

Forma e Movimentos da Terra

Forma da Terra

Modelos de Mundo: geocêntrico e heliocêntrico

Rotação e Translação da Terra

Precessão e Nutação

Estações do Ano

Sandra dos Anjos

IAG/USP -2023

<http://astroweb.iag.usp.br/~aga210/>

Vimos que os astros se movimentam na Esfera Celeste e realizam o chamado Movimento Diurno dos Astros.



Este movimento aparente deu suporte ao desenvolvimento de um modelo de Universo denominado “**Modelo Geocêntrico**”, que sabemos estar incorreto.

Sabemos que este movimento é aparente e, que, na verdade é a Terra quem realiza este movimento.

Como se concluiu que, de fato, é a Terra que se movimenta?

Quais são os argumentos e evidências que mostram este fato?

O que impulsionou os “pensadores da época” a buscar outras alternativas para explicar o movimento dos astros?

Quais as consequências da solução encontrada (Modelo Heliocêntrico) para explicar o que observamos ?

Visão do Cosmos

Até o século XVII pensava-se que o Cosmos, o Universo, era finito e que as estrelas estavam todas fixas, imóveis, na superfície de uma esfera cristalina denominada “Esfera Celeste”.



Gravura do livro de Camille Flammarion (1888) mostrando um homem da Idade Média procurando entender como funciona o universo.

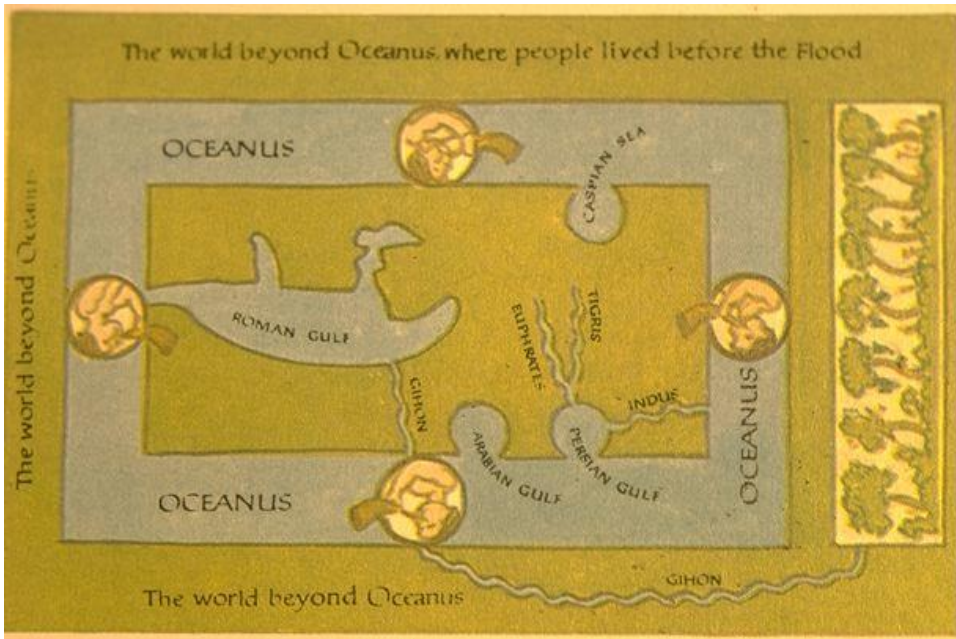
Só depois se começou a supor que havia mais mundos e que as estrelas estavam a diferentes distâncias de nós

Terra: a forma

Argumentos em favor da Terra Redonda são irrefutáveis e variam em sofisticação para apreendê-los....

Representação Terra Plana do
Séc.VI d.C

Sentido intuitivo humano nos
induz a imaginar que a Terra é
plana

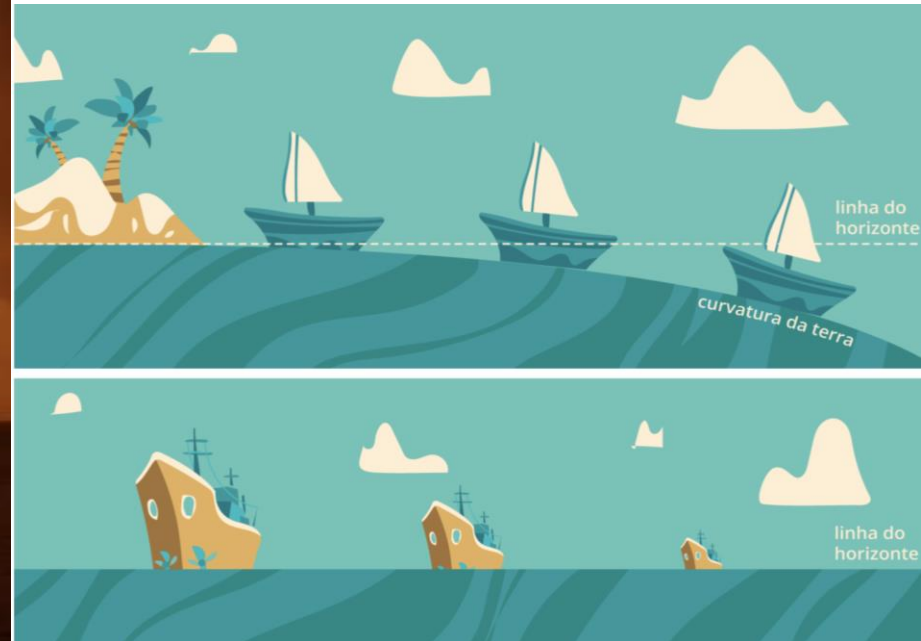


Redesenho do mundo de Cosmas
Indicopleustes (século VI)

Barco se afastando....

Se fosse plana ele diminuiria de tamanho conforme fosse se afastando, mas mostraria todas as partes diminuindo igualmente.

Como se observa, o mastro é o último a desaparecer quando o navio se afasta do continente



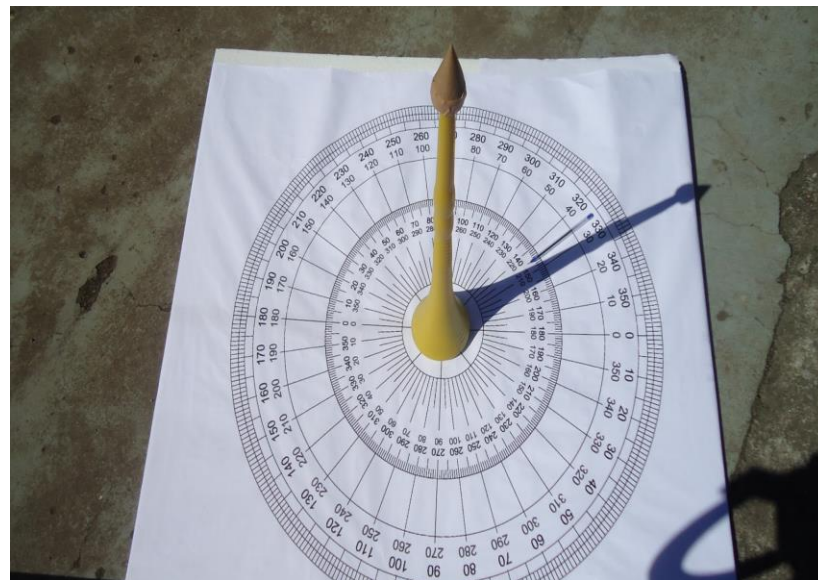
Evidências da Esfericidade da Terra

...fato conhecido desde os gregos, 300 anos antes da Era Cristã

Eratóstenes idealiza um experimento baseado em um raciocínio simples, para verificar a esfericidade da Terra:

Percebeu que longas hastes (gnomon) colocados em cidades distantes **projetavam sombras diferentes** ao meio-dia.

Isso só podia acontecer no mesmo horário se um lugar estivesse mais inclinado em relação ao Sol do que outro.



Confirmam o vídeo do Carl Sagan que mostra claramente o raciocínio, caso fosse plana e inclinada!

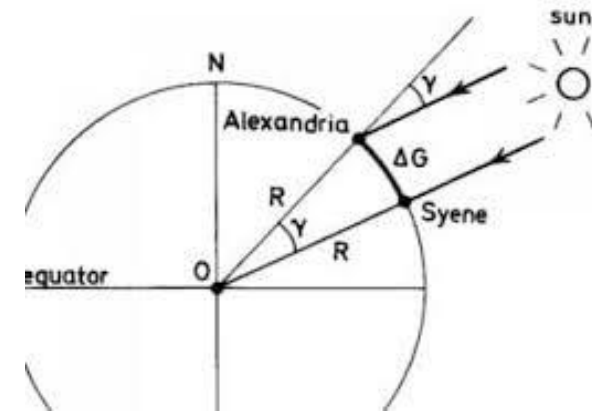
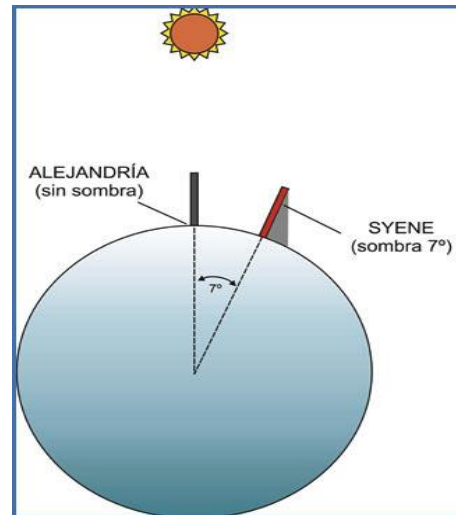
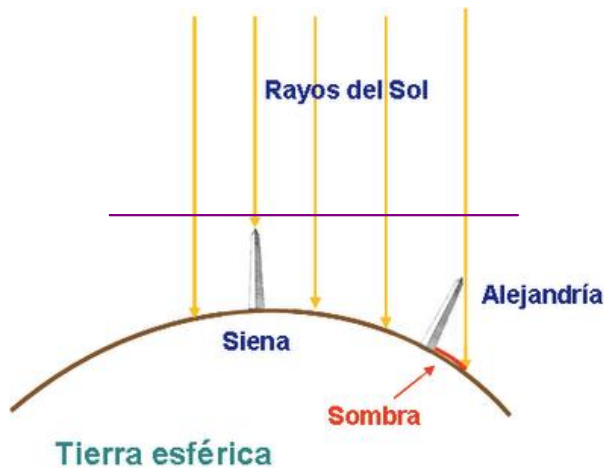
<https://www.youtube.com/watch?v=fu9Z7YuXLVE>

O Experimento: medida do raio da Terra

Eratóstenes realiza medidas para determinar a esfericidade e o raio da Terra (R)

Percebe a existência de **sombra** de uma "vara" em Alexandria no mesmo dia em que os raios de Sol estavam **verticais** na cidade de Siena (Sol a pino...).

Utiliza a técnica trigonométrica (triangulação)



$$d(AS) = 5.000 \text{ stadias} = 925 \text{ km} \rightarrow 7,2$$

$$2\pi R \rightarrow 360^\circ$$

PS: *stadias* = *estádios*
Unidade de Medida da época

$$2R \times \pi \times 7,2 = 925 \times 360 \text{ km}$$

$$2R = 14.722 \text{ km} = 7361 \text{ Km}$$

$$R (E) = 6369 \text{ km} \rightarrow R_{\text{atual-médio}} = 6371 \text{ Km}$$

Esfericidade da Terra
...Eclipses...desde a antiguidade!



Terra vista da Apollo 8



Movimento diurno aparente em torno do PS visto dos Andes

Via Láctea

Nuvens de Magalhães

Ojos del Salado

Mais alto vulcão ativo da Terra

Altitude = 6000 m

Temperatura = -18 °C

Exposição \cong 1 hora

Muito difícil aceitar as evidências e mudar a concepção da **forma da Terra**, pois é **pouco intuitiva...**

Do mesmo modo, a observação do **movimento geral dos astros**, o **Movimento Diurno**, nos induz a acreditar, erroneamente, que a **Terra está fixa e que são os astros que se movimentam...**

Vamos perceber que as dificuldades enfrentadas para a concepção da forma da Terra, bem como seus movimentos, estão intimamente vinculadas a dificuldade em perceber que a **localização do observador em um Sistema de Referência particular, local, induz a conclusões equivocadas.**

A mudança de referenciais foi o ponto de inflexão para um dos maiores avanços no desenvolvimento do pensamento humano.

Vamos ver quais foram os motivos que impulsionaram os “pensadores” da época a abandonar a forma intuitiva de pensar.

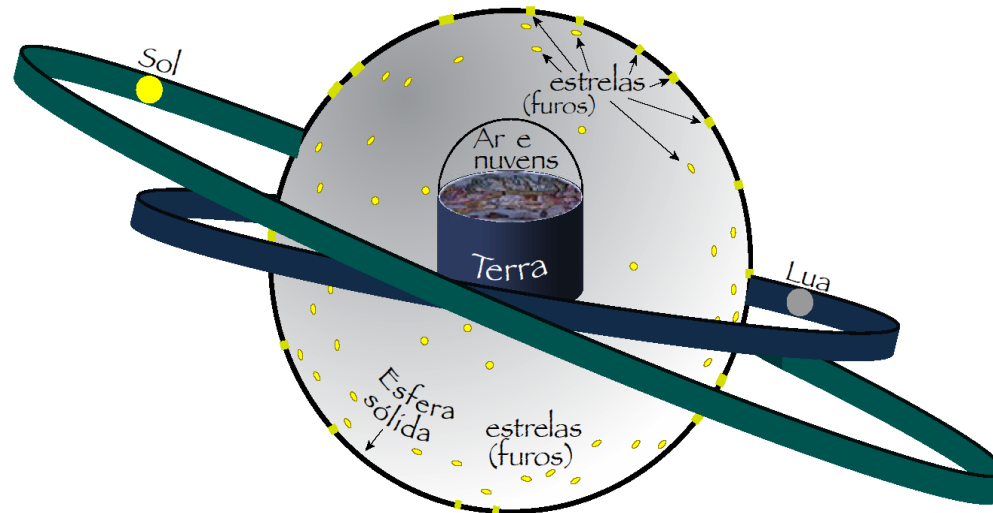
Antes porém, vamos deixar claro as premissas fundamentais da visão geocêntrica.

