



# *Movimento real e aparente das estrelas e dos Planetas*

(c) 2009/2014 Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira



# *Sistemas de coordenadas e tempo*

# Sistema de coordenadas horizontal local

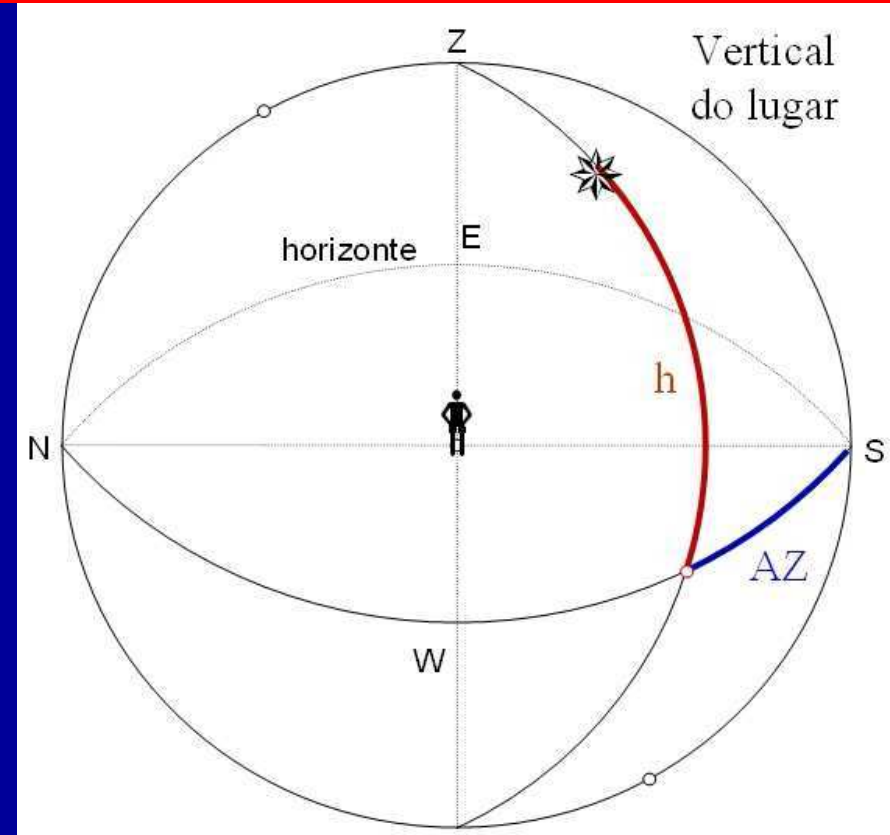
**zénite** : ponto mais alto no céu.

**nadir** : ponto situado no lado oposto ao zénite

**horizonte local** : circunferência máxima que define a linha do horizonte.

**verticais** : infinidade de semicircunferências máximas que ortogonais ao horizonte.

**vertical do lugar** : é a vertical que passa no ponto cardeal sul.



Augusto et al. 2009

<http://www3.uma.pt/Investigacao/Astro/Grupo/Publicacoes/Abstracts/pub2011a.htm>

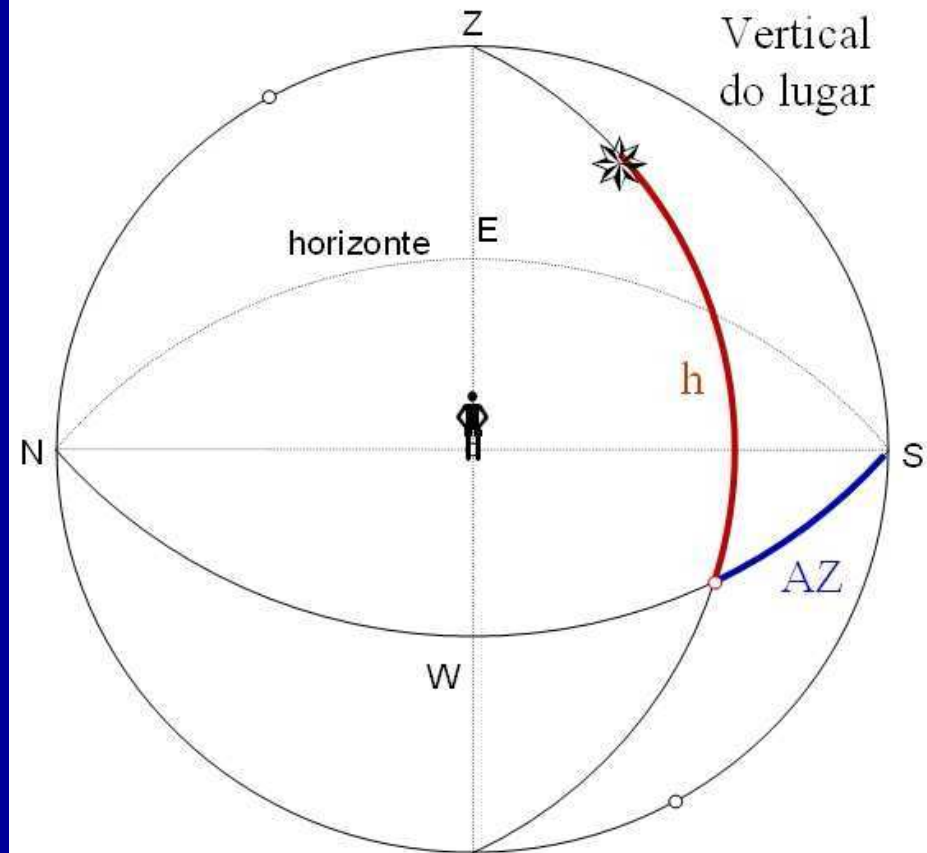
## Sistema de coordenadas horizontal local

Coordenadas:  
*azimute (AZ) e altura (h)*

**Azimute** : medido a partir do ponto cardinal sul variando de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  (no sentido sul-oeste...)

**Altura** : varia de  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ .

As alturas negativas não são vistas pelo observador (supondo este ao nível do mar).

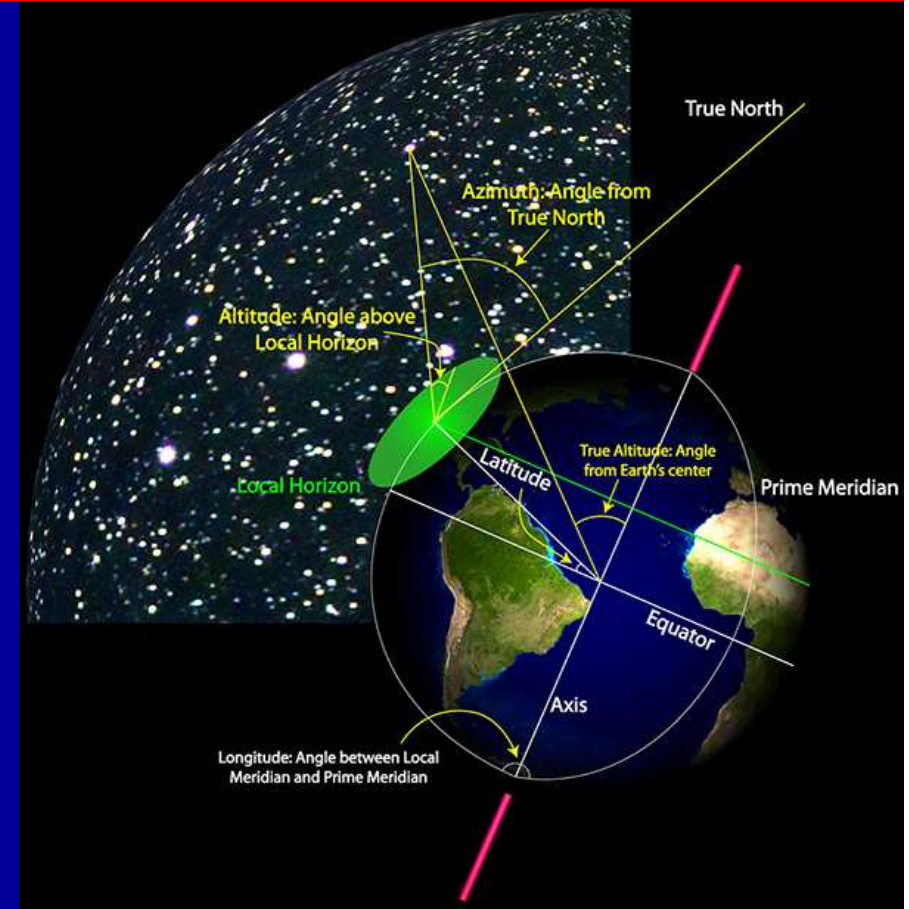


## *Sistema de coordenadas horizontal local*

As coordenadas dadas pelo Sistema horizontal local variam consoante a localização do observador sobre a Terra.

O horizonte não é, por exemplo, o mesmo para um observador na Madeira e para um observador na América do Sul.

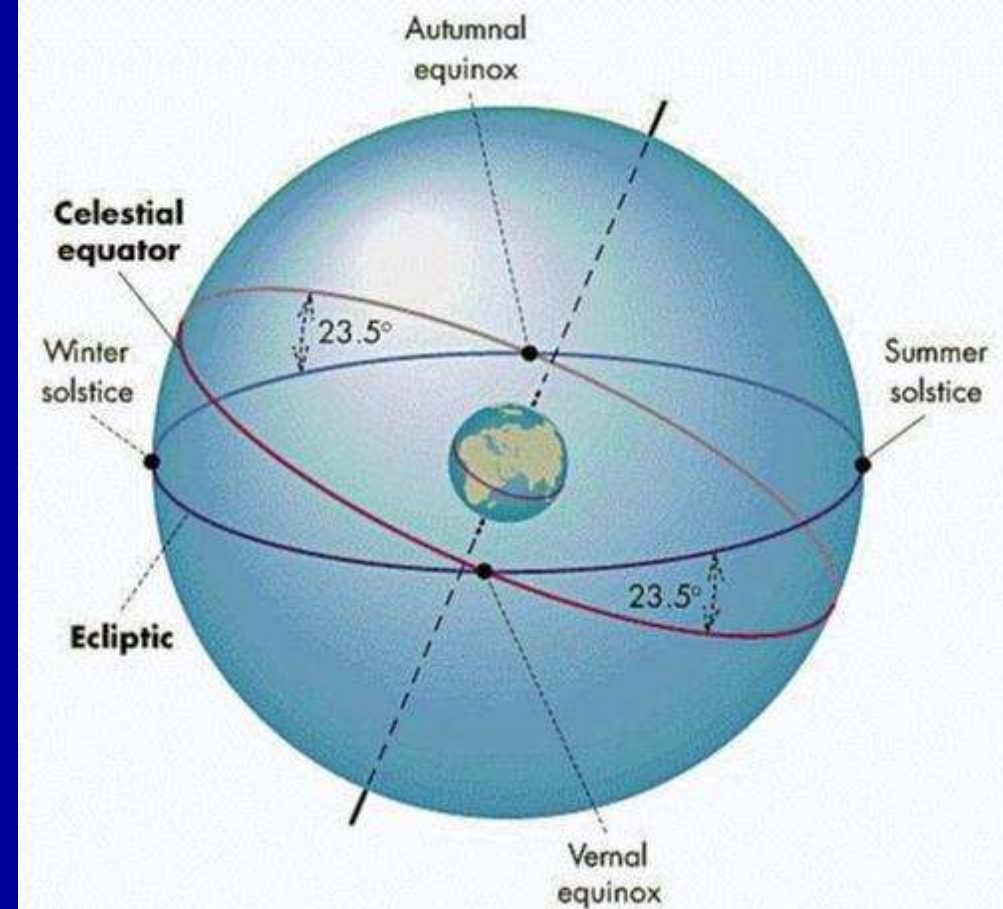
Torna-se, assim, importante definir um sistema de coordenadas comum a todos os observadores.



## Sistema de coordenadas equatorial celeste

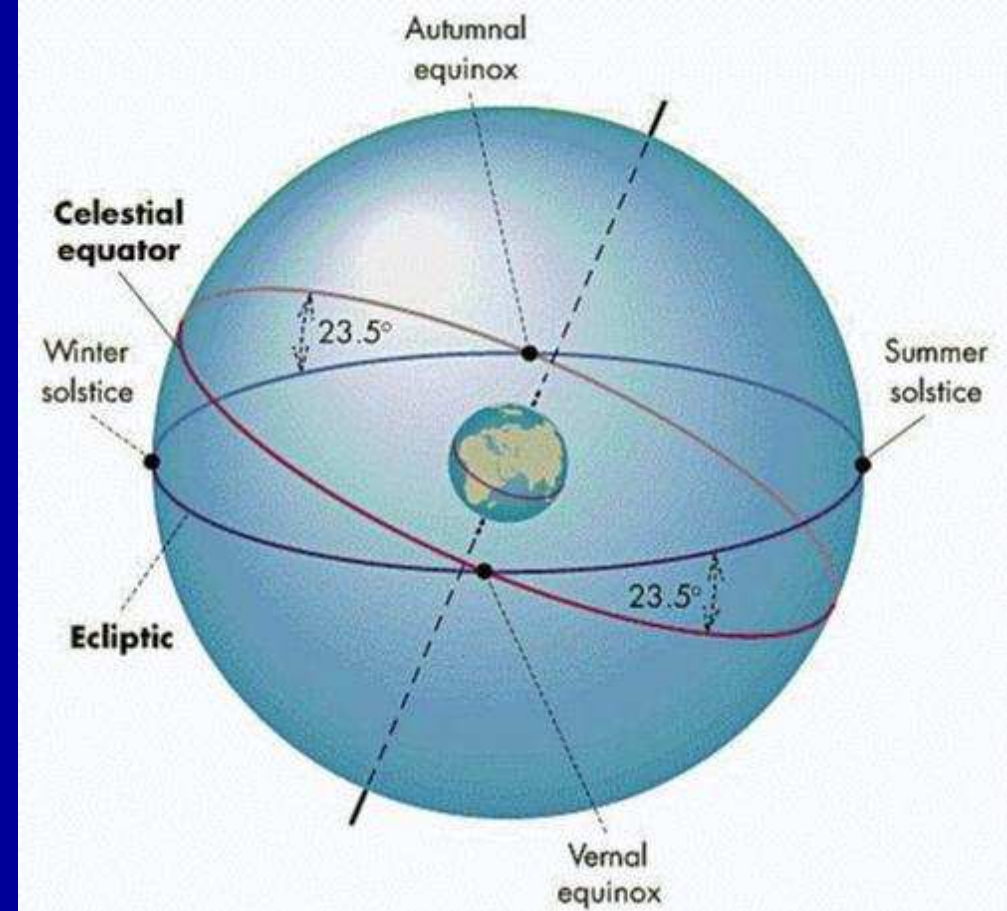
**Eclíptica** : percurso aparente do Sol ao longo de um ano sobre a esfera celeste.

Está **inclinada  $23.5^\circ$**  em relação ao equador celeste (devido à inclinação do eixo de rotação da Terra) intersectando este em apenas dois pontos: **equinócios** (dia igual à noite).



## *Sistema de coordenadas equatorial celeste*

O ponto mais a norte da eclíptica corresponde ao **solstício de Verão** (maior dia do ano no hemisfério norte) e o ponto mais a sul corresponde ao **solstício de Inverno** (dia mais pequeno do ano no hemisfério norte).

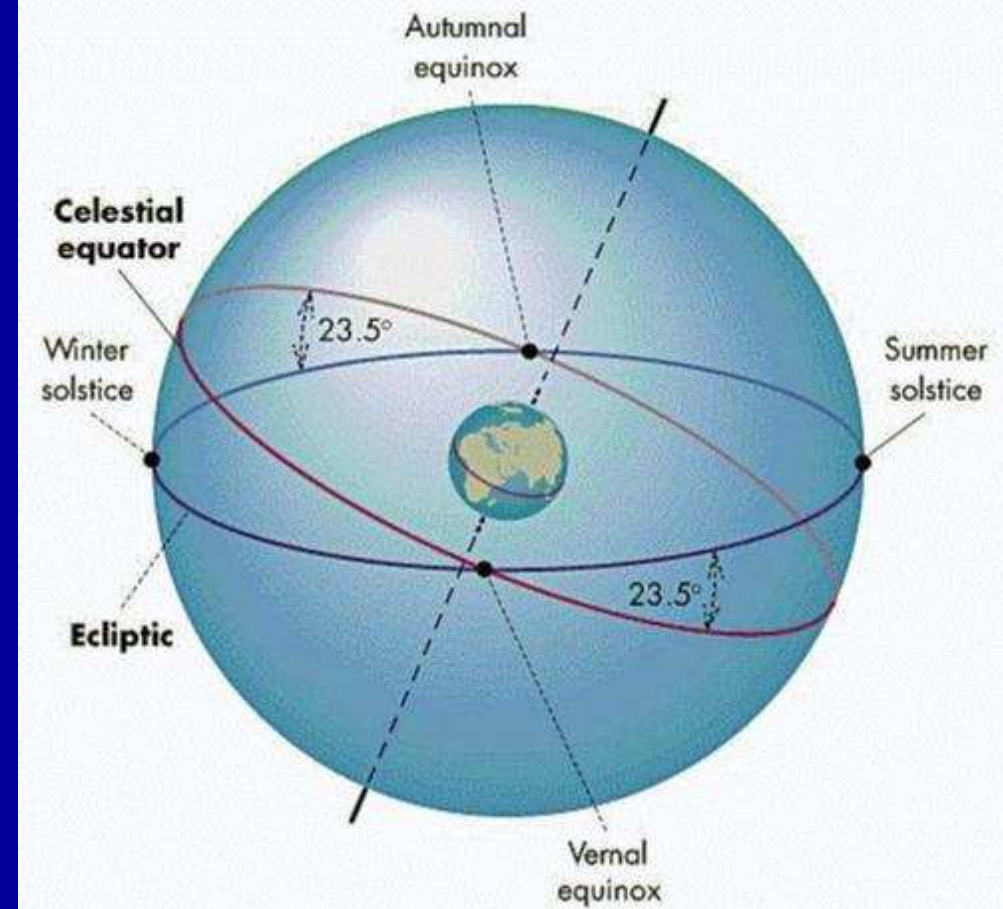


<http://spaces.imperial.edu/russell.lavery/Ast100/Lectures/Ast100Topic02.html>

## *Sistema de coordenadas equatorial celeste*

Estes pontos (equinócios e solstícios) coincidem com o início das estações do ano.

Em particular, o equinócio que ocorre por volta de 21 de Março e marca o início da primavera é designa-se por **equinócio Vernal**.



<http://spaces.imperial.edu/russell.lavery/Ast100/Lectures/Ast100Topic02.html>

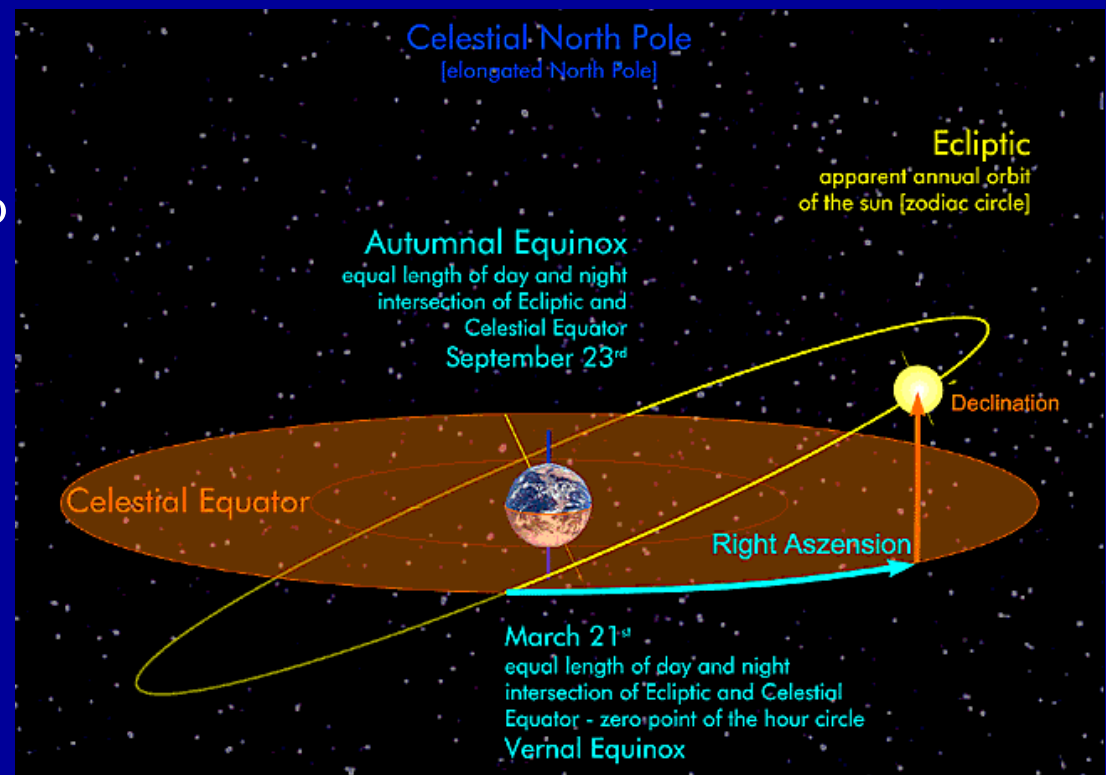


## Sistema de coordenadas equatorial celeste

O **ponto Vernal** ( $\gamma$ ) é o ponto em que o Sol cruza o equador celeste marcando o início da Primavera.

