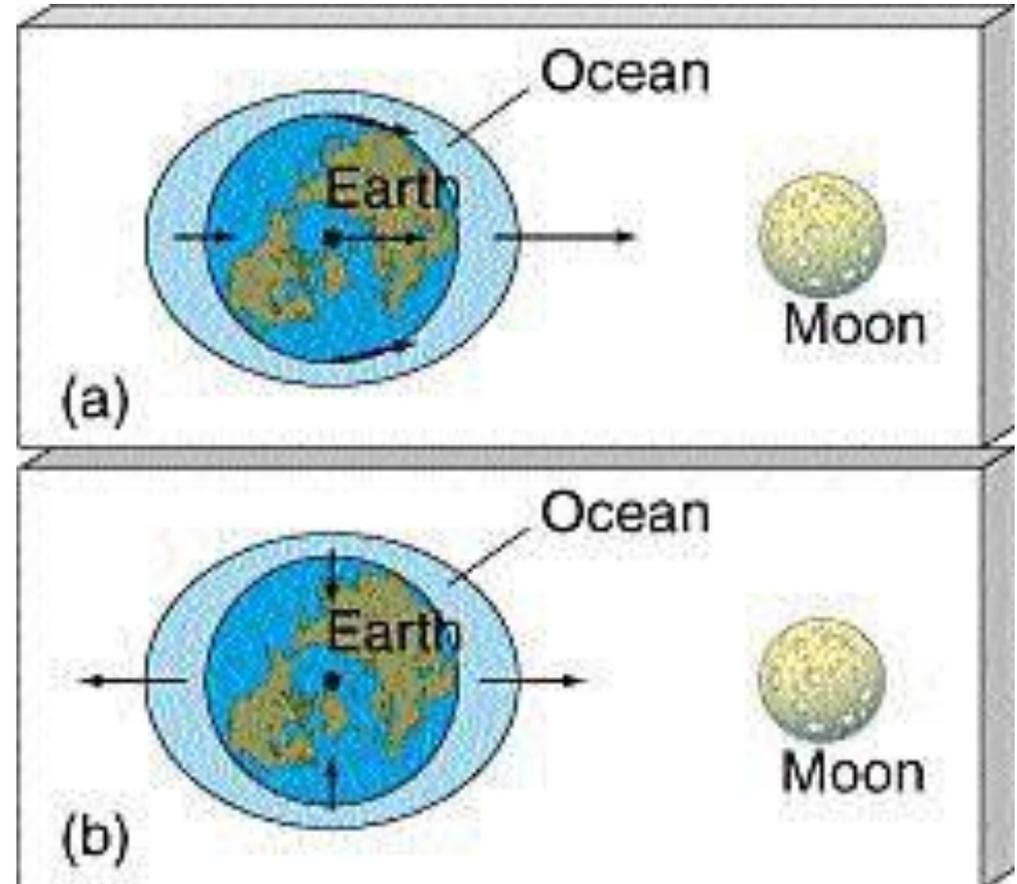
T fica ligeiramente alongada ao longo da linha T-L

Água (fluido) sente efeito mais fortemente:

Oceano + fundo ao longo da linha T-L e fica + raso na direção normal

Mares diárias: resultam à medida que T gira

Note: Força de maré (diferencial) resultante em ambos os lados da T é praticamente a mesma: daí mesmo efeito de Maré!



(a): força gravitacional da L sobre diferentes pontos da T na sup. e centro

(b): diferença entre forças dadas em (a) e a força no centro da T: forças de maré

Um pouco de matematica

Força de maré da L sobre a T = diferencial de forças entre superfície e centro da Terra devido a atração da Lua:

$$\Delta F_G = G M_T M_L / (d - R_T)^2 - G M_T M_L / d^2$$

d: distancia T-L

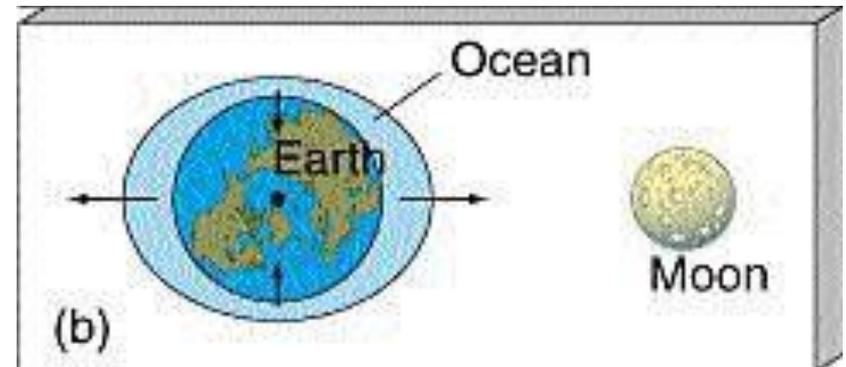
Depois de alguma algebra simples e considerando que $R_T \ll d$:

$$\Delta F_G = 2 R_T M_T M_L / d^3$$

→ Força de maré da L sobre a T

e a aceleracao gravitacional diferencial (de maré):

$$a_{\text{maré}} = 2 M_L R_T / d^3$$



Forças gravitacionais diferenciais

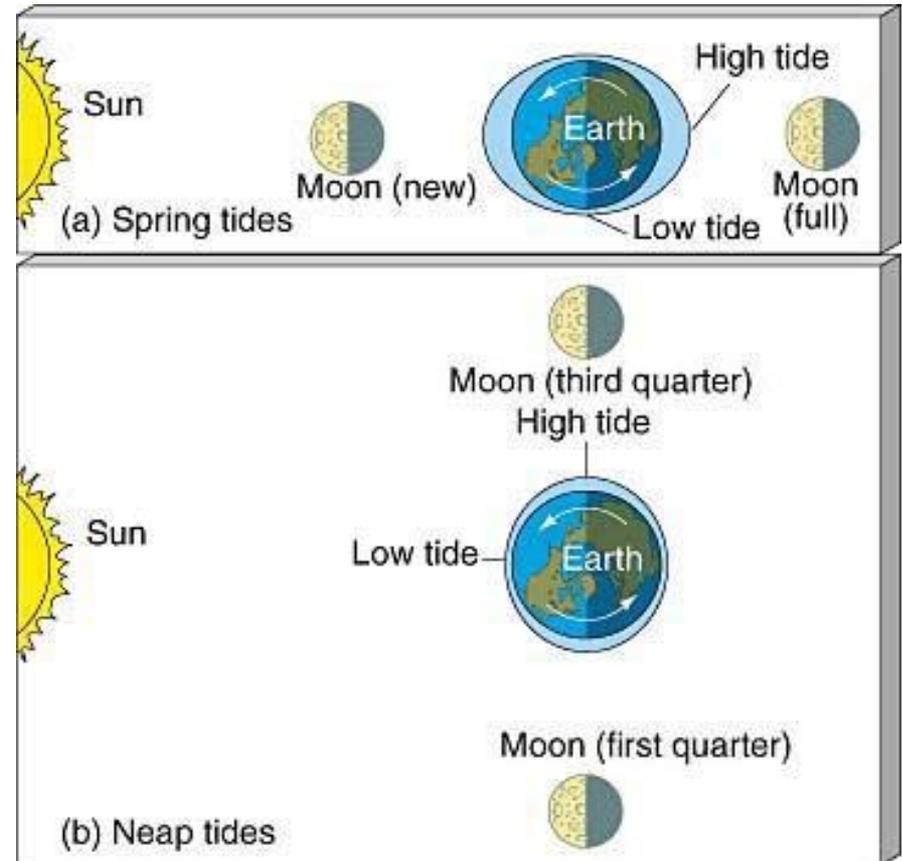
Aceleração diferencial proporcional a:

$$MR/d^3$$

R: raio da T e d: distância à L ou S

Razão entre forças de maré do Sol e da Lua:

$$\frac{M_{\text{Sol}}}{M_{\text{Lua}}} \cdot \left(\frac{d_{\text{Lua}}}{d_{\text{Sol}}} \right)^3 \approx \frac{5}{11}$$



(a): Quando Lua cheia ou nova: L-T-S alinhados e forças de maré da L e S se somam (marés mais altas do mes!)

(b): Quando L crescente ou minguante: efeitos de maré da L cancelam parcialmente os efeitos do Sol, mas dominadas pela L (marés mais baixas)

Forças gravitacionais diferenciais

Atrito das Marés:

Causa dissipação de energia em forma de calor:

- reduz en. Cinética da Rotação da T
- duração do dia aumenta 0,002 s por século!
- esse processo continuará até T girar em torno de seu eixo = taxa que Lua orbita a T

→ MOVIMENTO SINCRONO T-L

→ A partir de então: Lua estará sempre apontando para o mesmo ponto da T (como se ambas estivessem em repouso). Quando isso acontecer:

$$P(\text{terra}) = 47 \quad P(\text{hoje}) = 47 \text{ dias}$$

Isso acontecerá alguns bilhões de anos...! (deixo como ex. para dem.)