Modelo Geocêntrico

Anaximandro de Mileto (Turquia ~545 a.C)

Geógrafo, matemático, astrônomo, político e filósofo pré-socrático; discípulo de Tales

O céu seria esférico formado por camadas a diferentes distâncias.



O Sol estaria na esfera mais distante e as estrelas na mais próxima.

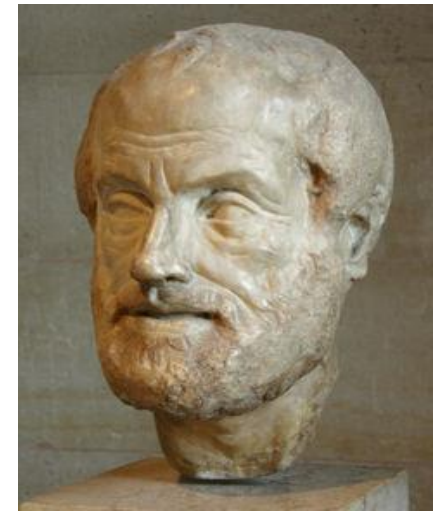
Terra seria um cilindro, imóvel, no centro do universo

O Sol, a Lua e os astros se movem em círculos ao redor da Terra

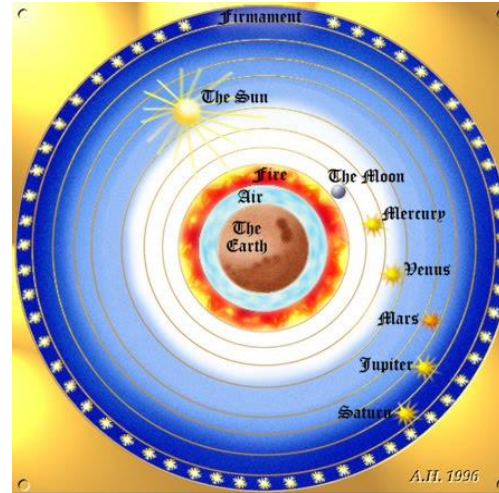
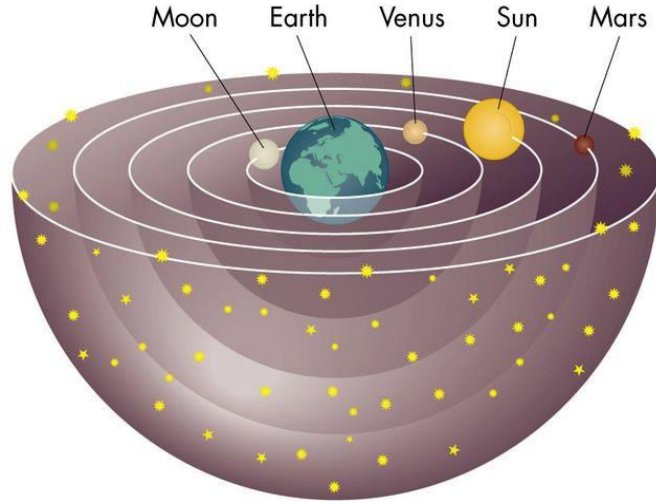
Modelo Geocêntrico

...dominou o pensamento científico até o final da idade média.

**Aristóteles (384-322 a.C, Macedônia;
Grécia – filósofo...escola de Platão)**



Busto de Aristóteles no museu do Louvre em Paris.



Terra imóvel, no centro do universo.

O Sol e os astros se movem em círculos ao redor da Terra.

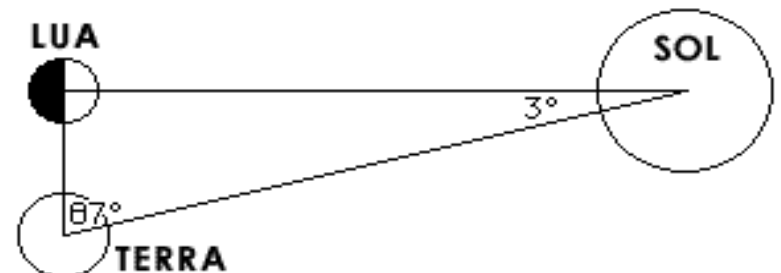
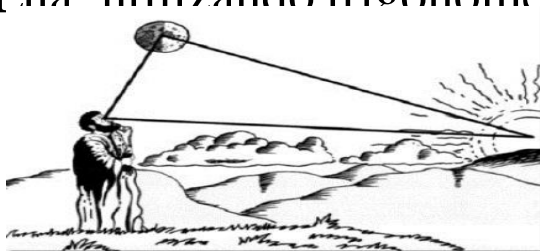
Quanto maior o movimento aparente, mais próximo da Terra.

Segundo Aristóteles, Aristarco de Samos (310-230 a.C) apresentou uma alternativa a este Modelo Geocêntrico no qual o Sol seria o astro dominante (Modelo Heliocêntrico !!).

Mas esta sugestão não teve praticamente qualquer impacto no pensamento científico da época.

Outra contribuição importante de Samos foi classificar as estrelas em "Classes de Brilho" (veremos este tema mais adiante).

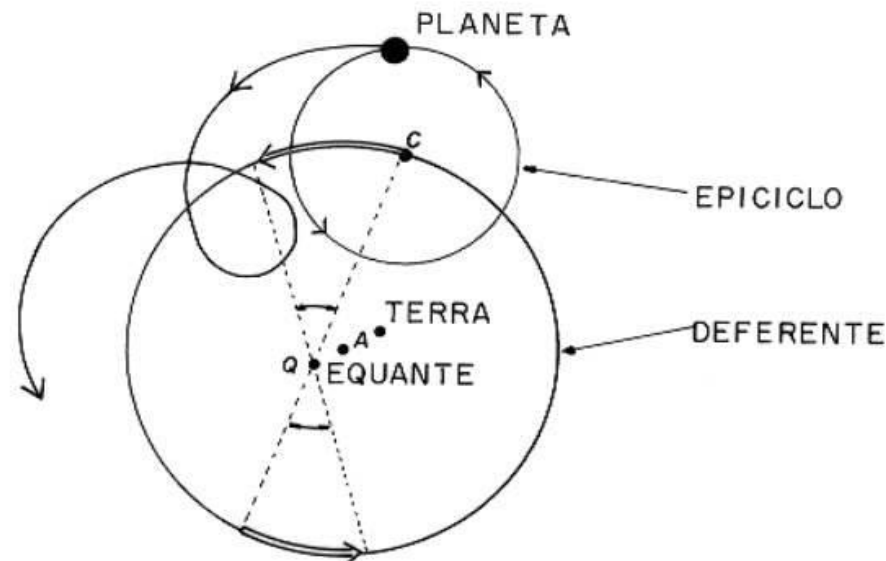
Determinou também tamanhos e distâncias do Sol e da Lua utilizando trigonometria.



Cláudio Ptolomeu (85-165 d.C – cientista greco-egipcio)



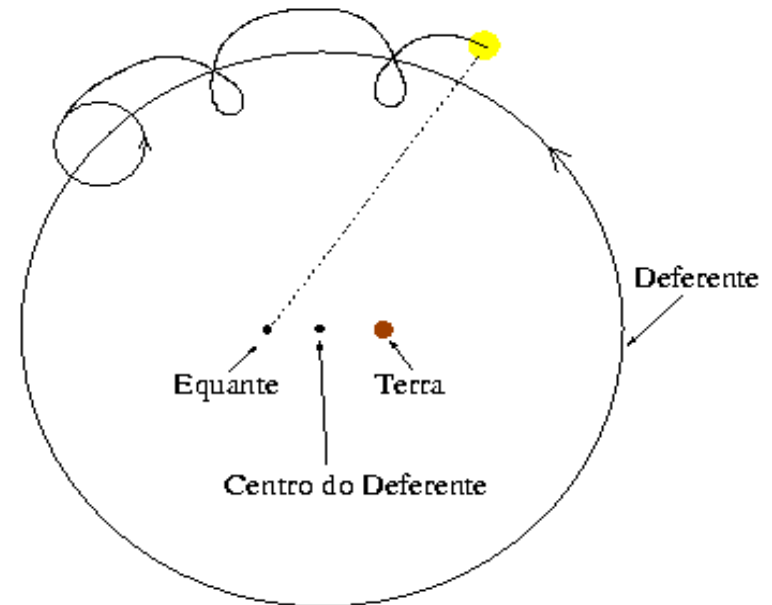
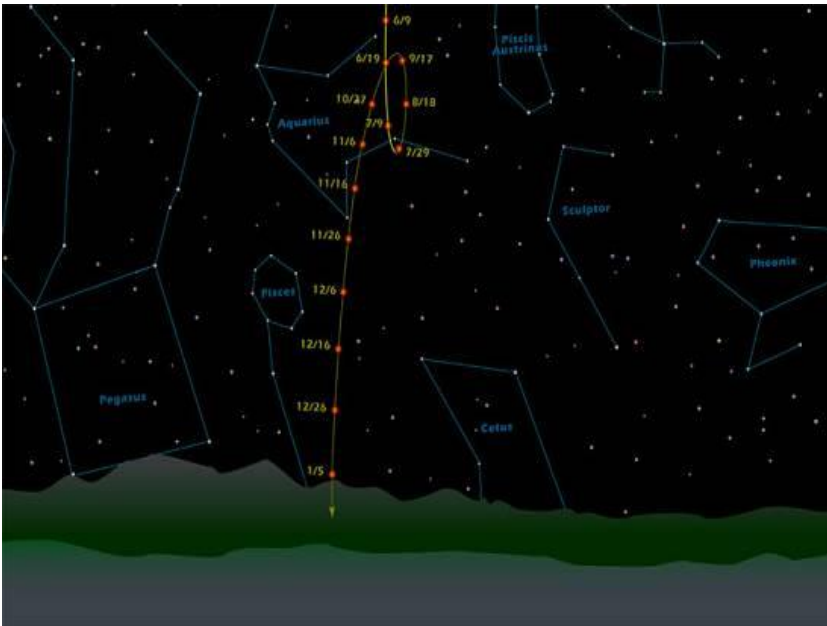
Levou o modelo geocêntrico ao seu ápice tornando possível realizar previsões razoavelmente precisas. O principal movimento circular se daria ao longo do **deferente**, mas a Terra ocuparia uma posição um pouco afastada do centro deste círculo.



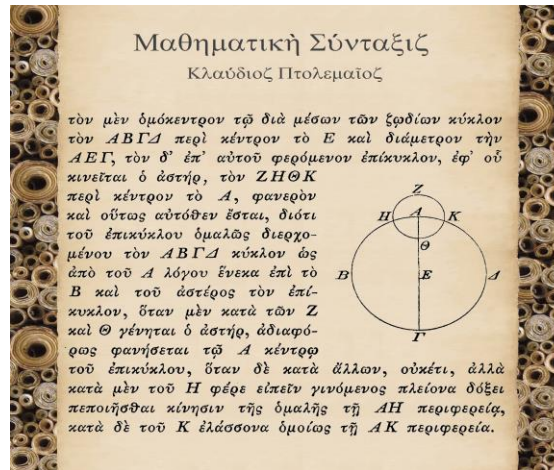
Os astros mais próximos teriam ainda um movimento adicional de **epiciclo** (pequeno círculo descrito por um astro em torno de um ponto imaginário, que por sua vez, descreve outro círculo). (pq ?!).

Cláudio Ptolomeu (85-165 d.C)

Para completar o modelo era preciso supor ainda que o movimento seria uniforme, não em relação ao centro do deferente, mas sim, em **relação a um terceiro ponto denominado Equante**: o ponto ao lado do centro do deferente oposto à posição da Terra, em relação ao qual o centro do epiciclo se move a uma taxa uniforme.



Este modelo bastante complexo era capaz de prever as efemérides com precisão da ordem de 1 grau e passou a ser amplamente utilizado.

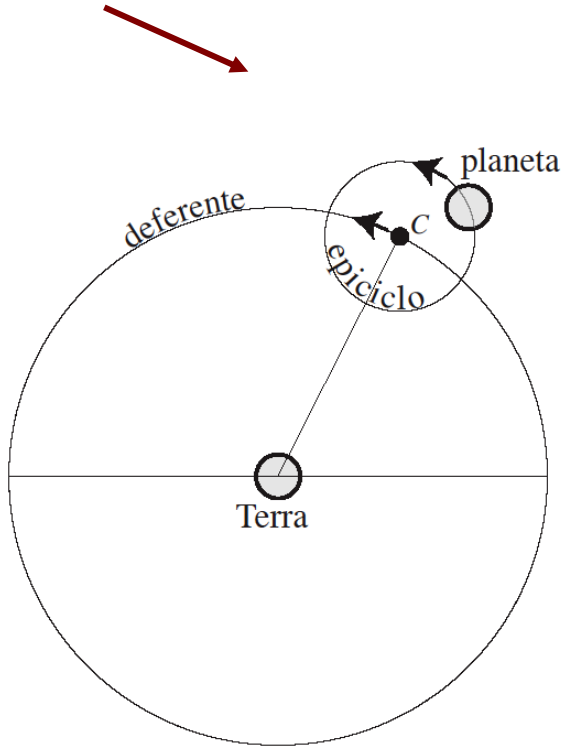


Ptolomeu deixa um “monumento” intelectual → **Almagesto**: 13 livros que descrevem matematicamente o movimento planetário (geocêntrico). Apesar de o Modelo Geocêntrico ser equivocadamente considerado um monumento intelectual, já que pela primeira vez na história da Humanidade são utilizadas equações matemáticas para descrever a natureza, o movimento planetário!

Almagesto (também conhecido como Grande Síntese) -> treze livros sobre Astronomia, Geometria e Trigonometria. Nesta grande obra, Ptolomeu fez estudos sobre o movimento do Sol e da Lua, trigonometria esférica, descrição do Astrolábio, eclipses da Lua e do Sol, conjunções de planetas e catalogação de estrelas.