Por convenção é este ponto que se toma como origem para a medida do ângulo horário que agora passa a chamar-se **ascensão reta (RA)**.

Definimos assim o sistema de coordenadas equatorial celeste igual para todos os observadores.



<http://www.bomhard.de/englisch/jaipur/10.html>



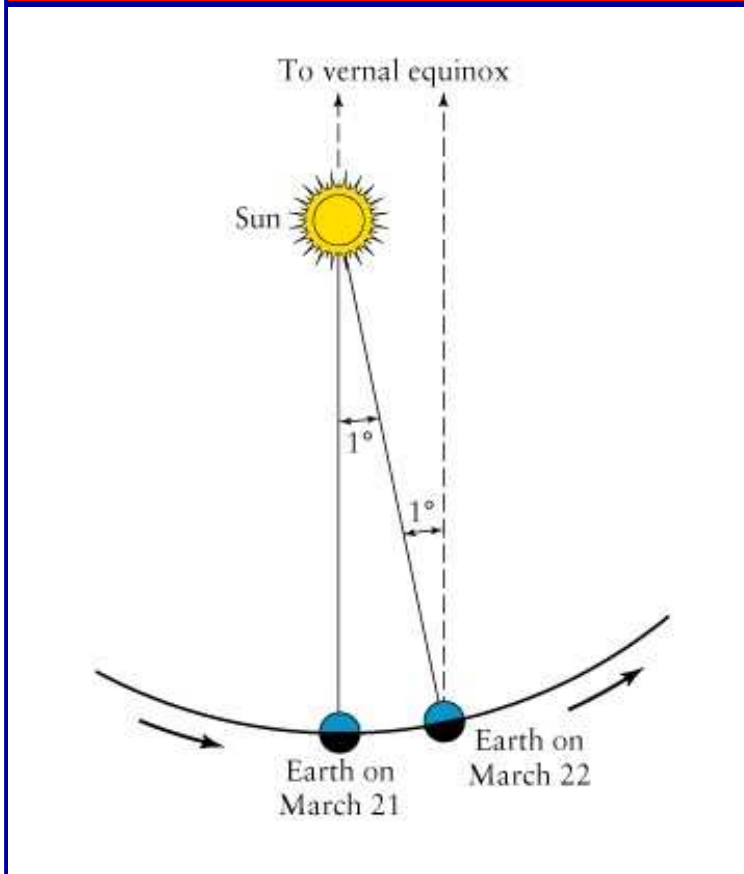
*Relação entre o*  
*Sistema de coordenadas horizontal local*  
*Sistema de coordenadas equatorial celeste*

Para um observador situado sobre um dos polos terrestres os sistemas horizontal local e equatorial celeste coincidem.

Para um observador localizado sobre o equador da Terra o sistema horizontal local faz um ângulo de  $90^\circ$  com o sistema equatorial celeste. Para esse observador, de facto, o horizonte é perpendicular ao equador.

**O ângulo entre os dois sistemas é dado pela latitude do lugar.** Assim para um observador localizado na Madeira o sistema horizontal local faz um ângulo de cerca de  $90^\circ - 32^\circ = 58^\circ$  com o sistema equatorial celeste.

## Tempo



<http://www.physics.unc.edu/~evans/pub/A31/Lecture02-Sky-Motions/>

Os relógios comuns têm como referência a posição do Sol.

Os **relógios siderais** têm como ponto de referência a posição do ponto Vernal, ou seja, o ponto de referência para a medição da ascensão reta de um objeto.

Um **dia sideral** corresponde ao intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas do ponto Vernal pelo meridiano do local.

Um **dia solar** corresponde ao intervalo de tempo entre duas passagens sucessivas do Sol pelo meridiano do local.

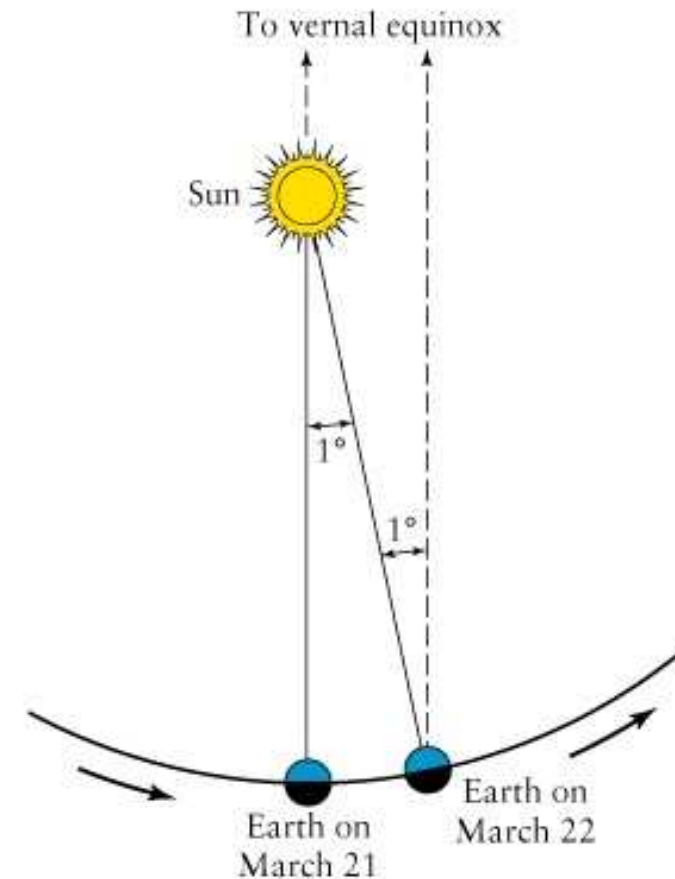


Devido ao movimento de translação da Terra **um dia solar é cerca de 4 minutos mais longo do que um dia sideral** pois a Terra avança cerca de  $1^\circ$  todos os dias.

**1 dia sideral = 23h 56m 4.091s**

**1 dia solar = 24h**

Os dois tipos de relógios funcionam a ritmos diferentes uma vez que baseiam-se em referências diferentes.



<http://www.physics.unc.edu/~evans/pub/A31/Lecture02-Sky-Motions/>

Qualquer objeto celeste cruza o meridiano local no momento em que o **tempo sideral é igual à ascensão reta do objeto**. Esta é a razão pela qual a ascensão reta é medida em horas, minutos e segundos e não simplesmente em graus.



# *Movimento real e aparente das estrelas e dos Planetas*





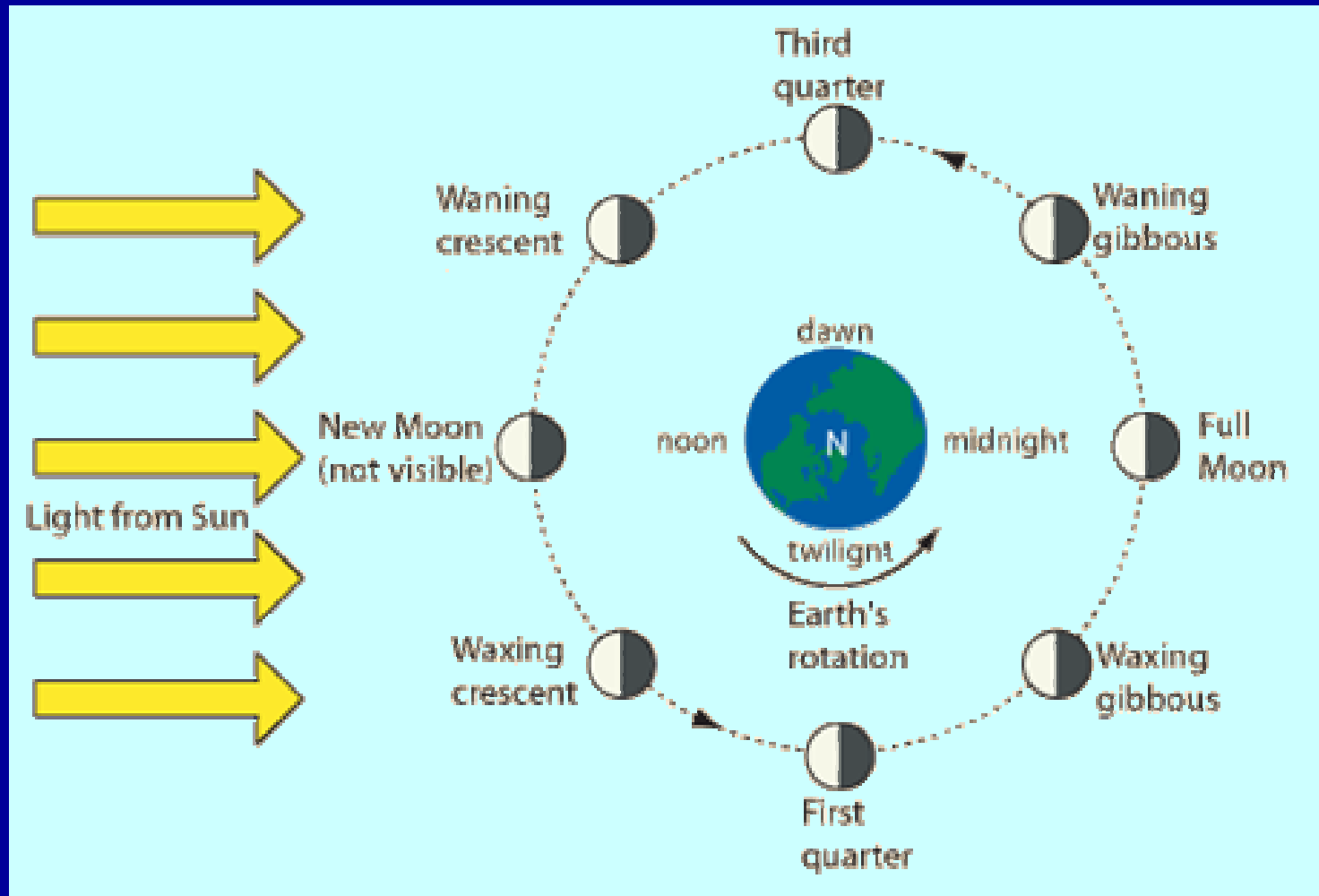
# Movimento da Lua

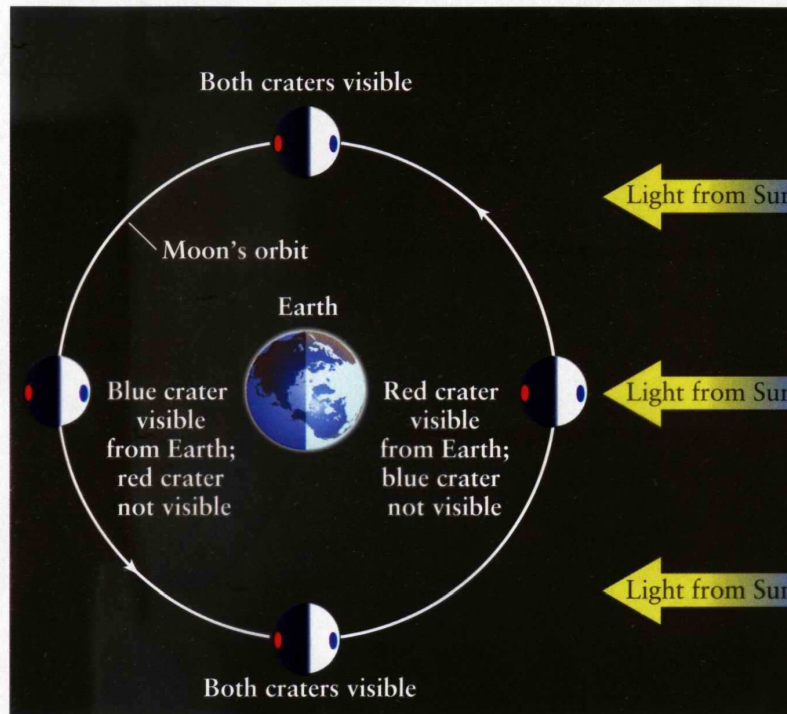


A Lua está a sempre visível a partir de um determinado ponto da Terra.

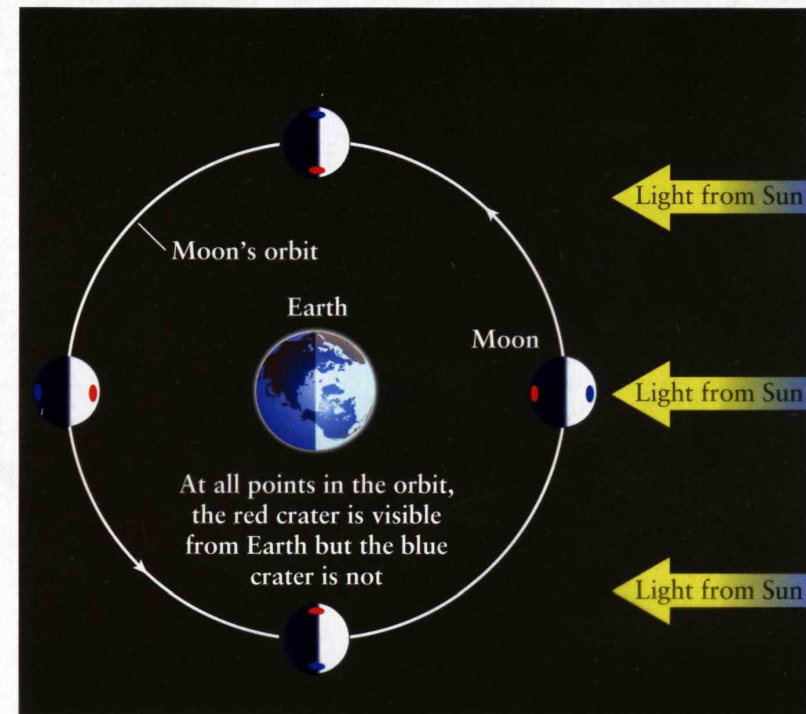


A Lua apresenta sempre a mesma face virada para a Terra. À medida que os dias vão passando vemos diferentes frações dessa face iluminada: são as chamadas **fases lunares**.





a If the Moon did not rotate, we could see all sides of the Moon  
<http://crab0.astr.nthu.edu.tw/~hchang/ga1/ch03-01.htm>



b In fact the Moon does rotate and we see only one face of the Moon

Vemos sempre a mesma face da Lua a partir da Terra (figura da direita).

Poderíamos então pensar que a Lua não roda sobre si própria (figura da esquerda). Esta ideia é errada.

Se a Lua não tivesse movimento de rotação em torno de si mesma não veríamos sempre a mesma face virada para nós.





O facto de vermos sempre a mesma face da Lua significa que a sua rotação está sincronizada: a Lua demora exatamente o mesmo tempo a dar uma volta sobre si própria e a completar uma volta em torno da Terra.

Para um observador na Lua o Sol nasce e põe-se no horizonte tal como acontece aqui na Terra.

Assim, não existe de facto o designado lado escuro da Lua.

Faz mais sentido falarmos em lado mais próximo e lado mais distante da Lua.

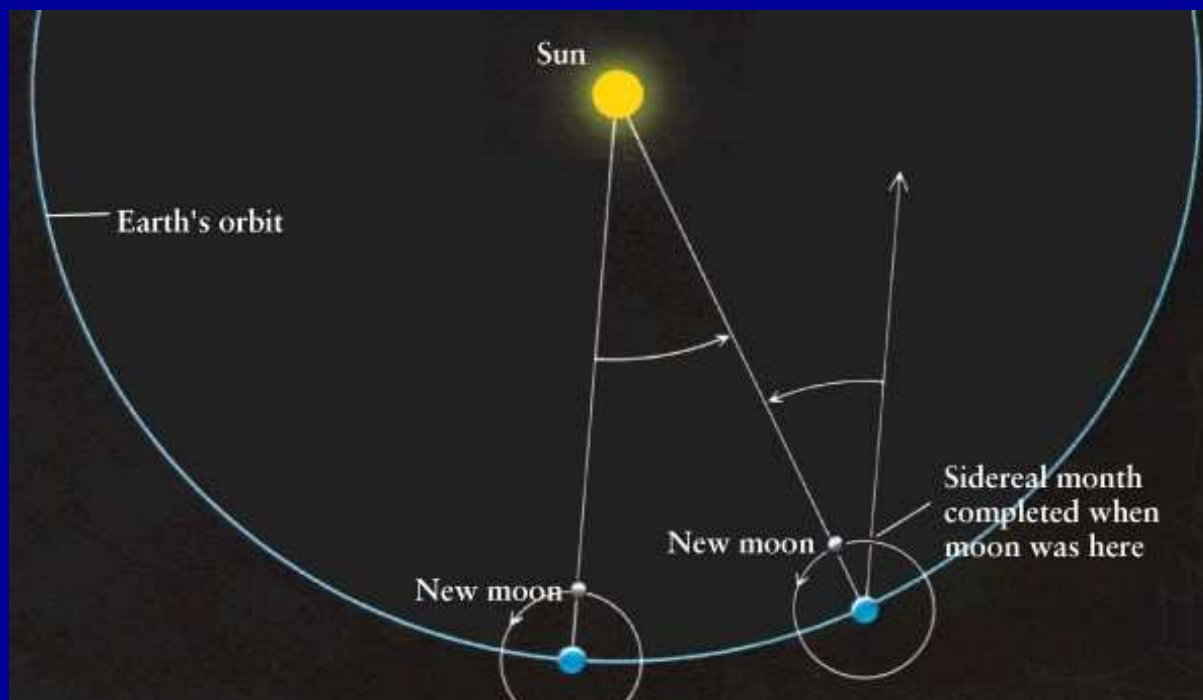
Um dia lunar são cerca de **28** dias terrestres.

Entre o nascer e o pôr do Sol, num dado ponto da Lua, passam em média cerca de **2** semanas.



**Mês sideral** – tempo correspondente a uma volta completa da Lua em torno da Terra medido em relação às estrelas. São 27.32 dias.

**Mês sinódico** - tempo correspondente a uma volta completa da Lua em torno da Terra medido em relação ao Sol, ou seja, tempo que decorre até que se complete um ciclo de fases lunares. São 29.53 dias.



O mês sinódico é maior do que o mês sideral por causa do movimento de translação da Terra em torno do Sol que a Lua acaba por acompanhar necessariamente.