T perde momento angular e Lua ganha e raio orbital da Lua (a) cresce. Por que? Lei de Kepler:

$$P^2 = k a^3$$

$$L = m V a = m (2\pi a/P) a = m 2\pi a^2/P = (m2\pi/k) a^{1/2}$$

Forças gravitacionais diferenciais

Efeito das forças de Maré da T sobre a L:

$$a_{\text{maré}} = M_T R_L / a^3 = 20 \text{ vezes } a_{\text{maré}} \text{ da L sobre a T}$$

→ por causa dessa força: Lua já se encontra em movimento sincrono:

$$P(\text{spin}) = P(\text{orbital})$$

por isso vemos sempre a mesma face da Lua apontando para a T:

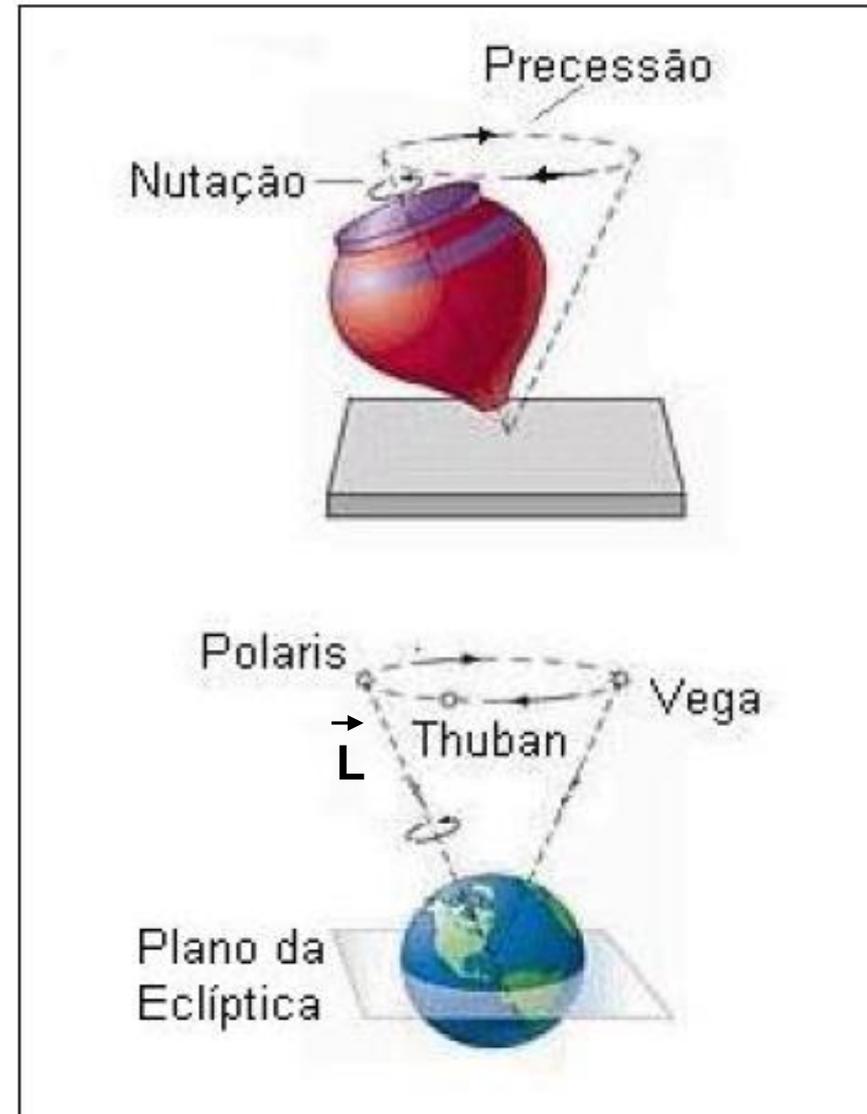
$$\omega(\text{spin}) = \omega (\text{rotacao})$$

Ao girar de um ângulo θ em torno da T, terá girado do mesmo ângulo em torno de seu eixo:

$$\theta = \omega(\text{spin}) t = \omega (\text{rotacao}) t$$

Movimentos de Longo Período da T

- **Precessão e Nutação** do eixo de rotação da T: como peão
- **Período de precessão** em torno do eixo da Eclíptica:
 $P(\text{precessão}) = 26.000 \text{ anos}$
- **Causa da Precessão:**



Movimentos de Longo Período da T

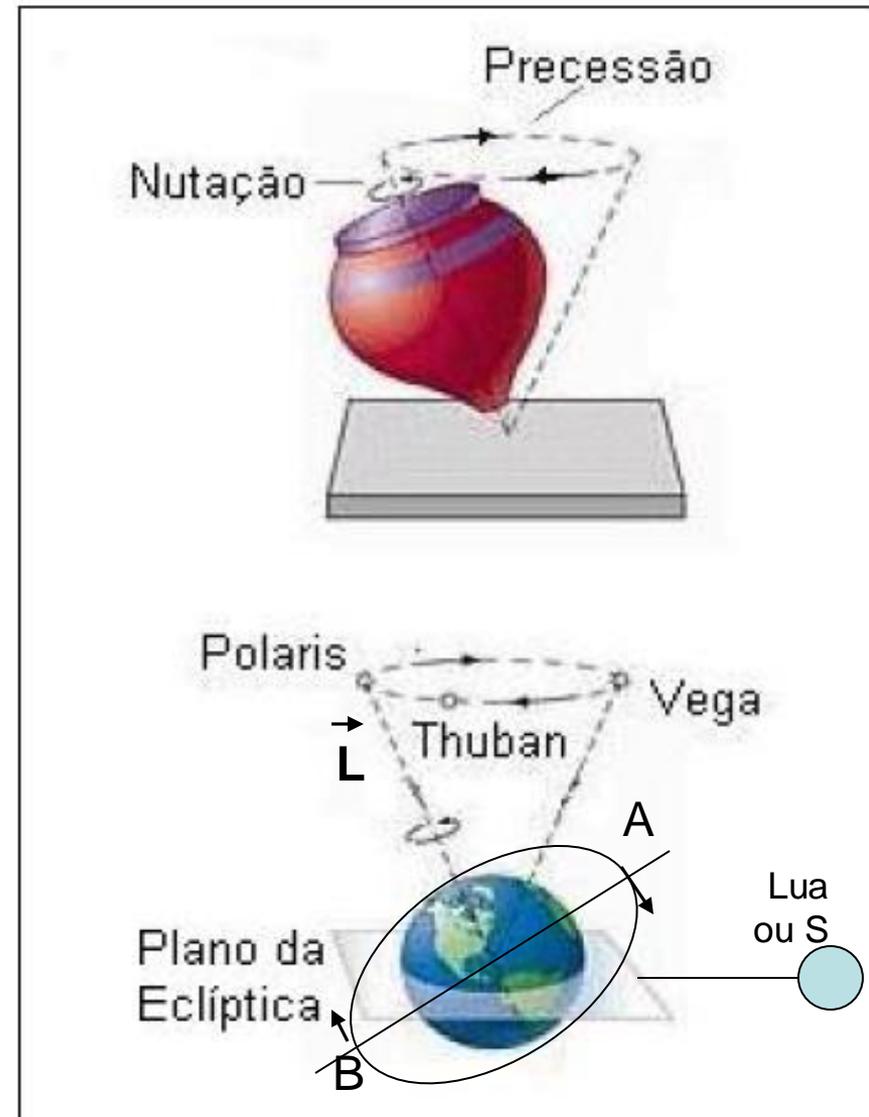
- **Precessão e Nutação** do eixo de rotação da T: como peão
- **Período de precessão** em torno do eixo da Eclíptica:

$P(\text{precessão}) = 26.000 \text{ anos}$

- **Causa da Precessão:**

Forças de Maré (gravitacionais diferenciais do S e sobretudo da L): em A e B causam Torque para dentro da página: que faz com que