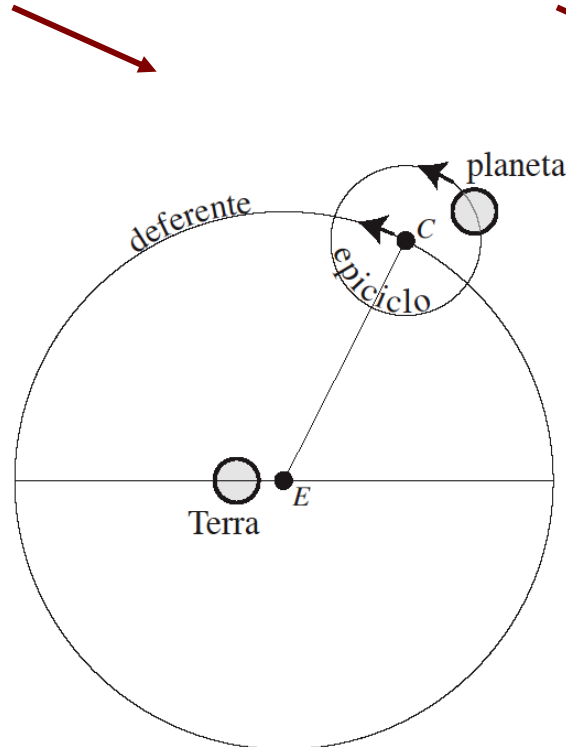
Evolução do Modelo Geocêntrico – Epiciclos

- Apolônio (~230 a.C.); Hiparco (~140 a.C.); Ptolomeu (~130 d.C.)

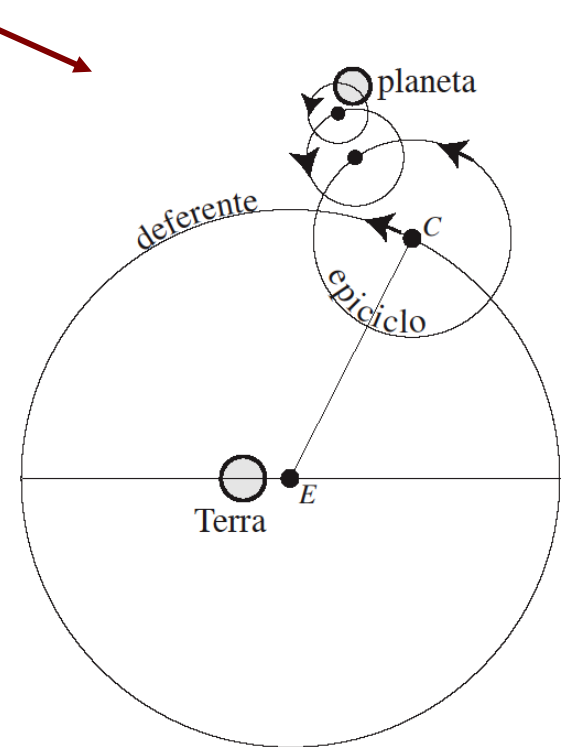


A Terra se encontra no centro do círculo (deferente) onde o epiciclo orbita.

O planeta gira em torno do ponto C.



Para considerar a velocidade variável no movimento anual do Sol a Terra foi deslocada do centro E.



Para poder explicar todas as irregularidades das órbitas dos planetas, Ptolomeu introduziu epiciclos que giram em torno de epiciclos.

A idade média que se seguiu foi caracterizada por um enorme respeito e admiração pelos clássicos, entre os quais se destacava **Aristóteles**. Portanto, nada mais importante do que **compilar toda a sua obra e organizar** assim, uma **ordem escolástica** definitiva. Um método de pensamento crítico....

Já no final deste período, **São Tomás de Aquino** (1225 - 1274) acreditava que a **ordem que vemos na natureza é uma prova irrefutável da existência de Deus**. Afinal, a **matéria deixada por si só não poderia se organizar**, a não ser que fosse guiada por uma **inteligência suprema**.

Gradualmente, a doutrina cristã passou a receber no texto bíblico elementos que reforçavam a idéia do geocentrismo. Esta **mesclagem da fé cristã com as informações astronômicas** que começavam a surgir seria motivo de uma tensão entre o pensamento científico e a igreja.

A integração do **pensamento científico** com o **pensamento religioso** foi responsável pela incorporação de conceitos de perfeição que seriam mais compatíveis com a origem divina das estrelas e planetas.

Consolidava-se assim a noção de que os objetos celestes eram perfeitos, e, com algumas pequenas correções, orbitavam em torno da Terra em órbitas circulares.

Nicolau Copérnico (1473-1543)

...astrônomo, matemático, médico e religioso polonês



O conceito do Equante, feito por Ptolomeu, representava para Copérnico uma **ruptura insuportável** ao ideal de órbitas circulares perfeitas.

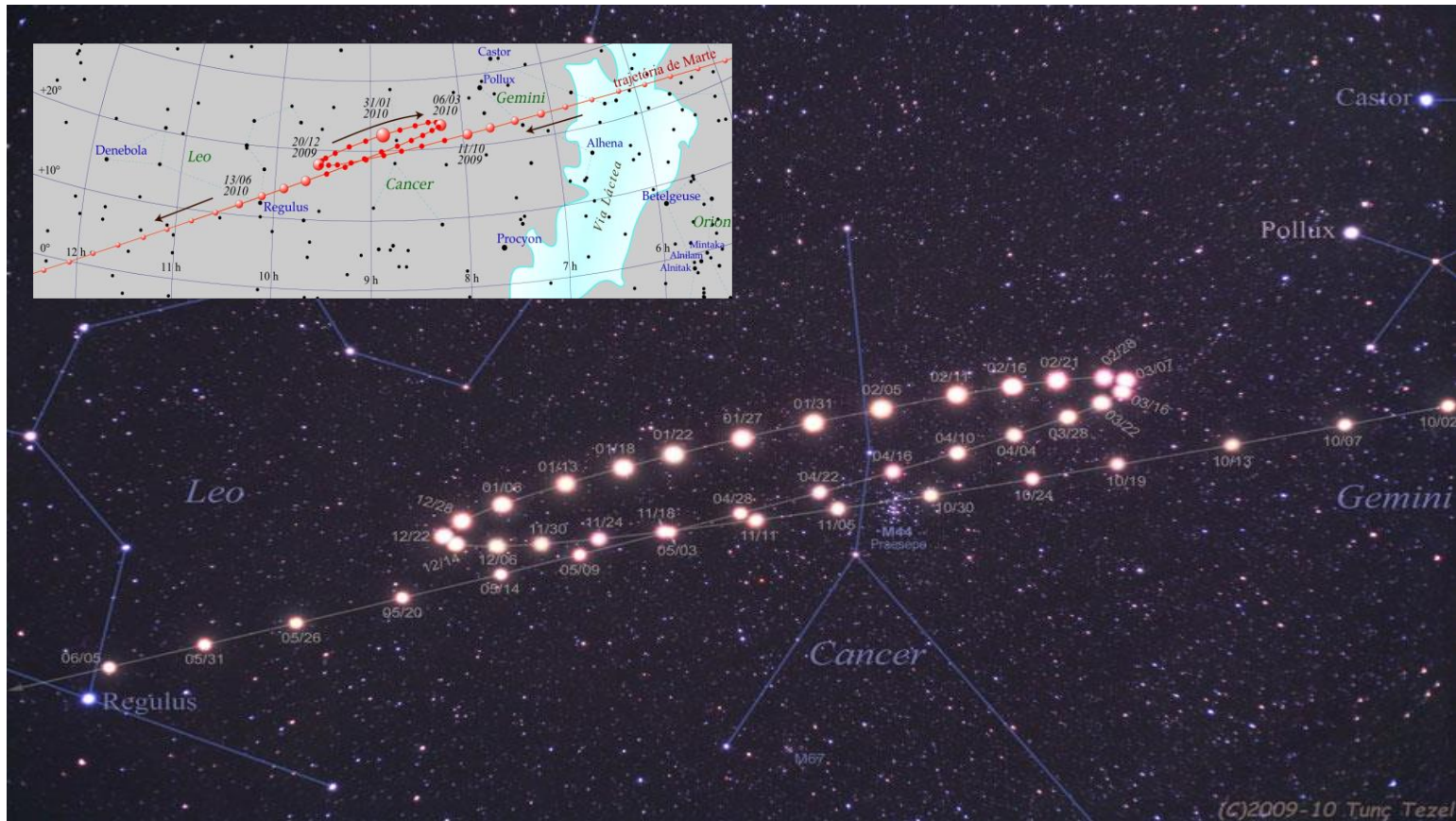
A Teoria de Copérnico também fazia uso dos epiciclos. Entretanto, a diferença é que, para ele, o Sol, fonte de luz e energia, era o “local” mais provável para encontrarmos Deus. Portanto, ele, e não nós, é quem deveria estar no centro do Universo.

Desta forma, ele propõem um modelo onde desloca a Terra do centro do Universo e coloca o Sol, divino, no centro do universo. Assim, a Terra, e os outros planetas, é quem orbitavam em torno do Sol em órbitas circulares, **introduzindo o heliocentrismo** na discussão científica da época.

Nesta concepção, o movimento aparente de “laço”, já amplamente observado para o planeta Marte, é explicado pelo fato de estarmos numa órbita interna não sincronizada com a órbita daquele astro. (vejam a seguir uma simulação do fenômeno)

Vamos recordar o movimento em "laço" de Marte...

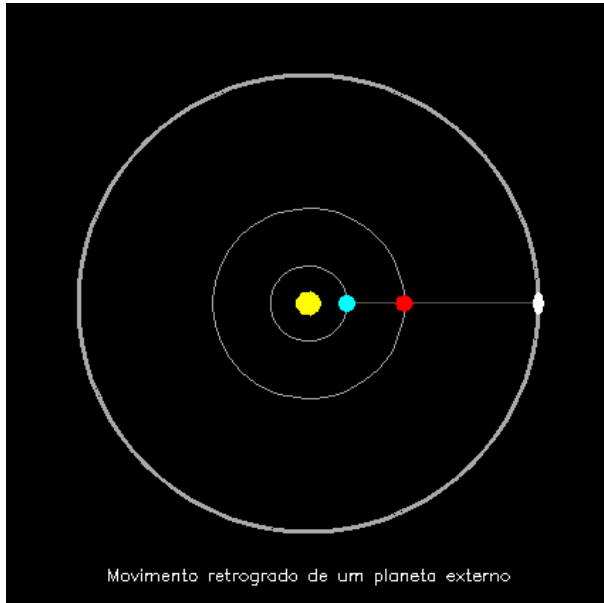
ver <https://www.youtube.com/watch?v=I2THXDdoCpY>



Créditos: Tunç Tezel (TWAN)

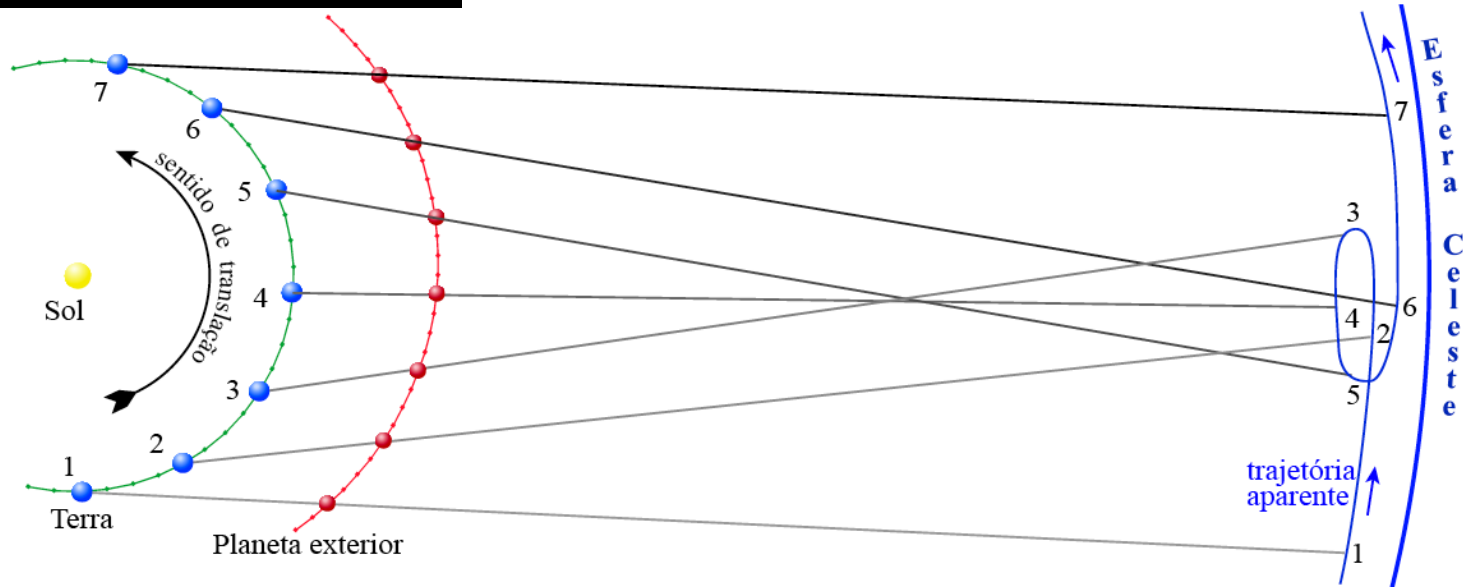
Os planetas apresentam movimento **direto** em relação às estrelas (de oeste para leste) na maior parte do tempo, mas também apresentam movimento **retrógrado** (de leste para oeste).

Movimento Retrógrado dos Planetas



Ver animação em:

<http://www.astro.iag.usp.br/~gastao/Retrogrado/retrogrado.html>



Tycho Brahe (1546-1601)

Astrônomo bastante respeitado e por este motivo foi capaz de arrecadar fundos para construir um grande observatório.