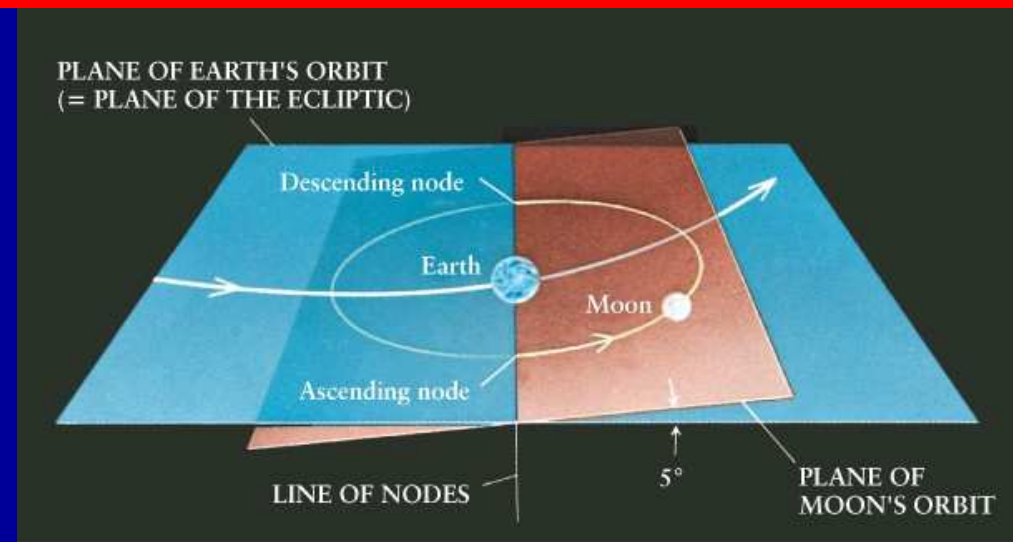
## A Lua e os Eclipses

Um eclipse lunar ou solar ocorre quando a Lua, a Terra e o Sol estão alinhados numa dada direção.

Se o plano orbital da Lua não estivesse ligeiramente inclinado teríamos eclipses de duas em duas semanas.

Devido à inclinação de cerca de  $5^\circ$  os eclipses acabam por ser eventos relativamente raros.

No máximo podemos ter **cinco eclipses solares** e **sete lunares** num ano

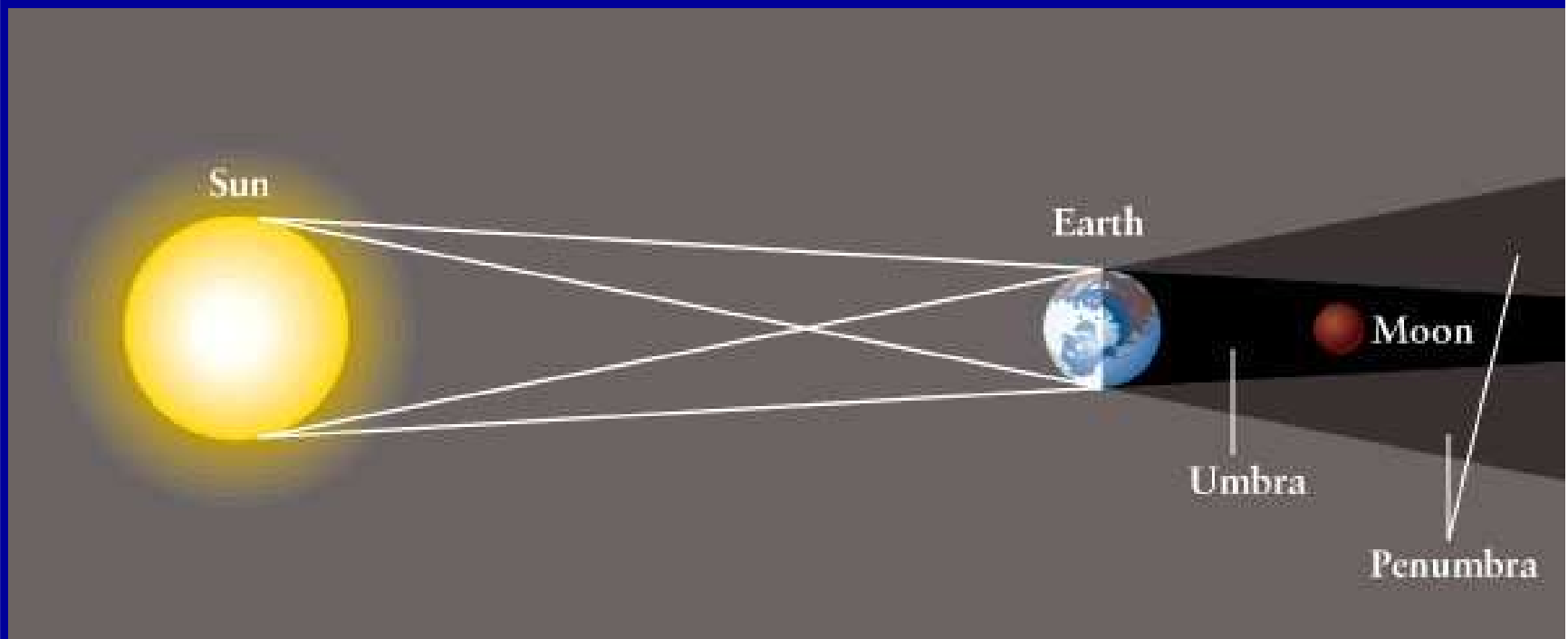


<http://crab0.astr.nthu.edu.tw/~hchang/ga1/ch03-02.htm>

A Terra cria no lado oposto ao Sol uma zona de sombra. Essa zona de sombra divide-se em duas partes:

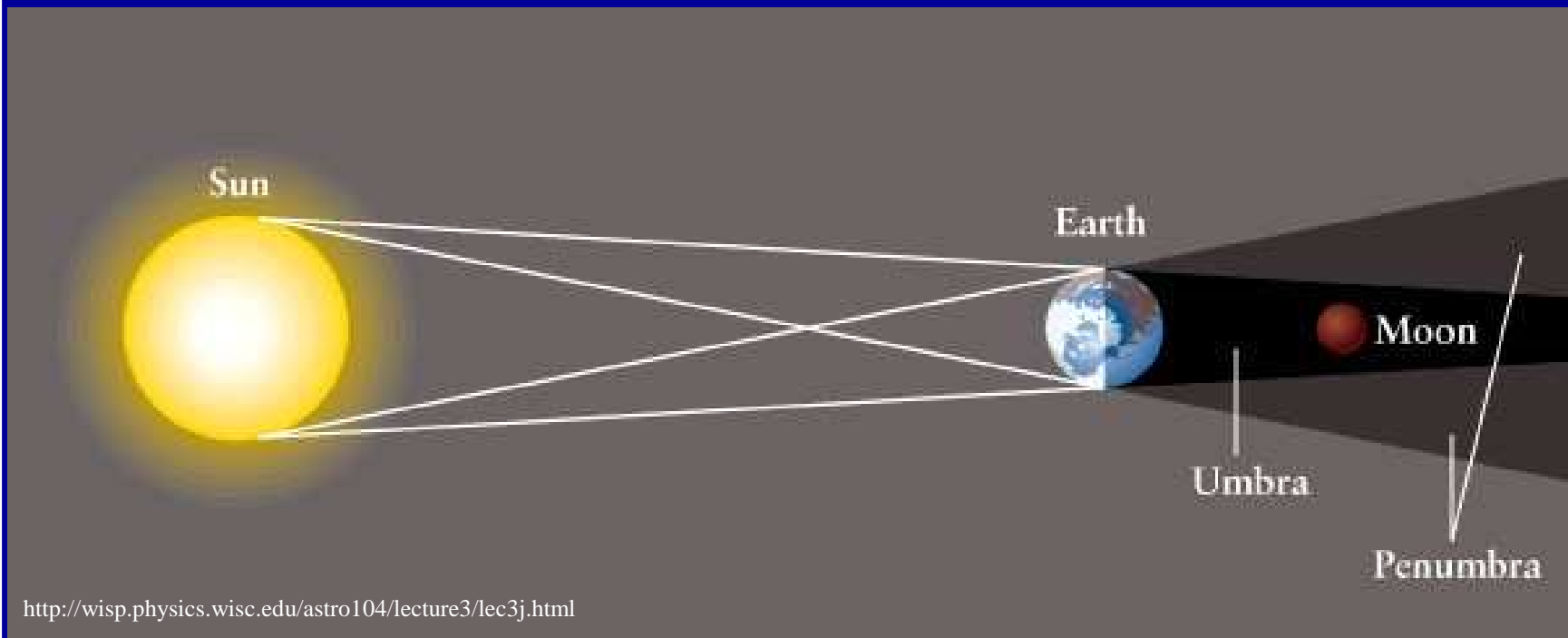
**Umbra** – escuridão total (não se vê o Sol)

**Penumbra** – zona de sombra onde se vê apenas parte do Sol.



Os eclipses lunares podem ser parciais, totais ou penumbrais. Em média 1/3 de todos os eclipses lunares são totais, 1/3 são parciais e 1/3 são penumbrais.

Se a Lua atravessar a **umbra** temos um **eclipse lunar total** (a sua duração é de 1h42m). Se apenas parte da Lua passar pela umbra então temos um **eclipse lunar parcial**.



Se a Lua passar apenas pela **penumbra** então temos um eclipse **penumbral**.

Neste caso a Lua apenas fica um pouco menos brilhante razão pela qual estes eclipses muitas vezes passam despercebidos.



Mesmo num eclipse lunar total existe sempre alguma luz solar que é refratada pela atmosfera da Terra e acaba por atingir a Lua.



Essa luz é essencialmente **vermelha**. Dai a razão pela qual a silhueta da Lua durante os eclipses tem um aspeto **avermelhado**.



Os eclipses solares podem ser parciais, totais ou anelares.

Um eclipse solar total é acompanhado por um decréscimo da temperatura e da velocidade do vento.

Os animais reagem como se fosse noite.





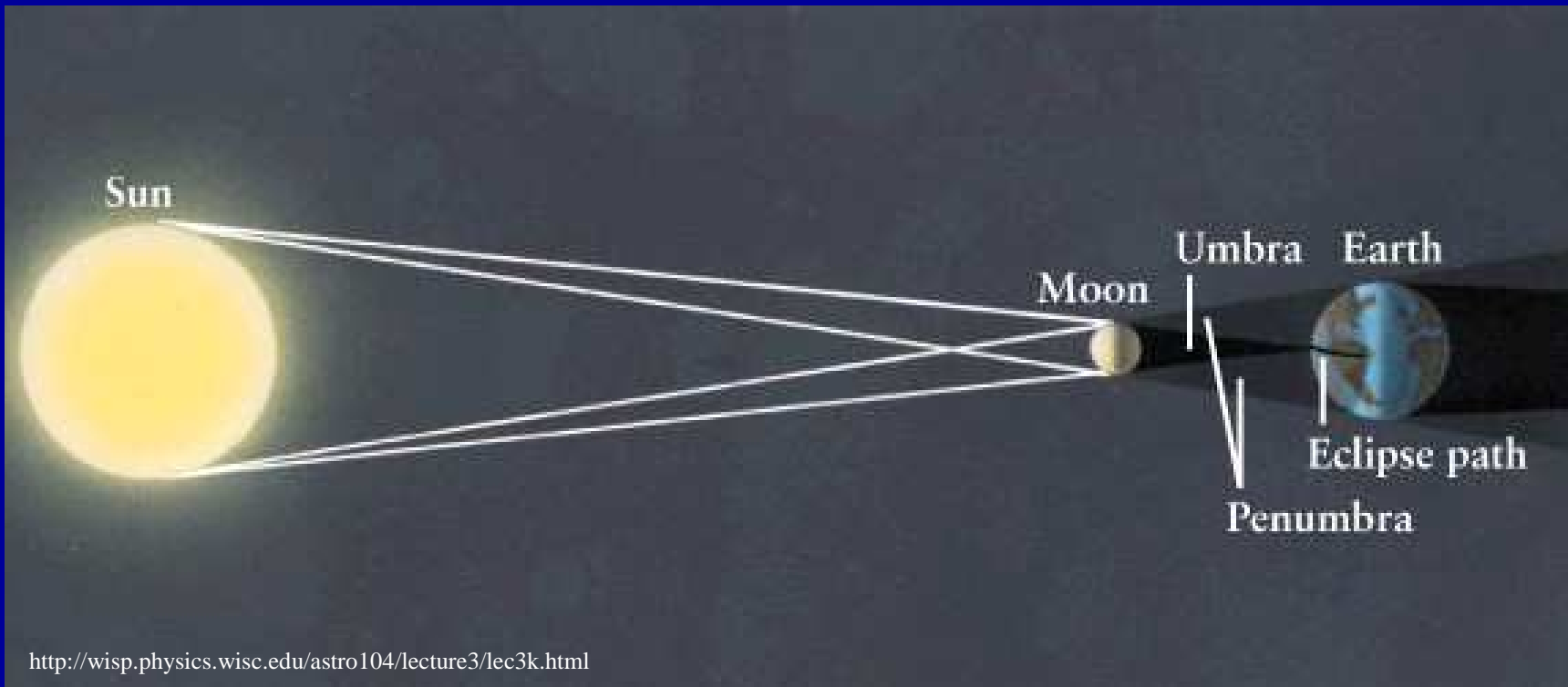
Quando a Lua tapa completamente o Sol podemos ver a **coroa do Sol**. Apenas neste momento podemos olhar para o Sol sem qualquer perigo para a nossa visão. No entanto, como este momento é breve não é aconselhável de modo nenhum fazê-lo.





Apenas numa estreita faixa ao longo do globo o eclipse atinge a totalidade.

A ladear essa faixa temos uma região onde o eclipse é apenas parcial e fora dessa região não temos eclipse.



<http://wisp.physics.wisc.edu/astro104/lecture3/lec3k.html>



Vistos da Terra, Sol e Lua têm praticamente o mesmo diâmetro angular (cerca de  $0.5^\circ$ ).

No entanto, como a órbita da Lua em torno da Terra é ligeiramente elíptica acontece que o diâmetro angular da Lua é variável.

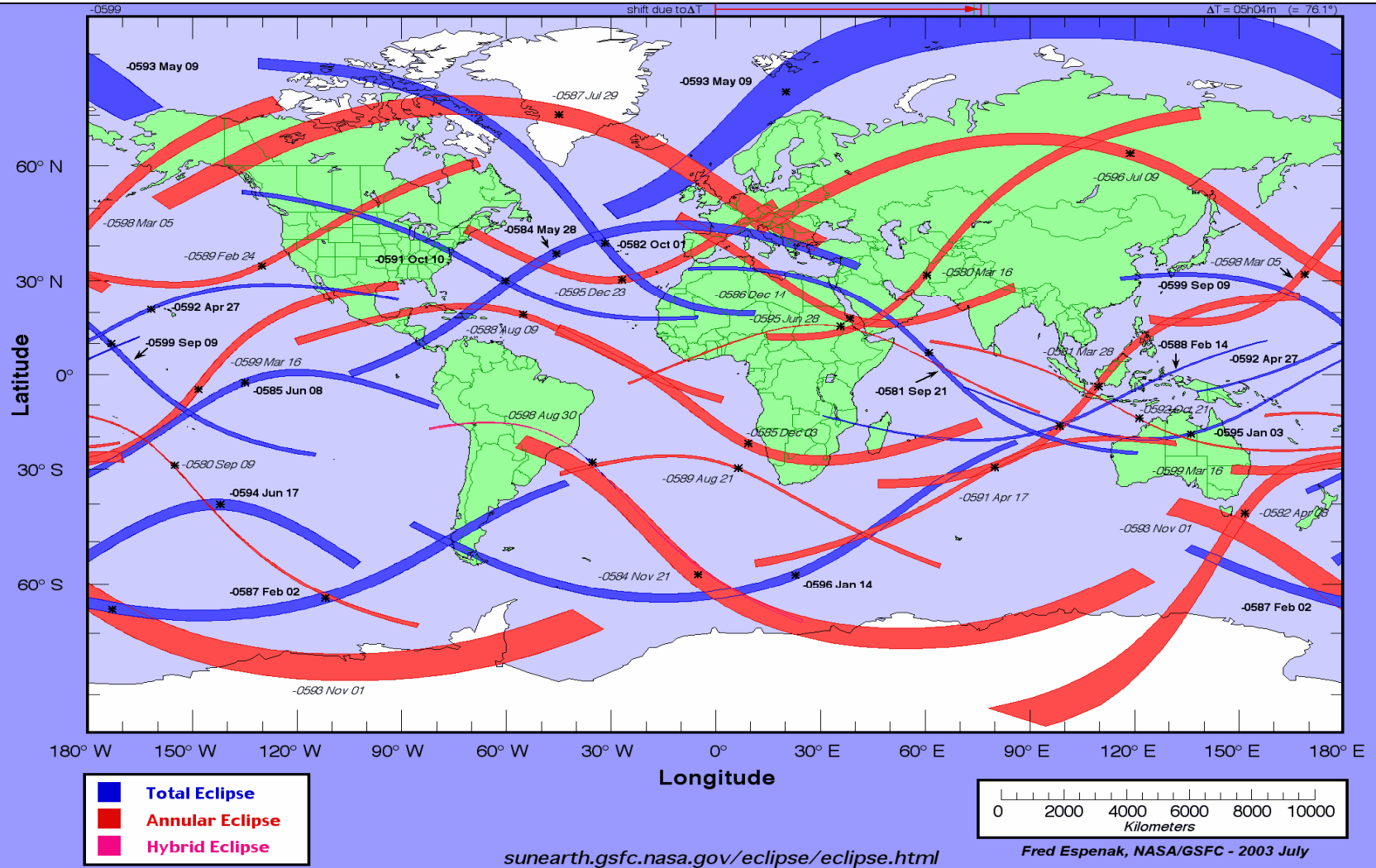
Em particular quando a Lua está no seu **apogeu** (ponto mais afastado da Terra) o seu diâmetro angular é menor e já não consegue cobrir completamente o Sol.

Neste caso temos um **eclipse anelar**.

Por outro lado, quando a Lua está no **perigeu** (ponto mais próximo da Terra) o seu diâmetro angular é máximo.

É nesta situação que os eclipses totais têm maior duração (cerca de 7.5 minutos).





Sabemos atualmente como determinar com bastante precisão a ocorrência de eclipses (passado e futuro).



Os Medos travavam uma batalha com os Lídios junto ao rio Halys (algures no centro da atual Turquia).

A batalha foi subitamente interrompida por um eclipse do Sol. Os soldados de ambos os lados cessaram os combates e declararam a paz.

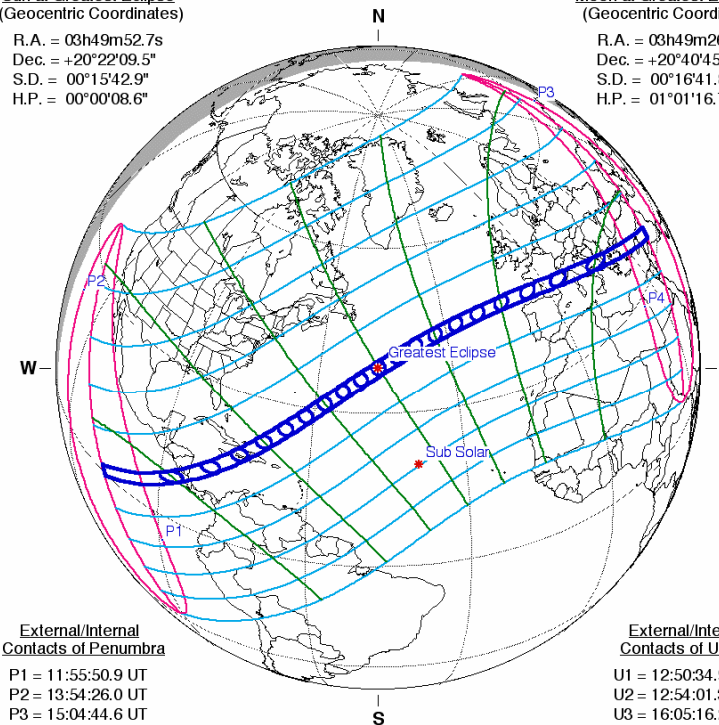
Analisando os eclipses que tiveram lugar no passado conclui-se que a batalha foi travada em 585AC.