→
L precesse para Oeste



Movimentos de Longo Período da T

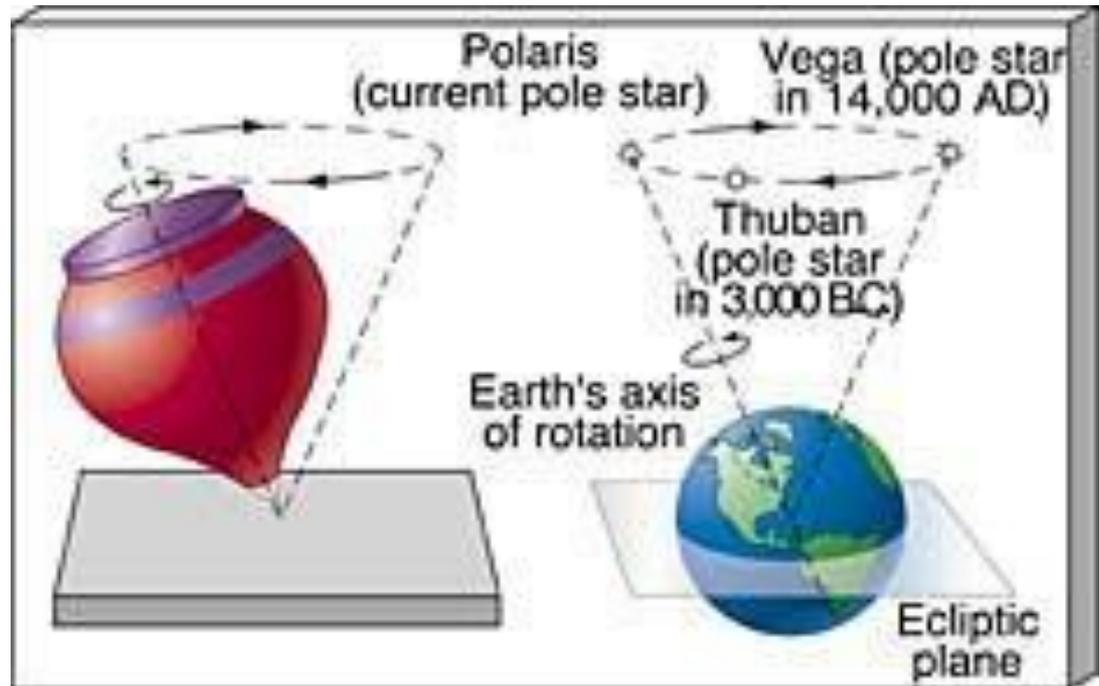
Hoje eixo aponta para estrela Polar

A 5000 anos: apontava para Thuban

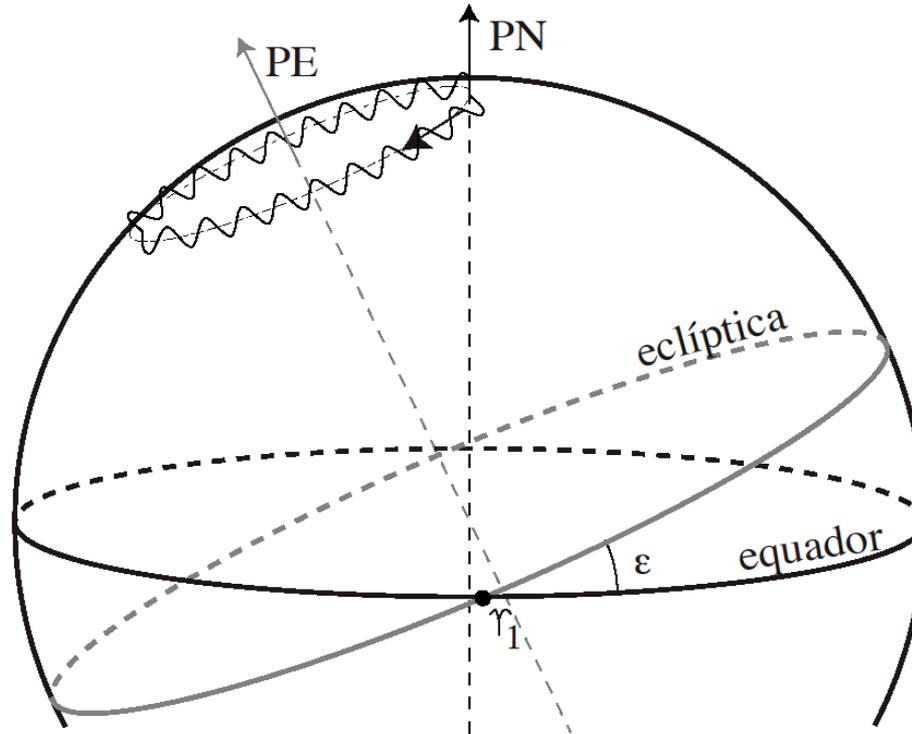
Daqui a 12.000 anos: apontara para Vega

Nutação: como a Lua e o \tilde{S} movem-se abaixo e acima do plano equatorial da T: há variações periódicas nos torques em A e B – levando a bamboaleamento do eixo de rotação

P(nutação) = 18,6 anos



Nutação

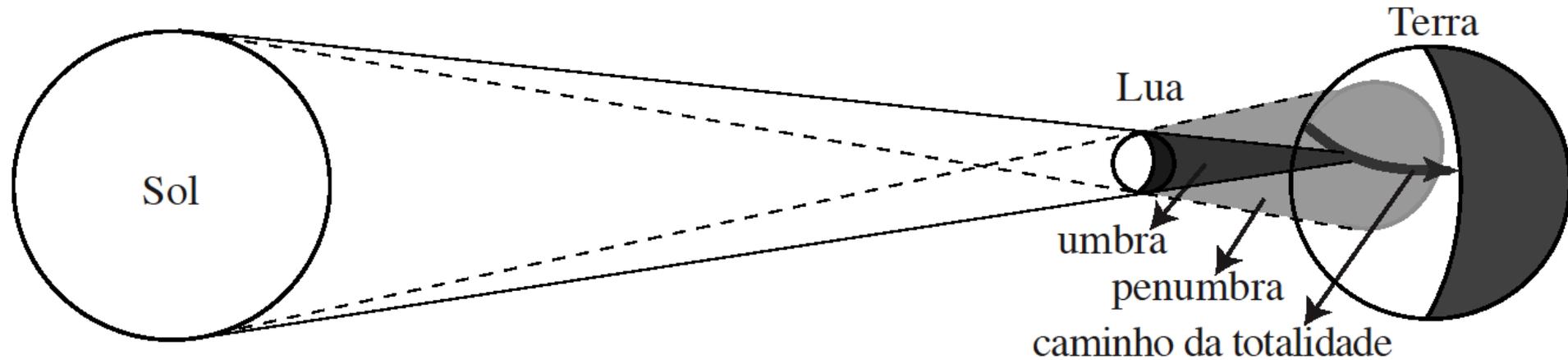


- Causado pela ação da Sol e Lua (principalmente);
- Pequena amplitude e período de ~ 18.6 anos;
- Descoberto em 1747 por James Bradley

Eclipses

- Do grego, "deixar de existir".
- Definição astronômica: fenômeno que ocorre quando um **corpo celeste passa pela sombra de outro corpo**.
 - **Eclipse da Lua** => a Lua passa pela sombra da Terra
 - **Eclipse do Sol** => a Terra passa pela sombra da Lua

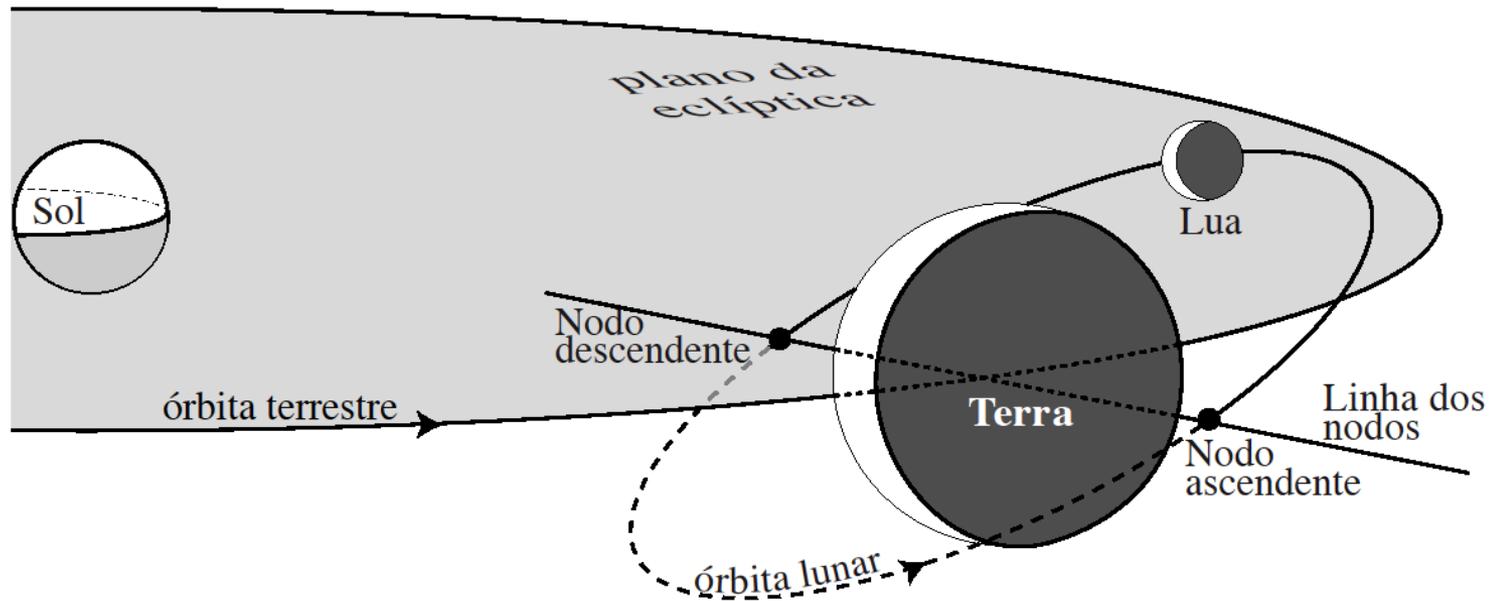
Eclipse do Sol



- Um observador na umbra observa um eclipse total do Sol;
- Um observador na penumbra observa um eclipse parcial;
- Se a umbra não chega até a superfície da Terra, observa-se um eclipse anular do Sol.