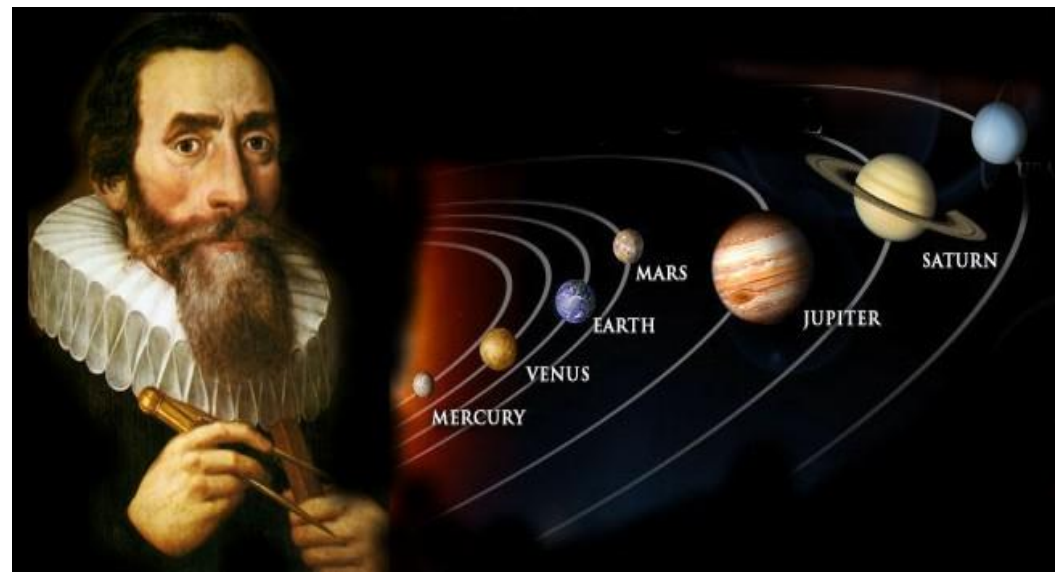


Conseguiu desta forma realizar **observações visuais** de alta precisão para a época, cerca de 8 minutos de arco, utilizando um instrumento conhecido como quadrante de parede.

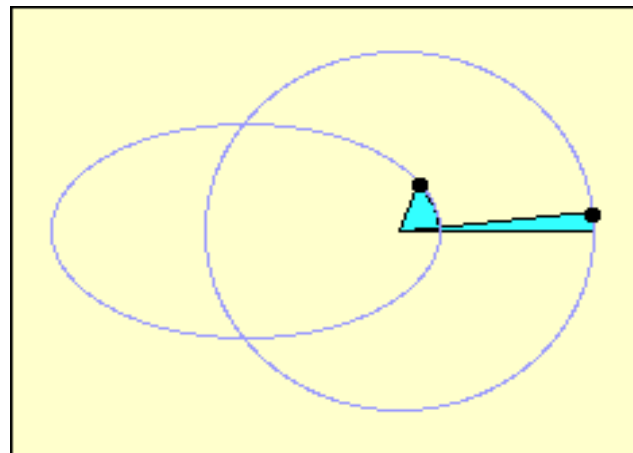
Cerca de 1000 estrelas foram observadas por ele. Estas observações foram interpretadas somente após sua morte por J. Kepler.

Johannes Kepler (1571-1630),

alemão, matemático e astrônomo, foi assistente do Tycho Brahe.

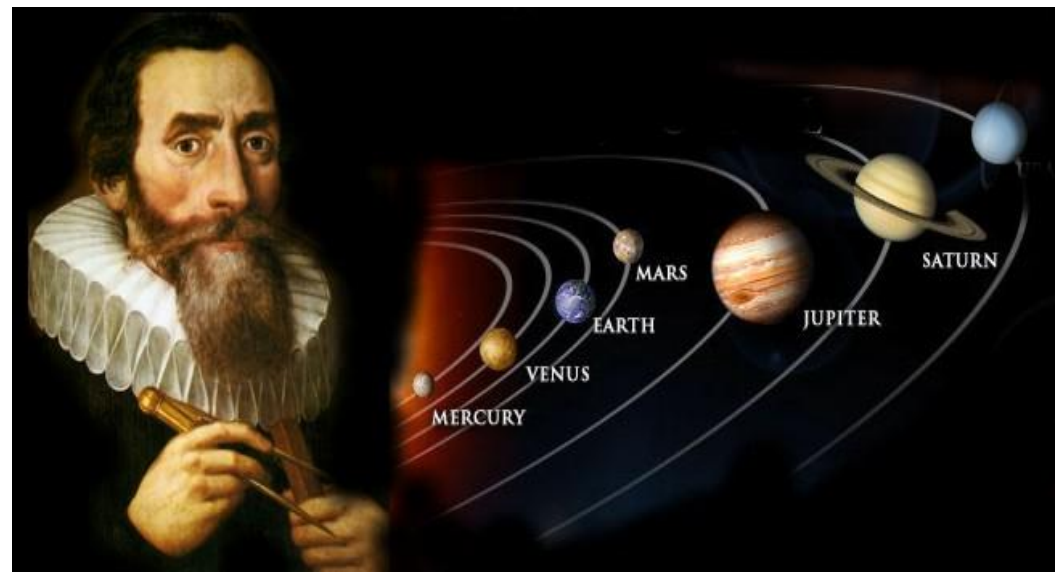


Dá continuidade aos trabalhos de Tycho, calcula a órbita de Marte e tenta ajusta-la a um círculo,...em vão! Conclui que não é circular, e que conforme sugerido por Copérnico, a órbita deveria ser elíptica. Publica artigos (1609-1619) destes resultados. Assim, o ajuste representa as orbitas observadas sem a necessidade dos epiciclos.



Johannes Kepler (1571-1630),

alemão, matemático e astrônomo, foi assistente do Tycho Brahe.



As inúmeras observações, de alta qualidade para a época, feitas por T. Brahe, foram fundamentais para determinar a forma da órbita de Marte.

Kepler introduz o conceito de erro observacional como forma de obter o melhor modelo que explicasse os dados com um mínimo de desvio estatístico.

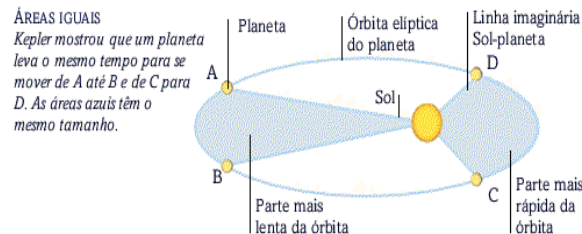
Enuncia então.....as **3 leis empíricas** do Movimento Planetário

1ª Os planetas se movem em **elipses**, com o Sol em um dos focos;

...esta Lei dá a forma da órbita do planeta

2ª A linha que liga o Sol a um dado planeta varre **áreas iguais em tempos iguais**;

... esta Lei descreve como o planeta varia continuamente sua velocidade quando descreve sua órbita, movendo-se mais rápido no periélio e mais devagar no afélio.



3ª O quadrado do período orbital de cada planeta, em anos, é proporcional ao cubo do semi-eixo maior da orbita do planeta.

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

...esta Lei dá a relação entre as distâncias médias do planeta ao Sol e seus períodos de revolução.

As 3 Leis do movimento de Kepler e a da Gravitação de Newton, permitiram que Newton generalizasse a 1a Lei de Kepler, verificasse a 2a Lei e mostrasse que a 3a Lei poderia ser alterada para a forma,

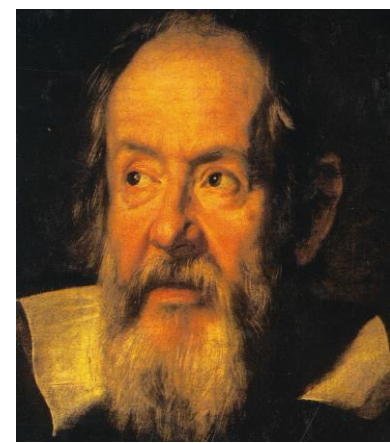
$$4\pi^2 a^3 / T^2 = G(m+m_p)$$

Onde **T** e **a** são o período de revolução e o semi-eixo maior, respectivamente, m_p é a massa do planeta, m a massa do Sol e G a constante gravitacional.

Veremos melhor este assunto na aula sobre Astronomia Moderna

Galileu Galilei (1564-1642)

Italiano, astrônomo, físico e matemático



Por volta de 1609, cientista respeitado, e simpático às idéias de Copérnico, percebeu a utilidade de utilizar um conjunto de lentes para construir um telescópio capaz de observar os objetos celestes com maior precisão.

Apesar da qualidade óptica ser ainda rudimentar, este telescópio se constituía em um enorme avanço em relação às observações anteriores feitas a olho nú.

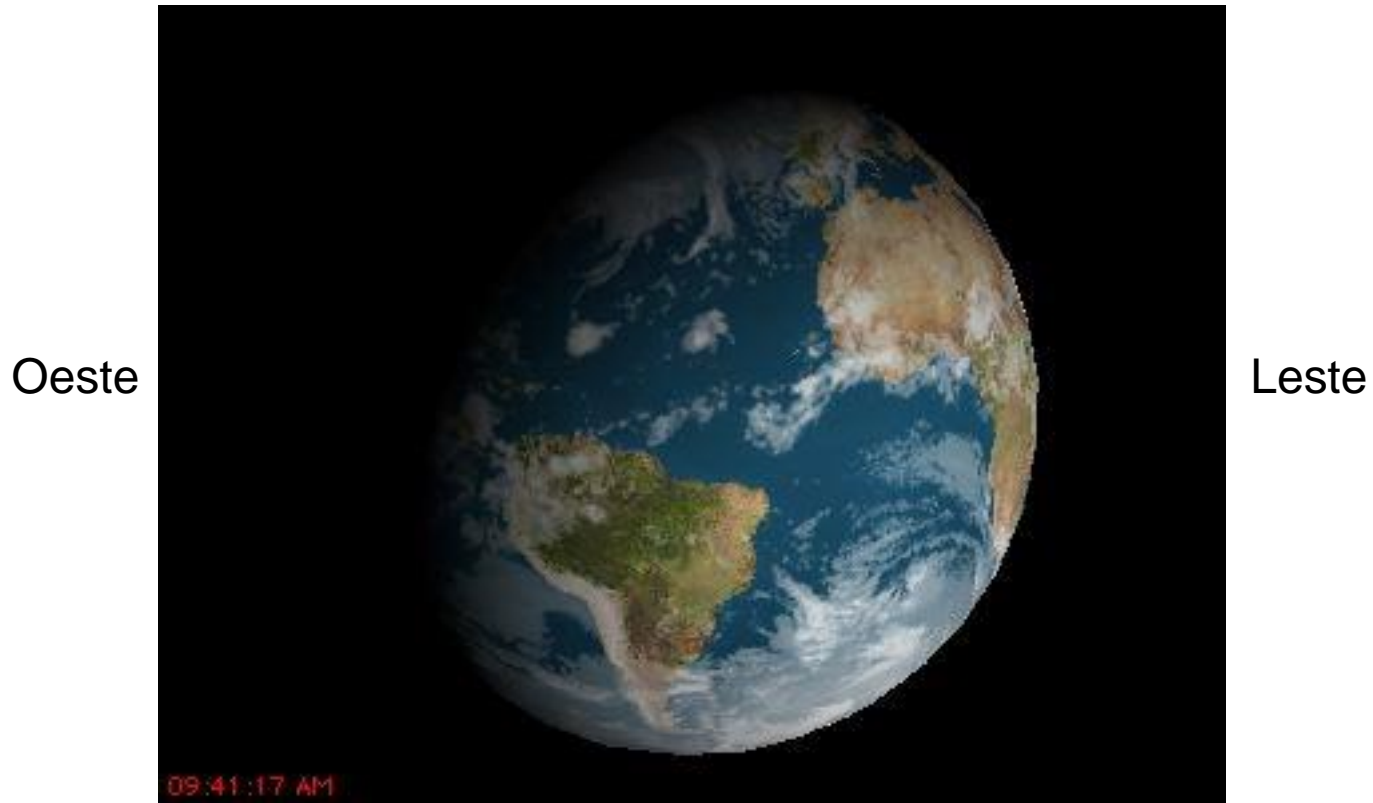
No final deste mesmo ano ele já utilizava este instrumento para demonstrar que a **Lua tem crateras e montanhas**, e, portanto, **não era perfeita** quanto se imaginava na época. .

Provou que a Via Láctea era composta por uma miríade de estrelas e percebeu a presença das luas de Júpiter, conhecidas atualmente como luas galileanas, e ainda em 1610, que o planeta Vênus mostrava o fenômeno de fases, e que, portanto, deveria orbitar em torno do Sol e não da Terra.

O que se conclui até este período histórico é que a
Terra rotaciona...
e, provavelmente, se move....ao redor do Sol...!