## Total Solar Eclipse of -0584 May 28

Ecliptic Conjunction = 19:32:05.1 TD (= 14:32:57.4 UT)  
Greatest Eclipse = 19:28:50.3 TD (= 14:29:42.6 UT)  
Eclipse Magnitude = 1.0798    Gamma = 0.3201  
Saros Series = 57    Member = 33 of 73

Sun at Greatest Eclipse  
(Geocentric Coordinates)  
R.A. = 03h49m52.7s  
Dec. = +20°22'09.5"  
S.D. = 00°15'42.9"  
H.P. = 00°00'08.6"

Moon at Greatest Eclipse  
(Geocentric Coordinates)  
R.A. = 03h49m26.6s  
Dec. = +20°40'45.1"  
S.D. = 00°16'41.8"  
H.P. = 01°01'16.7"



External/Internal Contacts of Penumbra  
P1 = 11:55:50.9 UT  
P2 = 13:54:26.0 UT  
P3 = 15:04:44.6 UT  
P4 = 17:03:28.6 UT

External/Internal Contacts of Umbra  
U1 = 12:50:34.9 UT  
U2 = 12:54:01.3 UT  
U3 = 16:05:16.2 UT  
U4 = 16:08:43.8 UT

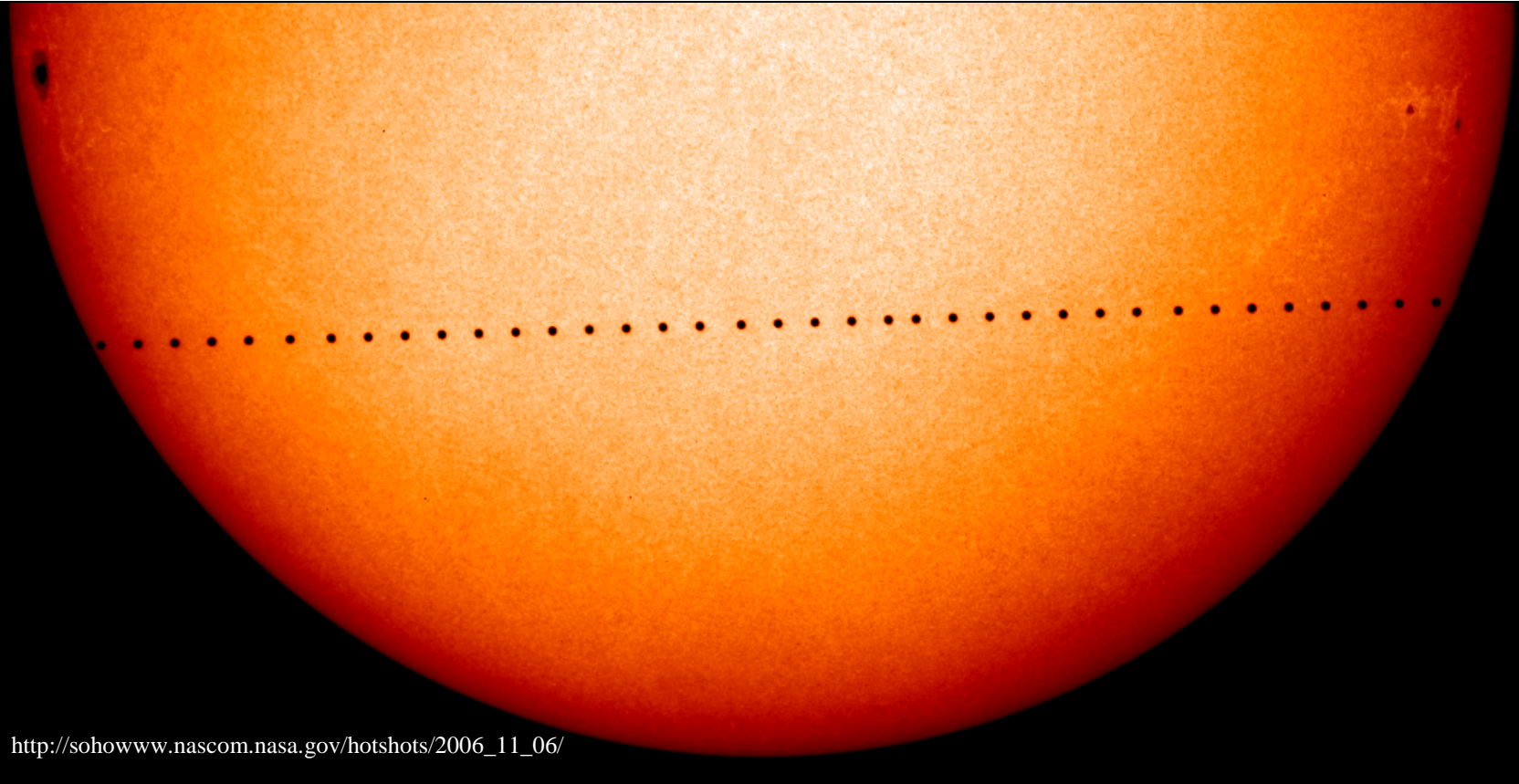
Constants & Ephemeris  
 $\Delta T = 17947.7$  s  
 $k1 = 0.2724880$   
 $k2 = 0.2722810$   
 $\Delta b = 0.0''$      $\Delta l = 0.0''$   
Eph. = VSOP87/ELP2000-82

Local Circumstances at Greatest Eclipse  
Lat. = 38°09.4'N    Sun Alt. = 71.1°  
Long. = 046°50.6'W    Sun Azm. = 158.5°  
Path Width = 271.5 km    Duration = 06m04.2s



F. Espenak, NASA's GSFC  
eclipse.gsfc.nasa.gov/eclipse.html

Geocentric Libration  
(Optical + Physical)  
 $l = -0.95''$   
 $b = -0.41''$   
 $c = -11.03''$   
Brown Lun. No. = -31002



[http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2006\\_11\\_06/](http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2006_11_06/)

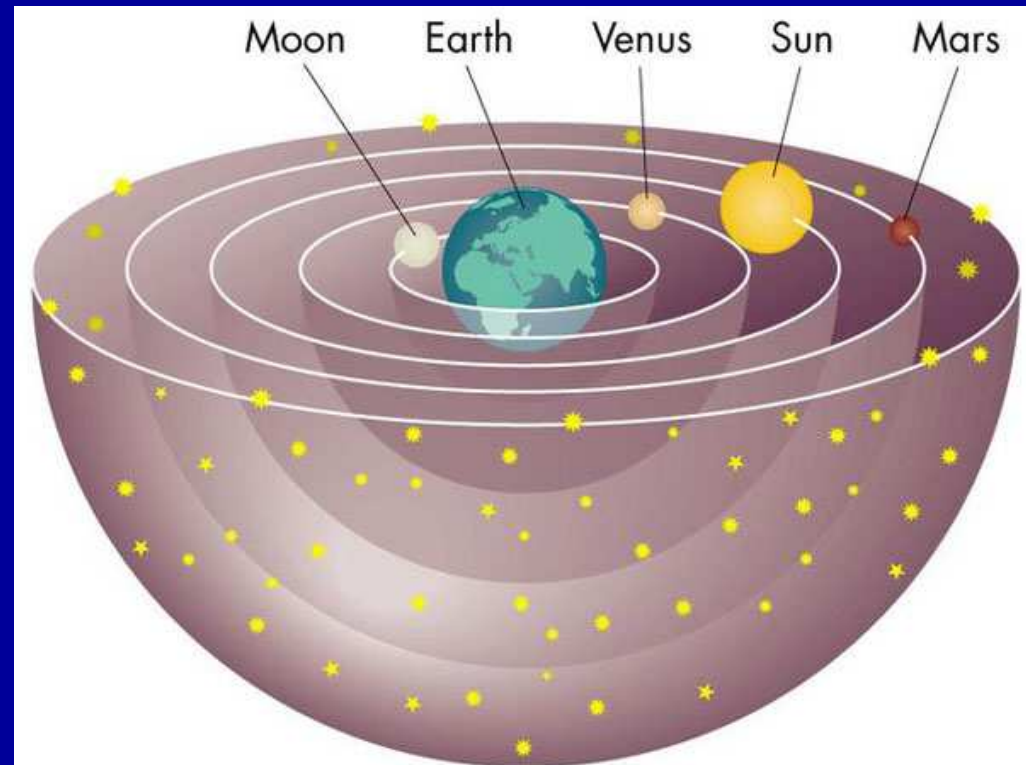
Quando, num alinhamento favorável Mercúrio passa em frente do Sol temos um chamado *trânsito de Mercúrio*. Tivemos um em 2006 (ver foto) e teremos outro em 2016. Não é um eclipse!

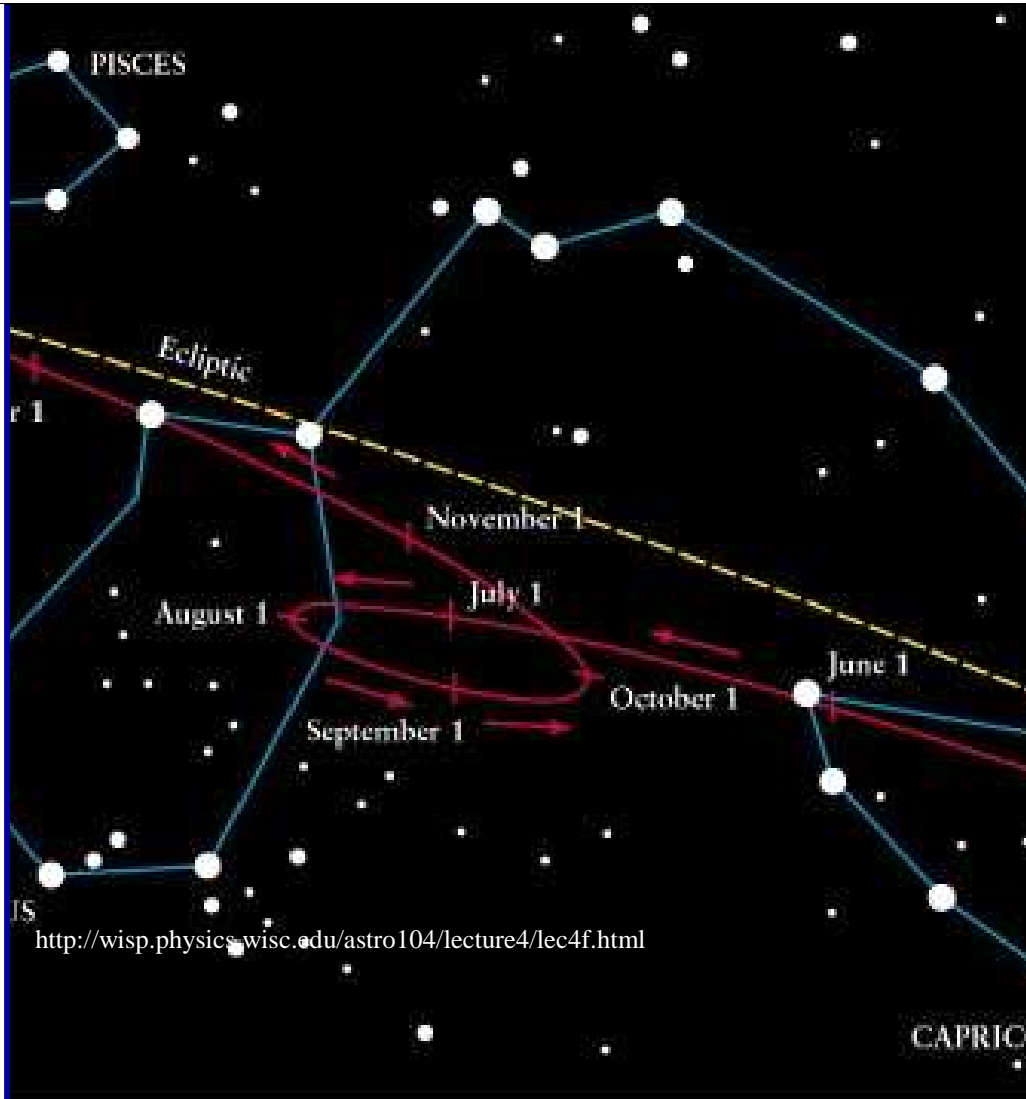


# Modelo geocêntrico e modelo heliocêntrico

Modelo geocêntrico – este modelo coloca a Terra no centro do Universo.

A esfera celeste com todas as suas estrelas era considerada imutável e rodava como um todo em torno da Terra uma vez por dia.



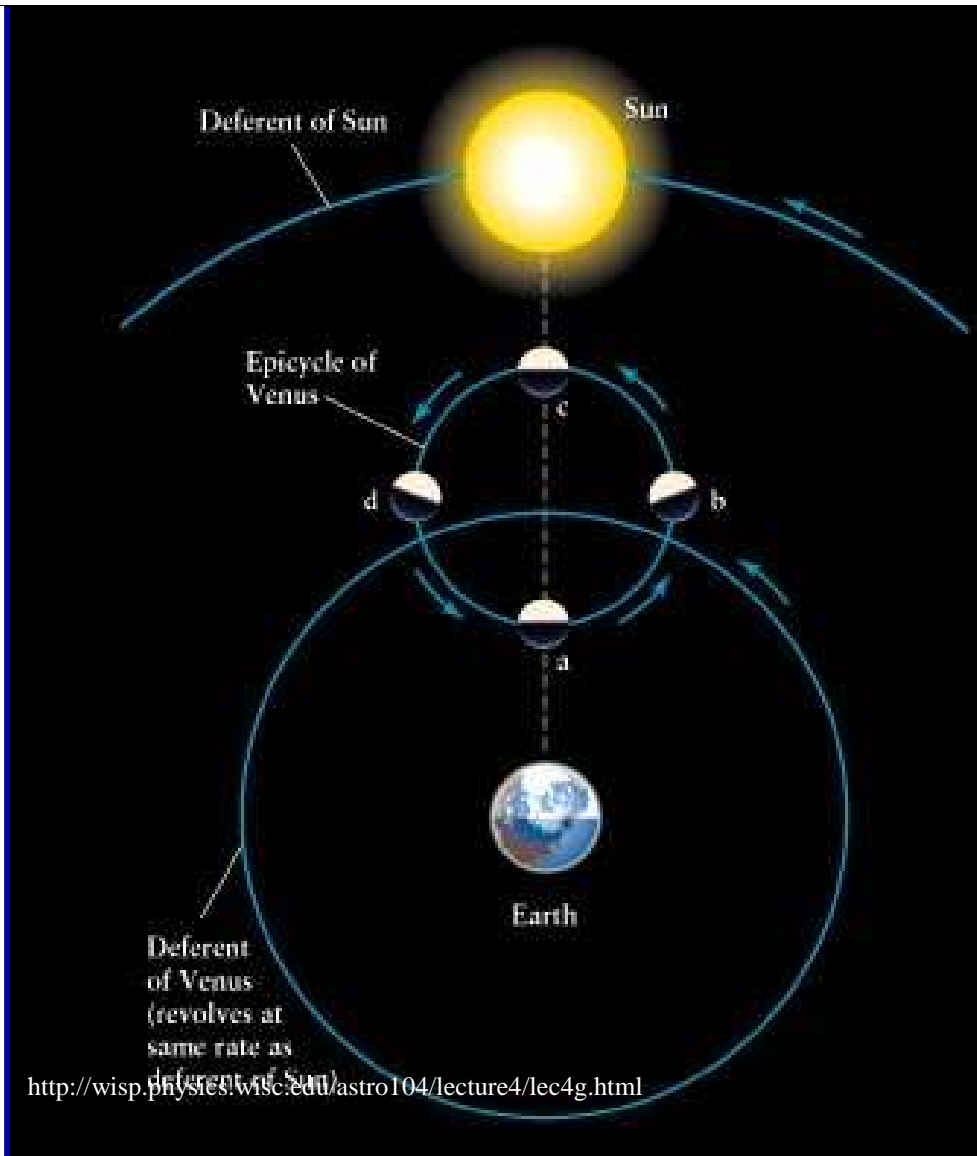


<http://wisp.physics.wisc.edu/astro104/lecture4/lec4f.html>

Um dos maiores problemas de qualquer modelo do Universo, incluindo o geocêntrico, era o explicar devidamente o movimento das chamadas estrelas errantes (que hoje sabemos serem os planetas).

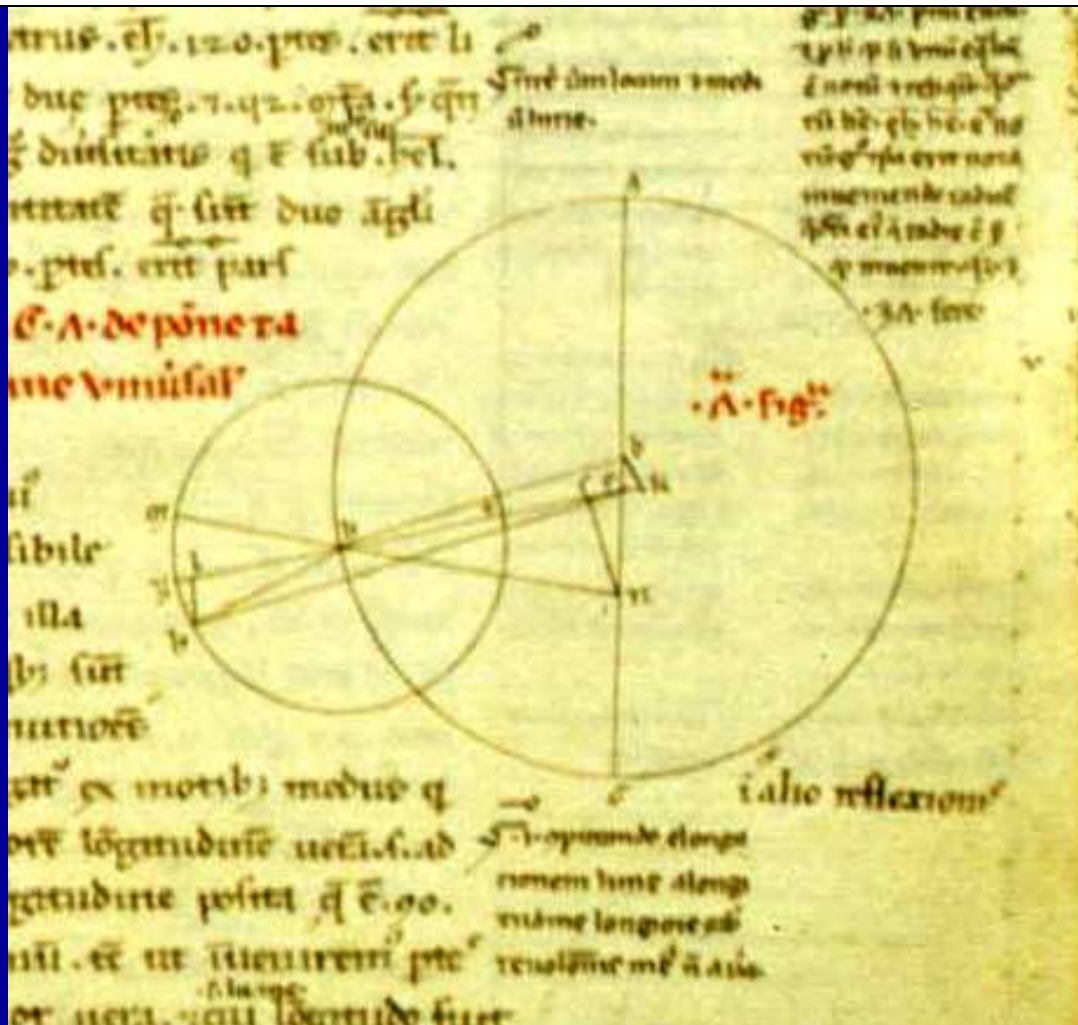
O Sol e a Lua deslocam-se ao longo do tempo de forma uniforme sob a esfera celeste não levantando qualquer problema ao modelo.

Os planetas não apresentam esse comportamento uniforme, uma vez que, por vezes eles invertem o sentido do seu movimento.



Para contornar esta questão Ptolomeu desenvolveu um modelo no qual os planetas descreviam **epiciclos** cujo centro, chamado **deferente**, se deslocava numa órbita circular em torno da Terra.