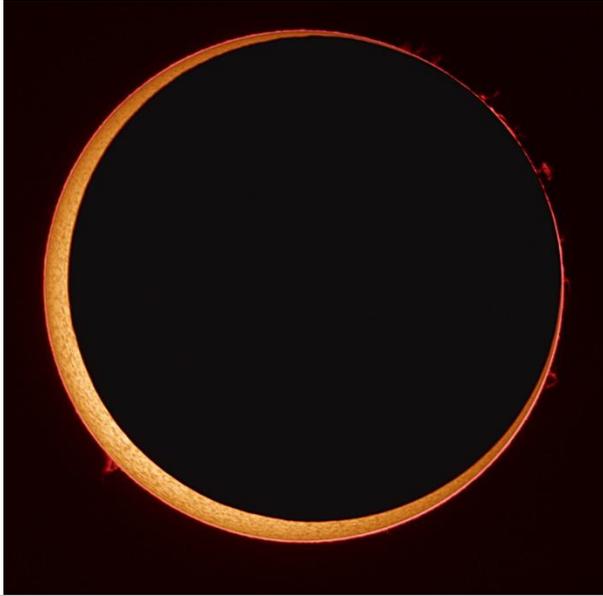
Eclipses

- Porquê não ocorrem 2 eclipses por mês, um do Sol na Lua Nova e um da Lua na Lua Cheia?

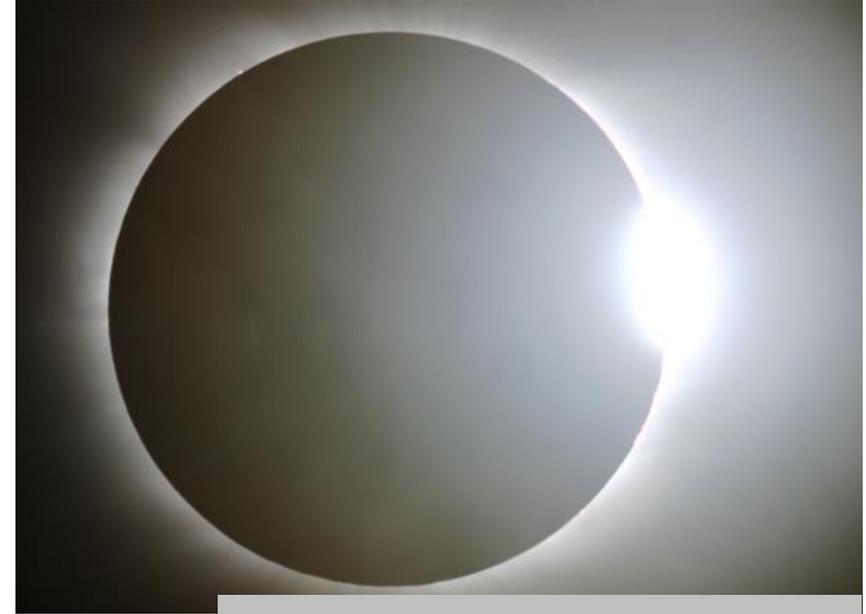


- O plano da órbita da Lua não coincide com o plano da órbita da Terra (a eclíptica). (5.9° de declinação relativo a eclíptica)
- Para ocorrer um eclipse, a Lua deve estar próxima do nodo.

Eclipses do Sol



- Eclipse anular, 3/10/2005, Stefan Seip



- Eclipse total, 29/3/2006, Anthony Ayiomamitis

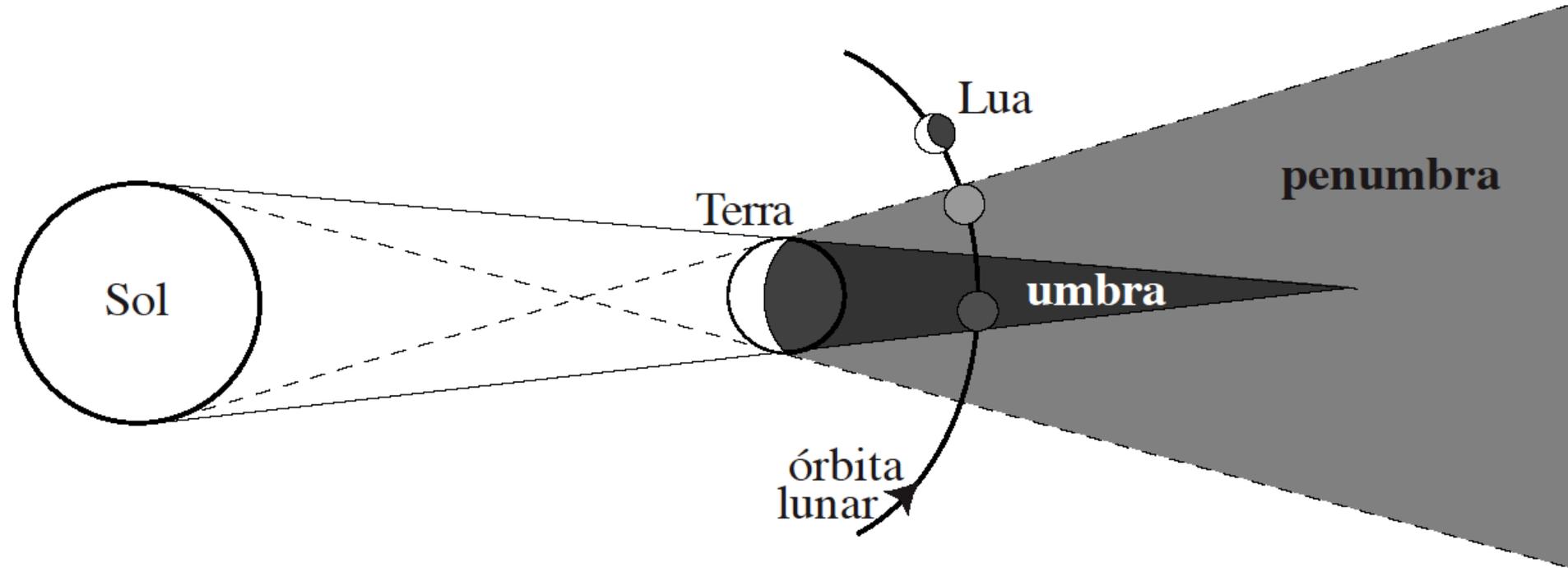


- Eclipse total, 29/3/2006, Gerhard Bachmayer



Coroa solar

Eclipse da Lua



- Se a Lua passa pela umbra, temos um eclipse total;
- Se a Lua passa parcialmente pela umbra, temos um eclipse parcial.
- Se a Lua passa apenas pela penumbra, temos um eclipse penumbral.

Sistema T-L: Características Físicas

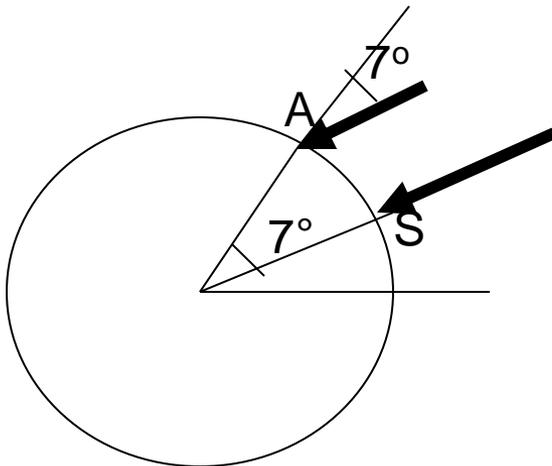
- **Raio da Terra:**

Erastotenes (sec. IIIAC):

Solstício de verão: raios do Sol perpendicular ao poço em Siena

Em Alexandria: a 800 km: inclinação dos raios de 7°

Assumindo T redonda: avaliou perímetro da T:



$$AS = \theta R_T$$

$$\text{Perímetro } p = 2\pi R_T$$

$$\frac{7^\circ}{360^\circ} = \frac{800 \text{ km}}{p}$$

Obtem-se: valor próximo ao conhecido hoje:

$$R_T = 6378,2 \text{ km}$$

Sistema T-L: Características Físicas

Distancia T-L:

Valores hoje: radar e satélites – medindo Δt entre saída e chegada de pulso entre Lua e T:

$$d(\text{T-L}) = a_L = c\Delta t/2 = 384.405 \text{ km} = 60,3 R_T$$

Massa da Terra: podemos desprezar massa da Lua e usar 3° lei de Kepler:

$$M_T = \frac{4\pi^2 a_L^3}{G P_L^2} = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg},$$

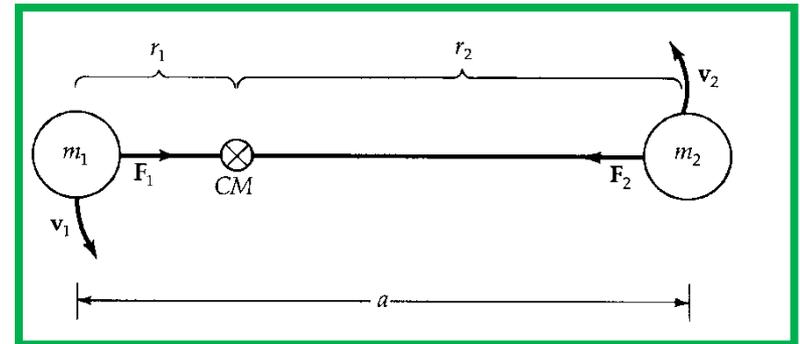
Sistema T-L: Características Físicas

Sabendo a priori a massa da Lua = $7,35 \cdot 10^{22}$ kg = $0.0123 M_T$

obtem-se:

$$r_1 = a \frac{m_2}{m_1 + m_2}$$

→ **Posição do CM:**



$$d_T = \frac{M_L a_L}{M_T + M_L} = \frac{(0,0123)(384.405)}{1,0123} = 4671 \text{ km}$$

→ O CM do sistema está a 1707 km abaixo da superfície da Terra.

E como determinar a massa e o raio da Lua?

Sistema T-L: Características Físicas

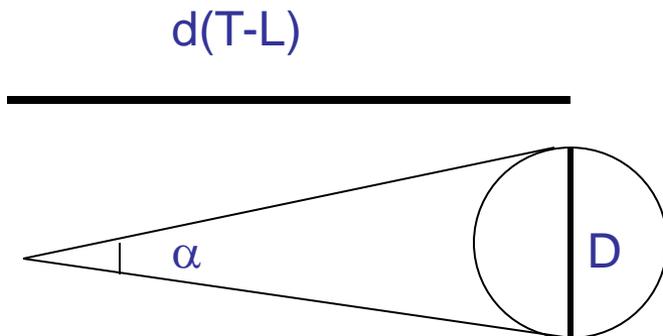
Massa da Lua: com sondas espaciais obtem-se hoje o valor acurado

Note-se que com distancia da T e L ao CM, e massa da T:

$$M_L = \left(\frac{d_{\oplus}}{d_L} \right) M_{\oplus} = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ Kg} = \left(\frac{1}{81,3} \right) M_{\oplus}$$

Mas ja haviamos usado a massa da Lua para calcular a posicao do CM...

Diametro da Lua - Sabendo $d(T-L)$ e medindo diametro angular aparente da Lua:



$$D / d(T-L) = \alpha(\text{rad})$$

$$R(L) = D/2 = 1738 \text{ km} = 0,272 R_T$$

Sistema T-L: Estrutura Interna

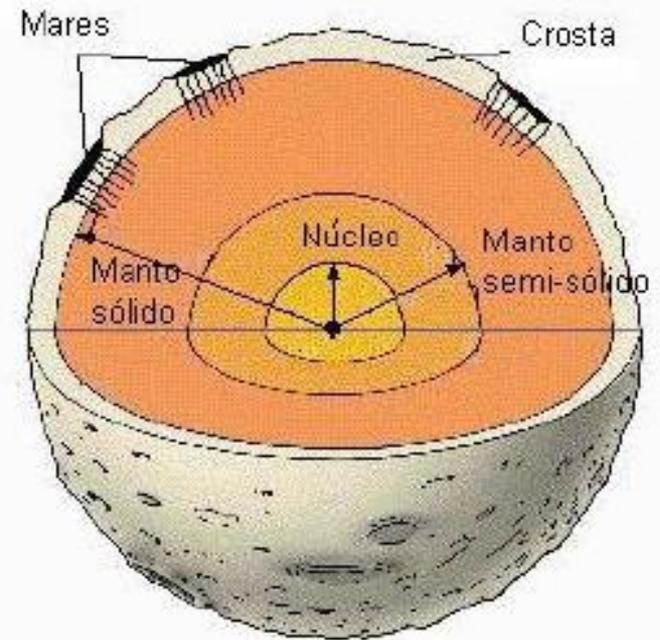
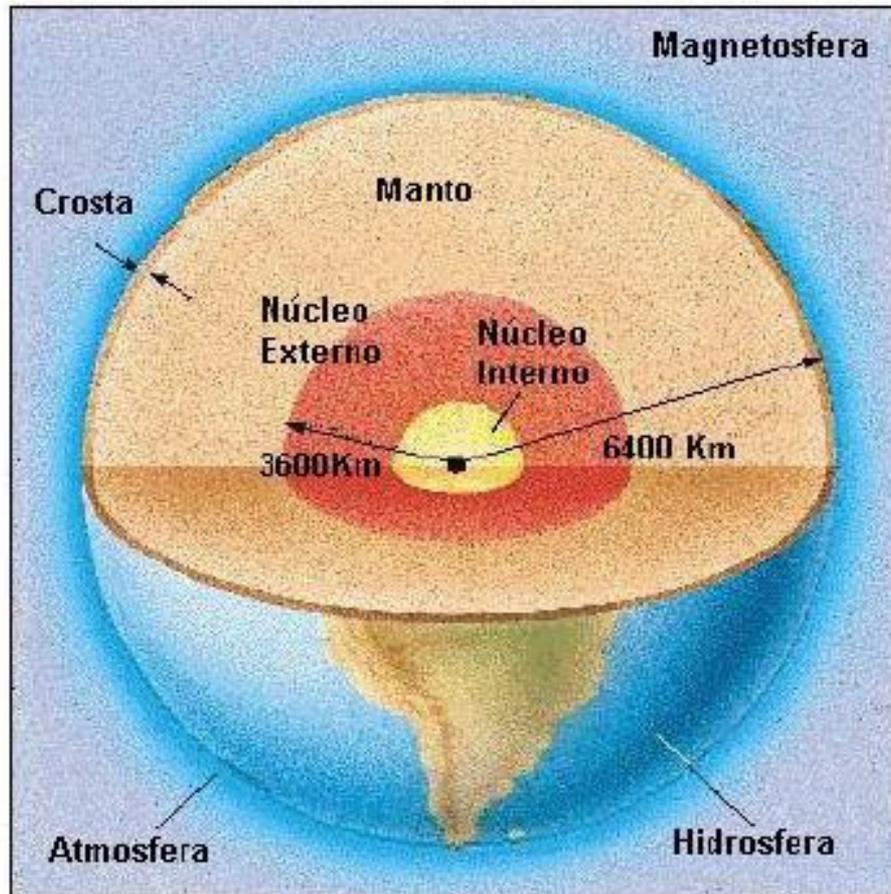
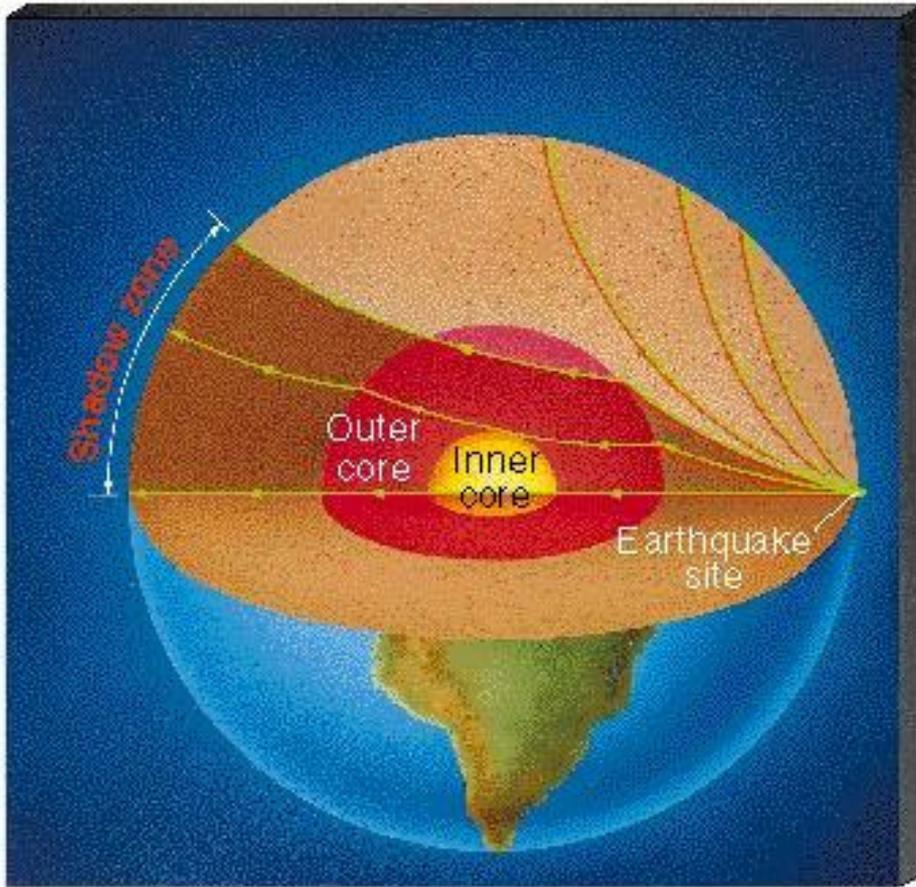