Rotação da Terra

Norte

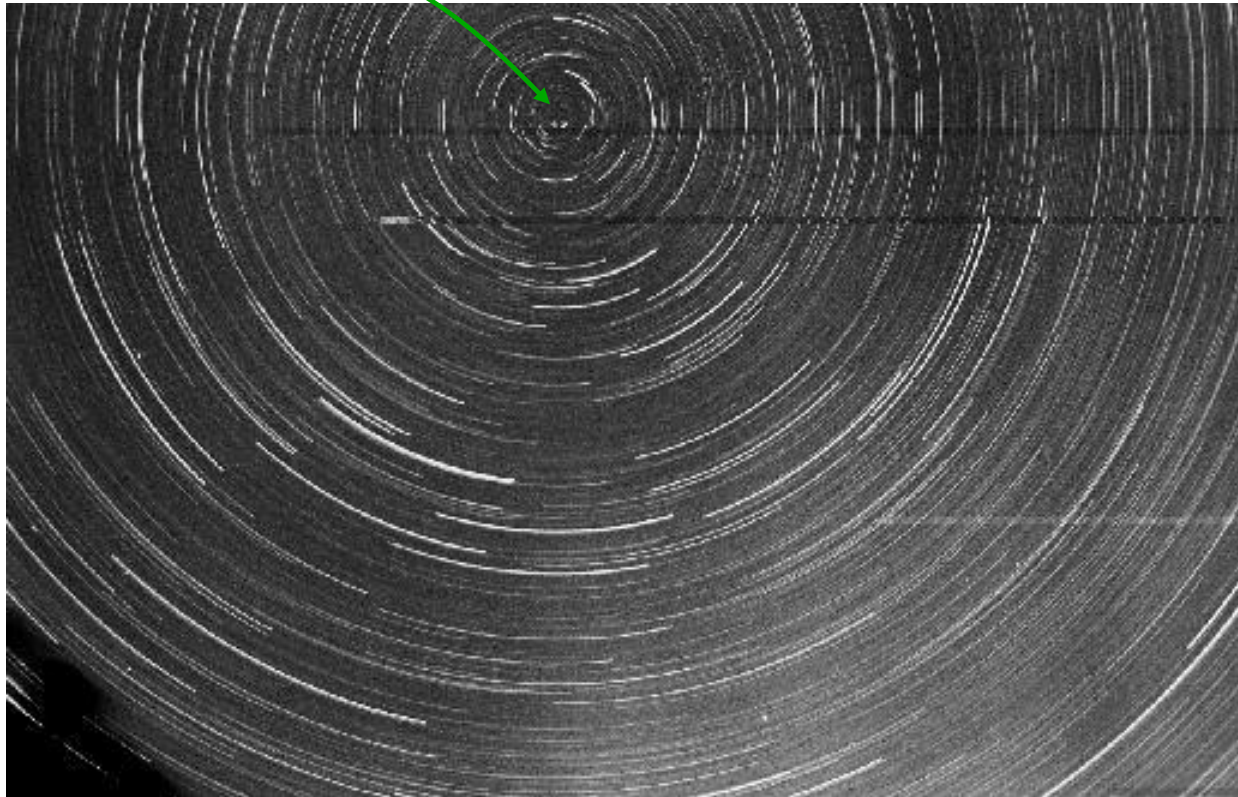


Sul

- O dia claro e a noite escura, são efeitos provocados pelo movimento de rotação da Terra em torno de seu eixo de rotação (o para L).
- Corresponde ao movimento aparente diário dos astros.

Rotação da Terra

Pólo Sul
celeste



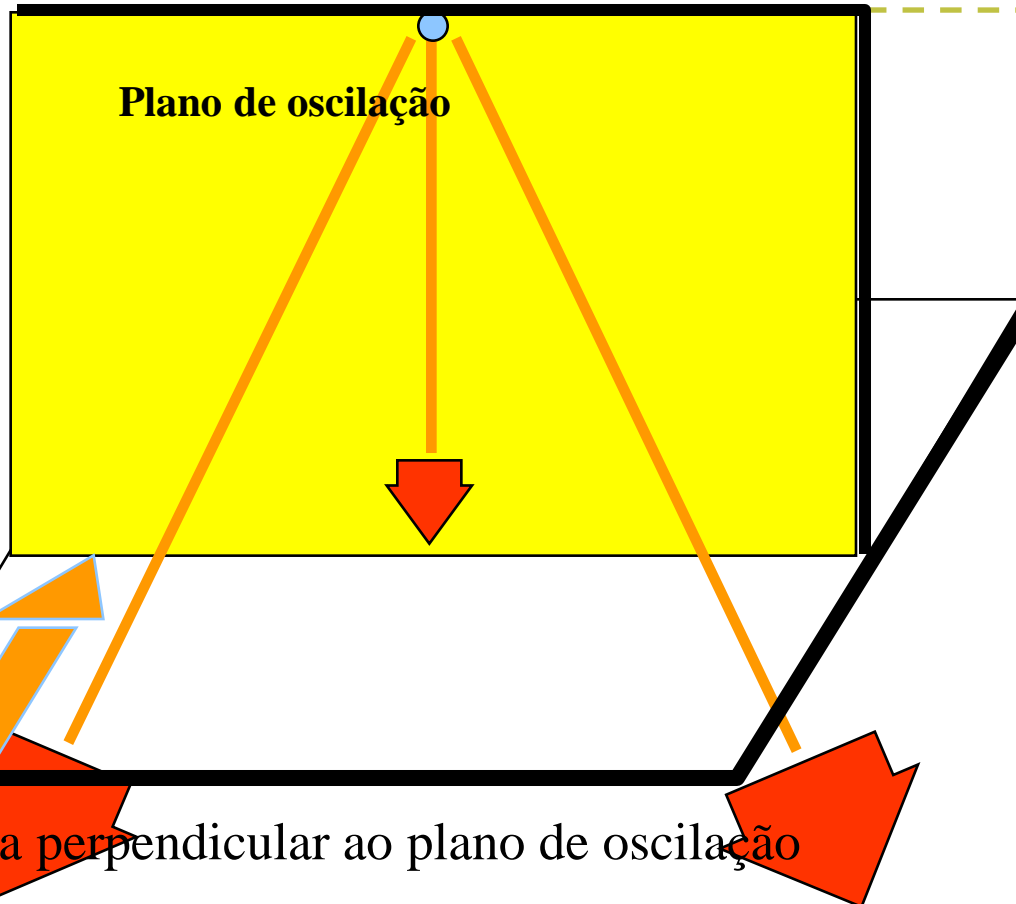
sentido
da
rotação

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

Imagem obtida pela exposição de 4 horas em um telescópio do European Southern Observatory-ESO, sem acompanhamento do movimento de rotação.

Outras evidências da Rotação da Terra

- Se a Terra não girasse teríamos uma invariabilidade no plano de oscilação de um pêndulo.



Na ausência de forças perpendiculares ao plano de oscilação, esse plano se mantém com direção fixa no espaço.

Força perpendicular ao plano de oscilação

Pêndulo de Foucault, Paris 1851

Fixado no Panthéon de Paris

Plano de oscilação se desloca durante o dia.

Se a Terra não girasse, o plano de oscilação do pêndulo permaneceria imóvel.

O plano de oscilação depende da latitude.

Nos pólos, o plano de oscilação daria uma volta completa em um dia.



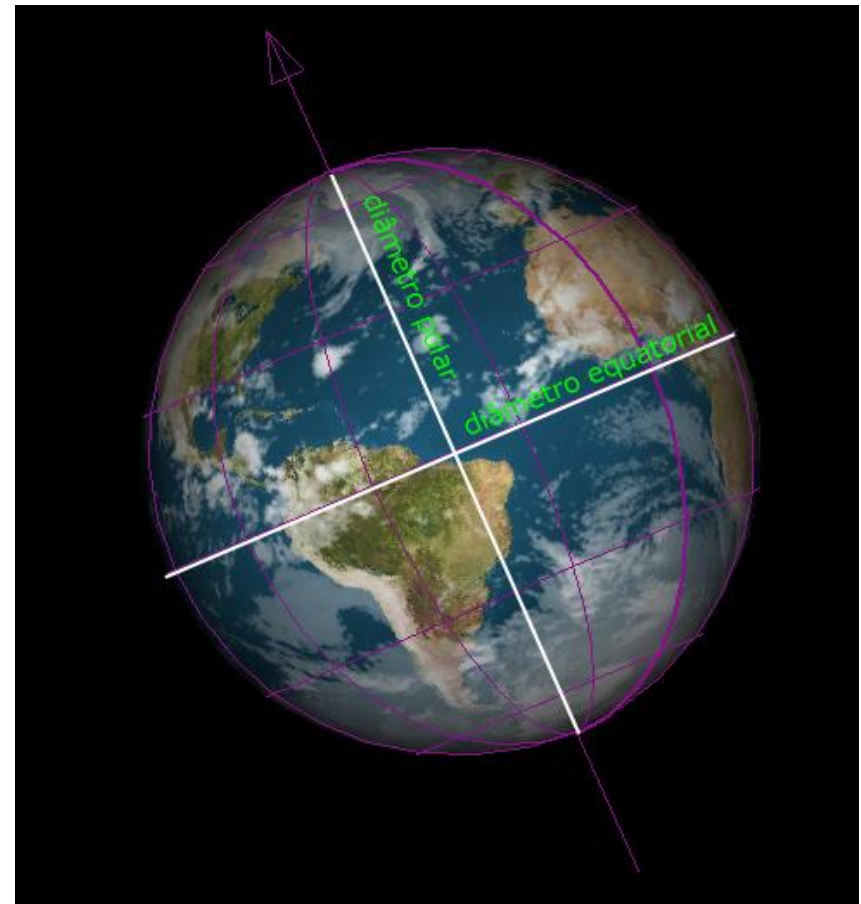
Outras evidências da Rotação da Terra (3)

Achatamento da Terra

A Terra (e o Sol, os Planetas...) se comportam em grande escala como um fluido.

A rotação provoca um aumento do diâmetro equatorial em relação ao diâmetro polar.

Na Terra, a razão entre estes diâmetros é 0,997 (21 km de diferença entre estes diâmetros).



Esta nova visão de que a Terra se movimenta em torno dela mesma, juntamente com os fatos abaixo relacionados, leva a descoberta do movimento da terra em torno do Sol, ou seja, o Movimento de Translação

1- Mudança Cíclica das Constelações do Zodíaco

2- Regularidade das Estações

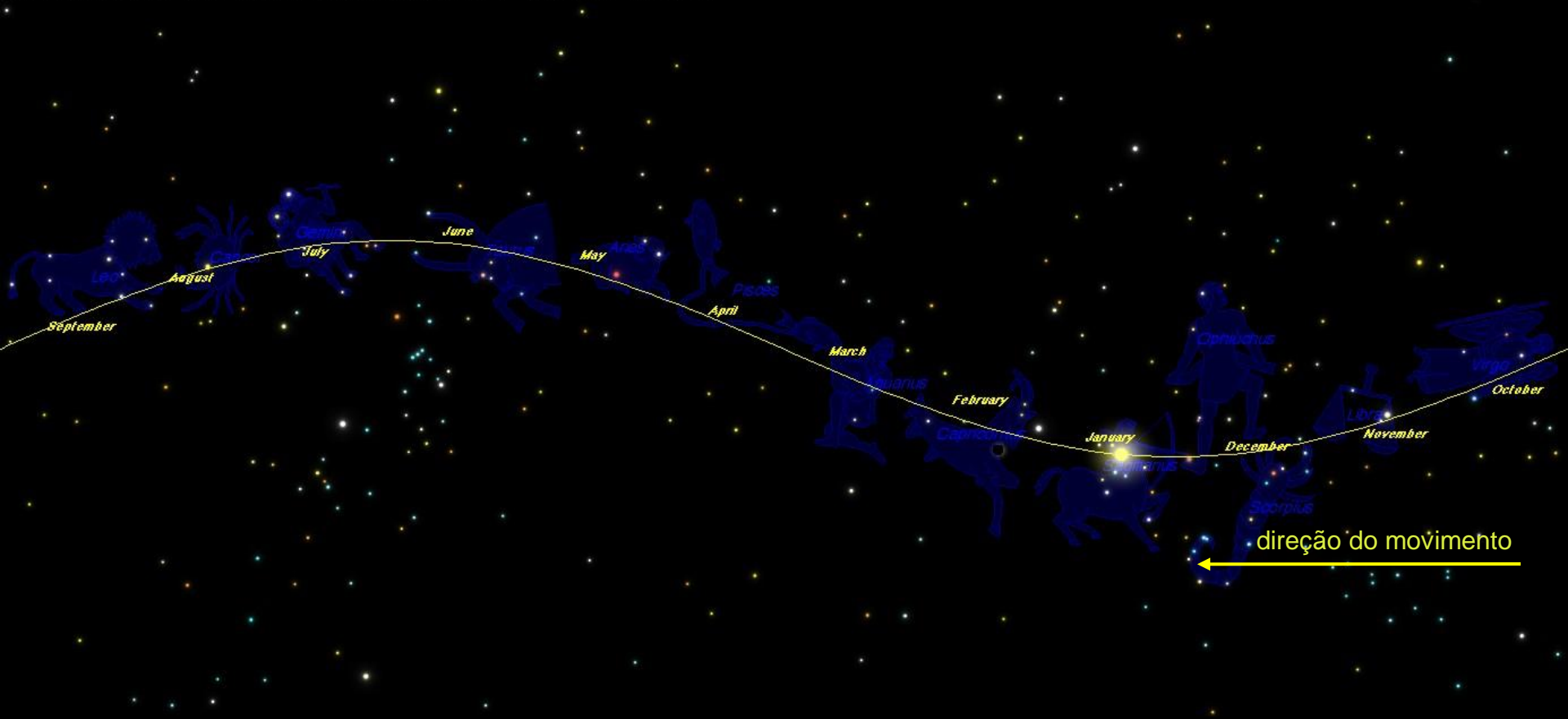
3- Temperaturas associadas a duração dos dias - no inverno dias curtos e temperaturas baixas; no verão o contrário...