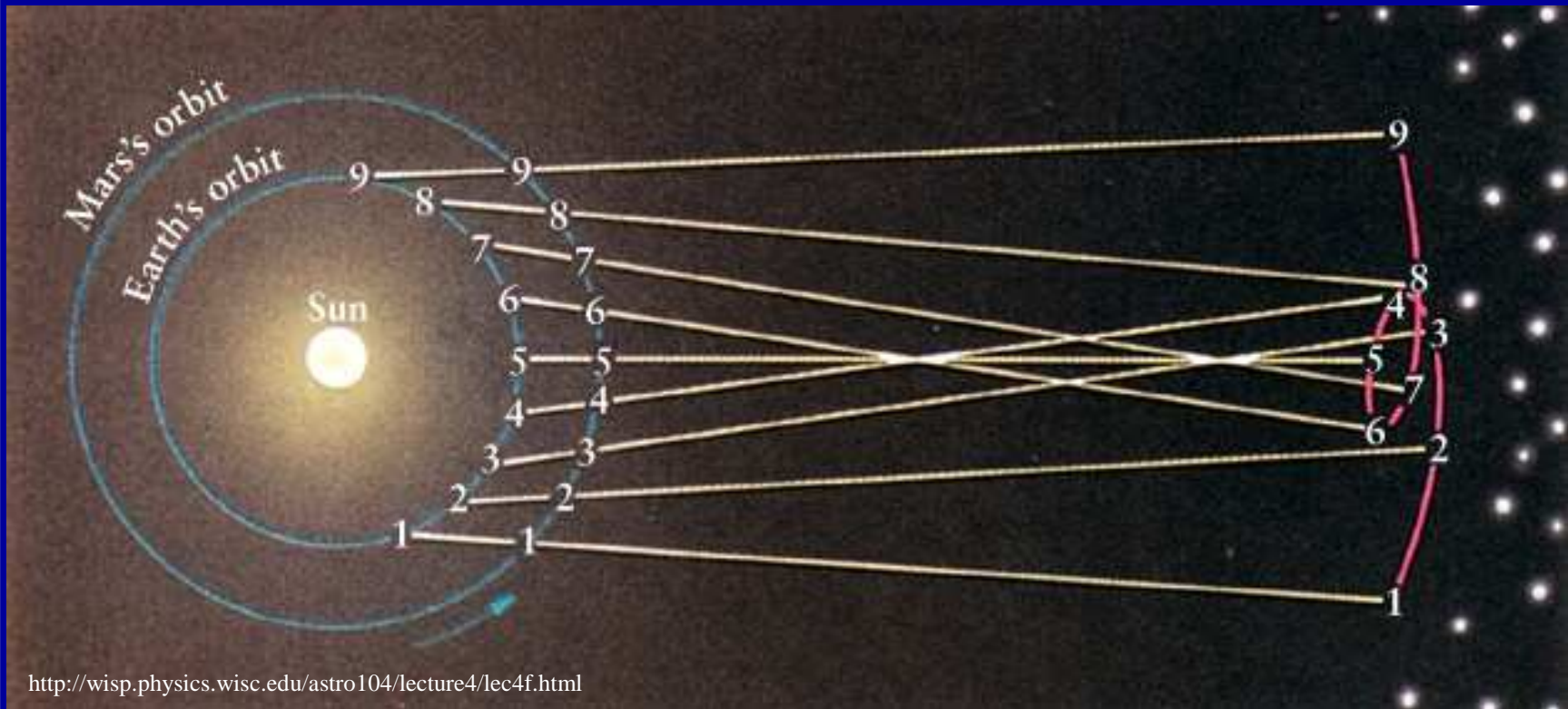
<http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/NatSci102/lectures/ptolemy.htm>

Ptolomeu compilou o seu modelo em 13 volumes: *Almagest*.

O modelo permitia determinar as posições do Sol, Lua e planetas com um rigor sem precedentes até então e, por isso, mesmo, esteve em vigor mais de 1000 anos.

O grande problema com este modelo era o facto de tratar todos os planetas de forma independente.

O **modelo heliocêntrico** de Copérnico colocava o Sol no centro e permitia explicar o movimento dos planetas de uma forma mais simples.

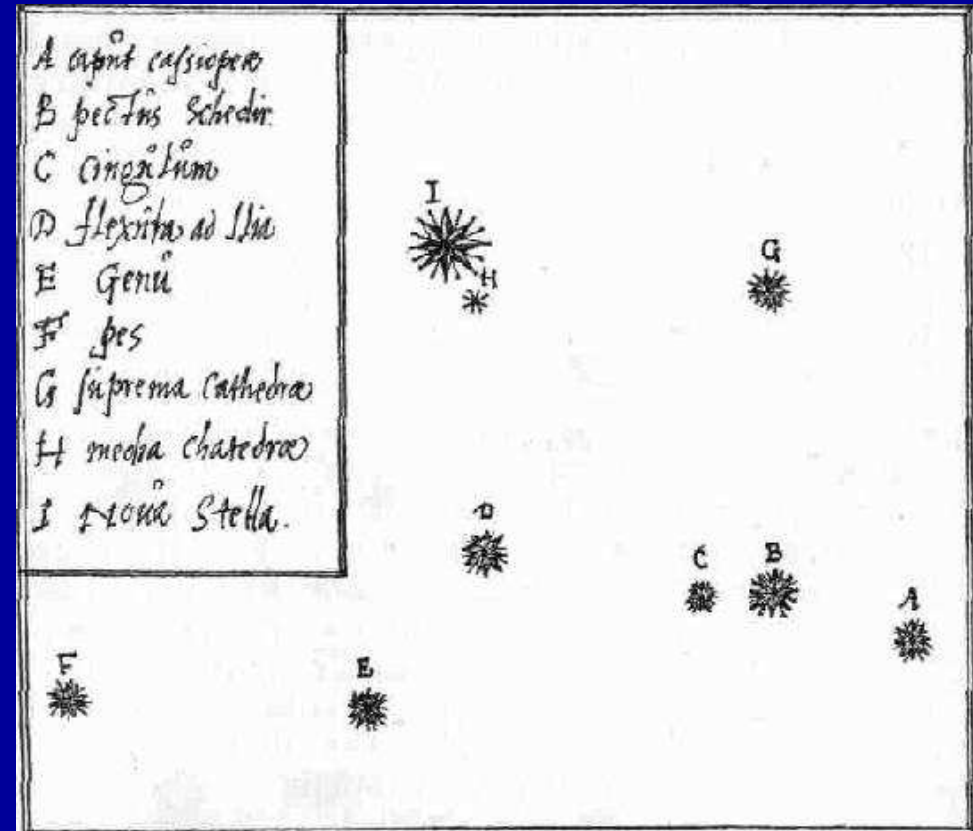


Em particular, o modelo permitia explicar o movimento retrógrado e tratava todos os planetas da mesma forma.

O modelo de Copérnico era mais simples que o de Ptolomeu mas não fazia previsões mais rigorosas ou outro tipo de previsões.

Era apenas mais simples e não havia, na altura, qualquer outra razão para escolher entre um e outro.

A 11 de novembro de 1572 uma estrela bastante brilhante apareceu na constelação de Cassiopeia tendo acabado por desvanecer e desaparecer completamente cerca de 18 meses depois (hoje sabemos que se tratou da explosão de uma nova).





Tycho Brahe tentou medir a paralaxe dessa estrela utilizando o melhor equipamento da época mas não foi capaz.

A estrela estava muito mais longe do que se julgava.

Foi o primeiro indício de que a esfera celeste não era imutável como se pensava.



**Tycho Brahe tentou medir a paralaxe de diversas estrelas.**

Havendo paralaxe significava que era a Terra que andava em torno do Sol e não o contrário.

Como não conseguiu medir (pois como sabemos hoje os ângulos de paralaxe estelar são extremamente pequenos) concluiu que talvez o modelo de heliocêntrico não fosse o melhor.



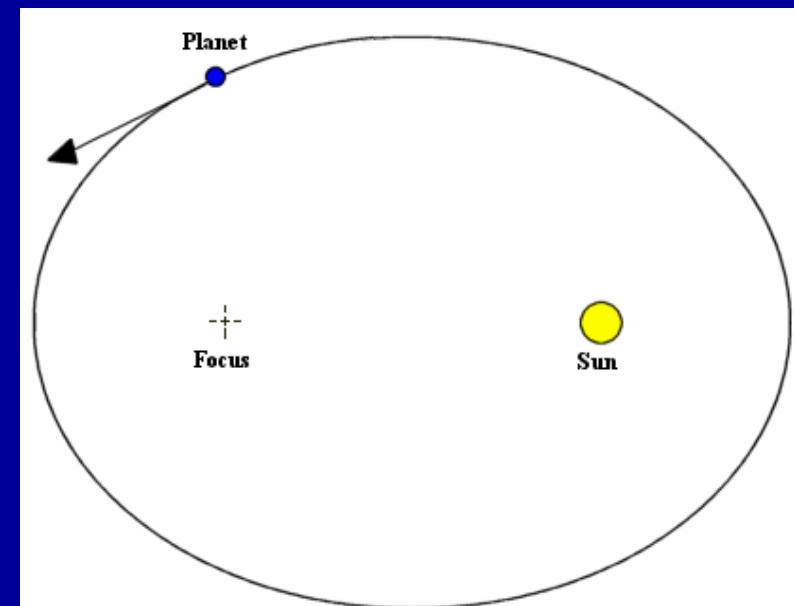
# Leis de Kepler

Johannes Kepler no início do século XVII procurou desenvolver um modelo planetário utilizando a grande quantidade de dados precisos que Tycho Brahe registou ao longo dos anos.

Uma das primeiras constatações de Kepler foi que as órbitas dos planetas deveriam ser elípticas e não simplesmente circulares como era então aceite.

Primeira Lei de Kepler (1609):

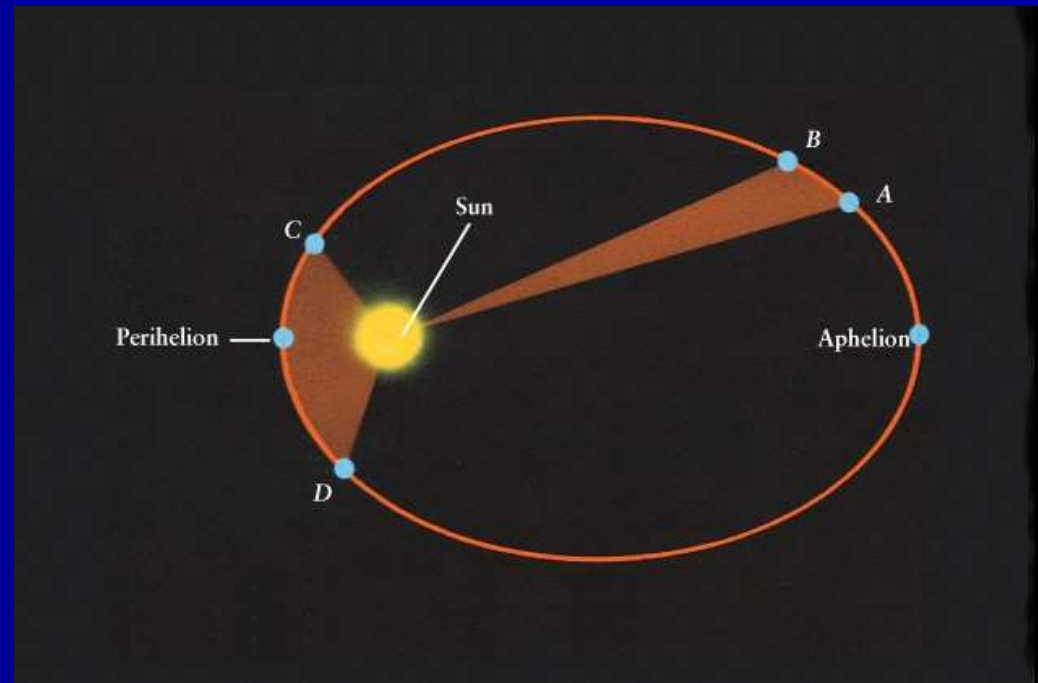
**A órbita de um planeta em torno do Sol é uma elipse com o Sol num dos focos.**





Quando um planeta descreve uma órbita elíptica a sua distância ao Sol varia. O ponto de maior aproximação ao Sol chama-se **periélio** e o ponto de maior afastamento chama-se **afélio**.

Kepler constatou que a velocidade com que se desloca o planeta é maior no periélio e menor no afélio.



Segunda Lei de Kepler (1609):

**Um planeta no seu movimento elíptico em torno do Sol varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais.**

Kepler também deduziu, a partir dos dados de Tycho, uma relação que permite comparar o movimento de diferentes planetas.

Terceira Lei de Kepler (1618):

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G(M_1 + M_2)} a^3$$

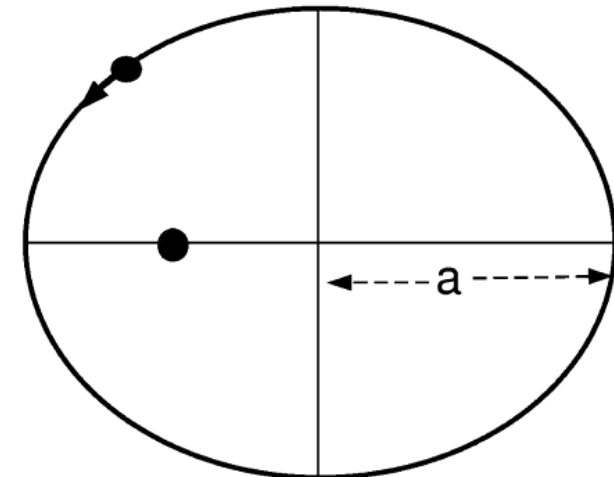
**O quadrado do período sideral de um planeta é diretamente proporcional ao cubo do semieixo maior da sua órbita.**

É de realçar que Kepler apenas estabeleceu as leis sem ter explicado a razão pela qual os planetas obedecem a essas leis.

Esse trabalho seria feito por Galileu e por Newton.

Kepler's 3rd Law

$$p_{\text{yrs}}^2 = a^3_{\text{AU}}$$

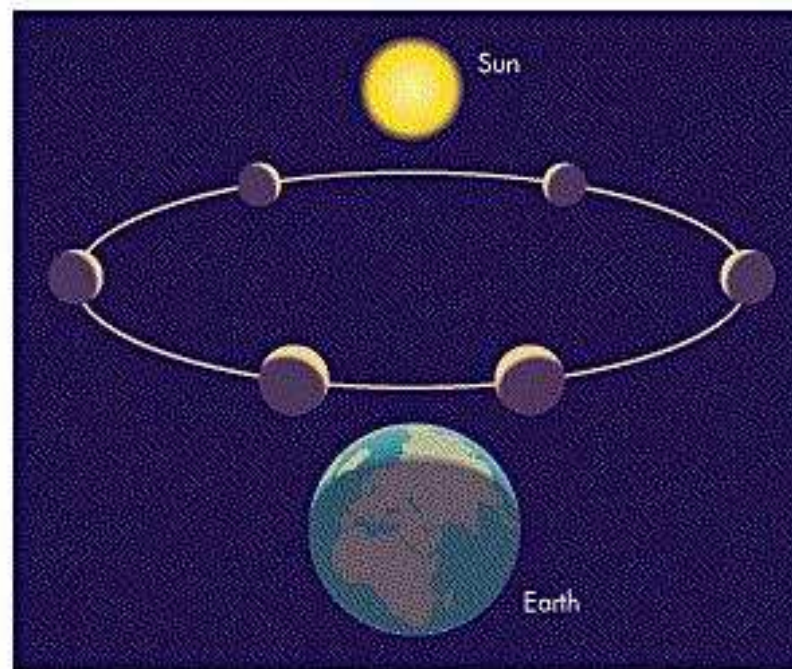




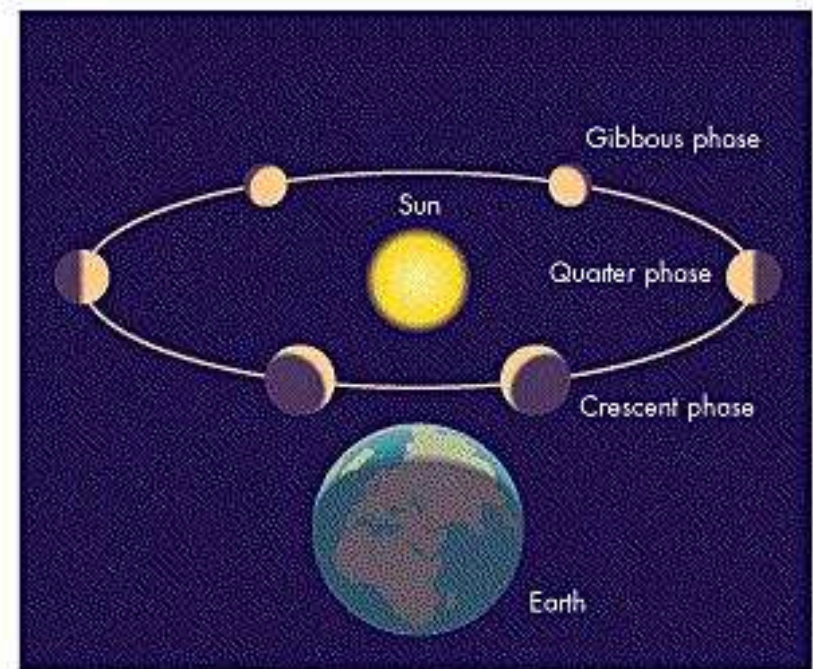
Galileu foi o primeiro a apontar um telescópio para o céu (1610). Fez várias descobertas.

Uma das mais importantes foi a da **existência de fases em Vénus** semelhantes às que observamos na Lua.

No sistema de Ptolomeu Vénus não poderia exibir algumas dessas fases dado estar sempre mais próximo da Terra do que o Sol.



A The Ptolemaic system



B The Copernican system





Outra importante descoberta de Galileu foi a das quatro maiores luas de Júpiter (atualmente designadas por satélites Galileanos).

Essas luas andavam em torno de Júpiter e não em torno da Terra.

Júpiter era, assim, uma espécie de ‘sistema heliocêntrico’ em miniatura.





Newton mostrou que as Leis de Kepler não são de natureza empírica mas sim uma consequência direta das Leis fundamentais da Física.

As Leis de Newton aplicam-se a objetos tanto na Terra como nos céus.

Halley utilizou a mecânica Newtoniana para prever a próxima passagem do **cometa Halley**.

O **planeta Neptuno** foi descoberto aplicando a mecânica Newtoniana ao problema das perturbações verificadas na órbita do planeta Úrano.

A mecânica Newtoniana foi amplamente aceite por resolver muitos dos problemas em aberto.

Contudo existem domínios onde a mecânica Newtoniana deve ser substituída por outras teorias mais gerais: Mecânica Quântica, Relatividade Especial e Relatividade Geral.