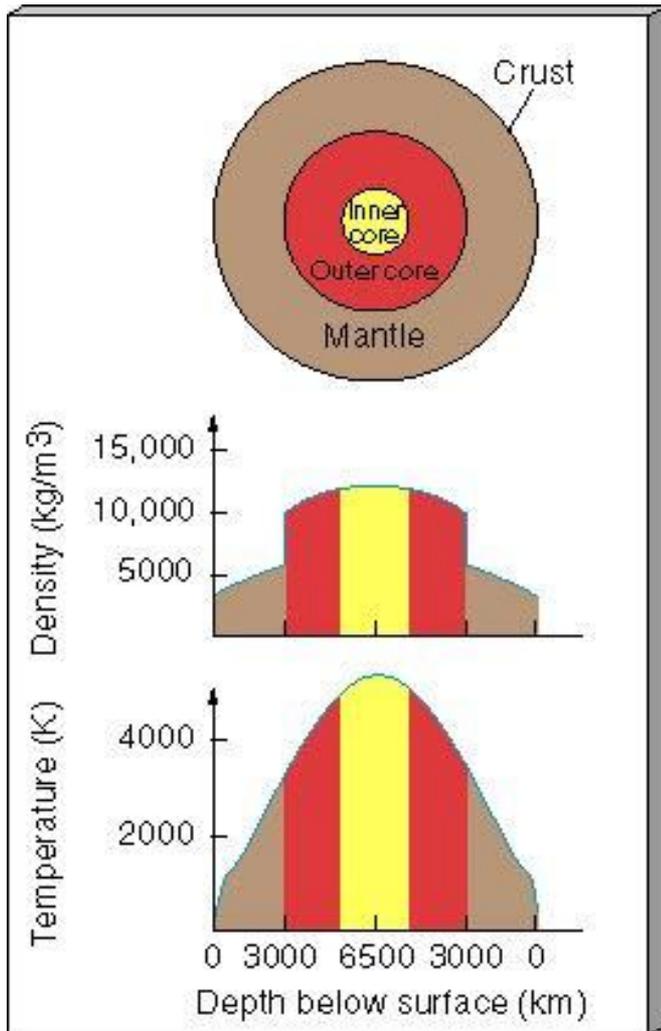
Figura 8. Representação esquemática das estruturas da Terra (painel à esquerda) e da Lua (painel à direita).

Terra: Estrutura Interna



- Interior mapeado com propagação de ondas sísmicas (S)
- Ondas são desviadas de acordo com densidade e T do interior.
- Ondas S não atravessam o núcleo externo → o mesmo é líquido

Terra: Estrutura Interna



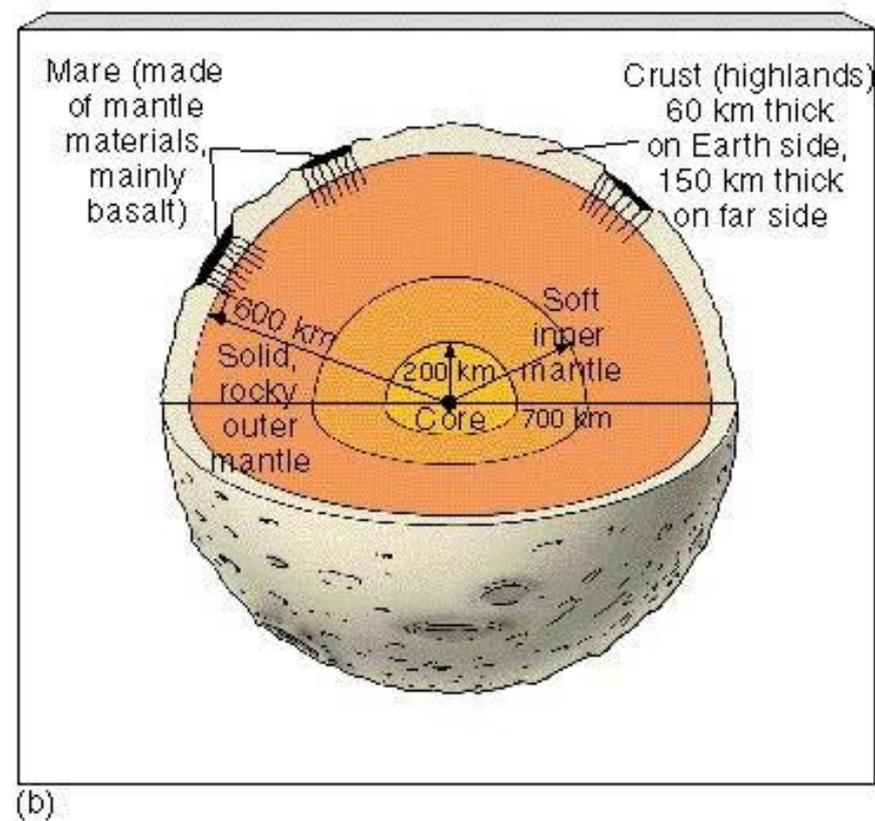
- Crosta: 35 km de espessura: rochas
- Manto (conhecido por erupcao vulcanica: semi-solido - ate 2900 km para dentro (silicatos))
- Nucleo exterior: liquido evidenciado por ondas sismicas que nao atravessam liquido (2200 km esp.)
- Nucleo interior (raio 1300 km): solido devido altissima pressao (material metalico: niquel + ferro?)
- Camadas mais externas: hidrosfera, magnetosfera, atmosfera
- Superficie da T (litosfera): 70% hidrosfera com placas continentais flutando sobre manto

Lua:

Pouca atividade sísmica

→ Interior modelado:

- Núcleo não metálico e sólido (raio: 200 km)
- Manto interno: parcialmente fundido com rochas semelhantes a manto da T
- Manto externo: sólido rochoso
- Crosta: 60-150 km de espessura