4- Tamanho das sombras variava periódicamente - ao meio-dia, quando se observava a menor sombra do ano, era sinal de que era o primeiro dia do Verão, e quando a sombra era a mais comprida, o primeiro dia do Inverno

5- A duração do dia igual a da noite em 2 dias do ano

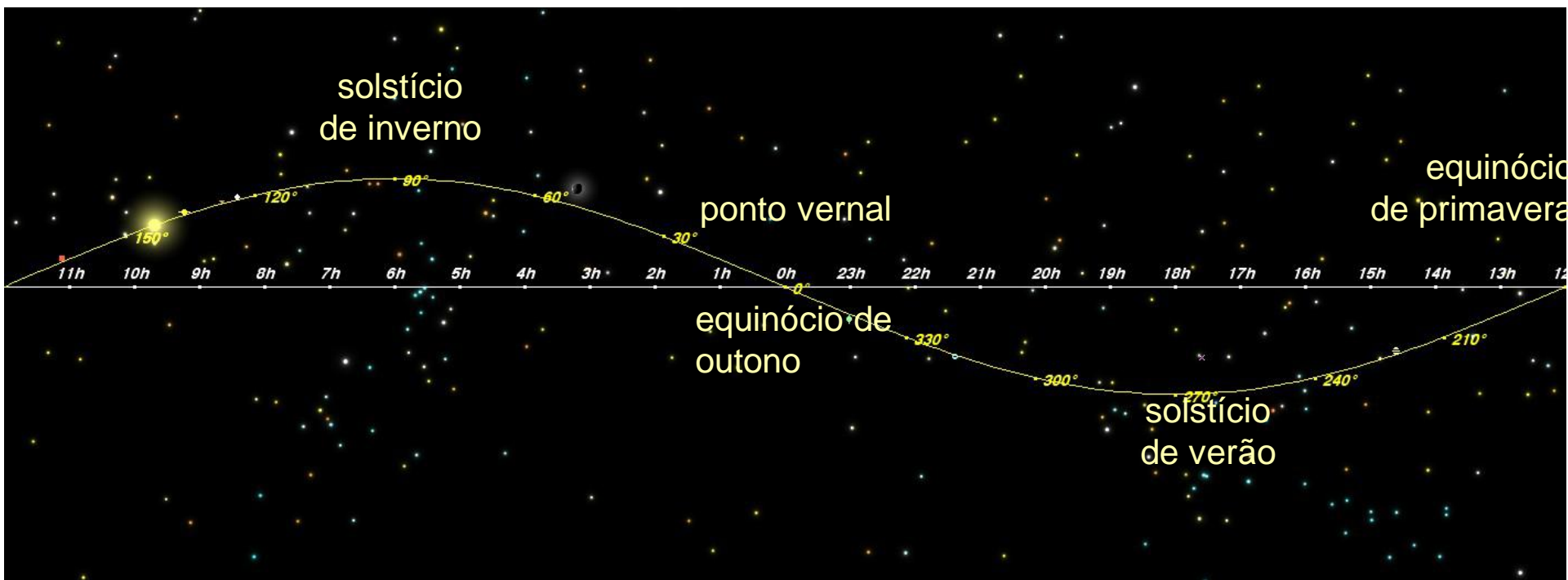
Como reconhecer o movimento de Translação da Terra projetado na Esfera Celeste?

RA: 00h 00m 00.00s Dec: +00° 00' 00.0" LMT 09:48:17 PM Sun 01 /01 /2006 Sao Paulo 47° 00' 00.0" W 23° 40' 00.0" S



Observando o movimento aparente do Sol na eclíptica, ou seja, observando a mudança das Constelações do zodíaco ao longo do ano

Movimento aparente do Sol na Eclíptica Projetado na Esfera Celeste ...posicionando o Ponto Vernal, Equinócios e Solstícios



No hemisfério norte os nomes são trocados:
verão \Leftrightarrow inverno; primavera \Leftrightarrow outono

	Outono	Inverno	Primavera	Verão
Início aproximado	21/03	21/06	23/09	22/12
Duração média (dias)	92,76	93,65	89,84	88,99

Algumas perguntas relevantes surgem então...

O que define as Estações do Ano?

O que causa as Estações do Ano?

Porque a duração das Estações não é a mesma durante o ano?

Distância da Terra ao Sol?

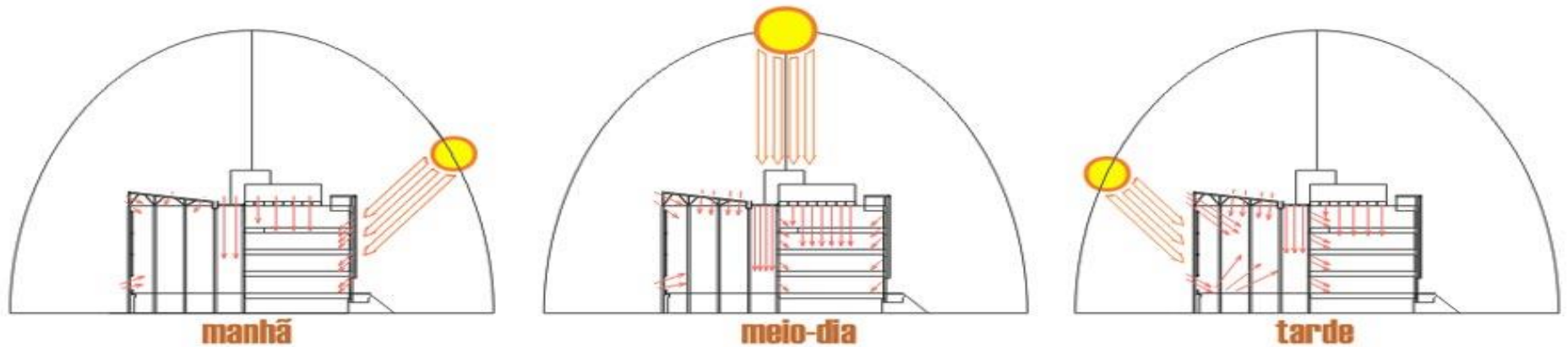
Terra próxima do Periélio?

Inclinação do eixo em relação ao Sol, etc....

Palestra do prof. Rama

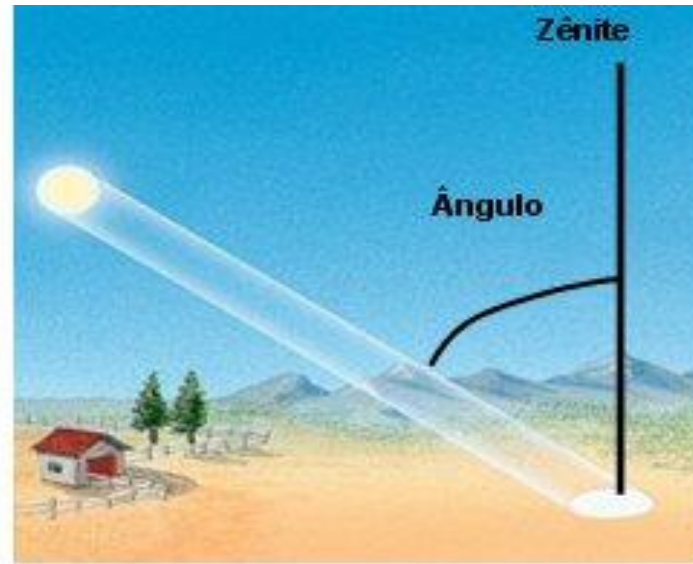
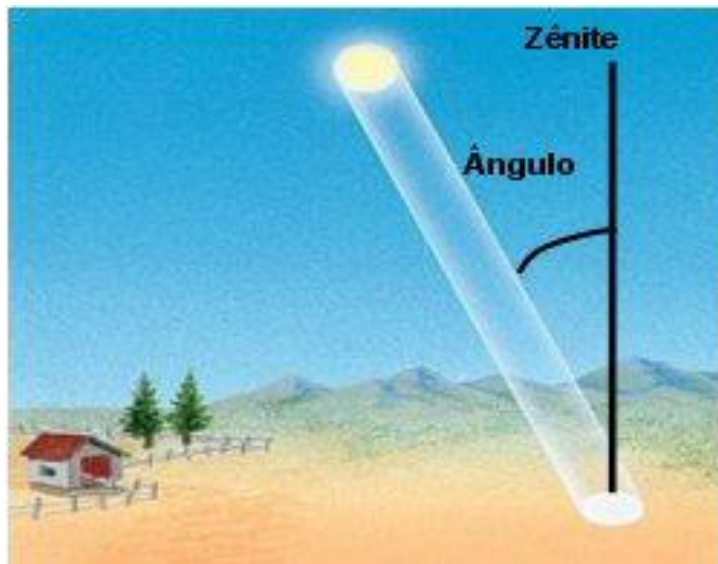
(<https://www.youtube.com/watch?v=tQL7chHWwIM>)

Alguns conceitos relevantes que nos ajudam a compreender porque a inclinação dos raios do Sol, insolação, influenciam a temperatura.



Conceito de Insolação Solar

...o ângulo do feixe de luz maior, projeta no solo uma área maior, portanto, maior distribuição de luz, menor intensidade, menos calor...



A quantidade de energia por unidade de área e por unidade de tempo que chega em um determinado lugar da superfície da Terra é definida como **insolação do lugar**.

A insolação varia de acordo com o lugar, com a hora do dia e com a época do ano e **só vai depender da área** sobre a qual essa energia se distribui, ou seja, da inclinação com que os raios solares atingem a superfície da Terra no local e data considerados.

Entendendo as Estações do Ano

O efeito da inclinação dos raios solares na Terra durante a translação é que produz as diferentes estações do ano!...**Errado! Muito simplificado...**

As Estações do Ano decorrem do efeito de inclinação entre os planos de rotação e translação da Terra

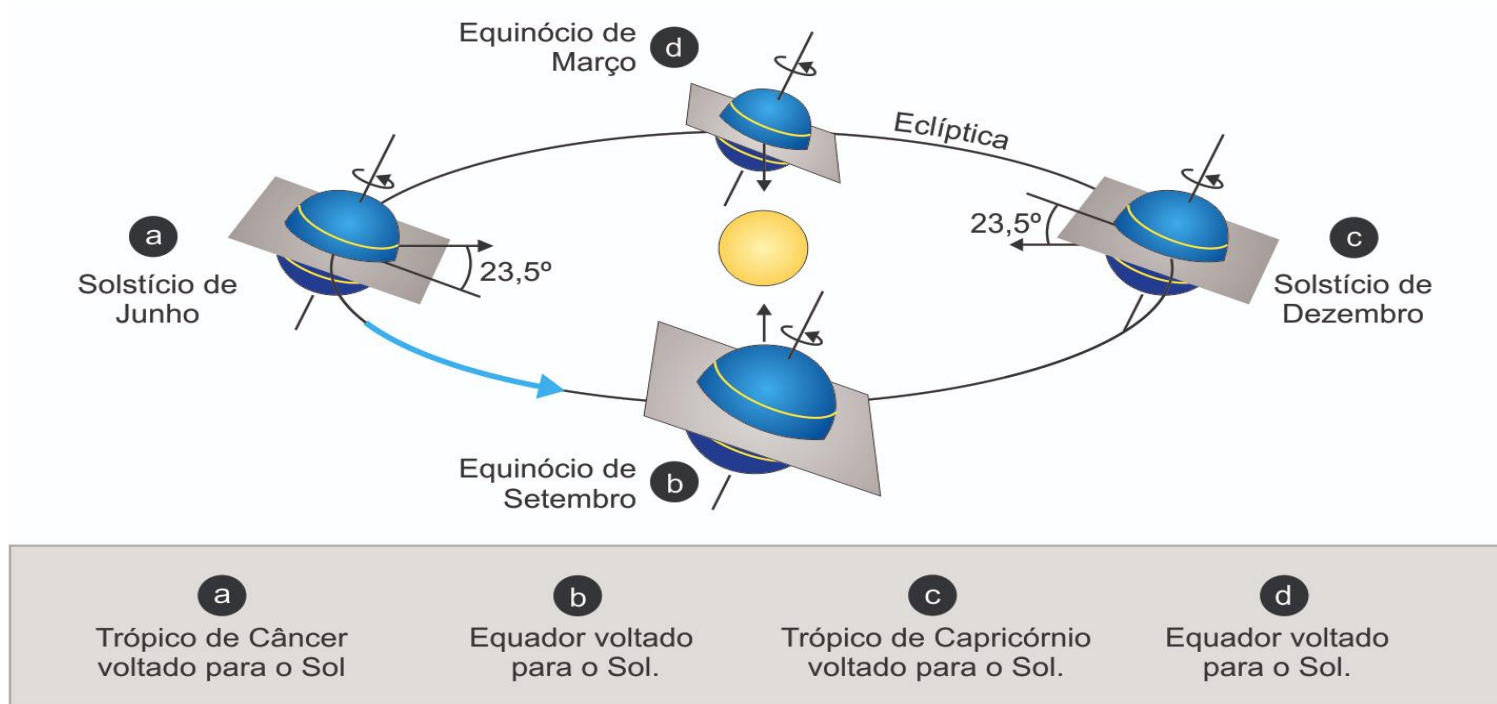
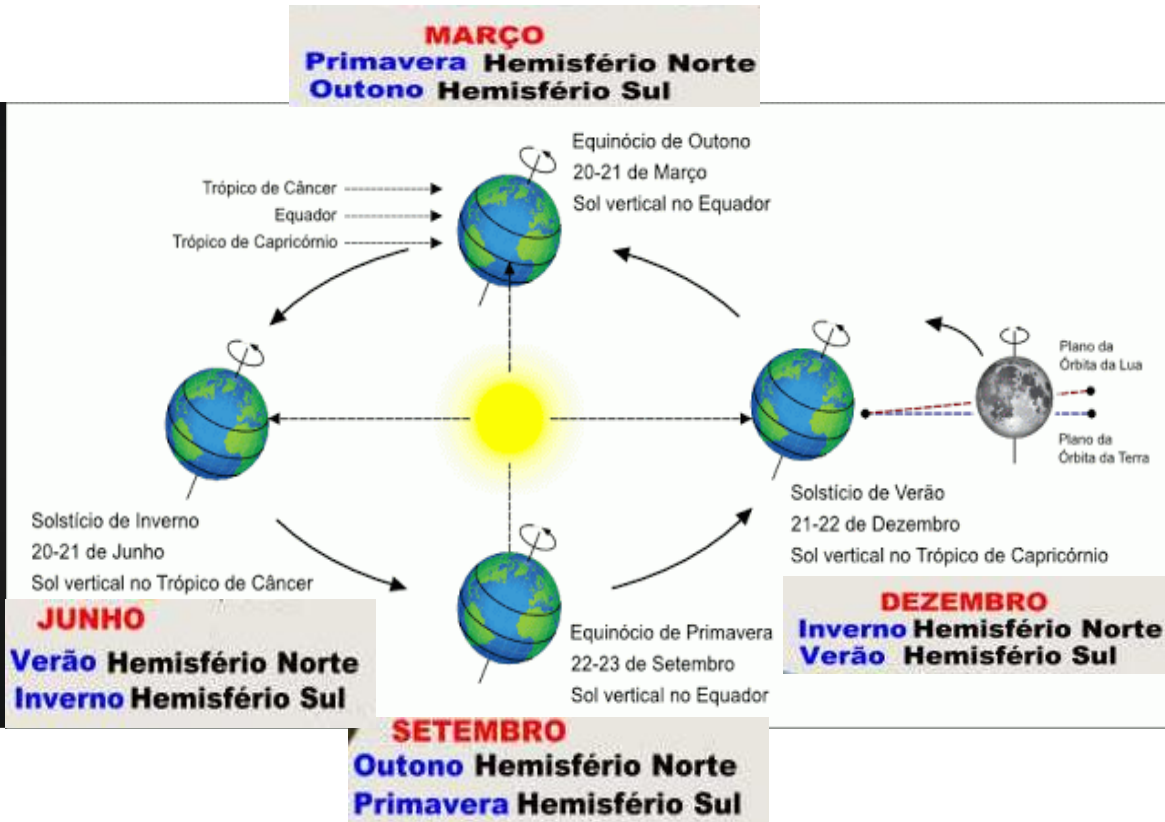
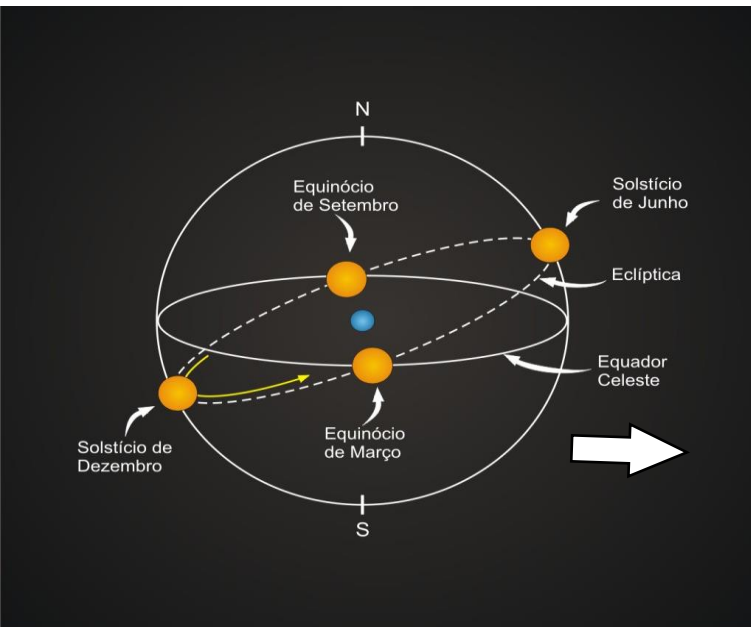