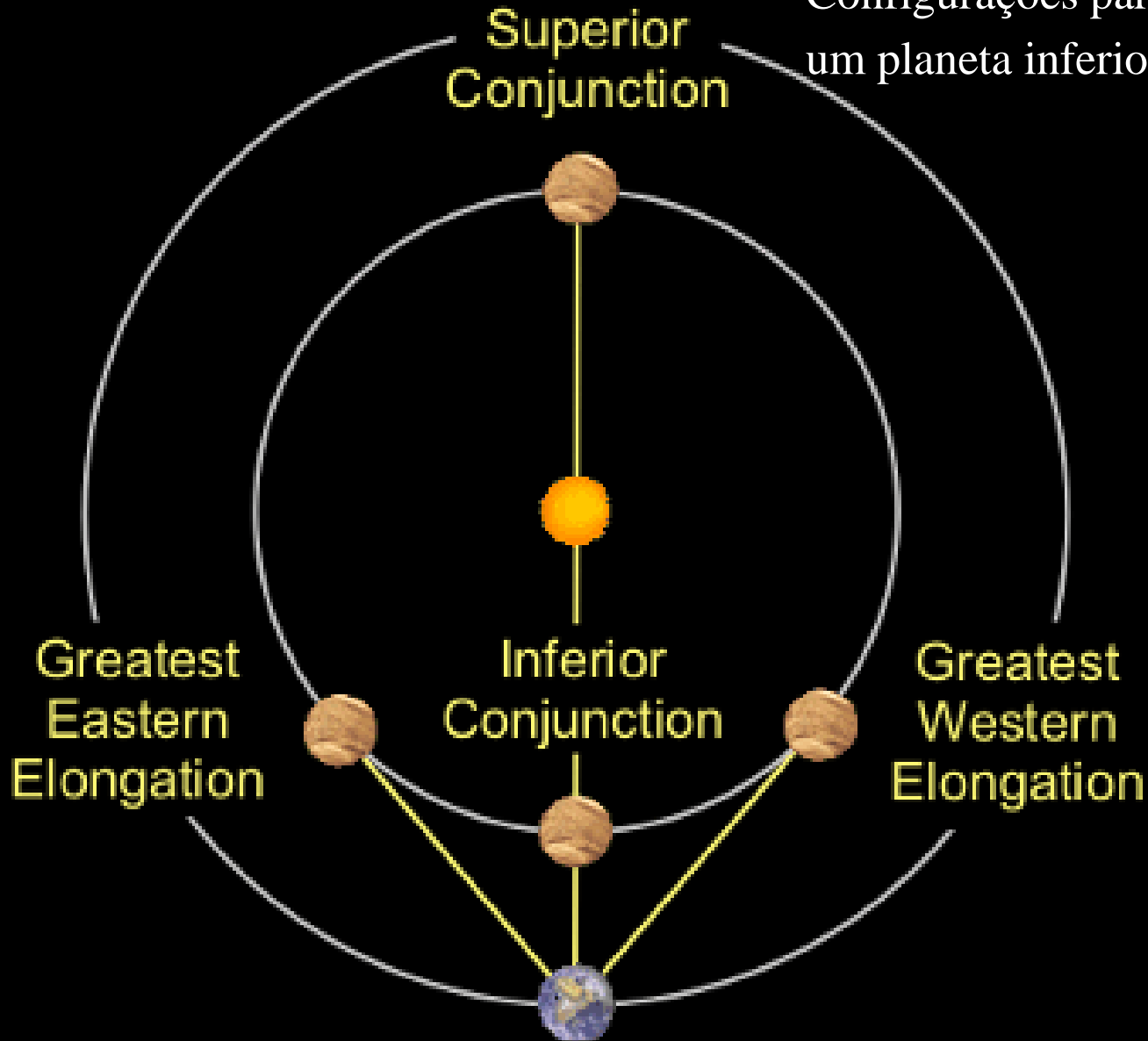


**Elongação** de um planeta: ângulo entre o Sol e o planeta do ponto de vista de um observador sobre a superfície terrestre



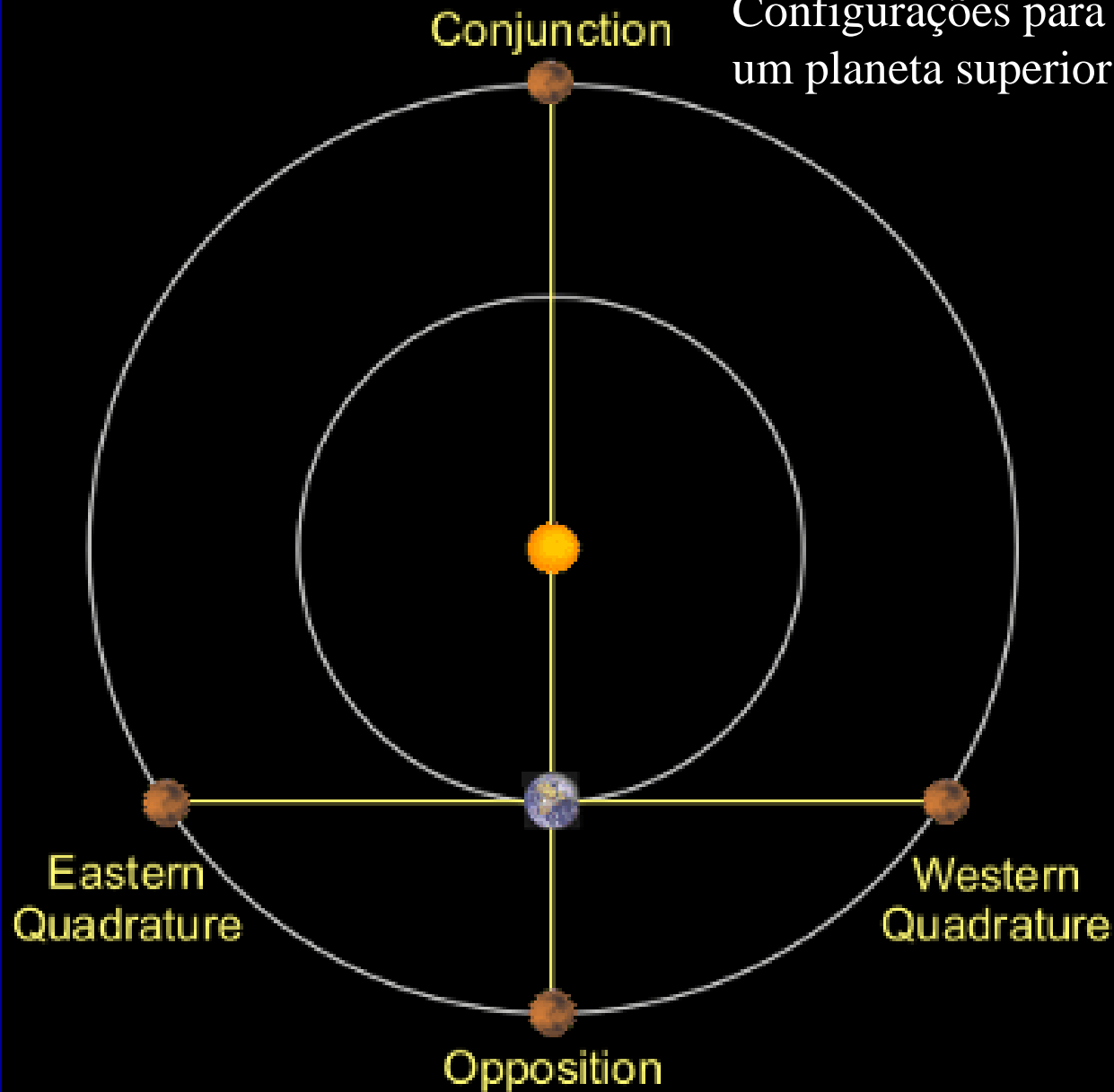


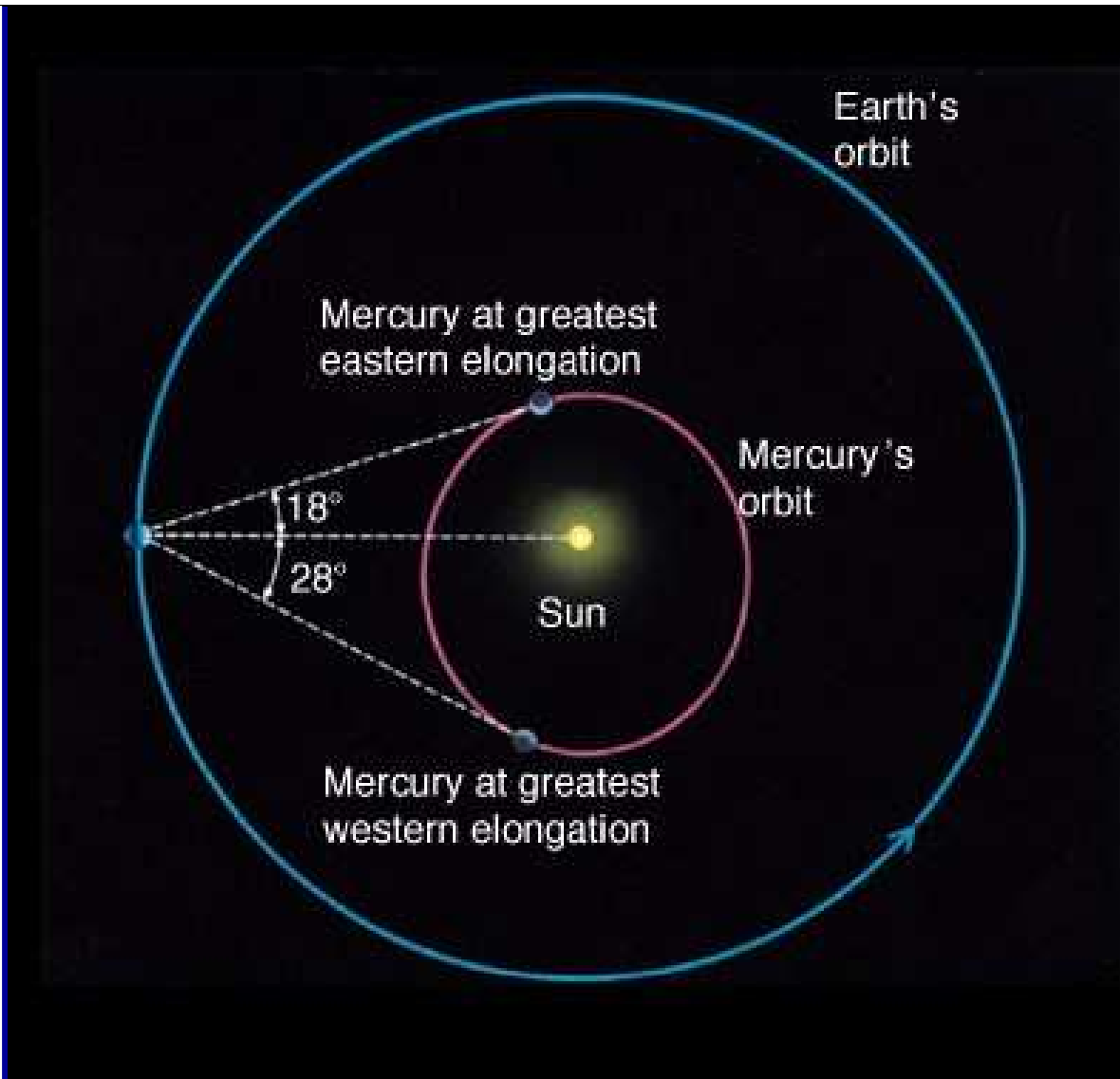
Configurações para um planeta inferior





## Configurações para um planeta superior





Mercúrio nunca sobe mais do que  $28^\circ$  em relação à linha do horizonte.

Pode ser observado antes do nascer do Sol ou logo depois do pôr do Sol.

Na melhor das hipóteses está acima do horizonte cerca de duas horas.



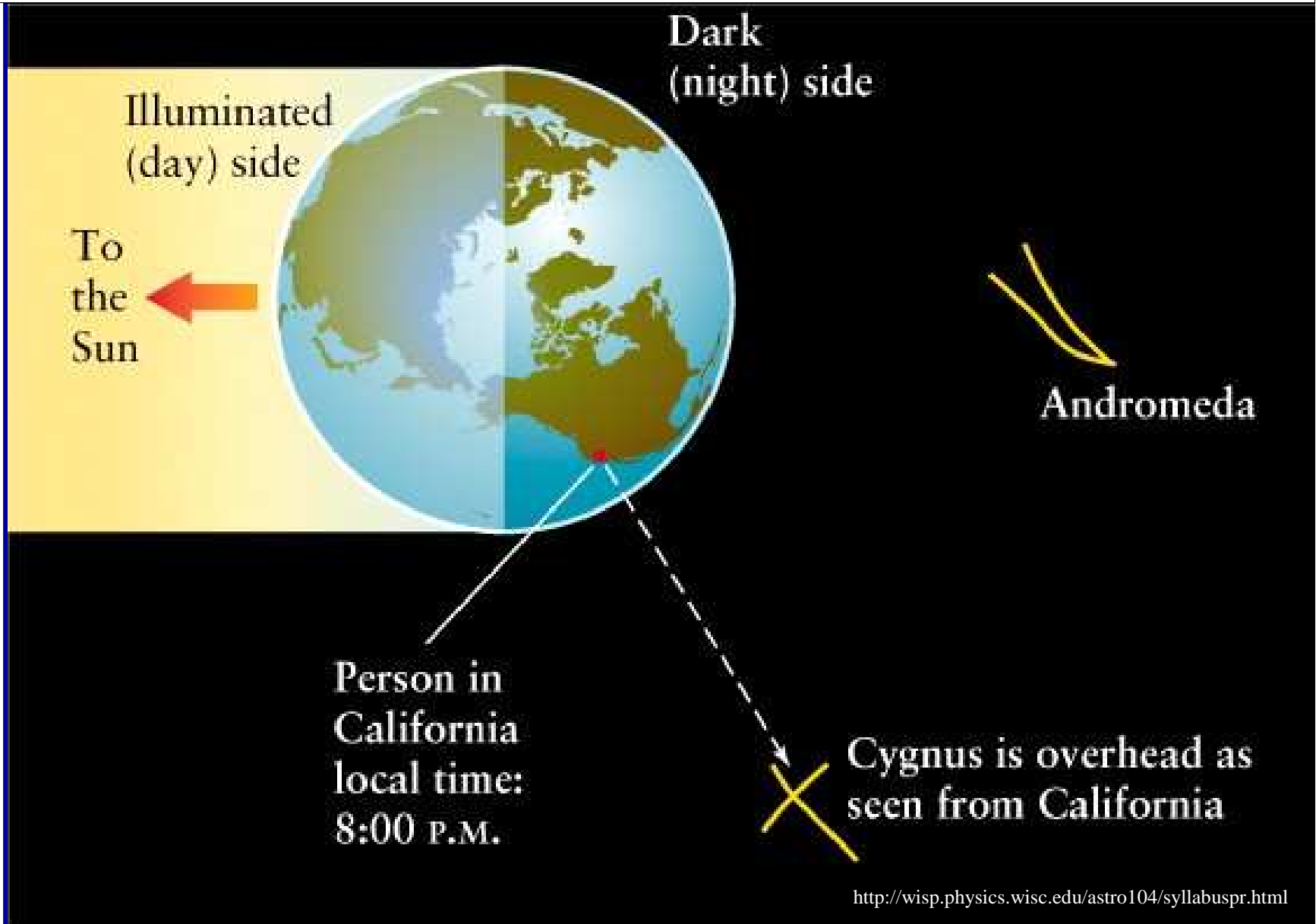
# Movimento aparente das estrelas ao longo da noite

**A aparência do céu muda ao longo da noite.**

Devido ao movimento de rotação da Terra, à medida que vai passando a noite, temos a sensação de que é a esfera celeste que roda como um todo em torno da Terra em sentido contrário ao da rotação da Terra.

Pela mesma razão, durante o dia vemos o Sol nascer, subir no horizonte e se pôr do outro lado ao fim da tarde.

**Estes movimentos aparentes são uma consequência direta do movimento de rotação da Terra.**

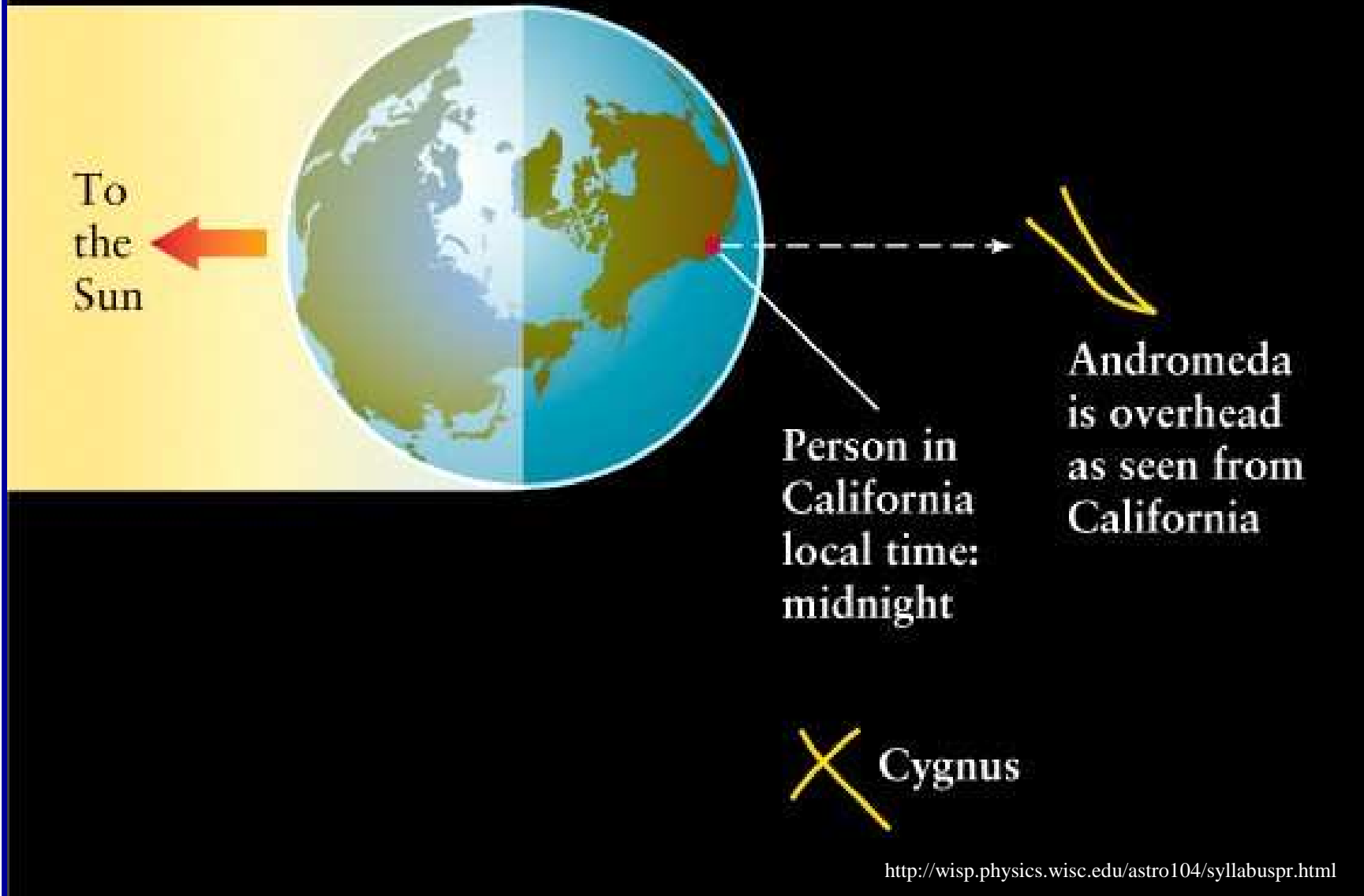


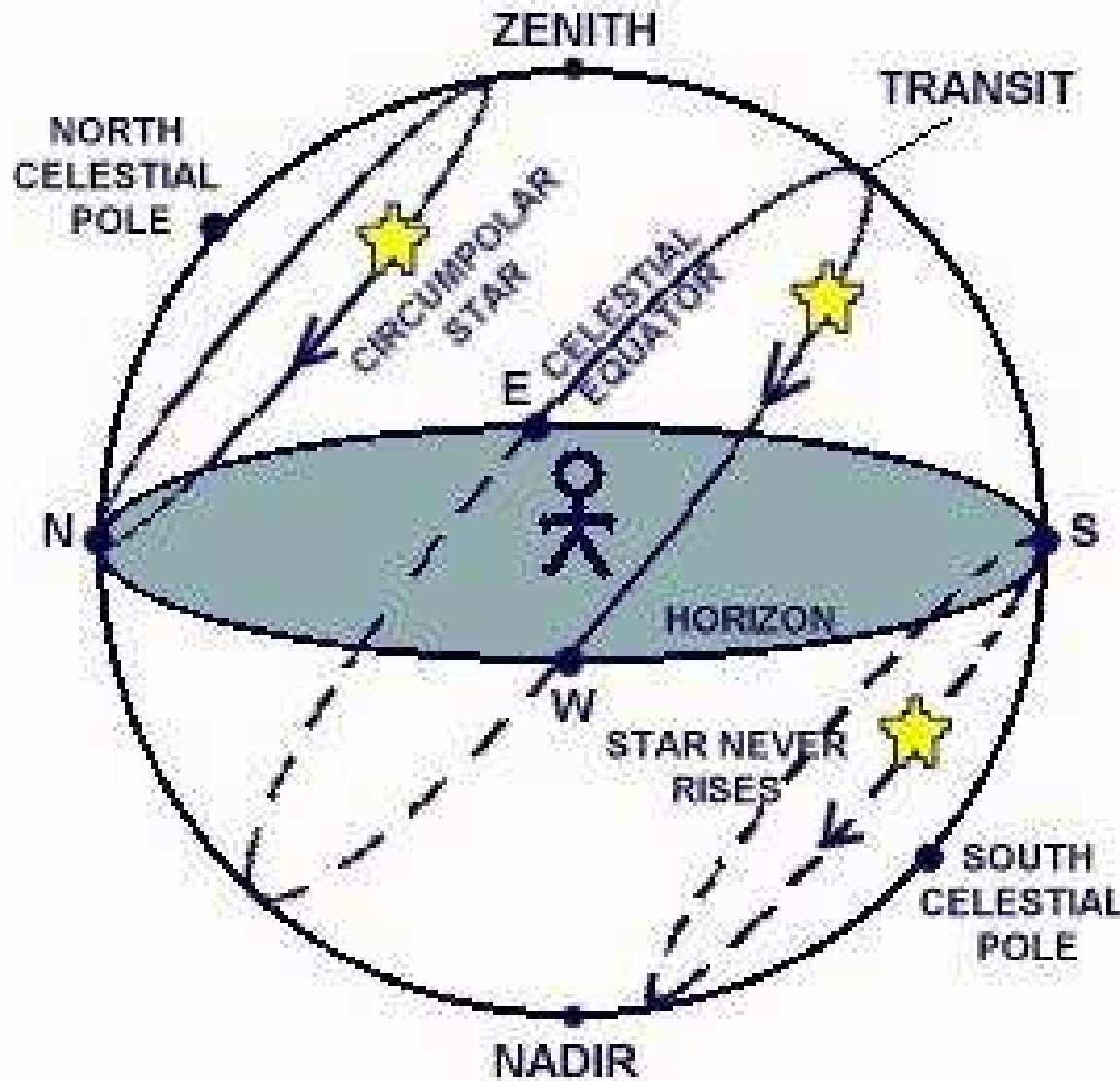
Person in California  
local time:  
8:00 P.M.