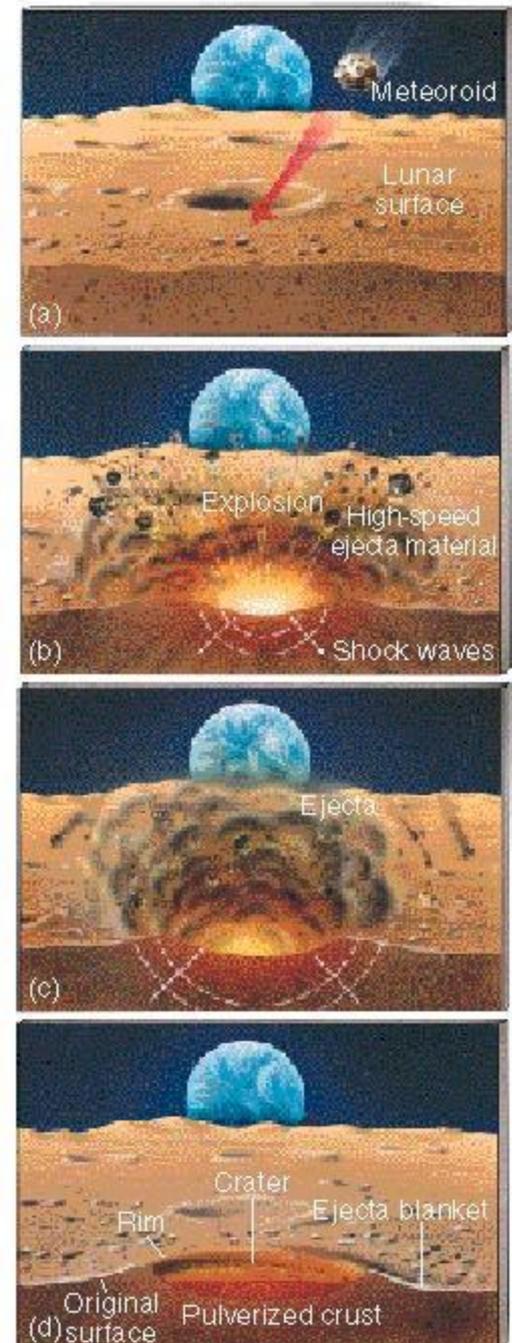
Lua: Estrutura Interna

Lua: Estrutura Interna

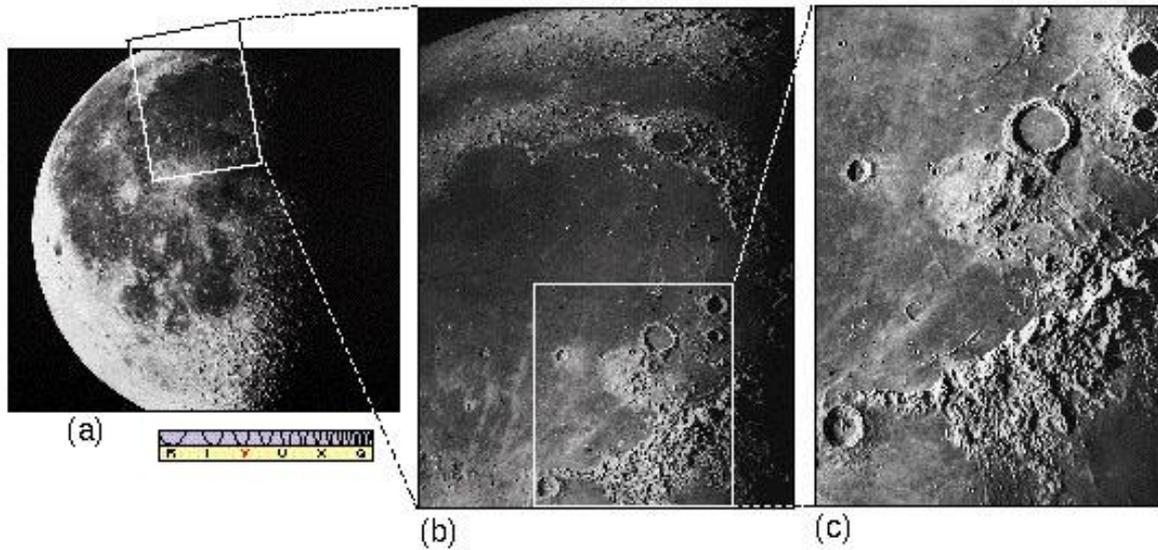
- **Terra:** interior quente + atmosfera erosiva: superfície mudou bastante
- **Lua:** interior frio e **sem atmosfera:** superfície preservada desde sua formação
- Lua: densidade media = 3370 kg/m^3
- Gravidade: $F(L) = 1/6 F(T)$

$$GM_L/R_L^2 < GM_T/R_T^2$$

- Superfície da Lua: composição basáltica: planaltos, planícies ou “mares” - regiões escuras extensas formadas de material basáltico - e crateras formadas por impacto de meteoritos



Mares e Crateras da Lua



Crateras: 500 m a 50 km

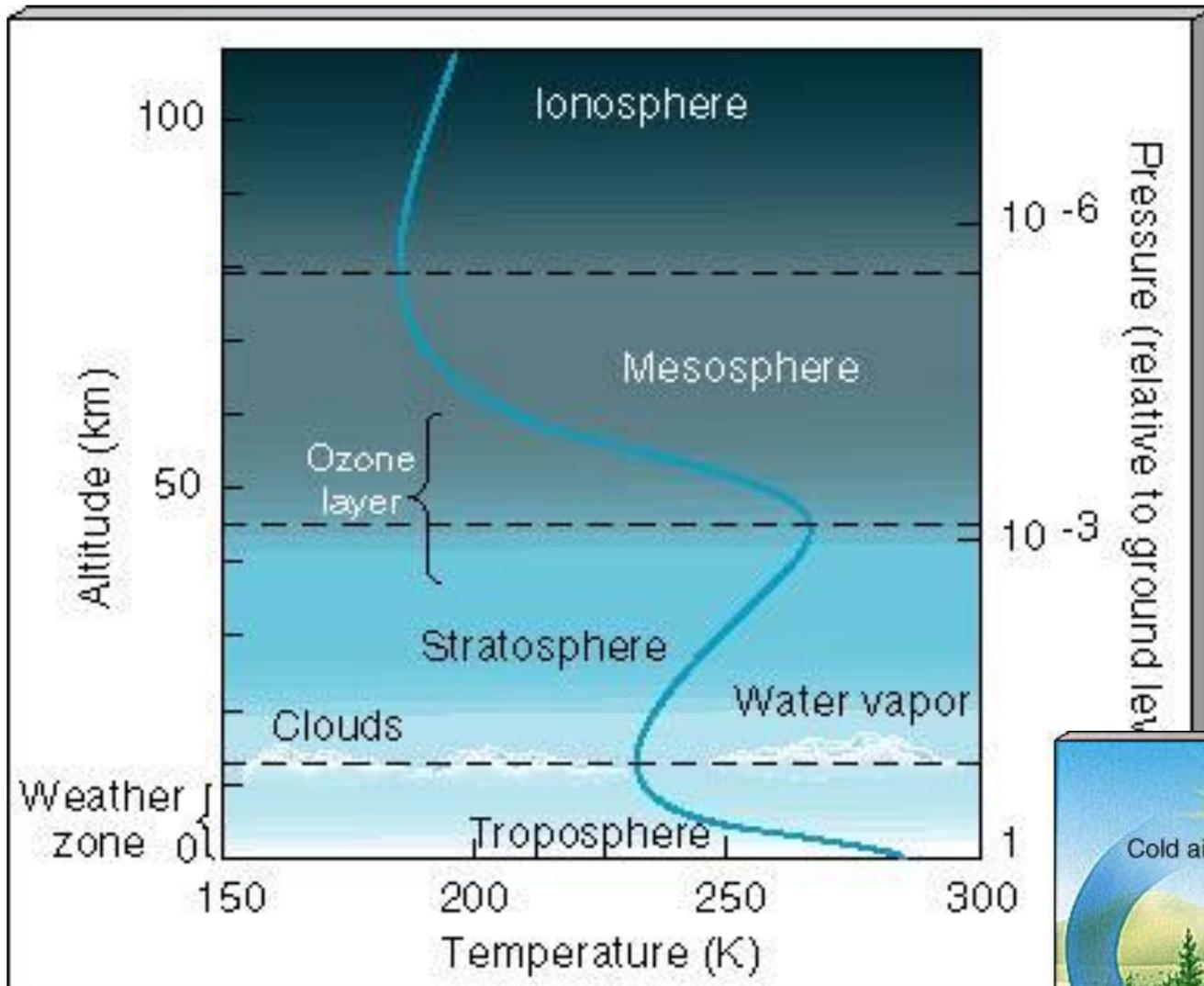


Atmosfera da Terra

- **Terra:** atmosfera atual - resultado de vulcanismo, emanações gasosas, gravidade forte para reter gas

Gás	%
Nitrogênio (N ₂)	78,08
Oxigênio (O ₂)	20,95
Argônio (Ar)	0,934
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,033
Neônio (Ne)	0,0018

Atmosfera da Terra

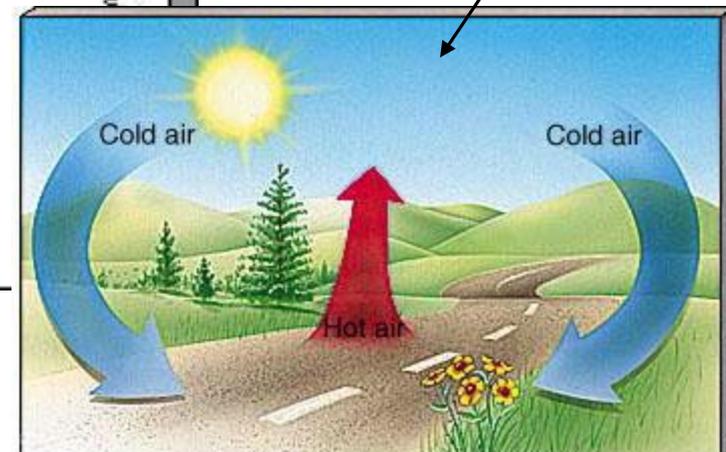


Ionosfera:

camada protetora
– raios X e UV do Sol ionizam átomos e dissociam moléculas

Ozonio: absorve UV

Troposfera: onde se dá a convecção



Escala Kelvin (K) = graus Celsius + 273

0 K (todos os movimentos cessam)

273 K (a água congela)

373 K (a água ferve)

Campo Magnetico da Terra

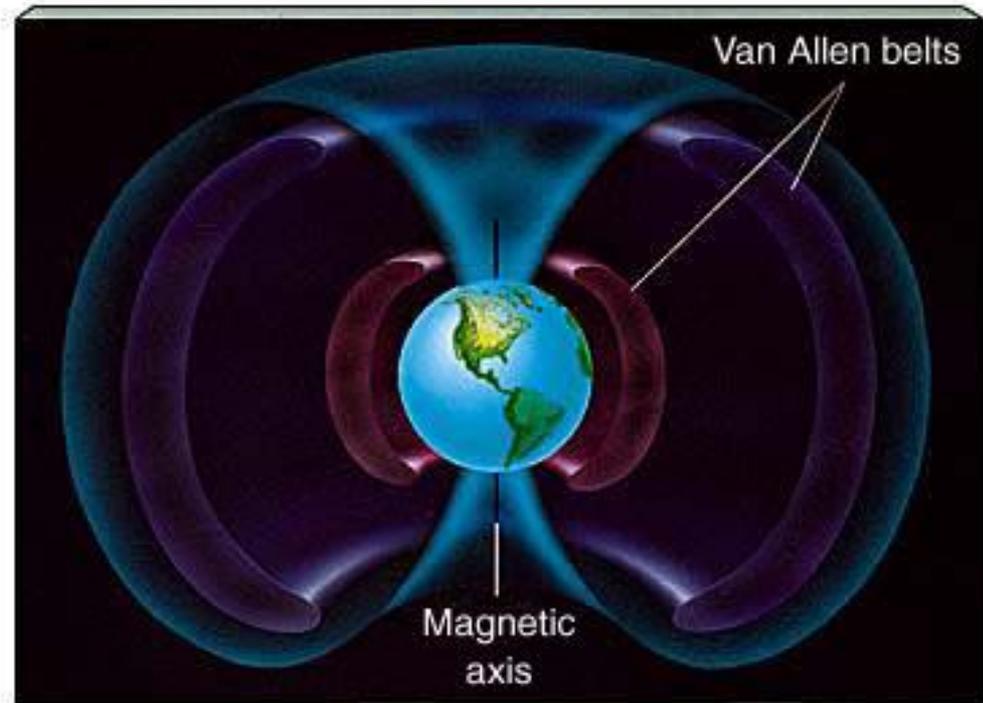
- Campo magnetico da Lua:

$B < 10^{-9}$ Tesla

- Campo magnetico da Terra:
dipolar - como imã

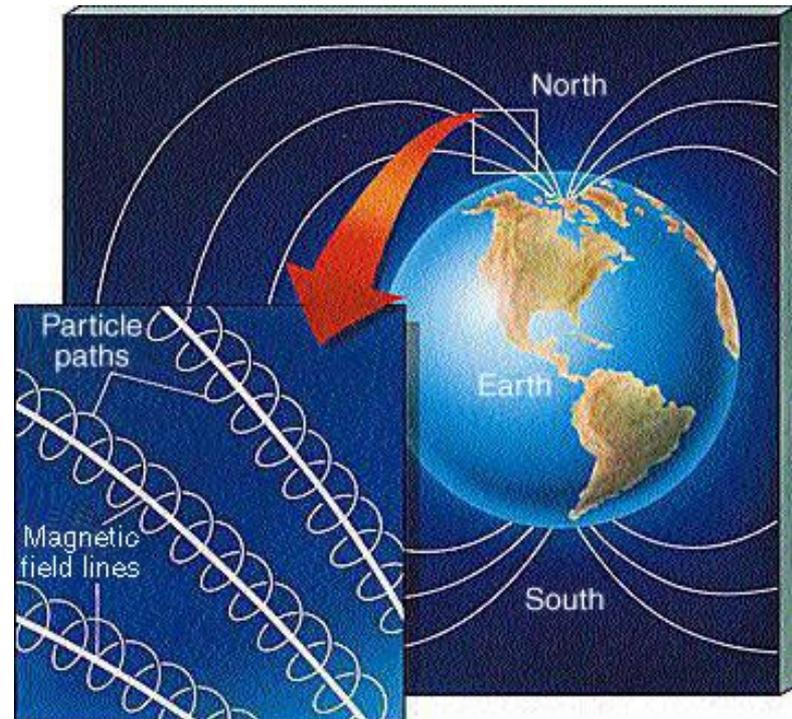
$B = 0.4 \times 10^{-4}$ Tesla = 0.4 Gauss

- T: eixo do dipolo inclinado de 12°
- **Cinturoes de Van Allen:** 3000 a 12000 km: 2 cinturoes com particulas carregadas de alta energia – vindas com o vento solar e sao capturadas pelo campo magnetico da Terra
- Cinturao de fora: eletrons principalmente
- Cinturao de dentro: protons



Campo Magnetico da Terra

- Particulas carregadas espiralam no campo e escapam da magnetosfera pelos polos magneticos: colisoes com moleculas do ar: liberam energia
- ➔ Produzindo auroras: resultado da emissao de radiacao pelas particulas (brilhantes nas altas latitudes: Artico e Antartica)



Origem da Lua e da Terra

- **Terra: planeta dos mais evoluídos** – mas continua em evolucao
- **Lua: mundo fossil** que preserva evidencias dos 1°s estagios da evolucao do sistema planetario
- **3 modelos possiveis de formacao:**

Origem da Lua e da Terra

- **Teoria de conformação** (teoria das irmãs): T e L formaram-se ambas ao mesmo tempo – **formaram-se ambas do mesmo fragmento**

Ponto fraco: T e L - densidade e composição distintas

Origem da Lua e da Terra

- **Teoria de captura:** T e L formaram-se separadamente e L capturada + tarde.

Ponto fraco: captura gravitacional da L teria sido muito difícil num encontro próximo no passado; também **mantos de ambas são similares e provavelmente não se formaram completamente independentes**

Origem da Lua e da Terra

- Teoria do impacto: + aceito

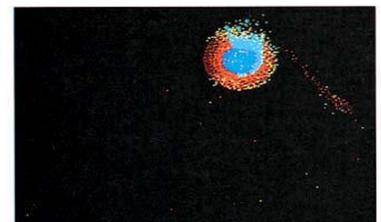
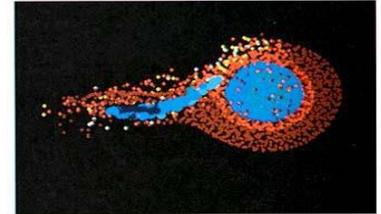
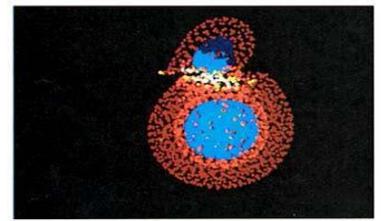
Colisao entre T jovem + 1 planeta do tamanho de Marte:

Simulacoes numericas: pedacos da T e do planeta coalesceram em orbita estavel formando L

- ambos teriam manto similar
- L nao teria nucleo metalico (azul)
- Mas T sim se ja houvesse se formado antes da colisao

azul: nucleo metalico

vermelho: manto rochoso



Informação Complementar

Historia Geologica da T e L

Terra:

- **A 4,6 bilhoes de anos:** formou-se por coalescencia de material do disco proto-planetario
- **Rochas + velhas na T: 3,9 bilhoes a.** – solidificaram-se depois da formacao, e erosao + eficaz apagou detalhes do passado
- **Parcialmente derretida no 1° bilhao de a.** – materia mais densa afundou no nucleo e material + leve ficou na superficie
- **Ate 3,9 bi. a:** bombardeamento intenso de meteoritos ajudaram a manter T derretida
- **Aquecimento por radiatividade no interior** continuou mesmo com solidificacao da superficie
- **Com o tempo: resfriamento de fora para dentro** – formacao da crosta e estratificacao conhecida hoje pelos estudos sismicos
- **As altas T's do nucleo:** o que restou de bem quente dos primordios da T
- **Atividade vulcanica:** formacao da atmosfera
- **Queda dos meteoritos:** fratura das crostas
- **A 3,7 bi. a:** surgimento dos 1°s continentes
- **Muita chuva e vento:** erosoes da superficie
- **A 600 mi. a.:** processos anteriores diminuiram progressivamente – T tornou-se semelhante ao que é hoje

Historia Geologica da T e L

Lua

- **4,6 bi.a.:** formou-se
- **Crosta: começou a solidificar 4,4 bi.a.** (corresponde a datacao rochas lunares mais antigas) e bombardeada por meteoritos
- **Planaltos:** partes + antigas
- **Mares: + recentes**
- **1ºs 500 mi.a.:** bombardeamento por meteoritos violento o bastante para manter derretidas camadas superficiais (rochas nao boas condutoras de calor)
- **Lua pouco massiva:** radiatividade insuficiente para mante-la liquefeita
- **3,9 bi.a.:** bombardeamento intenso parou – forma-se crosta solida dentada com varias bacias largas
- **3,9 a 3,2 bi.a. atras:** vulcanismo preencheu bacias com material basaltico : MARES
- **Pela atracao gravitacional da T: crosta + espessa do lado oculto:** < atividade ocorreu ali: sem grandes mares, ja que a crosta é muito espessa
- **L: menor que a T: resfriou + rapido:** atividade vulcanica terminou e crosta tornou-se espessa demais nao permitindo intenso vulcanismo e nem a formacao de placas tectonicas ou continentes
- **Lua tem permanecido a mesma nos ultimos 3 bi.a.** (exceto por pequena erosao superficial por meteoros): **INATIVA**