Figura atribuída a IF- UFRGS

Solstícios e Equinócios

posições (instantes) particulares do Sol transitando pela Eclíptica



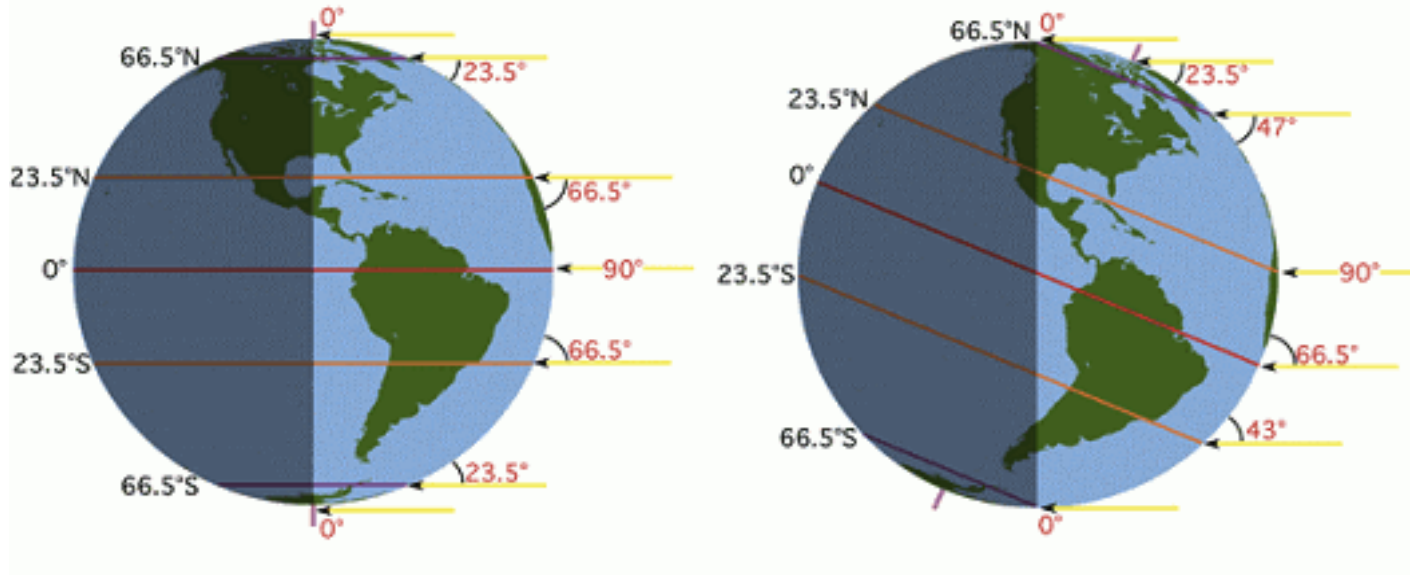
Equinócios

Sol cruzando o Equador em 2 posições

Solstícios

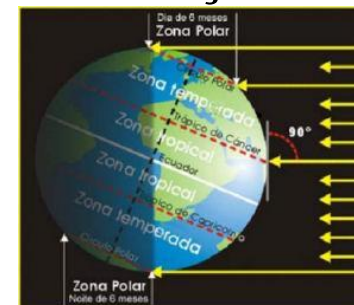
Sol em máxima e mínima alturas em relação ao Equador

Reparem como os raios solares incidem na Terra em diferentes ângulos.
Os raios que incidem diretamente, ou seja a 90° , provocam maior insolação



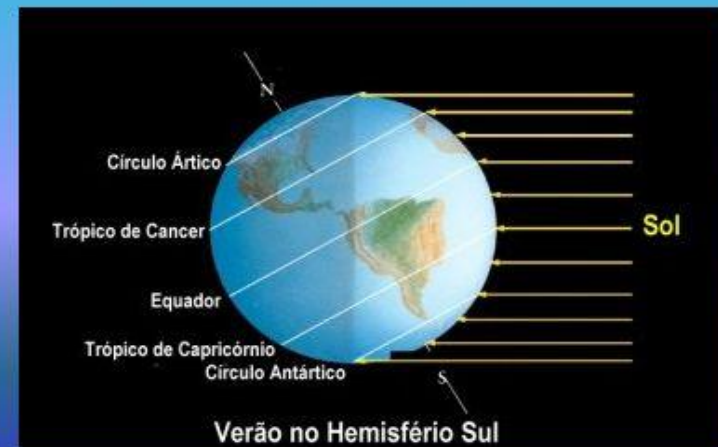
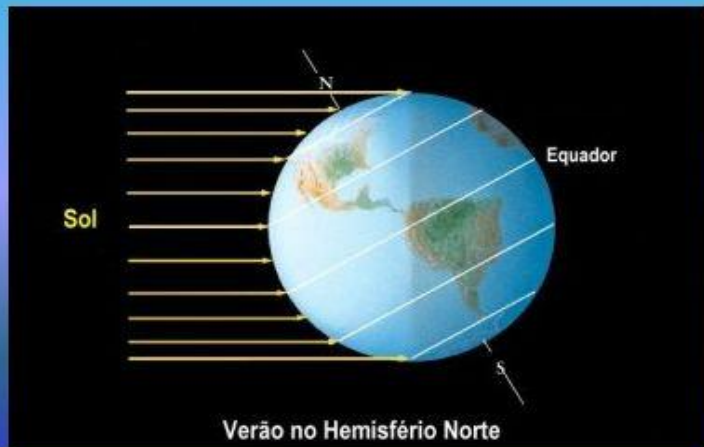
...sem inclinação do plano de rotação em relação ao plano de translação

...com inclinação do plano de rotação em relação ao plano de translação



Solstício

O Sol incide sobre um dos trópicos, um dos hemisférios é mais iluminado e aquecido que o outro, maior diferença na duração do fotoperíodo (dia e noite).



21/06 -Sol incide sobre Trópico de Câncer

Hemisfério Norte – Solstício de Verão -
Dia maior que a noite – Dias polares

Hemisfério Sul – solstício de inverno –
noite maior que o dia – noites polares

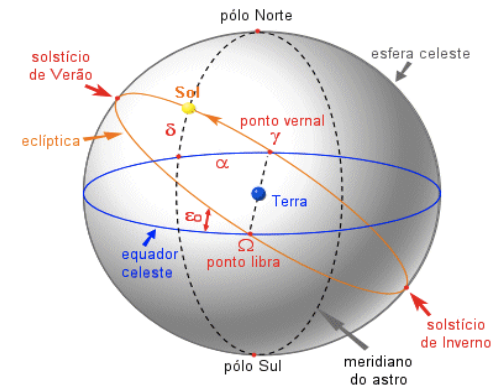
21/12 -Sol incide sobre Trópico de Capricórnio

Hemisfério Norte – solstício de inverno –
noite maior que o dia – noites polares

Hemisfério Sul – Solstício de Verão - Dia
maior que a noite – Dias polares

Equinócios = noites iguais
(latim: aequus-igual; nox-noite)

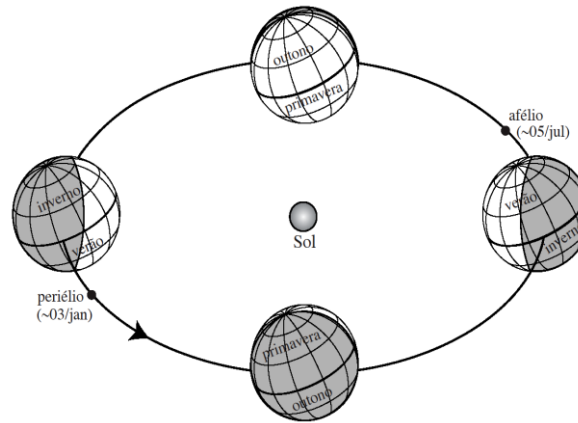
...Sol incidindo a luz perpendicularmente sobre o Equador
...Mesma intensidade de luz em ambos hemisférios



Estações do Ano – Relembrando...

A distância da Terra ao Sol **não** é responsável pelas estações do ano, já que em diferentes hemisférios observamos que as estações **não** são as mesmas.

O verão no hemisfério Sul é mais curto que o inverno devido ao período de exposição do Sol .



Em um ano a direção do eixo da Terra é praticamente imóvel, e com inclinação de 23,5 graus.

O principal efeito da variação da distância Terra-Sol, devido ao fato da Terra seguir uma elipse, é que as estações do ano **não tem todas exatamente a mesma duração**.

O movimento da Terra é mais complexo do que até aqui comentado...

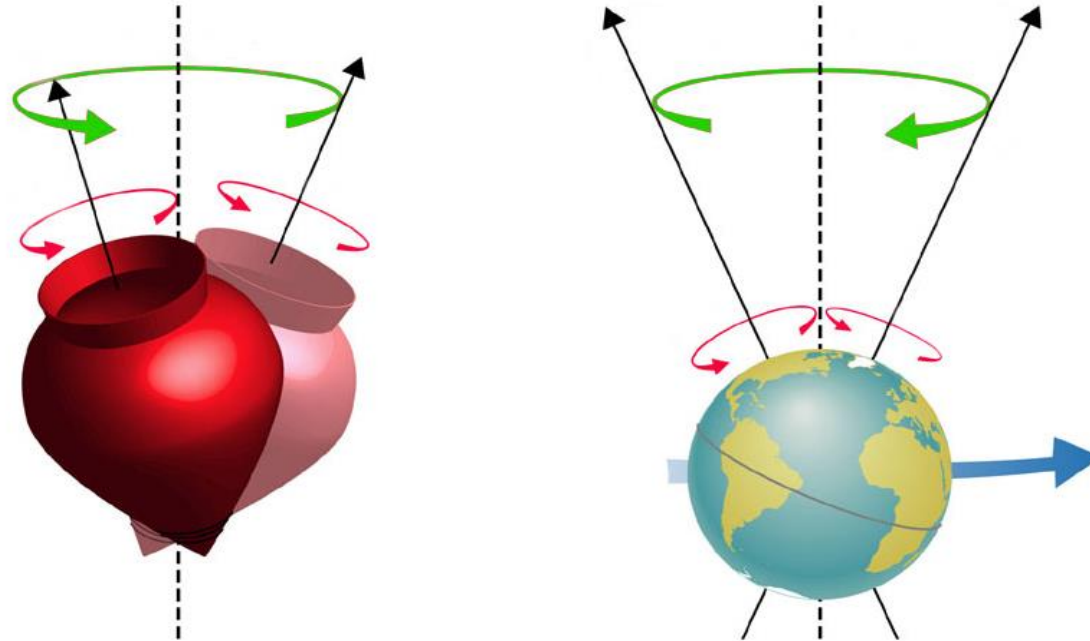
A Terra possui da ordem de **dezenas de movimentos...**

Já vimos os mais conhecidos – Rotação e Translação, e veremos a seguir, no escopo deste curso, a **Precessão e Nutação**.

Outros movimentos como Deslocamento do Periélio, Obliquidade da Eclíptica, Variação da Excentricidade da Órbita, Rotação e Revolução na Via-Láctea, etc...só serão comentados seus efeitos, e poderão ser visualizados no vídeo que se encontra ao fim deste roteiro...