Cygnus is overhead as  
seen from California

<http://wisp.physics.wisc.edu/astro104/syllabuspr.html>







Movimento aparente das estrelas para um observador situado no HN numa latitude comparável à da Madeira.



*Grupo de Astronomia*



Exposição longa duração mostrando o movimento das estrelas circumpolares em torno do eixo de rotação da Terra. Próximo do centro temos a Estrela Polar.



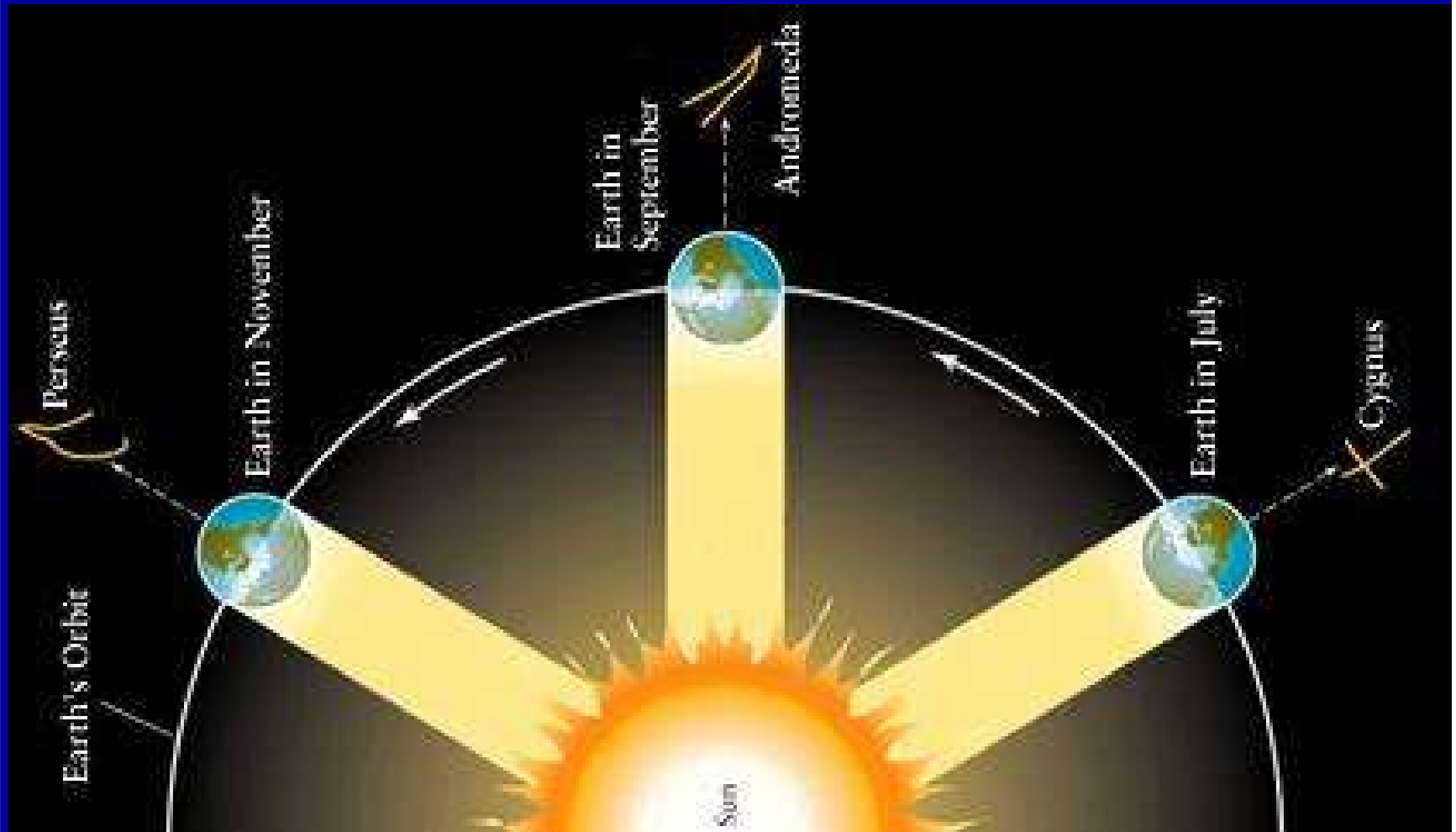
# Movimento aparente das estrelas ao longo do ano

Se a Terra não tivesse movimento de translação, de noite para noite, à mesma hora veríamos a esfera celeste exatamente da mesma forma.

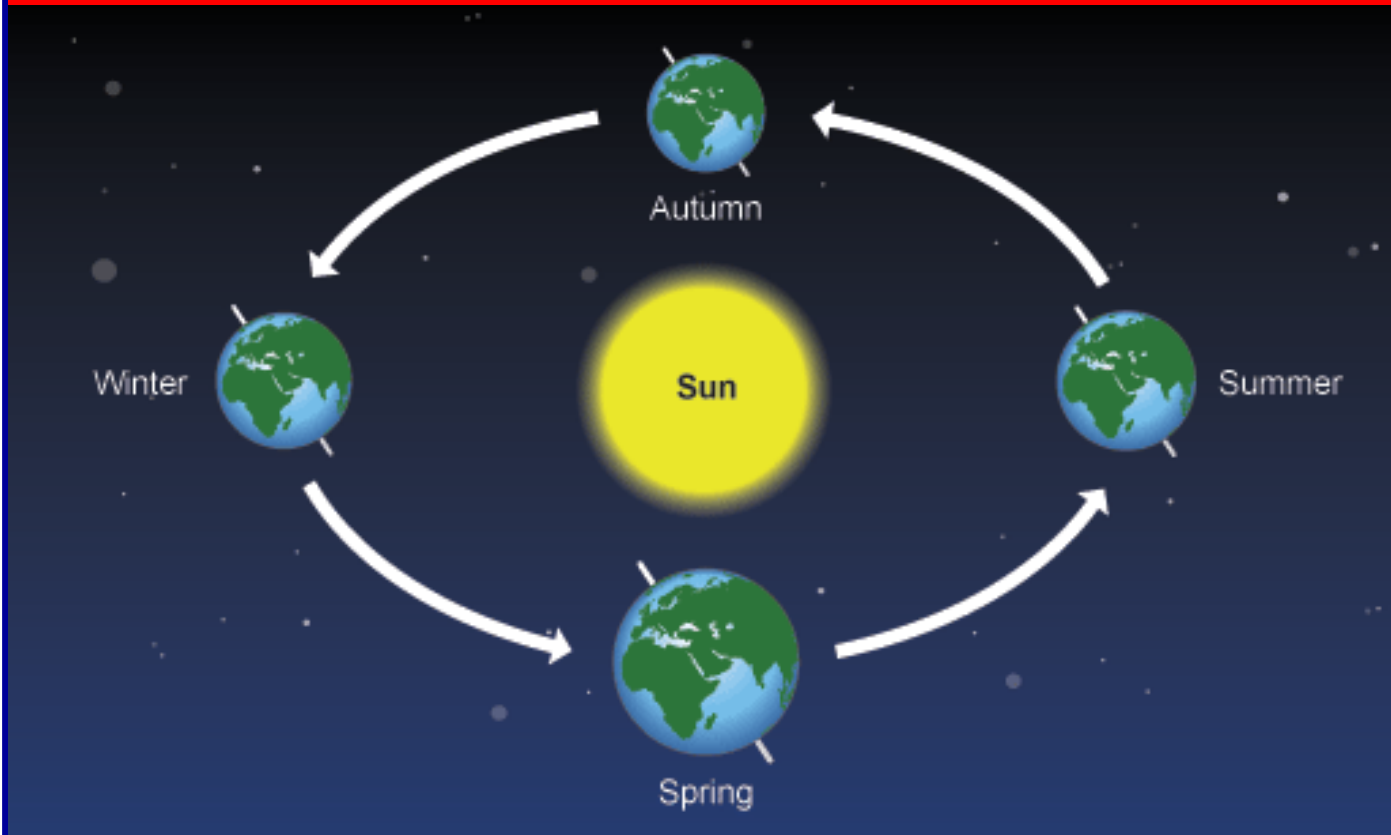
No entanto, como o **movimento de translação** existe, no dia seguinte à mesma hora o que vemos é uma esfera celeste ligeiramente adiantada à do dia anterior.

Esse adiantamento corresponde a cerca de **4 minutos**.

## Grupo de Astronomia

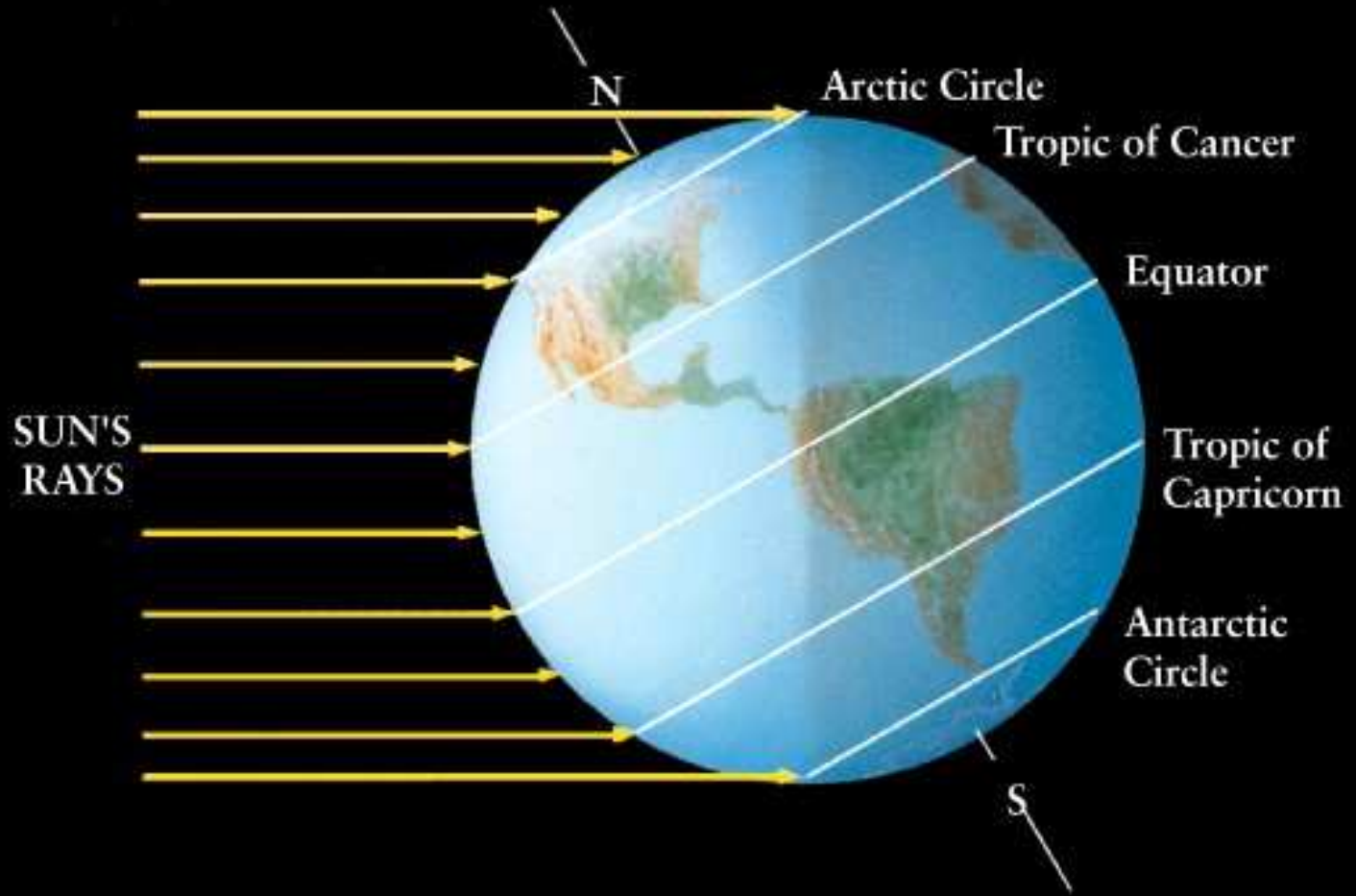


## Inclinação do eixo de rotação da Terra

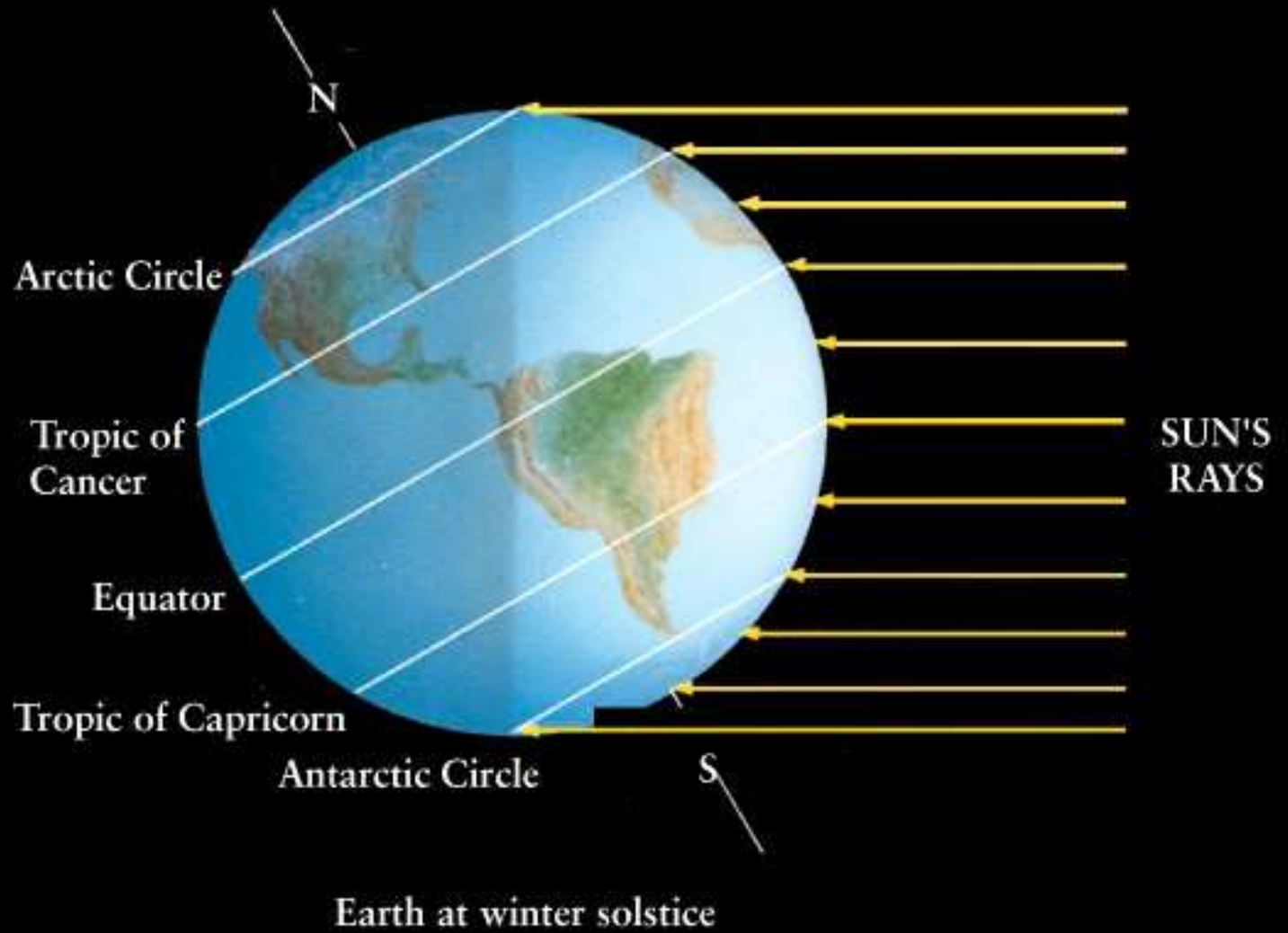


[http://www.bbc.co.uk/schools/ks3bitesize/science/environment\\_earth\\_universe/astronomy\\_space/revise5.shtml](http://www.bbc.co.uk/schools/ks3bitesize/science/environment_earth_universe/astronomy_space/revise5.shtml)

A inclinação do eixo da Terra é o responsável pela existência de **estações** uma vez que, no decurso do ano, diferentes frações de cada hemisfério são iluminadas pelo Sol e durante intervalos de tempo diferentes.



Earth at summer solstice



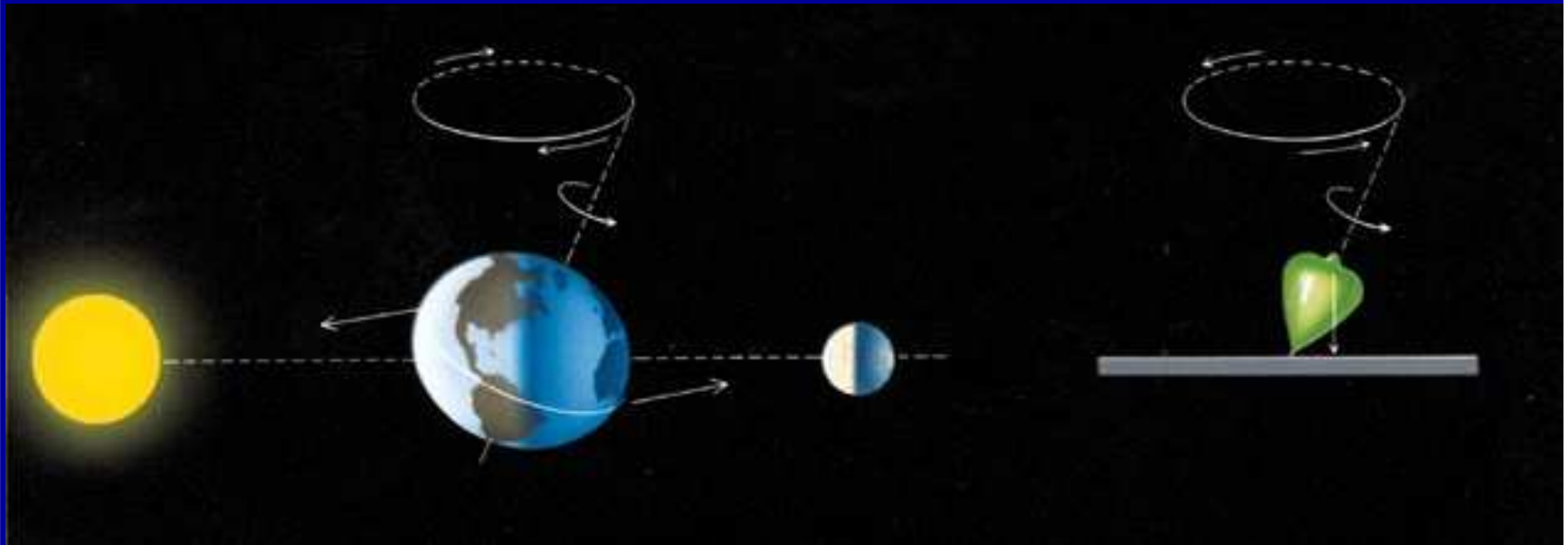




O eixo de rotação da Terra não mantém sempre a mesma orientação.