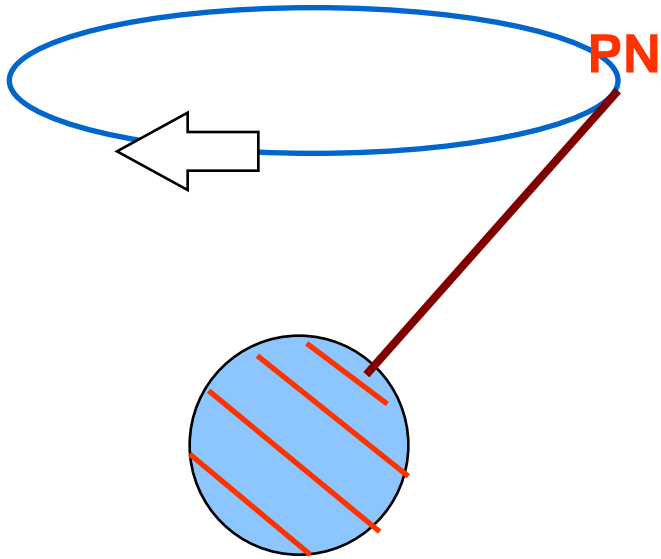
Precessão dos Equinócios

...um movimento semelhante ao de um pião girando



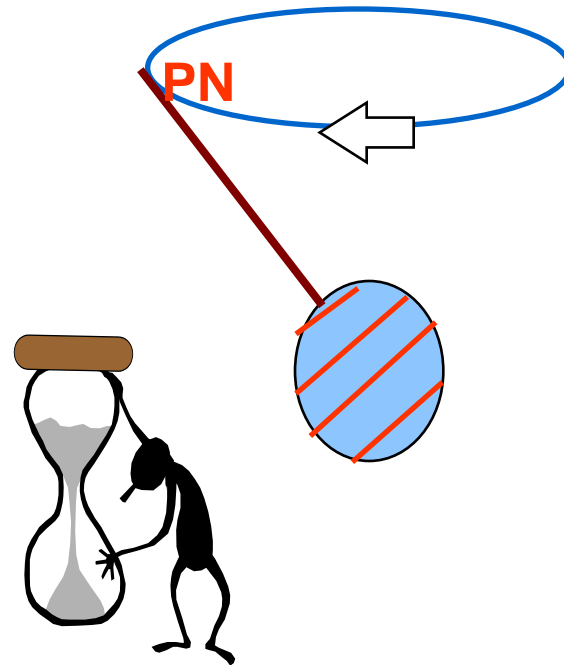
- Precessão Luni-Solar da Terra é causada por uma força (torque) do Sol e Lua
- Produz efeito de **mudança na direção do eixo de rotação da Terra**
- O eixo de rotação da Terra percorre um círculo em ≈ 26.000 anos
- **Causa mudança de quase 1 grau por ANO!**
- Efeito descoberto por Hiparco em ≈ 140 a.C. (mudança do Ponto Vernal)

Precessão



Hoje

o eixo da Terra aponta quase diretamente para a Estrela Polar.

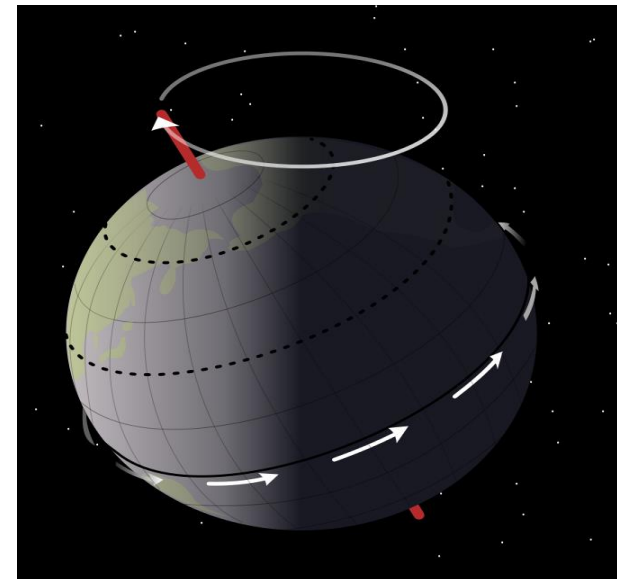
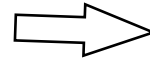
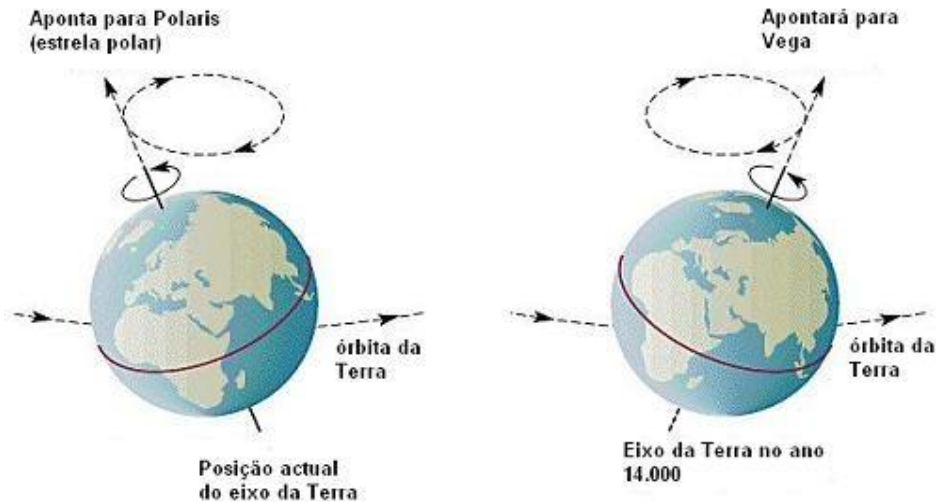


Daqui a 13 mil anos:
apontará para a estrela Vega.

Precessão

...afeta a posição do Ponto Gama – ponto imaginário resultante da intersecção do Sol quando cruza o equador celeste...

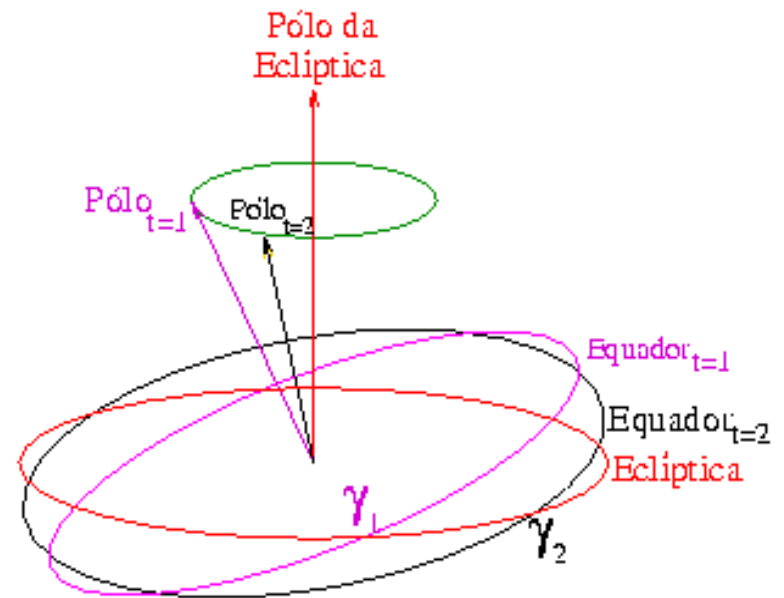
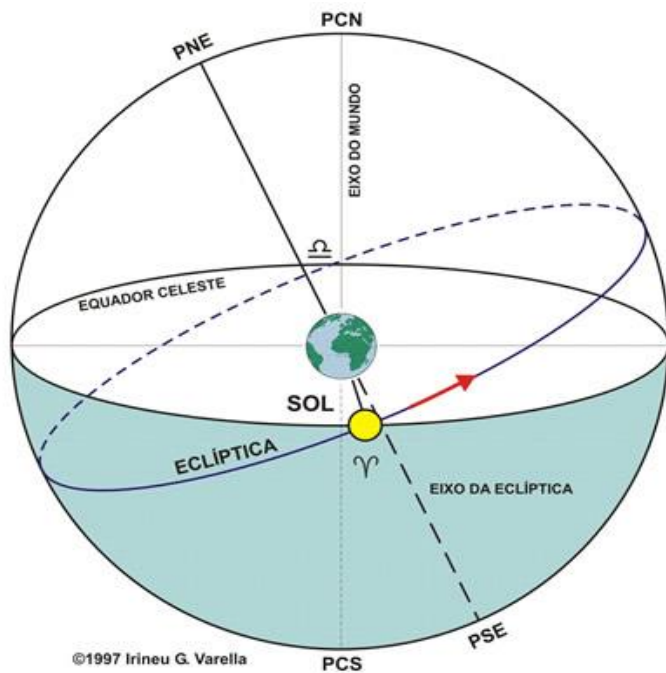
Mudança no eixo de rotação da Terra provoca mudança no ângulo de inclinação do equador da Terra



PRECESSÃO

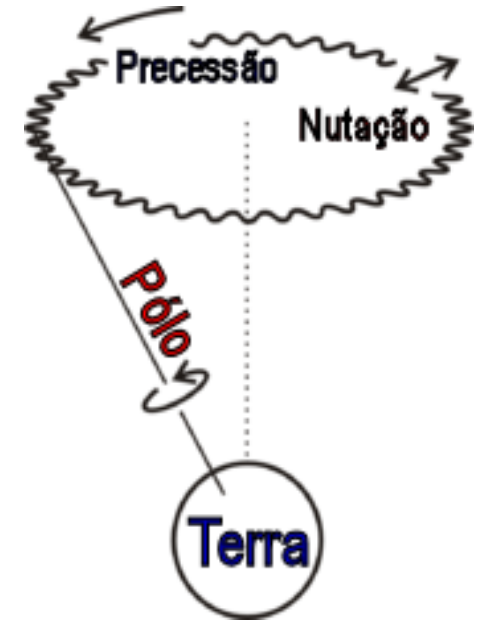
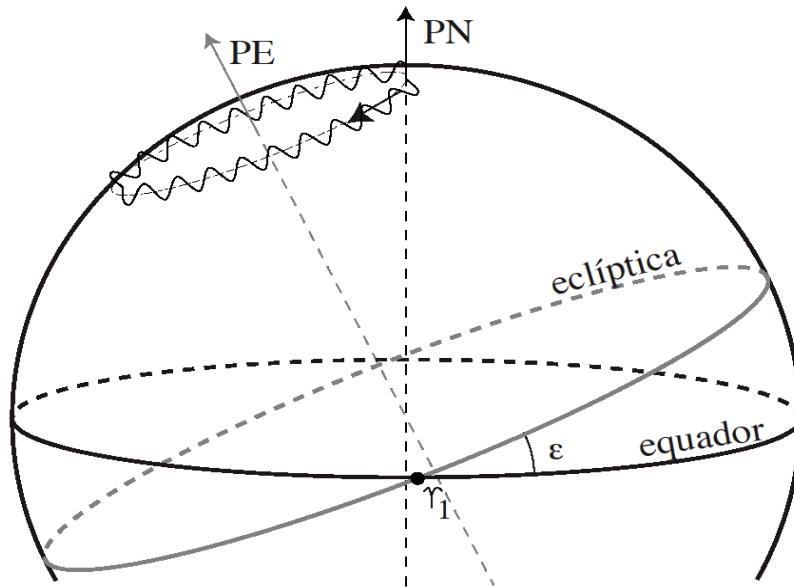
...mudança da posição do **Ponto Gama** (γ) - ponto imaginário resultante da intersecção da eclíptica com o Equador Celeste

Esta mudança no ângulo de inclinação do equador da Terra provoca um deslocamento do Ponto Gama de $50,29''/\text{ano}$, no sentido oposto ao movimento do Sol na Eclíptica



Nutação

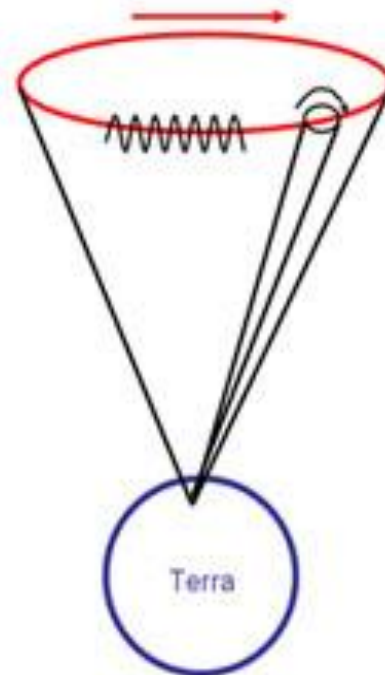
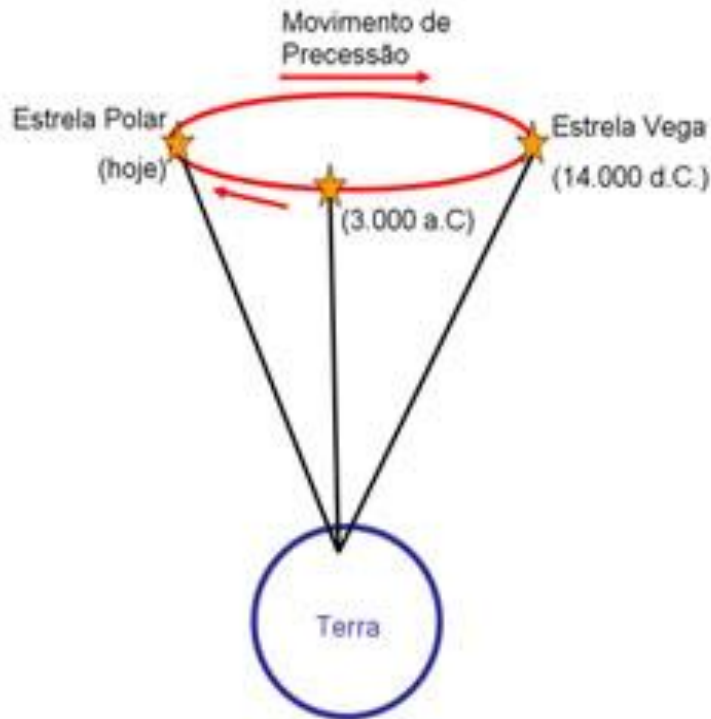
...oscilações periódicas em torno do movimento de precessão



<http://astro.if.ufrgs.br/telesc/nutacao.png>

Causado pela ação do Sol mas principalmente pela Lua;
Pequena amplitude e período de $\approx 18,6$ anos;
Descoberto em 1747 por James Bradley

Precessão e Nutação



Vejam vídeo sobre Precessão disponível no site da disciplina....