Ele executa o chamado **movimento de precessão** (como o eixo de um pião a rodar) completando um ciclo a cada **26 000 anos**.

Este movimento resulta de uma ação conjugada entre a Lua e o Sol.





Neste momento o eixo de rotação da Terra aponta numa direção que dista  $1^\circ$  da **Estrela Polar**.

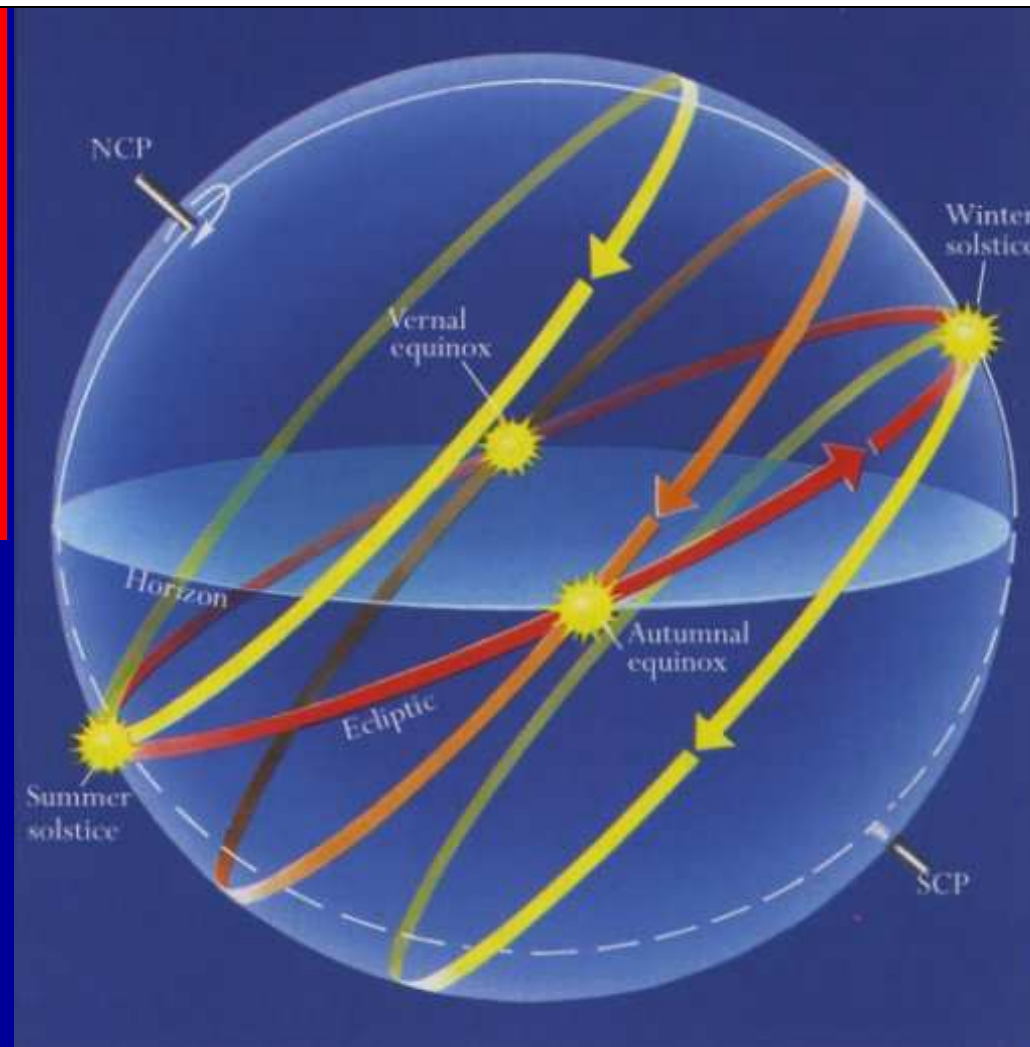
Há 5000 anos a estrela que estava mais próximo do PNC era **Thuban** na constelação do Dragão. Daqui por 12000 anos será **Vega** na constelação de Lyra.

A mudança de orientação do eixo de rotação da Terra acarreta também consigo a mudança dos equinócios....

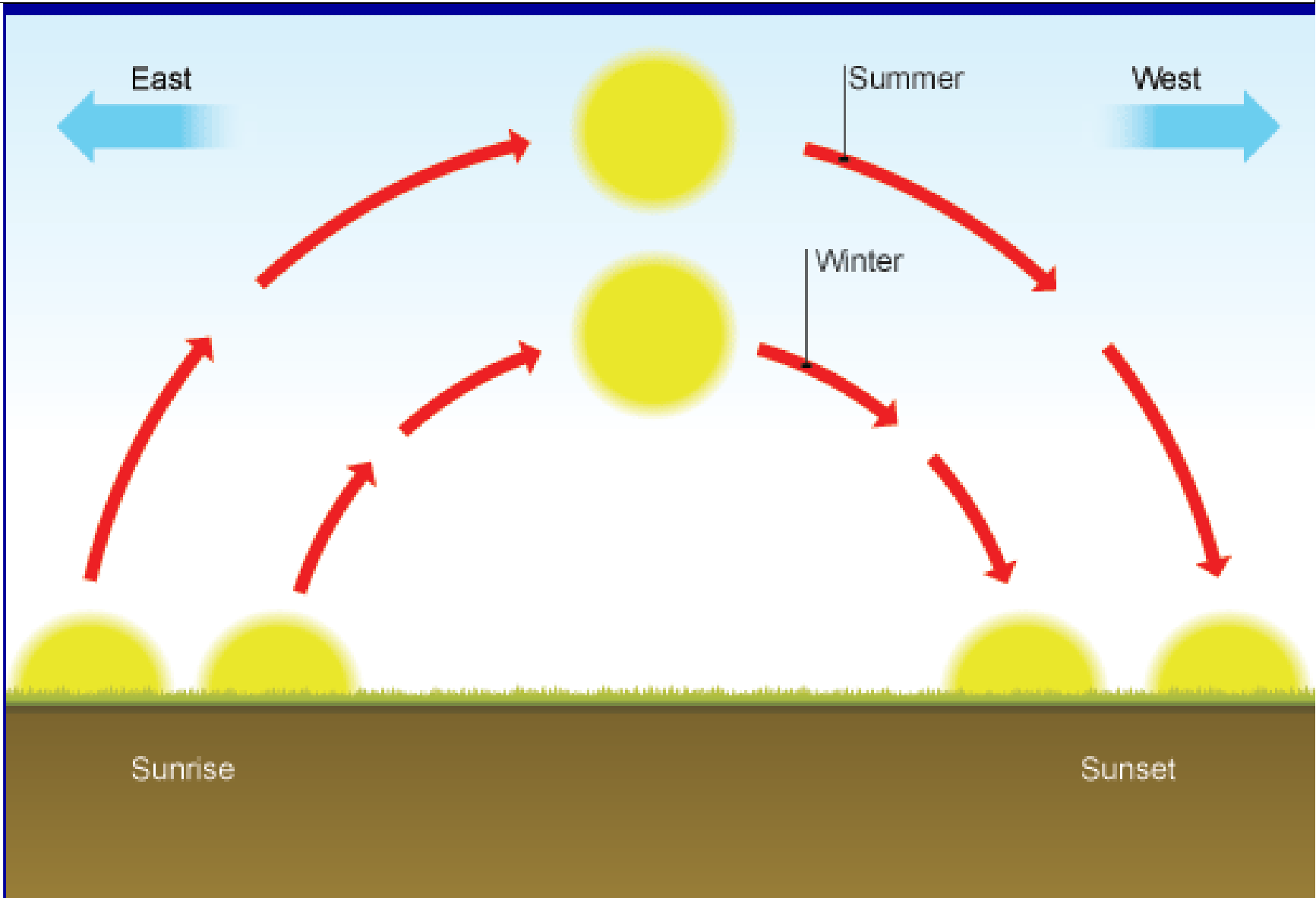




# Movimento aparente do Sol ao longo do ano

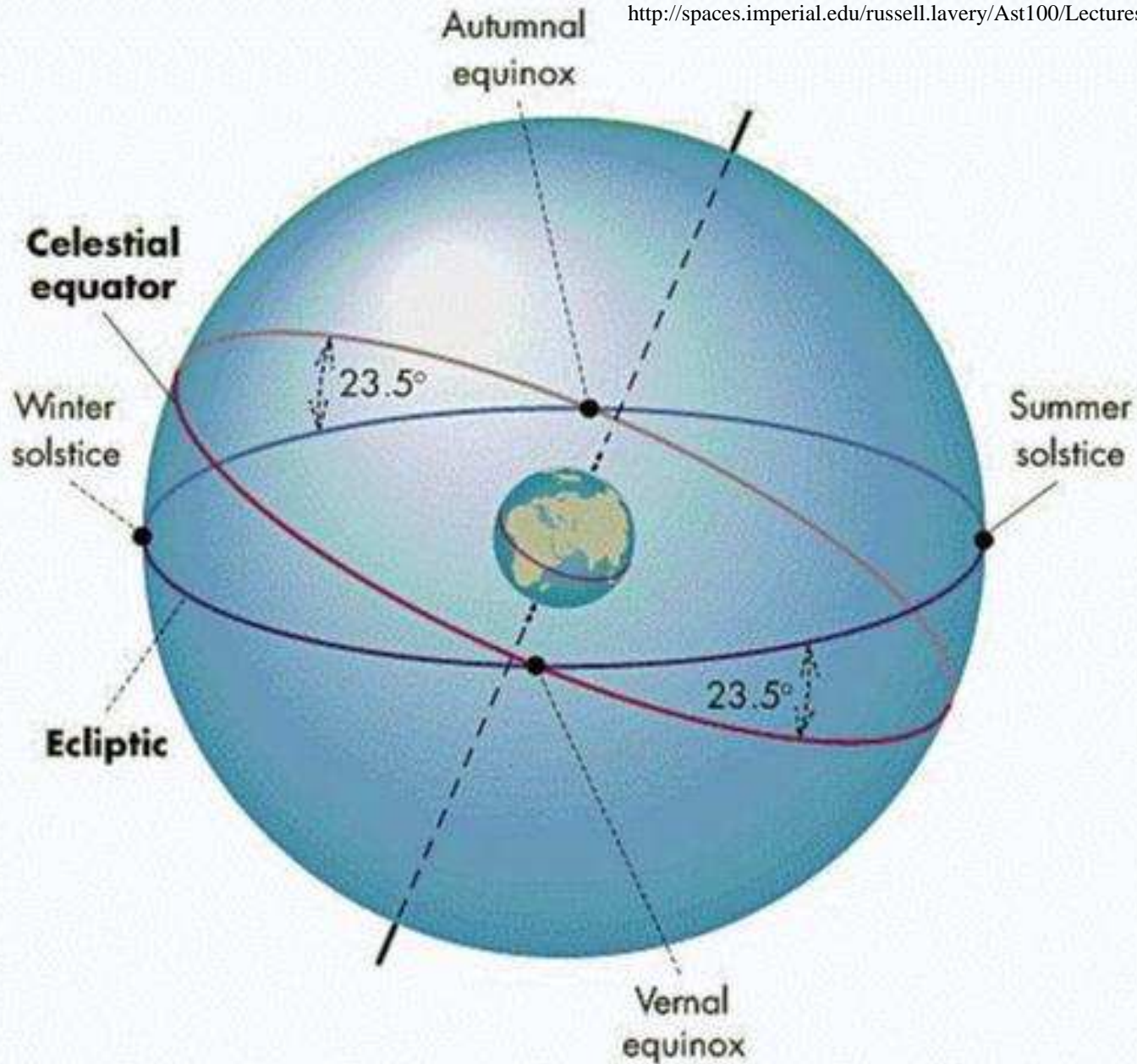


<http://stars.astro.illinois.edu/celsph.html>





<http://spaces.imperial.edu/russell.lavery/Ast100/Lectures/Ast100Topic02.html>



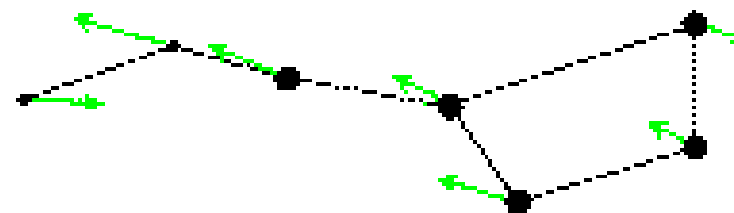


# Movimento próprio das estrelas

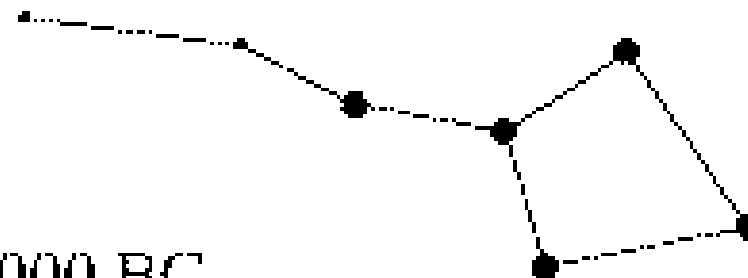
As estrelas parecem fixas no céu dada a grande distância a que estão. No entanto as estrelas têm movimentos próprios.

Movimentos  
próprios de  
algumas das  
estrelas da  
Ursa Maior...

Today

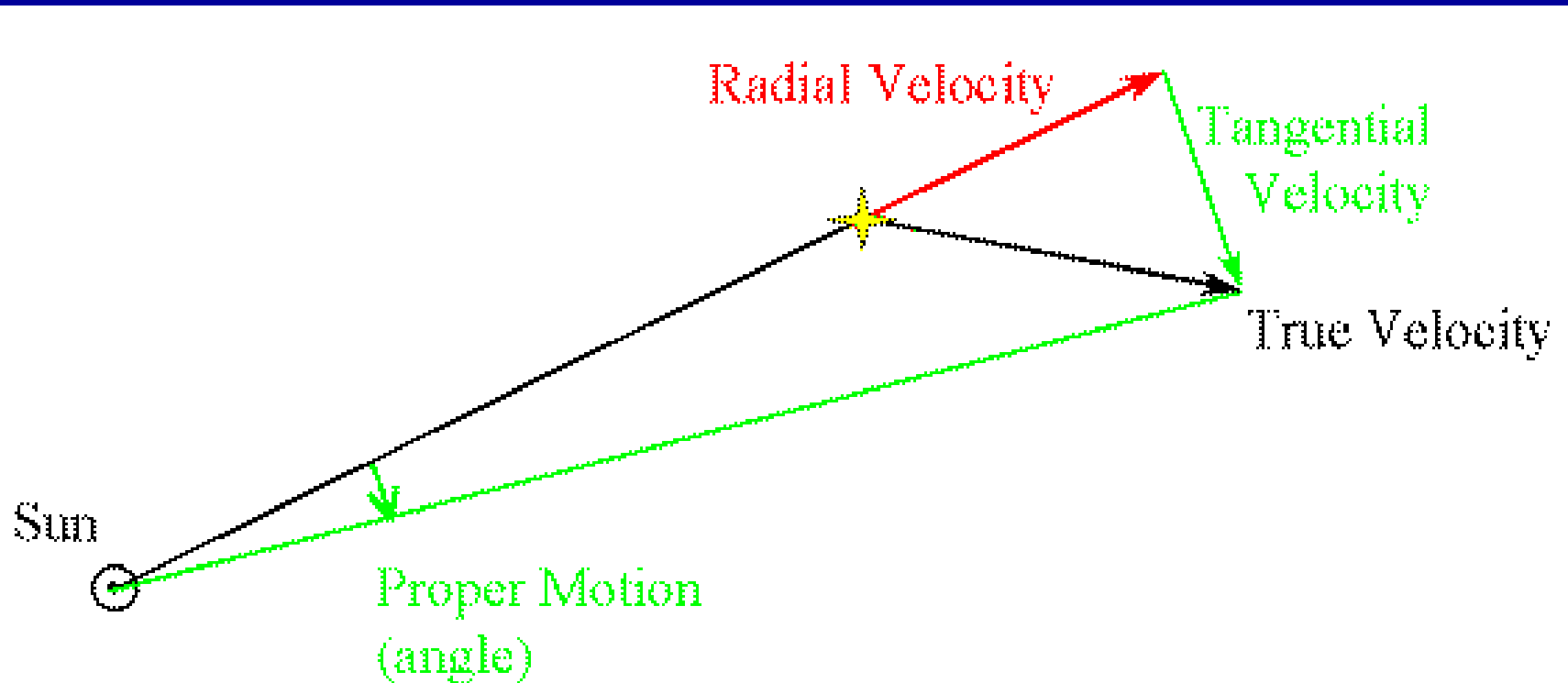


50,000 BC





Decomposição da velocidade de uma estrela nas suas componentes radial e tangencial:



<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit1/motions.html>

$$v^2 = v_r^2 + v_t^2$$



Velocidade tangencial da estrela:

$d$  – distância à estrela em parsec

$\mu$  - deslocamento próprio da estrela em arc sec / ano

$$v_t = 4.74 \mu d$$





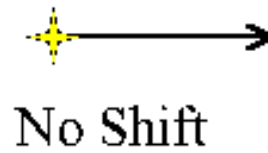
Velocidade radial da estrela:

$c$  – velocidade da luz

$\lambda$ - comprimento de onda da luz emitida pela estrela

$\Delta\lambda$  - desvio de comprimento de onda devido ao efeito Doppler.

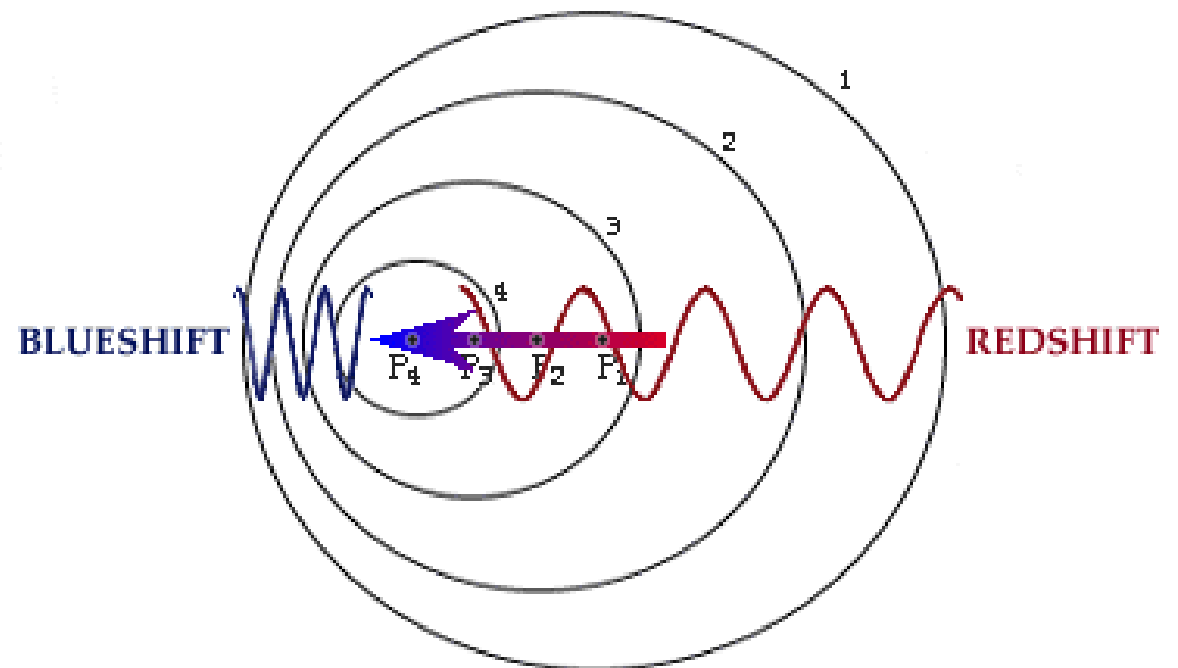
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = v_r/c$$



<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit1/motions.html>

## Efeito Doppler

<http://archive.ncsa.illinois.edu/Cyberia/Bima/doppler.html>





<http://www3.uma.pt/Investigacao/Astro/Grupo/index.htm>  
astro@uma.pt

(c) 2009/2014 Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira