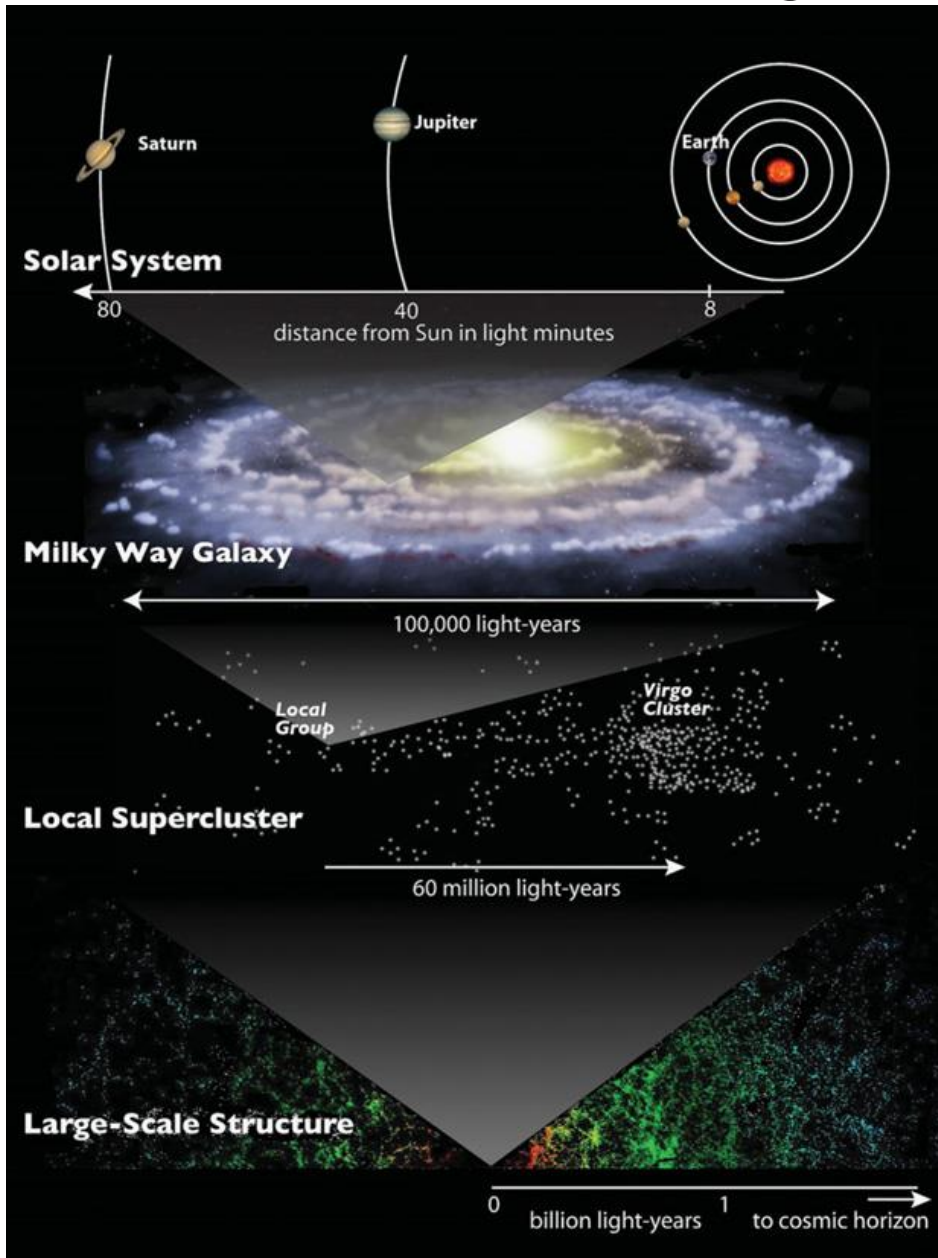


Cap. 2 – Mecânica do Sistema Solar I

Nosso Lugar no Universo



$$1 \text{ min luz} = 1,798 \times 10^7 \text{ km}$$

$$1 \text{ ano-luz} = 9.460.800.000.000.00 \text{ Km} \sim 10^{12} \text{ km}$$

$$100.000 \text{ a.l.} = 946073047258080000 \text{ km} = 9.46 \times 10^{17} \text{ km}$$

$$1 \text{ a.l.} = \text{dist\~ancia que a luz viajou durante 1 ano com } v = 300.000 \text{ km/s}$$

$$1 \text{ a.l.} = c \Delta t = 10 \text{ tri km} = 10 \times 10^{12} \text{ km}$$

Observando o Céu

Dia Claro: estabelecido pelo movimento diurno aparente do Sol:

Sol: **nasce** no oriente (leste)

põe-se no “ocaso” no ocidente (oeste)

Noite: movimento noturno aparente: do instante em que se põe o Sol até o instante em que volta a nascer novamente

Movimento diário aparente = movimento que os astros “parecem” realizar no céu (abóbada celeste) em ~ 1 dia (de L para O)

Constelações

Noite: 3000 pontos fixos vistos no céu a olho nú (+ 3000 do outro lado)

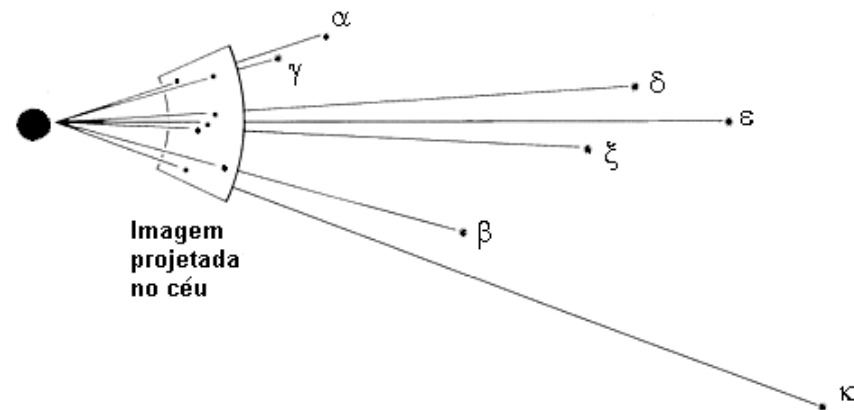
Antigos viam conexões entre estrelas projetadas no céu: que definiam com associações: **CONSTELAÇÕES**

Estrelas de uma constelação:

Designadas por α , β , etc. de acordo com brilho aparente



Ex. Constelação de Orion



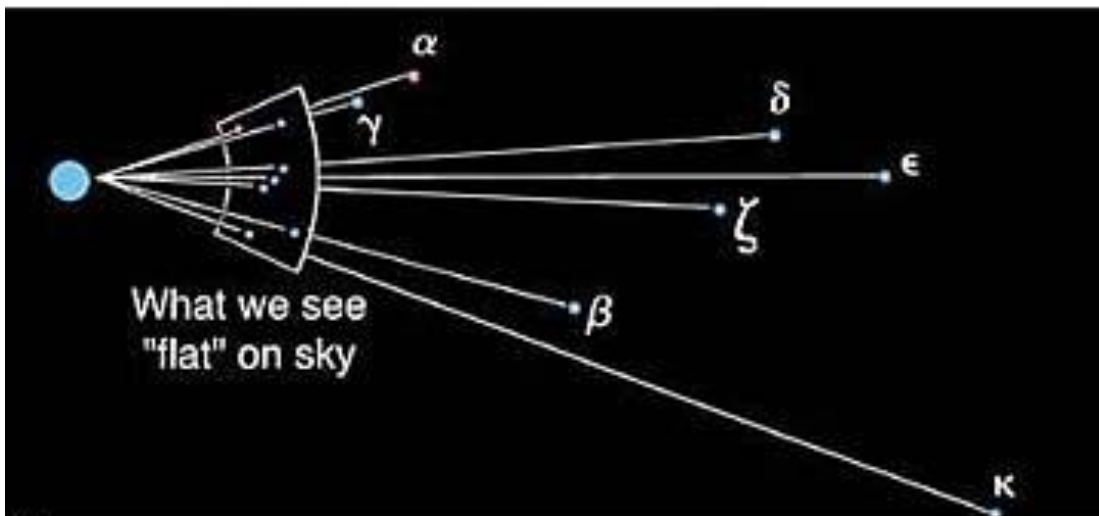


(a)



(b)

Constelação de Orion



(c)

Constelações

Hoje ⇒ 88 constelações catalogadas.

Terminologia usada ainda hoje para especificar largas regiões do céu (como geólogos usam continentes para localizar-se na Terra)

Noite: constelações movem-se de leste para oeste (= Sol), mas posição relativa das constelações não muda

Estrelas (fusão nuclear que faz com que brilhem) x **Planetas** (refletem luz solar)

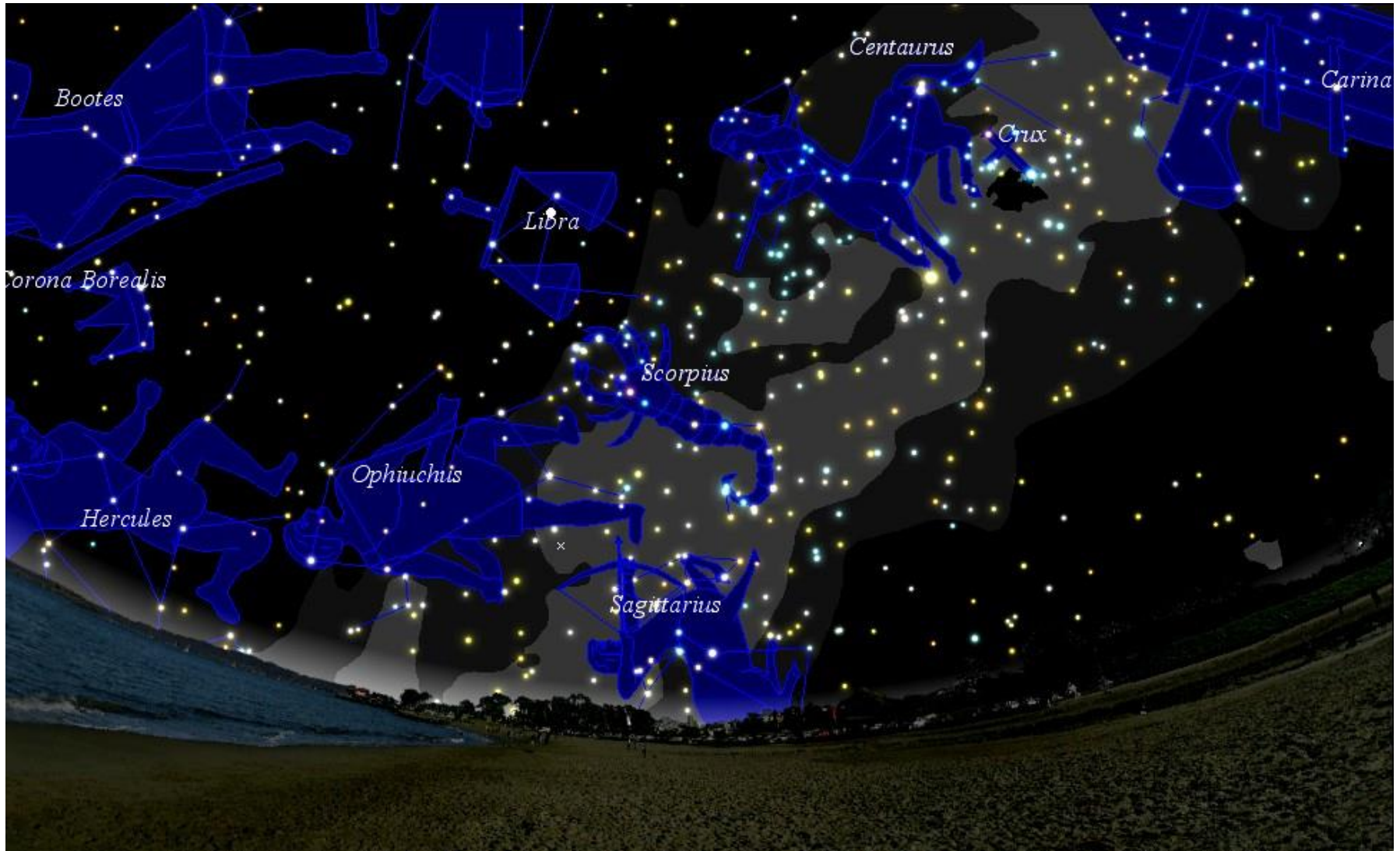
Na antiguidade: distinção entre eles:

Estrelas pareciam “fixas” nas Constelações

Planetas (grego = **errante**): movem-se entre as constelações (5 visíveis a olho nú: Mercúrio, Venus, Terra, Marte, Jupiter, Saturno)

Constelações

- Hemisfério Sul



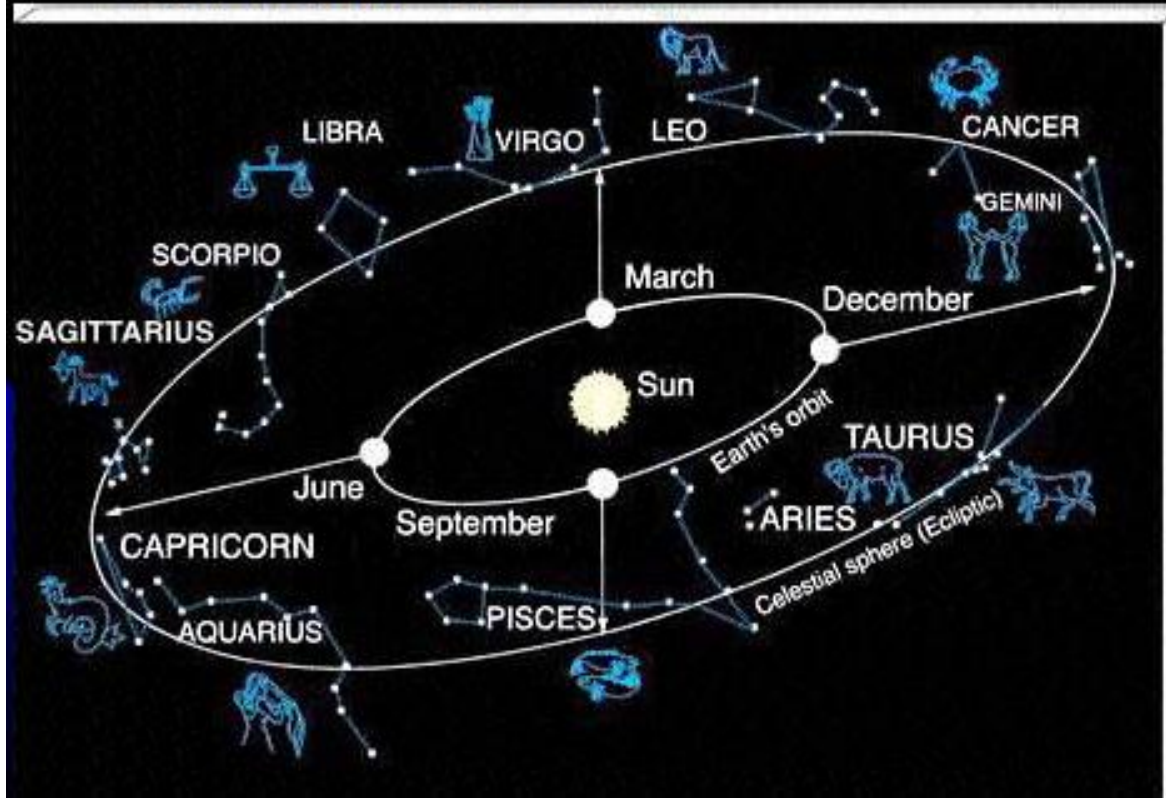
Constelações

- Posição relativa das estrelas “fixas”.
- Mitologia

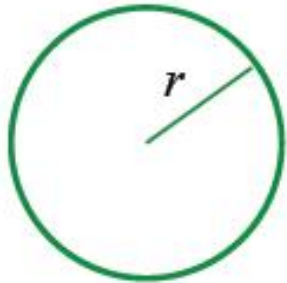


As constelações aparecem projetadas sobre a Eclíptica

Eclíptica: plano da órbita da Terra em torno do Sol



Revisão rápida: Geometria I



Circle, radius r

Area $A = \pi r^2$

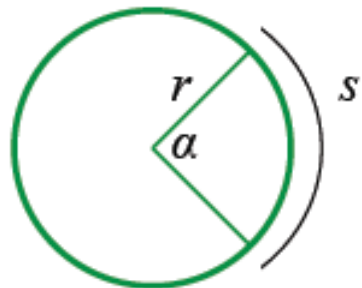
Circum. $C = 2\pi r$



Sphere, radius r

Surf. Area $A = 4\pi r^2$

Volume $V = \frac{4}{3}\pi r^3$



Arc of length s
on circle, radius r
subtends angle α

where $\alpha = \frac{s}{r}$ **in radians**

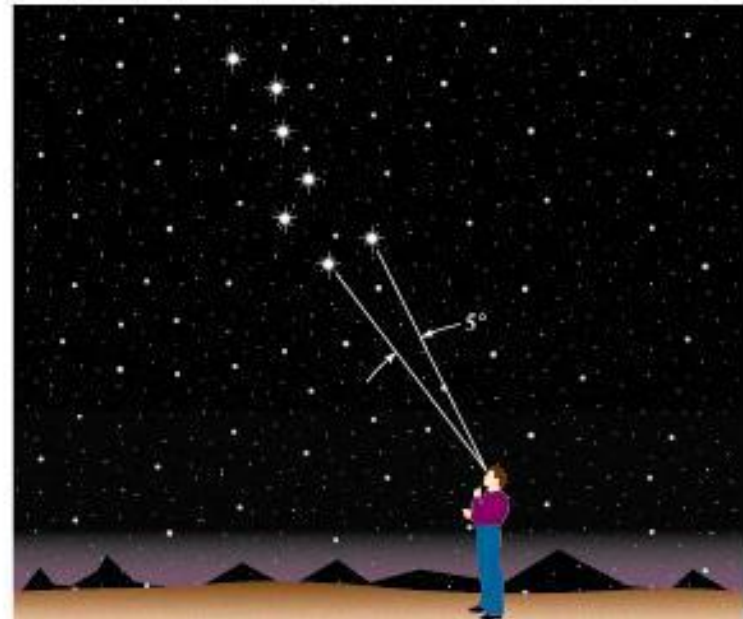
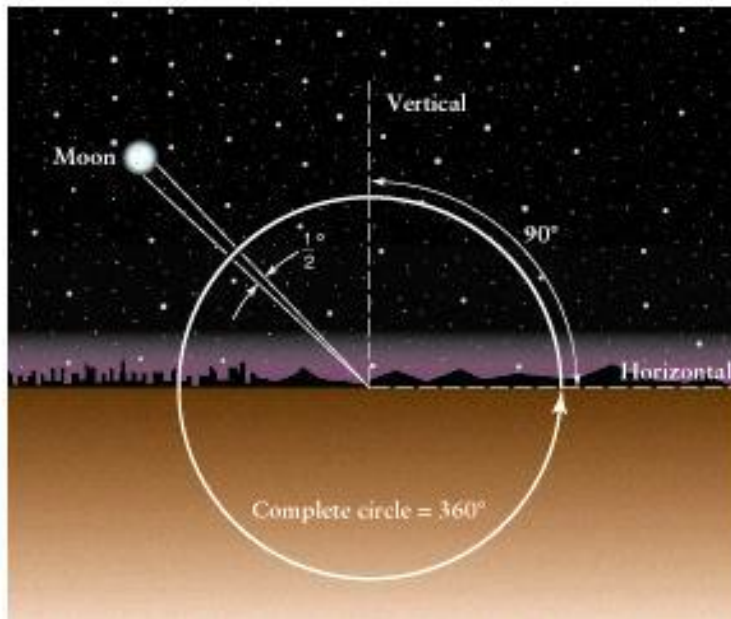
2π radians is equivalent to 360°

..so 1 radian is equivalent to $180^\circ/\pi$

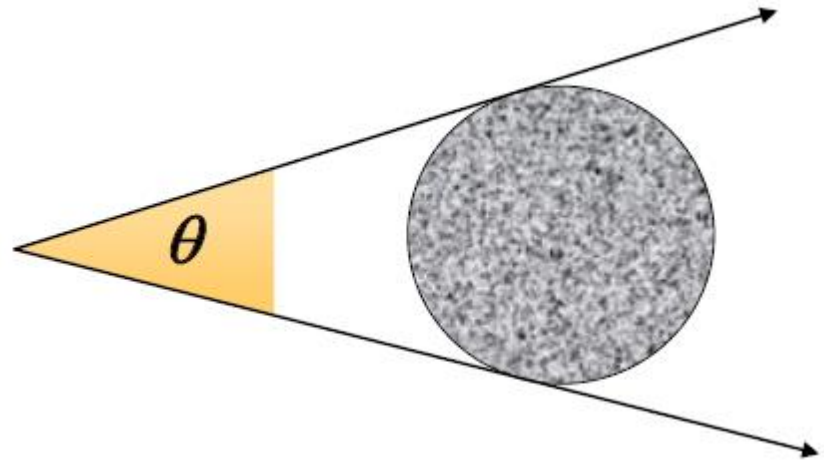
- Círculo tem 360° ou 2π radianos
- Há 60 min. em 1° e 60 s em 1 min
- Portanto, 1° tem 3600 segundos
- e, $1 \text{ rad} = 206\,265 \text{ s}$ (calcule!)

Medindo ângulos

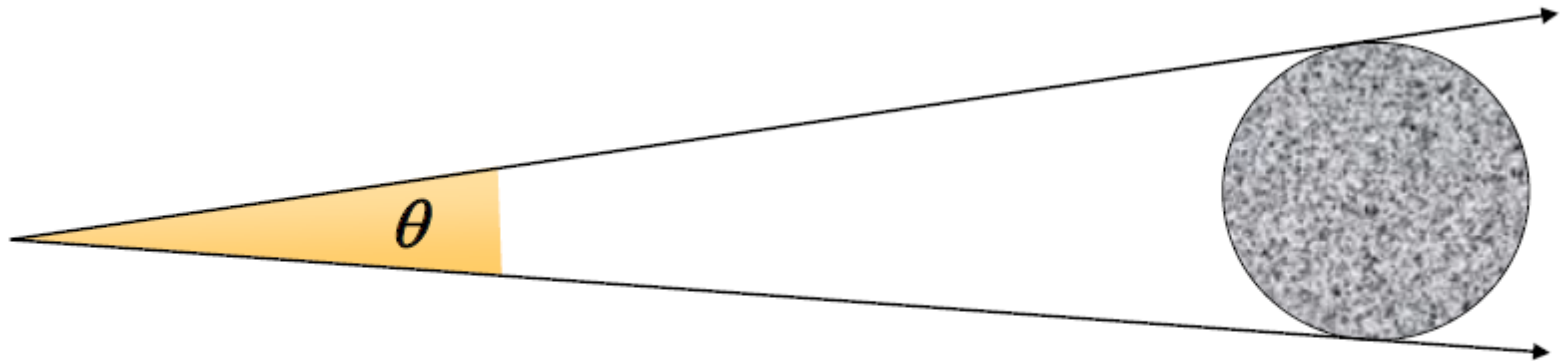
- Distâncias aparentes no céu são determinadas pela medida do ângulo entre dois objetos.
- Astrônomos medem ângulos em **graus**, **minutos de arco** (60 por grau) e **segundos de arco** (60 por minuto de arco ou 3600 por grau)



Tamanho Angular



- À medida que a distância cresce, o tamanho angular decresce



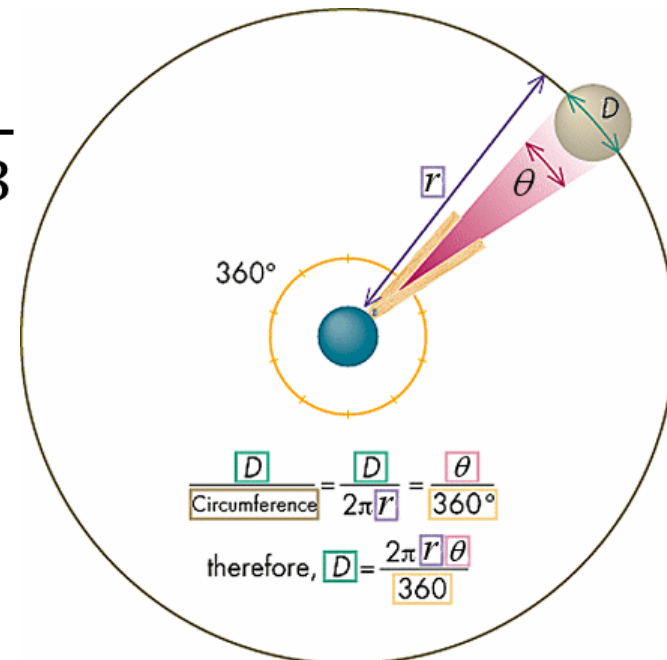
- O tamanho angular de um objeto está relacionado com sua distância a partir da Terra e com seu diâmetro angular observado:

Diâmetro físico \cong distância \times diâmetro angular $\times \pi / 180^\circ$

$$D \cong \frac{\pi r \theta}{180^\circ} = \frac{r \theta}{57.3}$$

exatamente,

$$D = r \tan \theta$$



O parsec (pc) e o segundo de arco (")

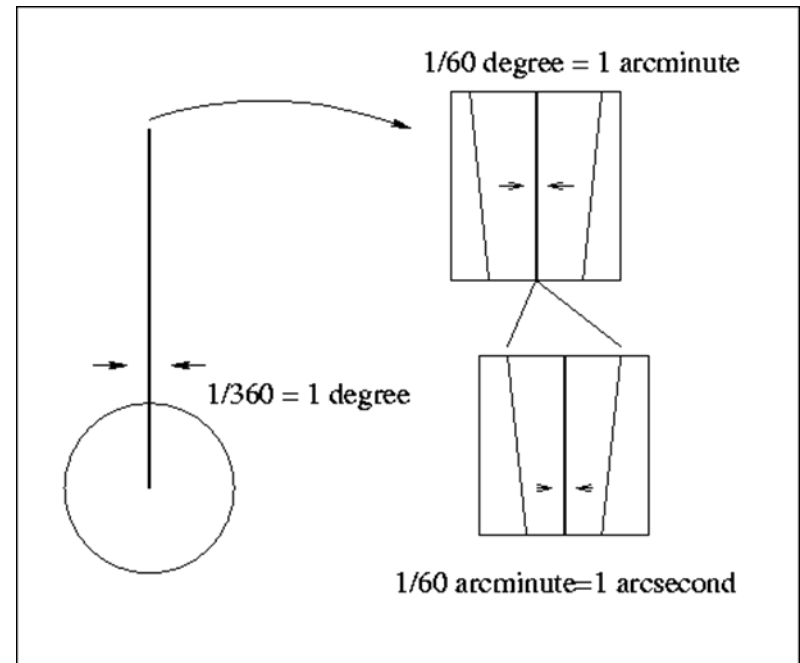
Parsecs e segundos de arco

Há uma unidade especial de distância chamada **parsec**

Uma estrela cujo ângulo paralático anual é igual a 1 segundo de arco está a uma distância de 1 parsec.

Círculo completo = $360 \times 60 \times 60$
= 1,296,000 " (seg de arco)

$$1'' = \frac{1}{60} \times \frac{1}{60} \times \frac{1}{360} = \frac{1}{1.296.000} \text{ de um círculo}$$



Unidades de distância

- 1 AU = 1.495978×10^{11} m (ver adiante)
- 1 ly(light year = al) = 9.46053×10^{15} m = 6.324×10^4 AU
- 1 pc = 3.085678×10^{16} m = 3.261633 ly = 206265 AU



uma unidade preferível para grandes distâncias.

parsec = distância na qual uma UA subtenderia um segundo de arco.

Revisão rápida: Geometria II

Sobre uma esfera de raio r e área superficial total $4\pi r^2$, vamos definir uma área A sobre a superfície.



Então, a partir do centro da esfera podemos definir um ângulo sólido ω onde

$$\omega = \frac{A}{r^2} \text{ em steroradianos (sr)}$$

A área superficial de toda a esfera é $4\pi r^2$, de modo que o ângulo sólido total é: 4π

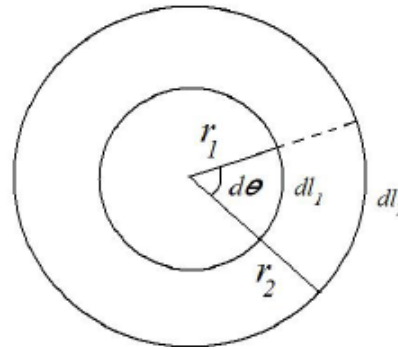
Revisão rápida: Geometria III

Elemento diferencial de ângulo sólido $d\Omega$

- Sabemos que o comprimento total da circunferência é :

$$C = 2\pi r$$

- Observe a figura ao lado:



É sabido que se o ângulo total de uma circunferência, em unidades de radianos vale 2π e a razão entre o comprimento de circunferência e o raio que lhe deu origem é igual a esta constante, então:

$$\frac{dl_1}{r_1} = \frac{dl_2}{r_2} = \frac{dl}{r} = d\theta$$

$$\int_0^{2\pi} d\theta = 2\pi = \frac{C}{r}$$

↪ Podemos fazer o mesmo agora com a superfície de uma esfera.

↪ Note que a área da esfera é dada por:

$$A_{esf} = 4\pi r^2$$

↪ Dessa forma a razão entre a área da esfera e o raio que deu origem a essa esfera, r vale:

$$\Omega_{esf} = \frac{A_{esf}}{r^2} = 4\pi$$

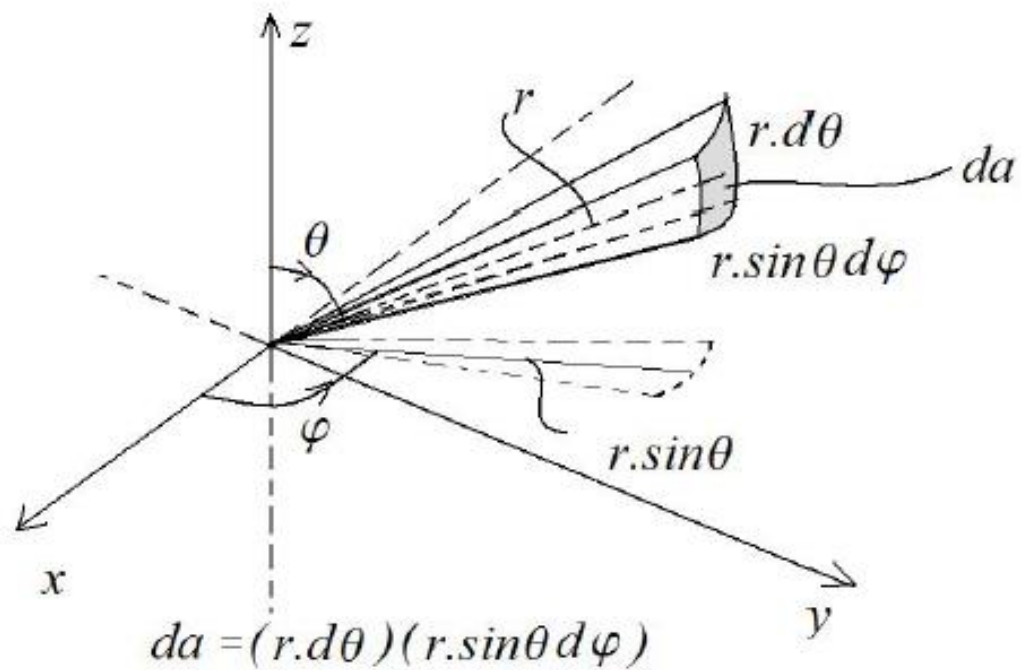
que é uma quantidade adimensional, denominado ângulo sólido total de uma superfície esférica (unidade stero-radiano , str).

Uma vez que a relação vale para toda a superfície da esfera, deve valer para infinitésimos:

$$\frac{da_1}{r_1^2} = \frac{da_2}{r_2^2} = \frac{da}{r^2} = d\Omega$$

↪ $d\Omega$ é conhecido como elemento infinitesimal de ângulo sólido, e é a razão entre uma casca de superfície esférica infinitesimal e o quadrado do seu raio, r^2 .

Observe a figura:



Podemos ver então que:

$$da = r^2 \sin\theta d\theta d\varphi$$

Em coordenadas esféricas é fácil ver que:

$$d\Omega = \frac{da}{r^2} = \sin\theta d\theta d\varphi$$

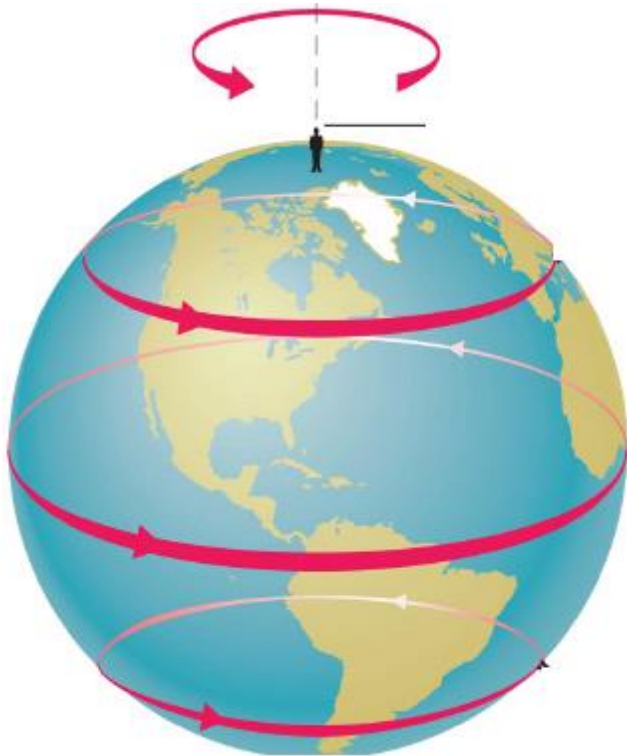
↪ O elemento diferencial de ângulo sólido é dado pelo produto de dois ângulos lineares $d\theta$ e $d\varphi$, mas tem um fator de peso, $\sin\theta$. Desse modo em coordenadas esféricas:

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$$

$$\Omega = \int d\Omega = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \sin\theta d\theta d\varphi = 4\pi$$

Rotação da Terra

- Sabemos que a Terra rotaciona uma vez por dia no sentido ANTI-HORÁRIO, com visto a partir do polo norte geográfico.



[Image Credit: Pearson Education]

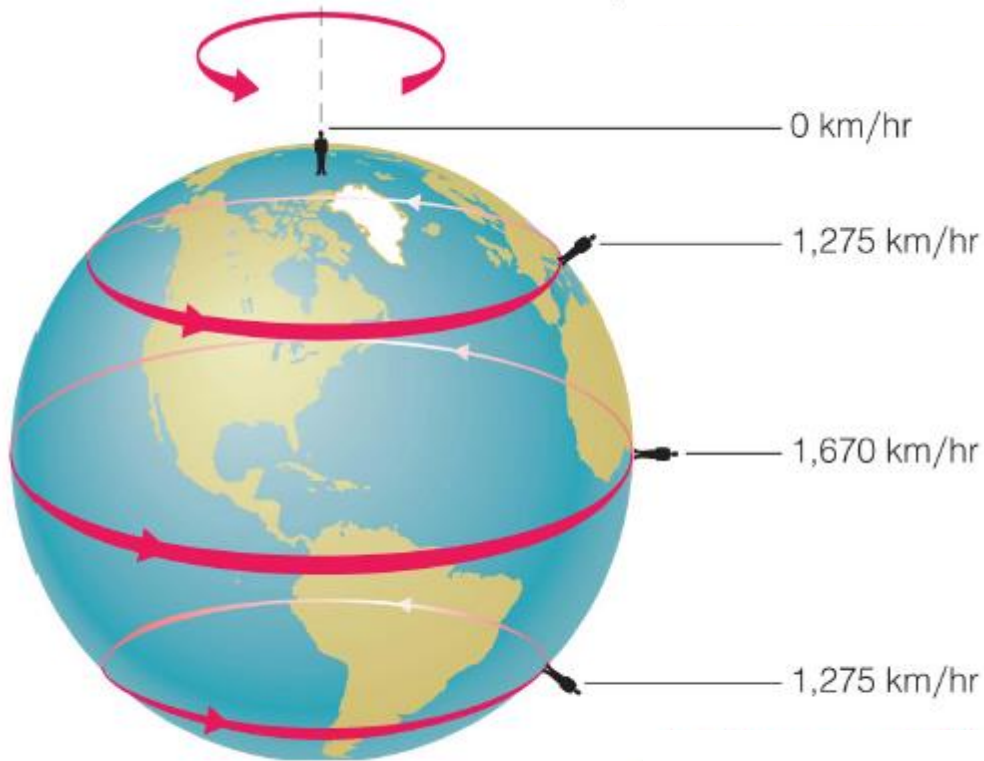
A rotação é utilizada para definir a **latitude** geográfica.

A **longitude** geográfica é definida a partir do grande círculo que passa por Greenwich (UK).

A **latitude** e **longitude** geográficas funcionam como um sistema de coordenadas em rotação para um observador fora da Terra.

... rotaciona para LESTE!

- É trivial calcular a velocidade com a qual um local está se movendo em relação a um observador externo “estacionário”.



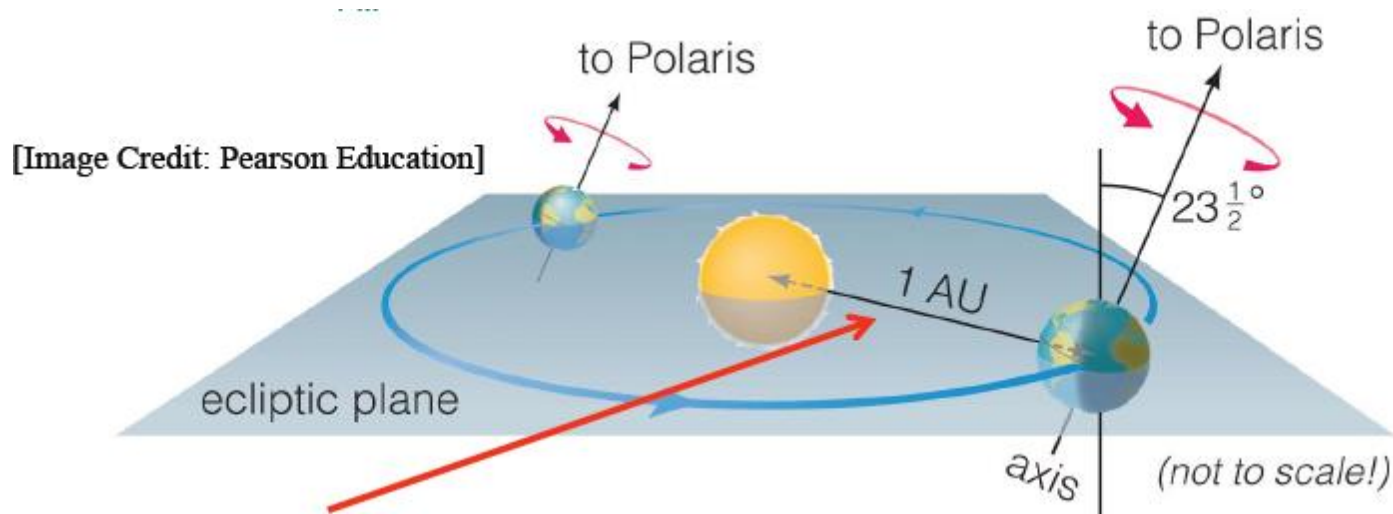
O raio da Terra no equador é 6378 km.

As velocidades são maiores na maiores latitudes.

[Image Credit: Pearson Education]

Órbita da Terra I

- A Terra orbita ao redor do Sol uma vez por ano, também no sentido ANTI-HORÁRIO num círculo quase perfeito!



- A distância média entre a Terra e o Sol durante um ano é conhecida como “**Unidade Astronômica**” (UA)

Unidade Astronômica

- A distância **média** entre Terra-Sol é chamada de **Unidade Astronômica (UA)**

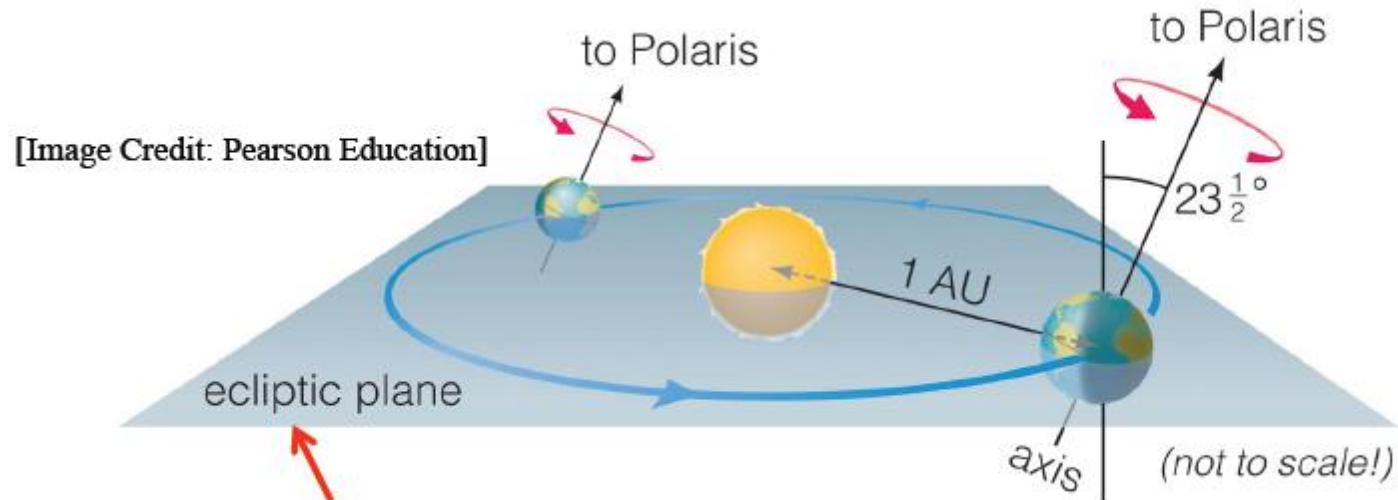
$1.4959787066 \times 10^{11}$ km
ou ~ 8 minutos-luz

- A órbita da Terra não é um círculo 100% perfeito.
Apresenta uma excentricidade de **0.01671022** (2000.0)
Daí o uso da palavra **média**.

(o número entre parênteses fornece o ano - 01/01/2000 neste caso – já que como muitas coisas em astronomia, **este número muda com o tempo**)

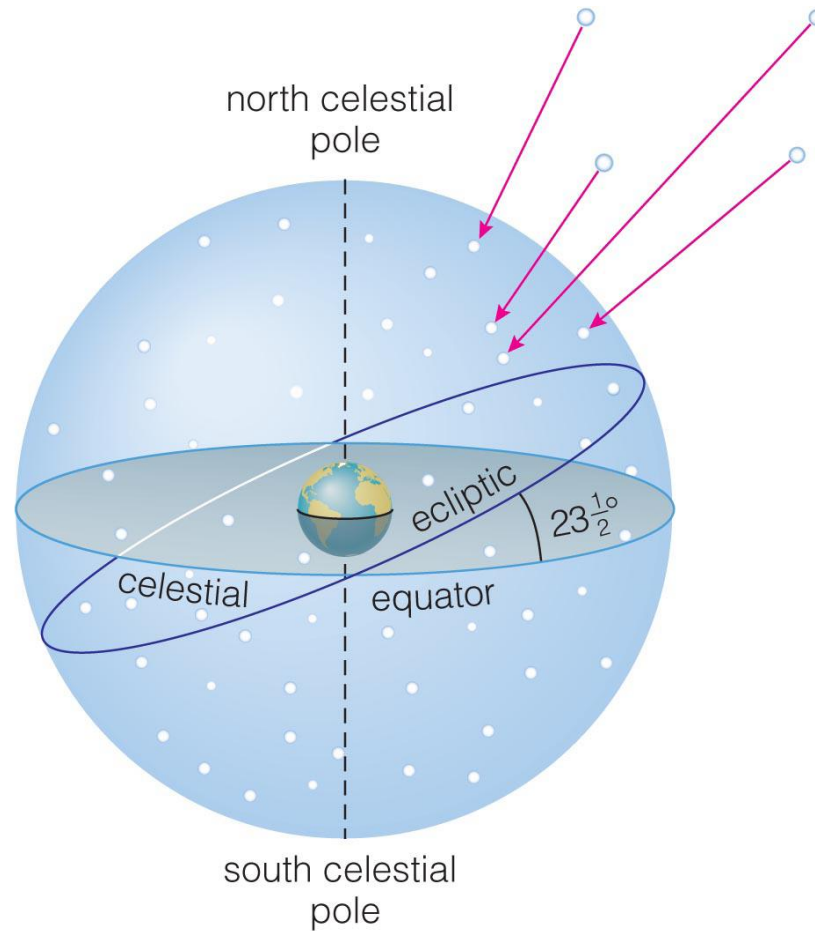
Órbita da Terra II

- Velocidade orbital é rápida valor médio ~100.000 km/h
- Sabemos também que o eixo de rotação da Terra está inclinado em relação à **eclíptica** de 23.45° (2000.0)



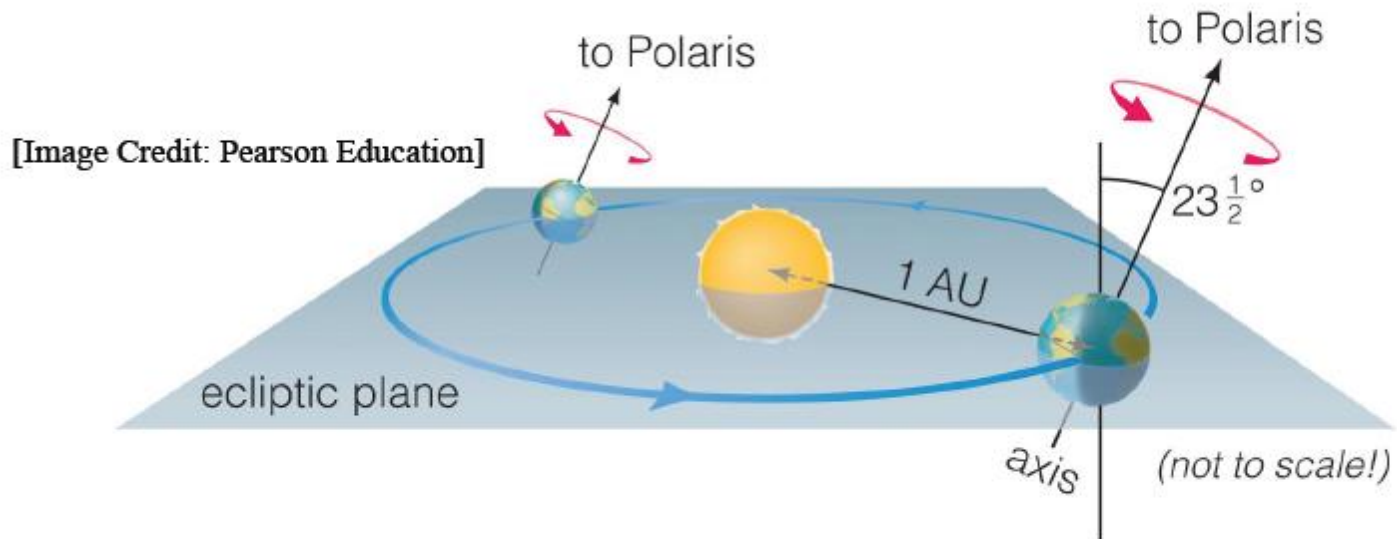
plano no qual a Terra orbita o Sol

...mudando a origem do sistema para a Terra

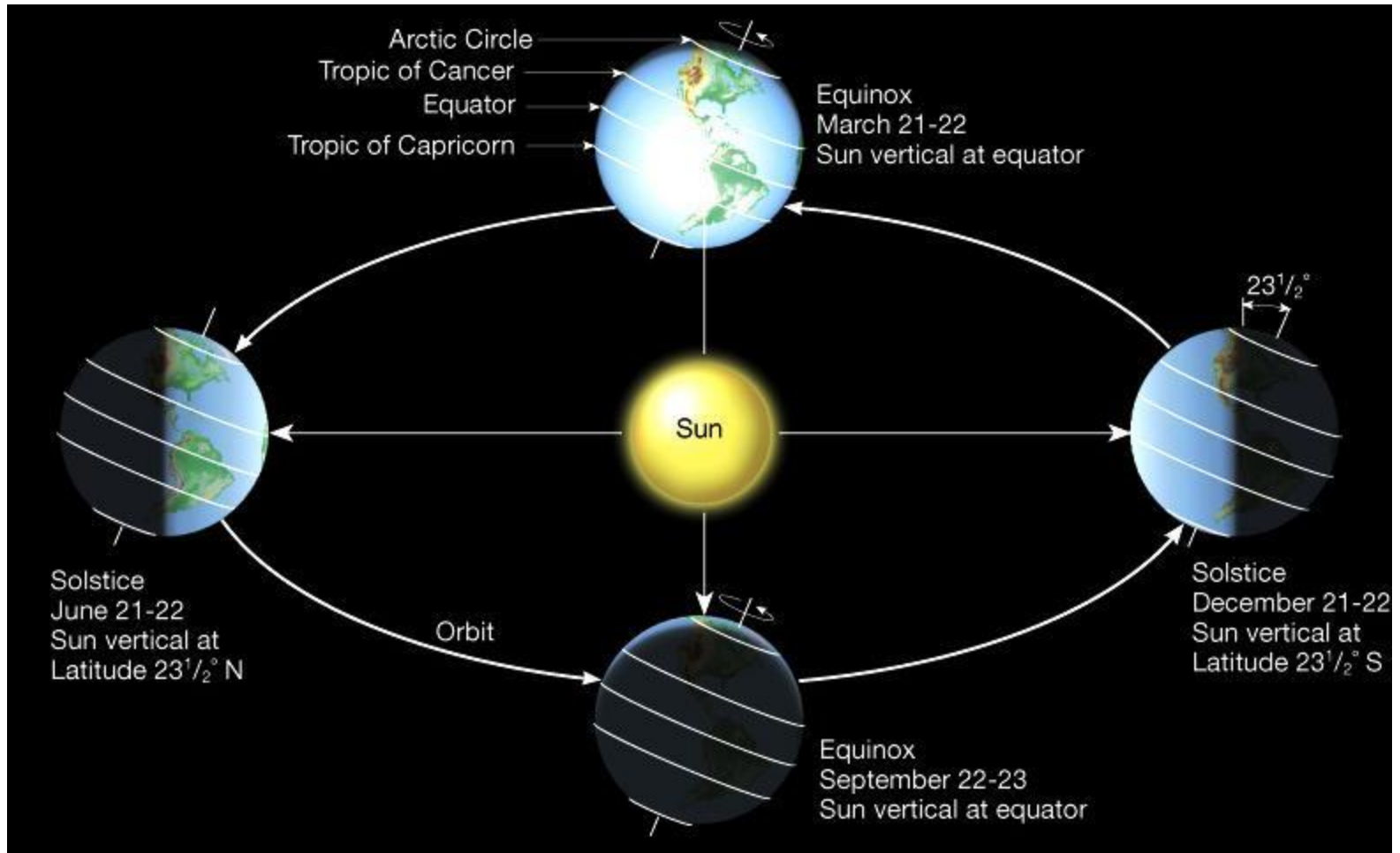


Estações do ano

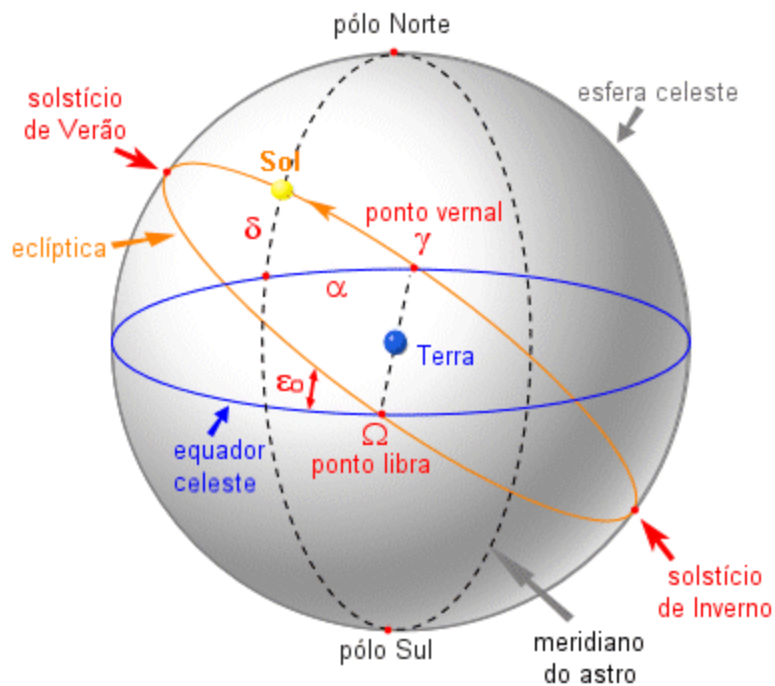
- A inclinação do eixo de rotação da Terra ($\sim 23.5^\circ$) em relação à normal ao plano da eclíptica causa as estações do ano, define trópicos, etc...



Ou, visualizando de outra forma...



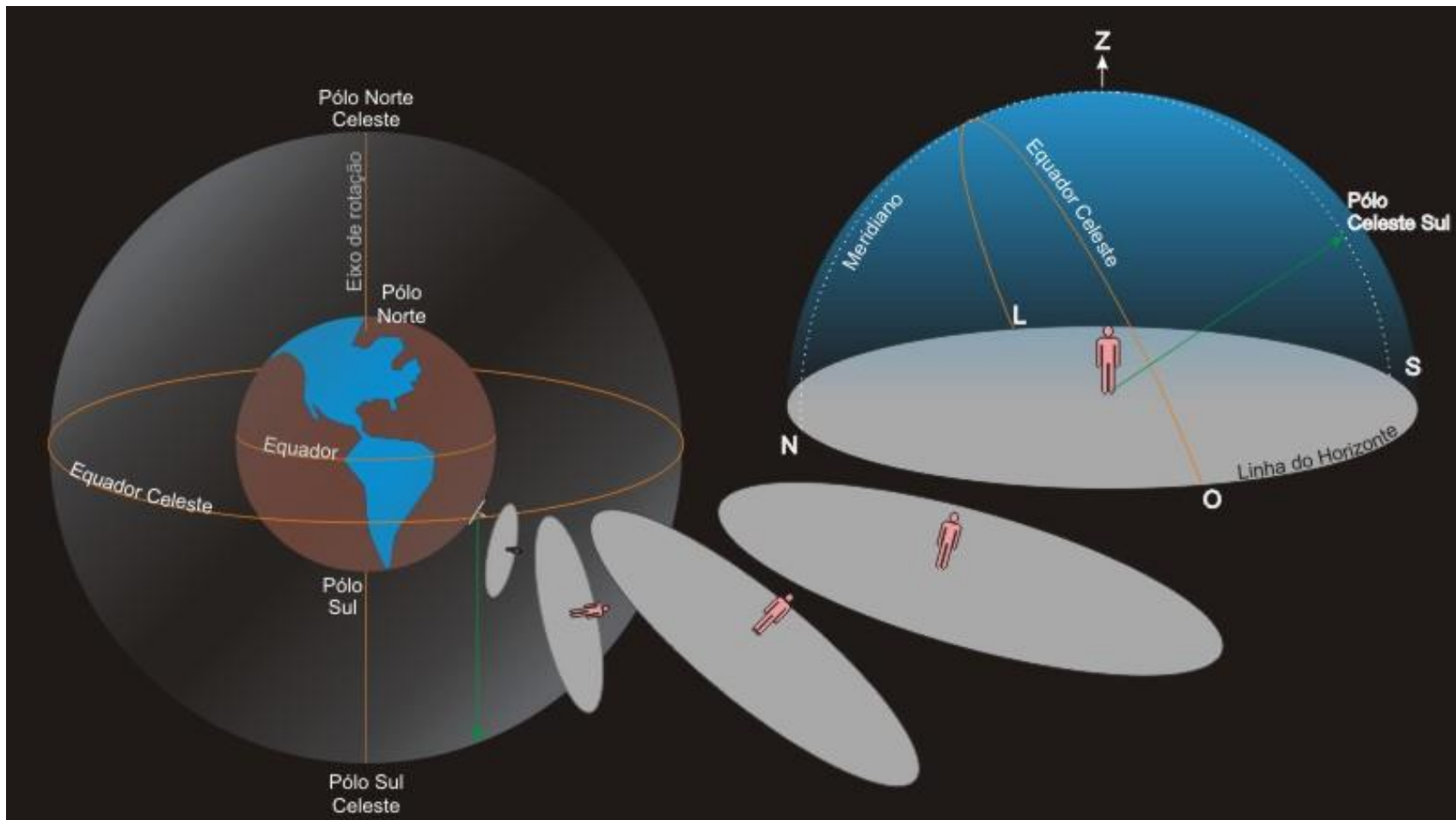
Movimento Diurno das Estrelas



Movimento aparente (diurno) das estrelas resultado da rotação da TERRA e não da EC, de OESTE para LESTE

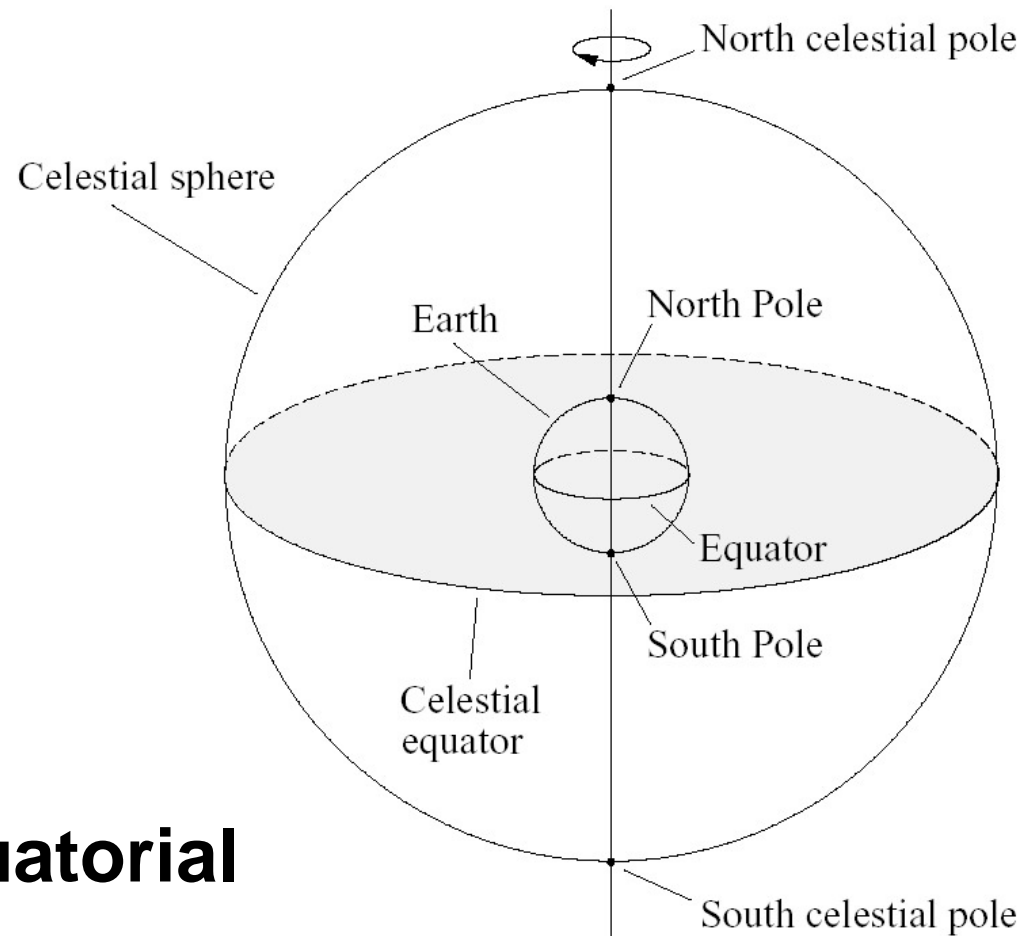
Usamos **Esfera Celeste** para visualizar posições da estrelas no céu

Sistemas e Coordenadas Celestes



A Esfera Celeste

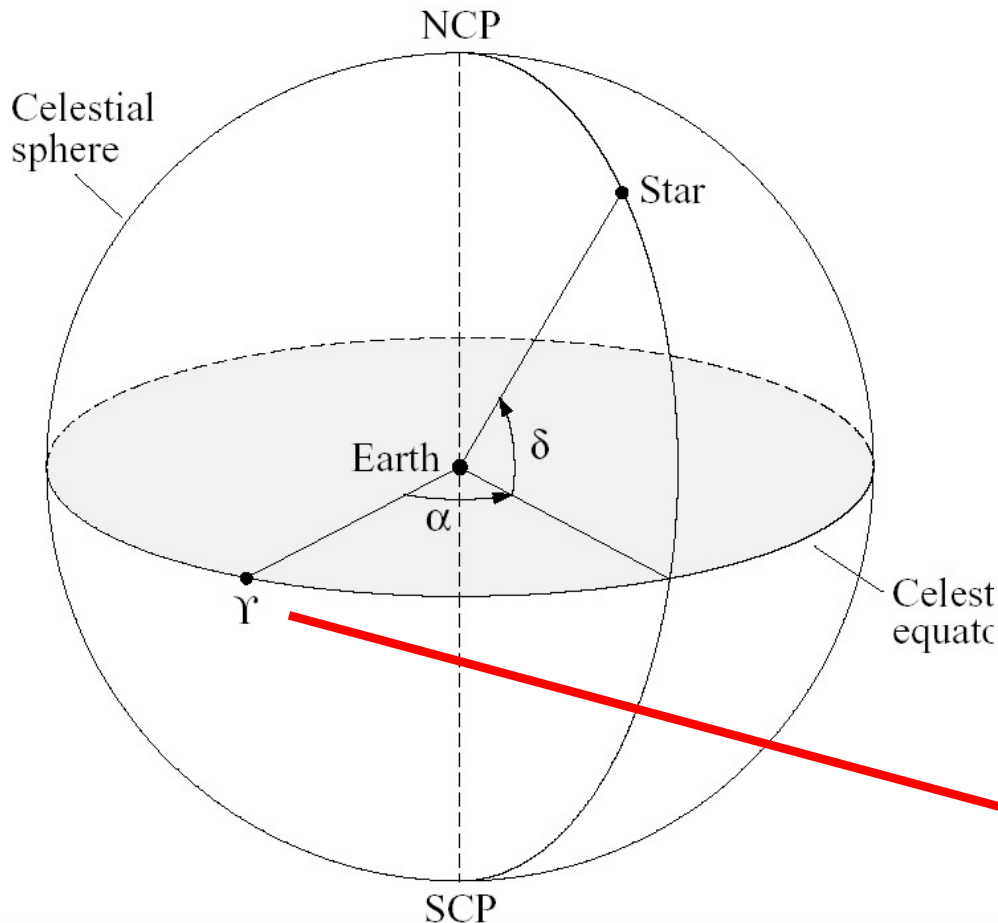
Pense nela como uma projeção “para fora” do sistema de coordenadas terrestres long-lat



➔ o Sistema Equatorial

O Sistema Equatorial

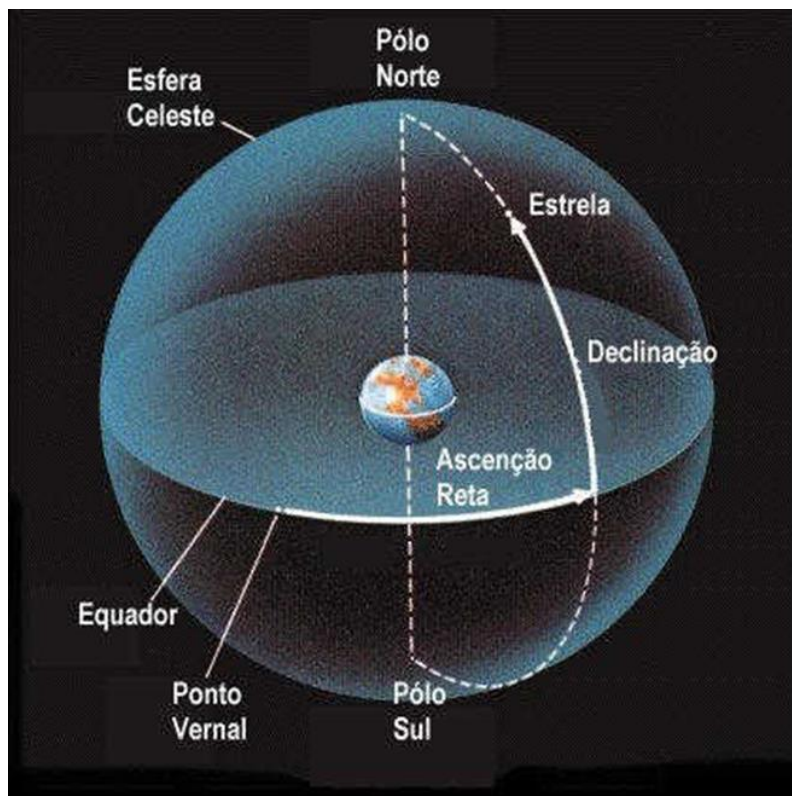
(praticamente independente da posição do observador e do tempo)



- As coordenadas são **Ascensão Reta** (**RA**, ou α) e **Declinação** (**Dec**, ou δ), equivalentes às longitude e latitude geográficas.
- **RA = 0** definido pela posição do Sol no equinócio vernal (ponto γ)

COORDENADAS EQUATORIAIS

- **ascensão reta (α ou AR):** ângulo medido sobre o equador, com origem no meridiano que passa pelo ponto Áries, e extremidade no meridiano do astro. A ascensão reta varia entre 0h e 24h (ou entre 0° e 360°) aumentando para leste.
- **declinação (δ):** ângulo medido sobre o meridiano do astro (perpendicular ao equador), com origem no equador e extremidade no astro. A declinação varia entre -90° e $+90^\circ$. O complemento da declinação se chama distância polar.



Ponto Vernal:

- está na reta definida pela intersecção dos planos da eclíptica e do equador celeste. A direção e sentido são precisamente determinadas pela data do equinócio vernal, em 21 de Março (primavera no N, outono no S)

Ângulos - lembrando

- Na esfera celeste, medimos distâncias e tamanhos dos objetos com ângulos
- 360 graus corresponde a um círculo completo

Em horas, minutos e segundos:

$$360^{\circ} = 24^{\text{h}} = 2 \pi \text{ rad}$$

$$15^{\circ} = 1^{\text{h}} = 60^{\text{m}} = 3600^{\text{s}}$$

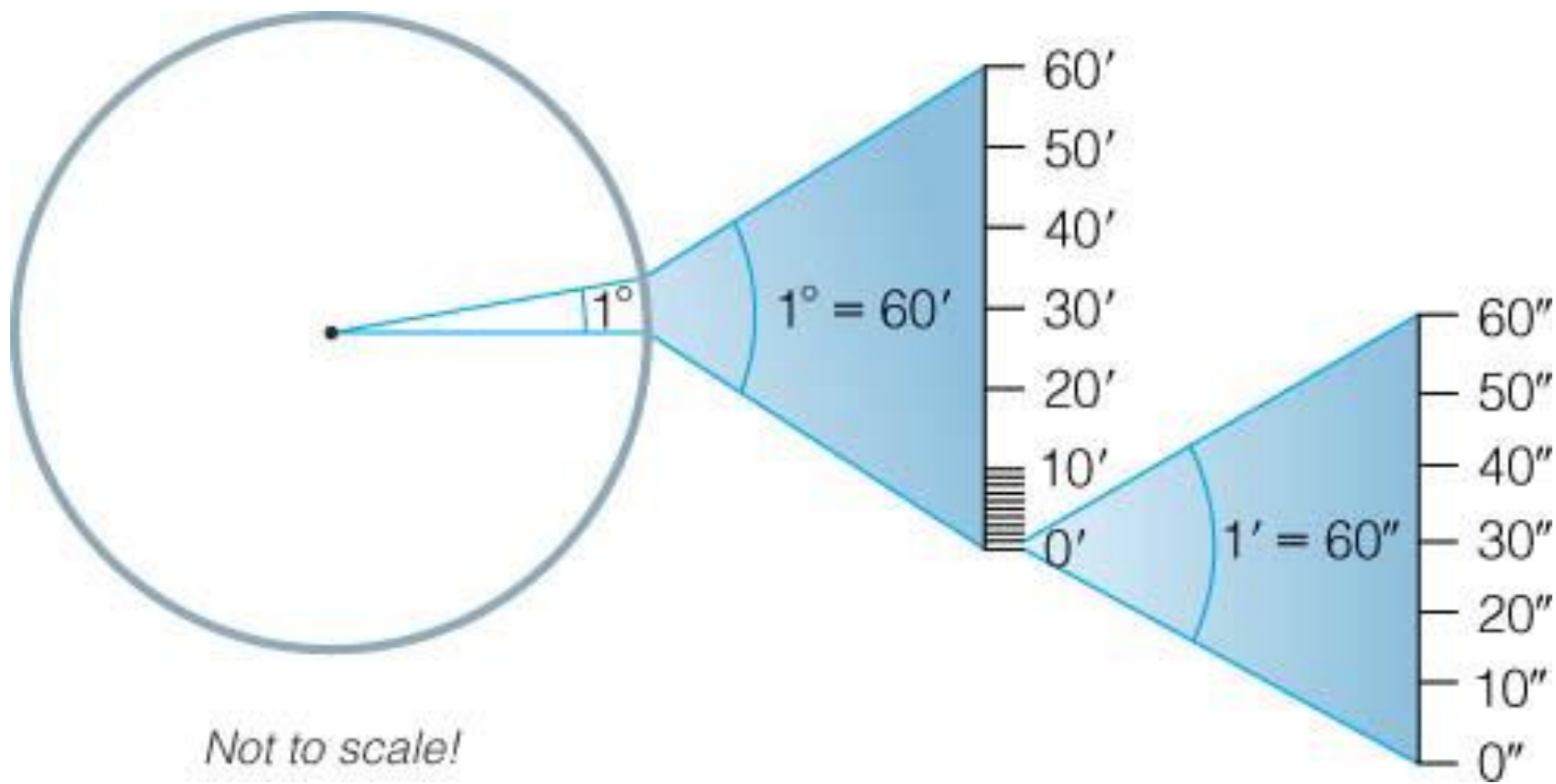
$$1^{\circ} = 60^{\text{m}} = 3600^{\text{s}}$$

Em minutos (') e segundos (") de arco:

- 1 grau (1°) se divide em 60 minutos de arco ($60'$)
- 1 minuto ($1'$) de arco se divide em 60 **segundos de arco**

$$\text{logo } 1^{\circ} = 60' = 3600''$$

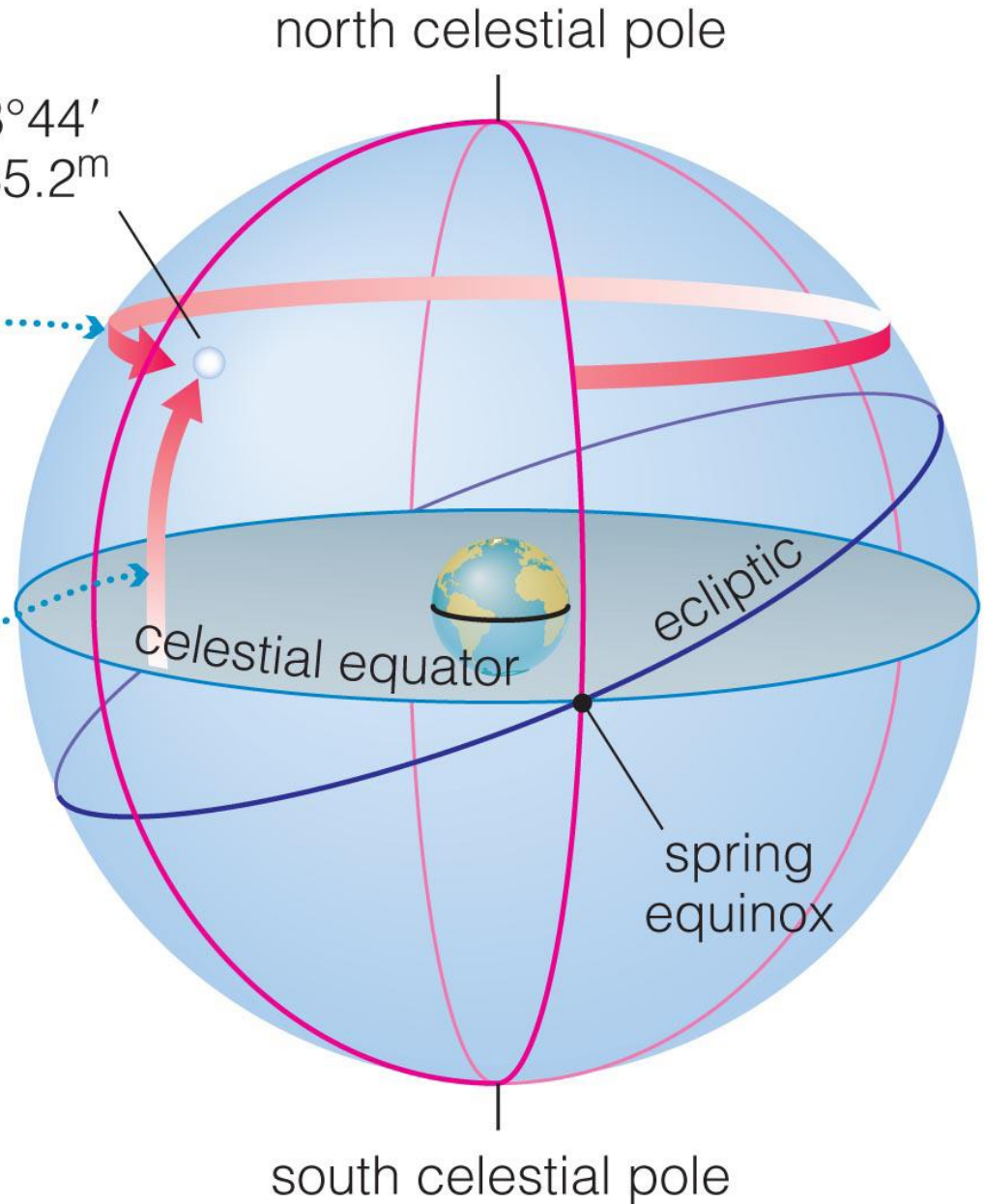
$$1' = 60''$$



Vega
dec = $+38^{\circ}44'$
RA = $18^{\text{h}}35.2^{\text{m}}$

The right ascension tells us that Vega is 18 hours, 35 minutes (about 279°) east of the spring equinox.

The declination tells us that Vega is $38^{\circ}44'$ north of the celestial equator.



Expressando RA em HH:MM:SS

No sistema equatorial, a ascensão reta (R.A. or α) é frequentemente expressa em unidades de tempo ao invés de graus:

Especificamente:

360° é equivalente a 24h

$$1 \text{ h} \equiv 360 / 24 = 15^\circ$$

1 min equivale a 15 minutos de arco

1 seg equivale a 15 segundos de arco

Unidades angulares são utilizadas para a declinação (δ)

mas frequentemente é express em termos de graus inteiros, minutos de arco inteiros e segundo de arco decimal, ao invés de grau decimal.

Exemplo de RA, dec

- A estrela brilhante Altair tem uma posição no catálogo que geralmente é apresentada na forma:

$$\begin{array}{c} 19\text{h } 50\text{m } 47.1\text{s}, +8^\circ 52' 06.8'' \text{ (J2000)} \\ \underbrace{\hspace{10em}} \quad \underbrace{\hspace{10em}} \\ \text{Ascensão Reta} \quad \text{Declinação} \\ \text{em unidades de tempo} \quad \text{em unidades angulares} \end{array}$$

- Para converter para grau decimal:

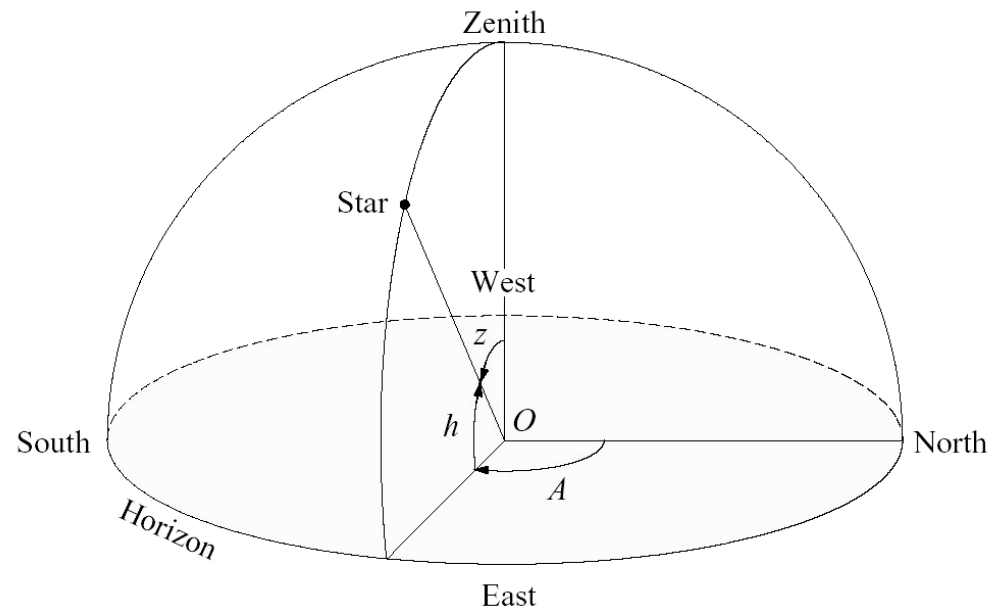
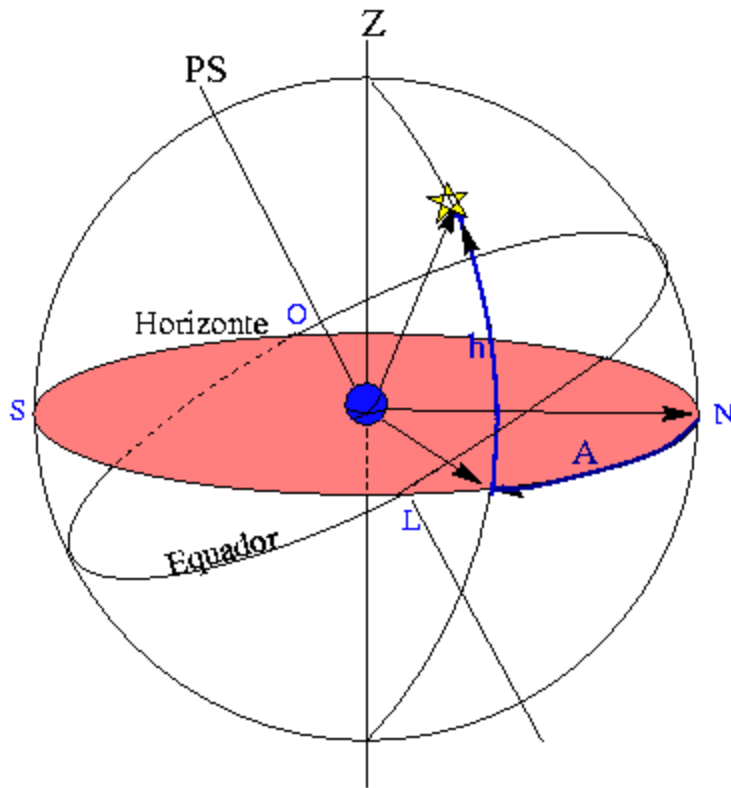
$$\alpha = 19 \times 15 + 50 \left(\frac{15}{60} \right) + 47.1 \left(\frac{15}{60^2} \right) \text{ graus}$$

$$\delta = 8 + 52 \left(\frac{1}{60} \right) + 6.8 \left(\frac{1}{60^2} \right) \text{ graus}$$

O Sistema de Coordenadas Altazimutais

O Sistema Horizontal utiliza como plano fundamental o Horizonte Celeste. As coordenadas horizontais são **azimute (A)** e **altura (h)**.

Obviamente, é dependente da localização



A maior parte dos telescópios hoje em dia apresenta montagem alt-az

COORDENADAS ALT-AZ (A , H) [ALTAZIMUTAL]

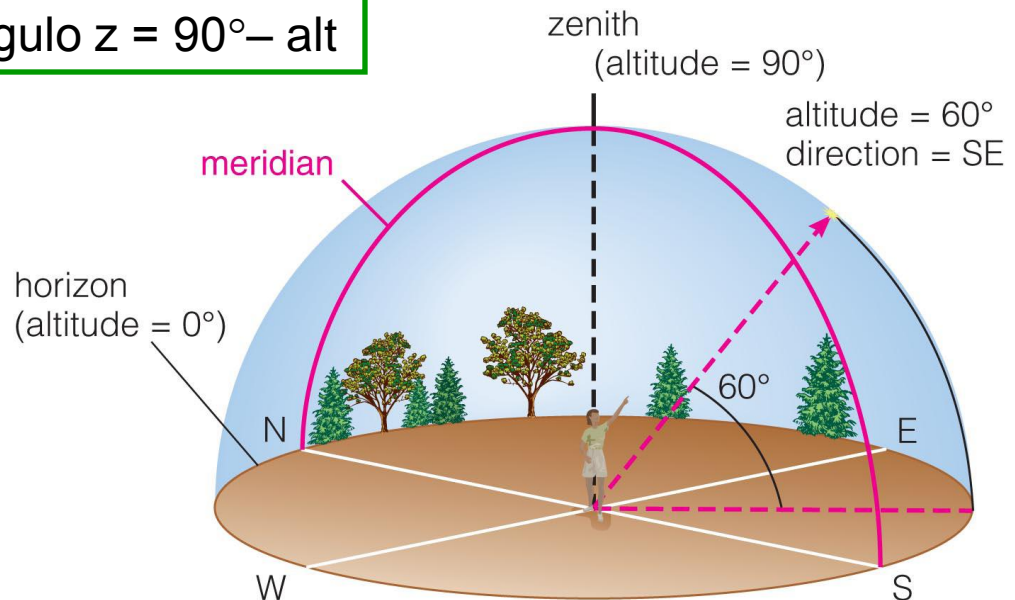
Coordenadas espaciais 2-D

Origem: **Observador**

Direção-1: **Altitude** (alt), ângulo acima do horizonte (em graus)

Direção-2: **Azimuth** (az), ângulo medido ao redor do horizonte no sentido horário partir do sul (em graus)

("Distância Zenital" = z) ângulo $z = 90^\circ - \text{alt}$



[Image Credit: Pearson Education]

Fazendo uma observação

... admitindo que voce conheça

- a **ascensão reta** (R.A. or α) e **declinação** (δ) de um objeto no **sistema equatorial** (em um tempo definido)

...e

- sua **longitude**, **latitude** e **tempo local**

... então,

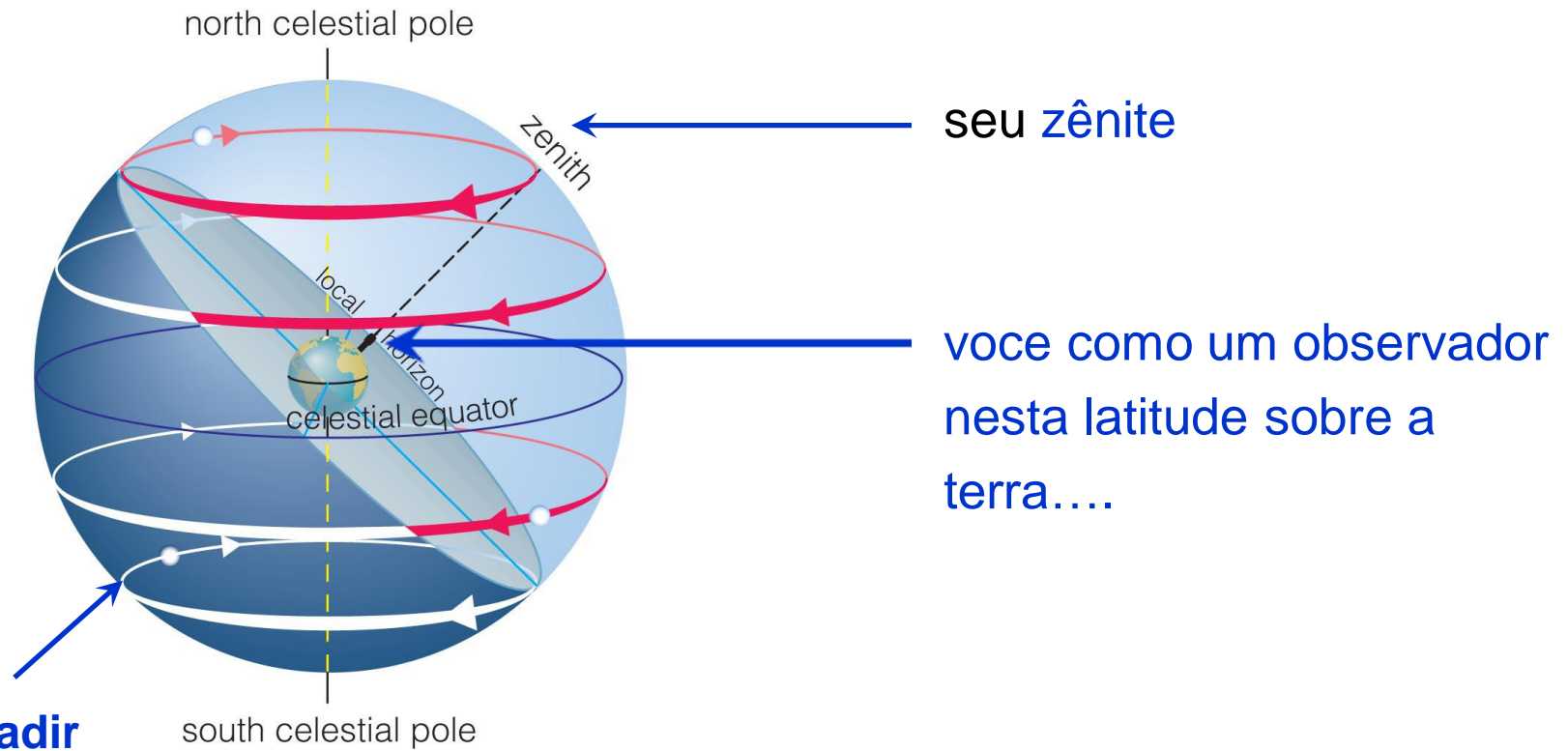
- transformações de coordenadas temporais e espaciais

... fornecerão

- A **altitude** (alt) e **azimute** (az) do objeto no **sistema horizontal** em qualquer tempo local desejado.

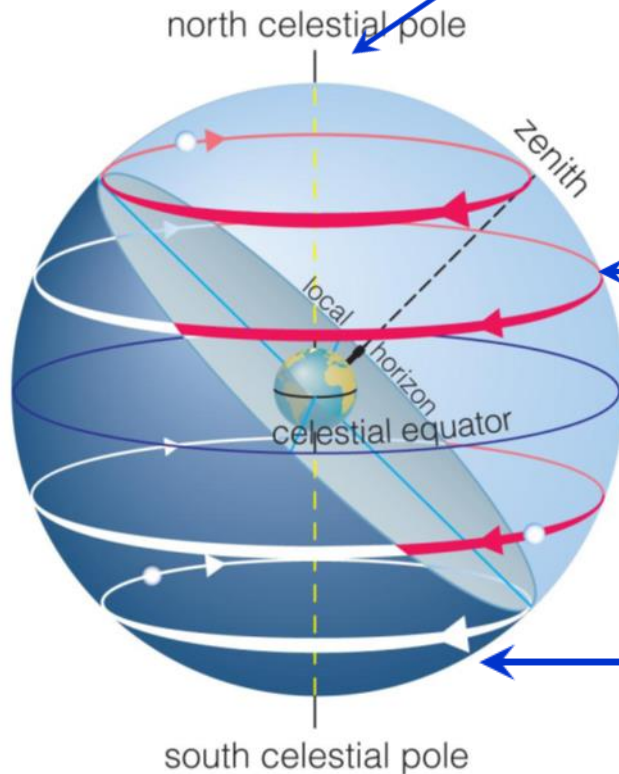
... continuando.....

- Vejamos esse sistema comparado à Esfera Celeste.



Mais considerações

Estrelas próximas ao polo N celeste são **circumpolares** e nunca se põem

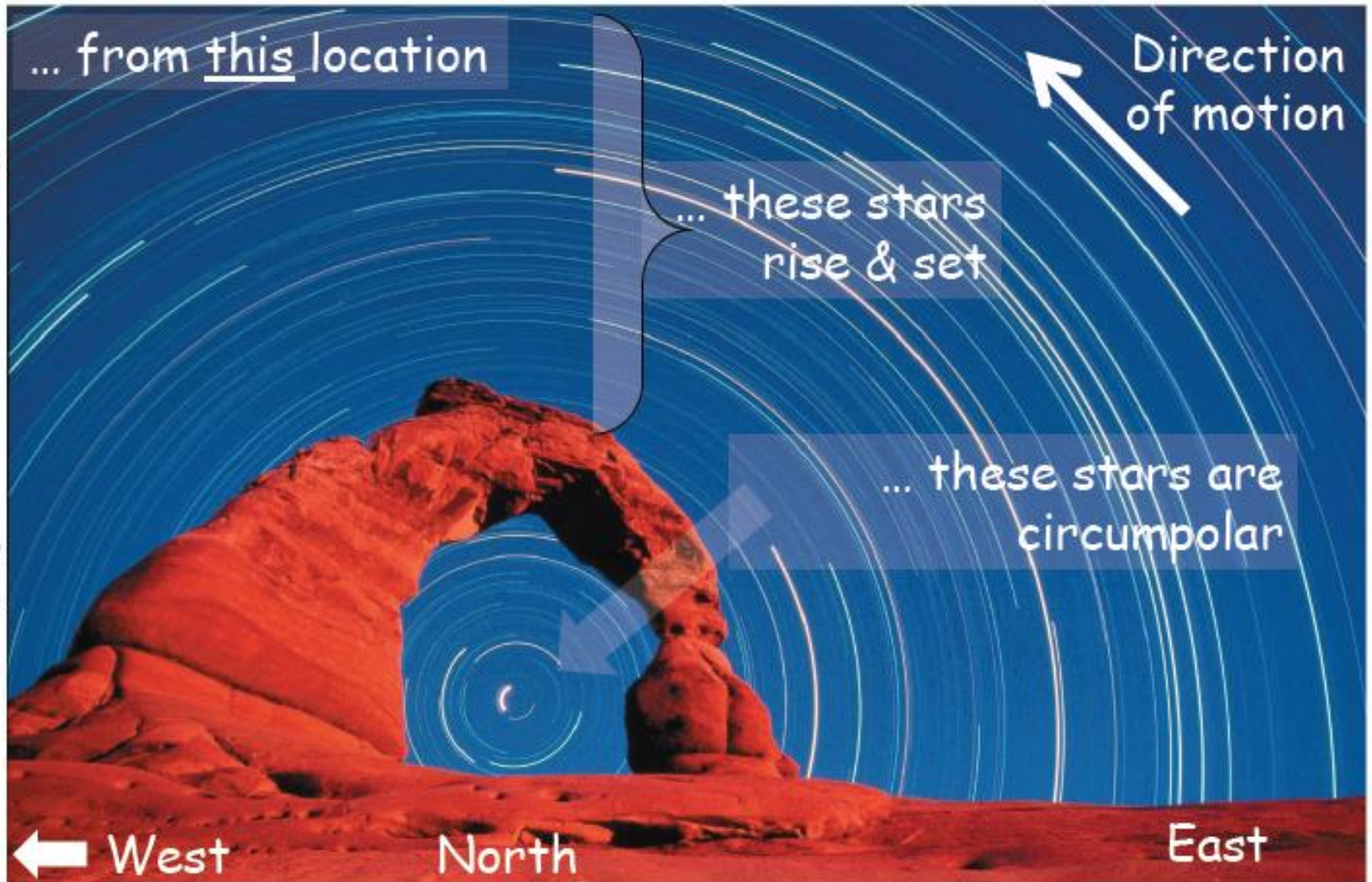


Muitas estrelas (e o Sol, lua, planetas) nascem a leste e se põem a oeste

Não se pode ver estrelas próximas ao polo S celeste

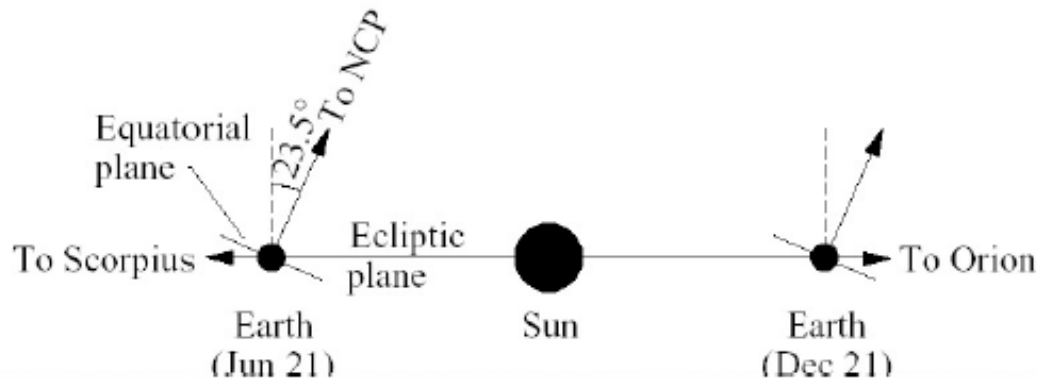
Estrelas circumpolares e outras....

[Image Credit: Pearson Education]



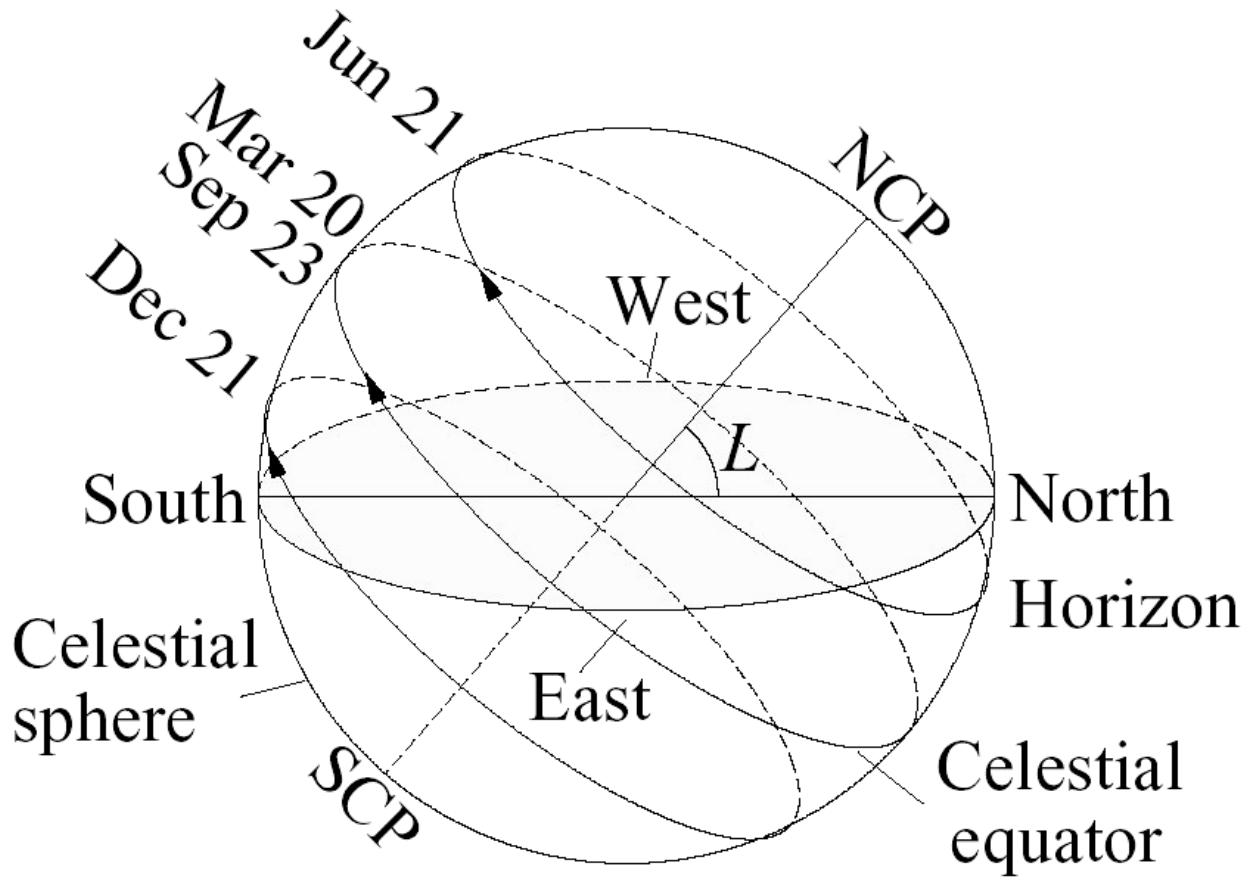
Outros sistemas de coordenadas celestiais comuns

- **Eclíptico:** projeção do plano da órbita a Terra define o Equador da Eclíptica. Sol define a longitude = 0.

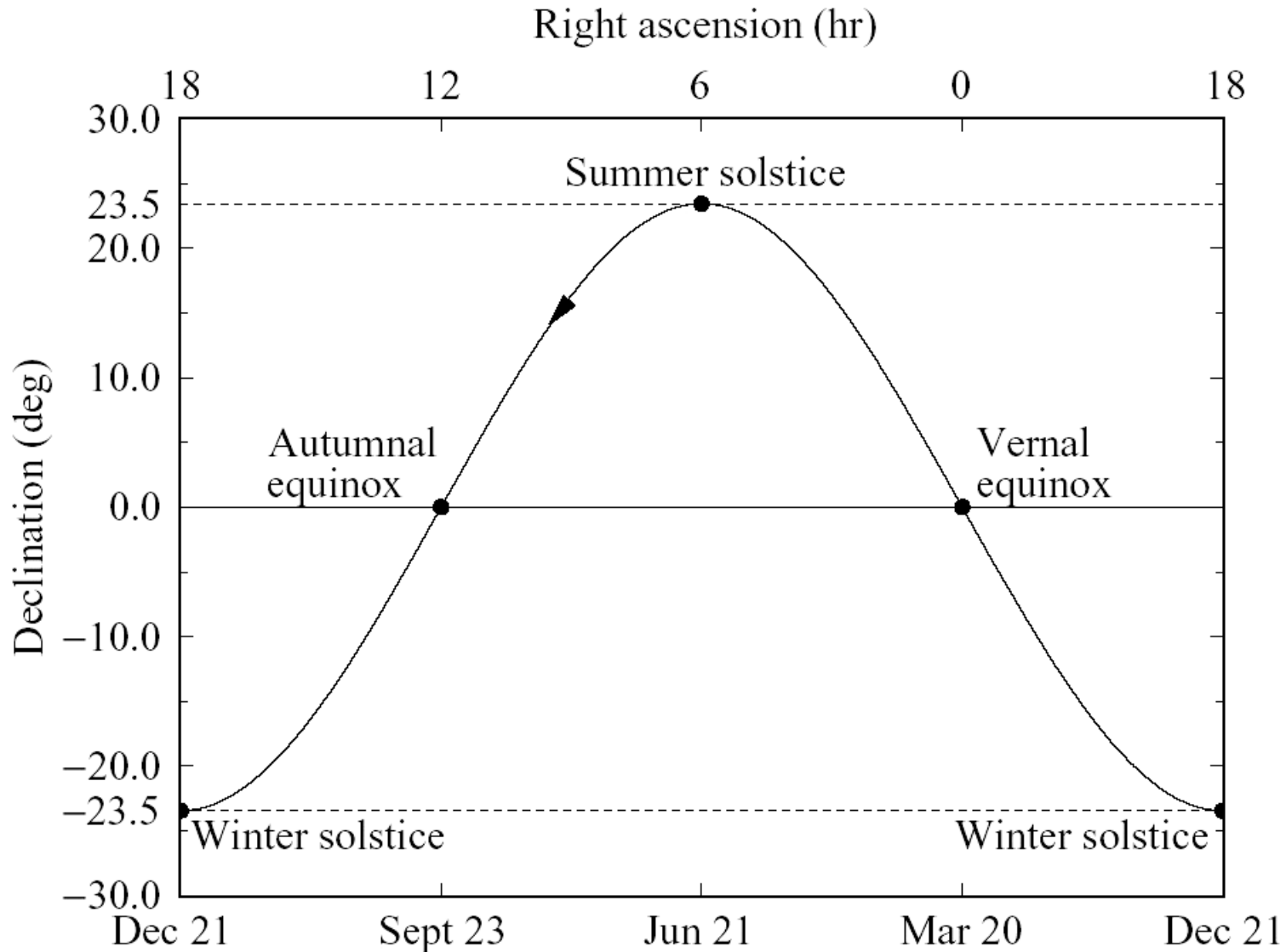


- **Galático:** projeção do plano Galático médio é próximo ao Equador Galático; longitude = 0, próximo ao Centro Galático, mas não muito. $(\alpha, \delta) \rightarrow (l, b)$

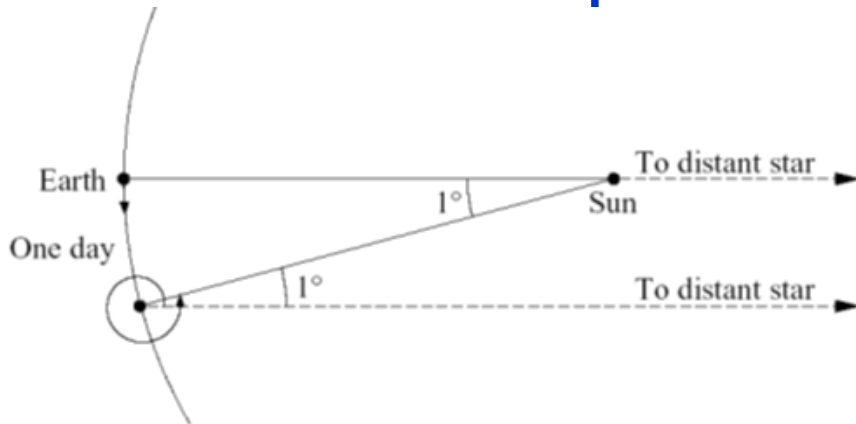
Mudança sazonal da declinação solar



Caminho Solar Anual



Tempos Sinódico e Sideral



Sinódico = relativo ao Sol

Sideral = relativo às estrelas

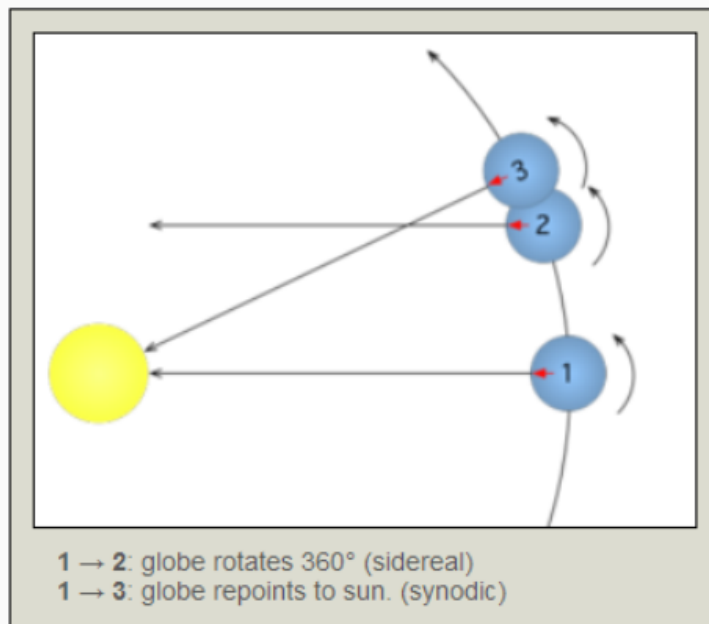
DIA SIDERAL

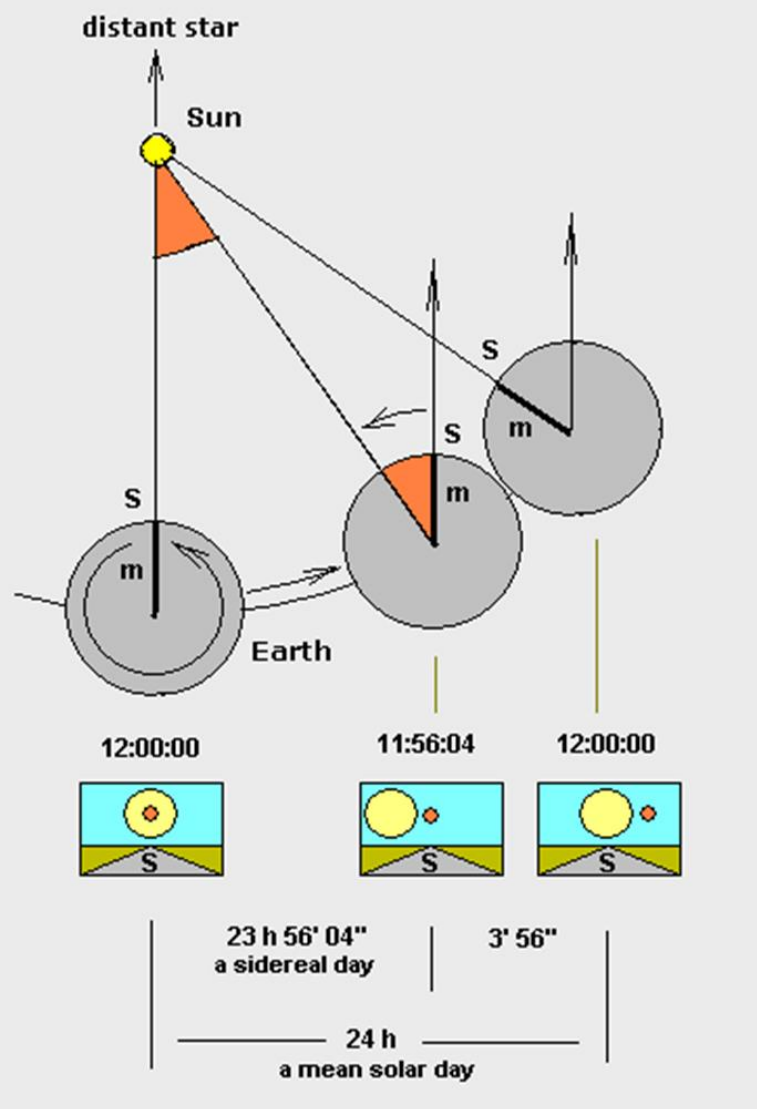
Um *dia sideral* é o tempo que leva uma estrela no céu para voltar ao mesmo lugar. Como, para todos os efeitos, o céu é fixo, um dia sideral é quando a Terra gira 360° (**360° em 1 ano (~ 365 dias) $\rightarrow \sim 1^\circ$ por dia**).

Um dia sideral são 23h 56' 4.09" .

Ano sideral = 366.25 dias (sidereais)

Devido à precessão dos equinócios, o ano sideral é 20 minutos mais longo que o ano sinódico.





DIA SINÓDICO

Um dia sinódico ou solar é o tempo que leva o sol para passar sucessivamente o meridiano. Um dia solar médio são 24h. A Terra tem que rodar mais que 360° para o sol voltar para o “meio dia”.

Ano sinódico (ou tropical) = 365.25 dias (solares)

1 dia solar = Δt entre 2 nasceres de Sol = 24 h

Portanto,

Dia SOLAR (24h) = 361° > dia SIDERAL (verdadeiro periodo da rotação)

Como T demora 4 minutos para girar de 1° em torno de si mesma:

Dia SOLAR (24 hs) = 4 min mais longo que o SIDERAL (23 h 56 m 04 s)

- A diferença entre o dia sideral médio e o dia solar médio pode ser derivada aproximadamente como segue abaixo.
- Como no ano tropical o tempo solar médio se atrasa um dia em relação ao tempo sidral médio, então:

$$\frac{24h}{365.2422} \cong 3^m 56^s$$

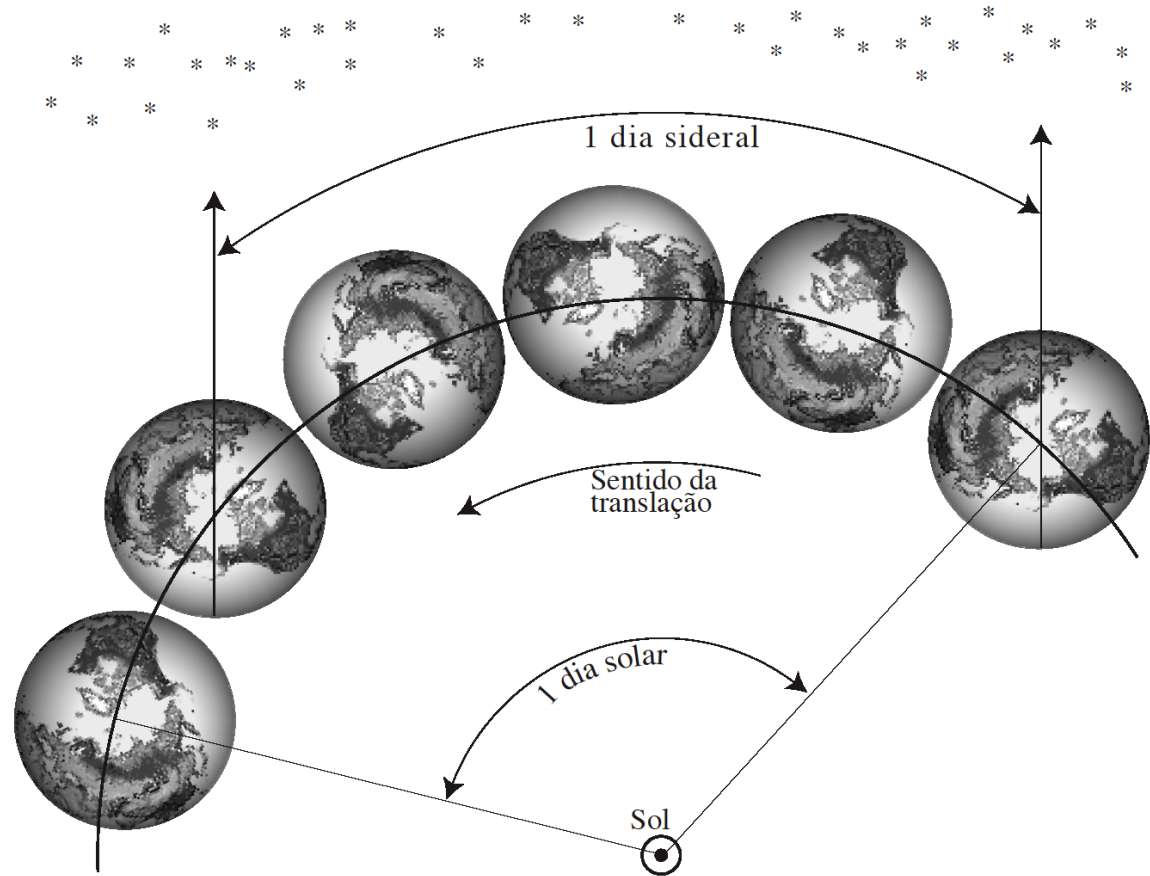
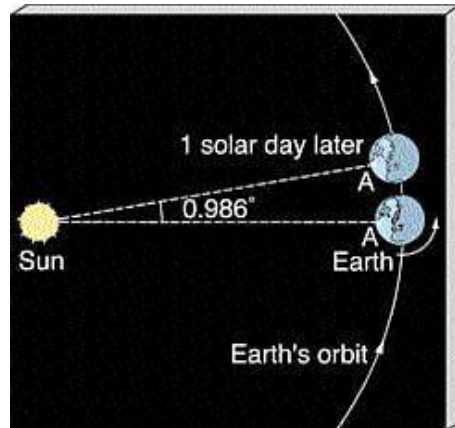
- Portanto, um dia sideral é $\sim 3^m 56$ mais curto que o dia solar.

- **Tempo Universal** , UT = relativo ao Sol, em Greenwich
- **Tempo Sideral Local (LST)** = relativo à esfera celeste = RA agora cruzando o meridiano local (em direção ao Sul),

ou seja,

nesse ponto (isto é, $\alpha = 0^\circ$, $\delta = 0^\circ$) teremos máximo de culminação em LST $\Theta = 0h$

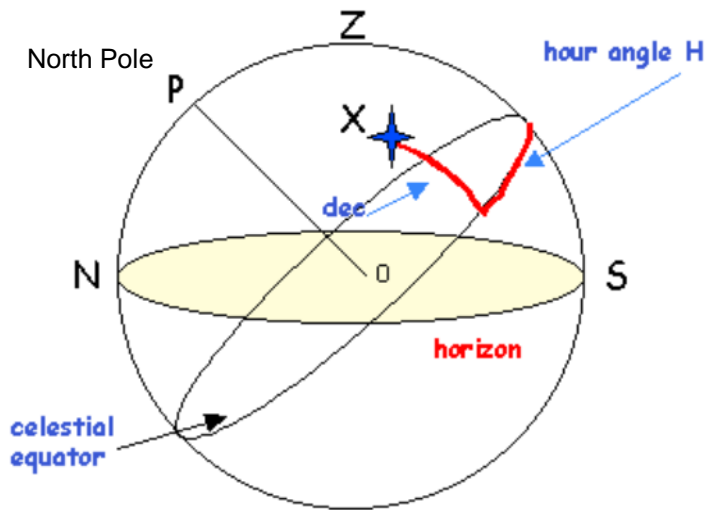
Rotação da Terra: dia



Dia solar: 24h

Dia sideral: 23h 56m 4,1s

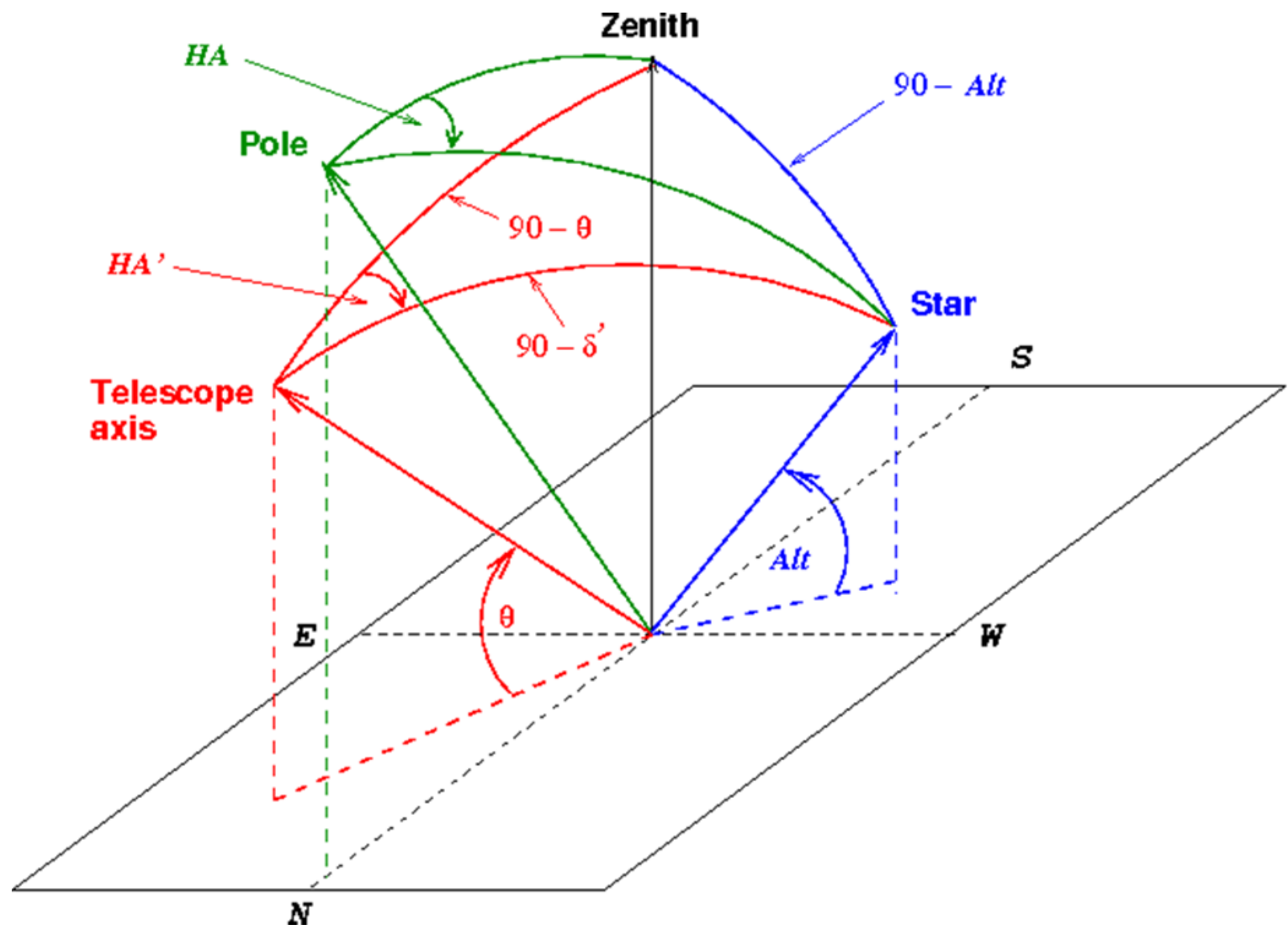
Ângulo Horário (h)



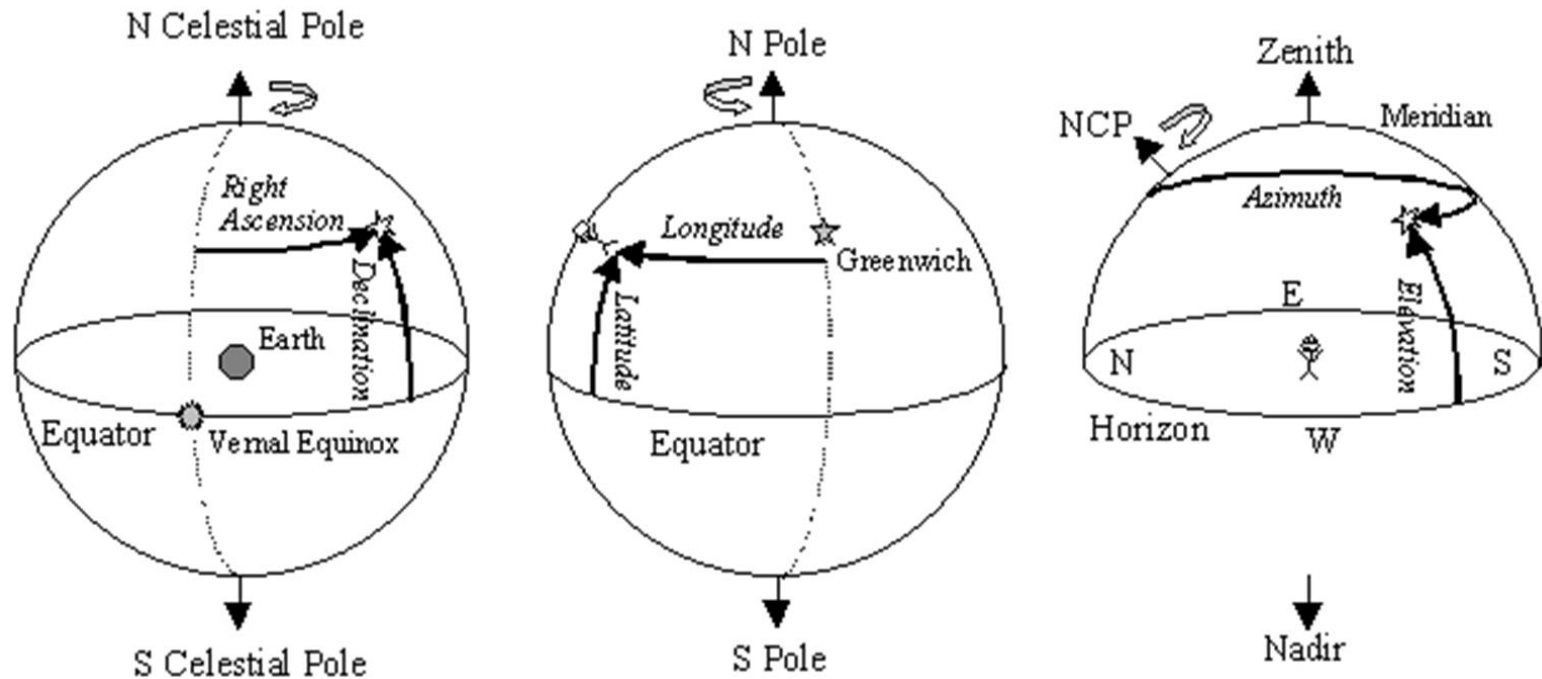
O ângulo horário h de um objeto X é o ângulo entre o meridiano local N-S e a projeção da localização do objeto, medido no **sentido horário** ao longo do **equador celeste**.

A culminação (ponto mais alto) do objeto ocorre para $h = 0h$, geralmente expresso em horas!

- Positivo se no sentido horário e negativo no caso oposto.



Resumindo... notem as diferenças e semelhanças



A precessão dos Equinócios

Equinócio significa o momento em que o sol incide com maior intensidade sobre as regiões que estão localizadas próximo à linha do equador. Quando ocorre o equinócio, o **dia** e a **noite** têm igual duração (exatamente 12 horas). Ocorre durante os meses de março e setembro, quando há mudança de estação.

- O eixo de rotação da Terra precessiona com um período de ~ 26,000 anos
- É causada pela atração de maré da Lua e Sol sobre o equador da Terra que é abaulado devido à força centrífuga da rotação da Terra.
- Existe também a nutação (oscilação do eixo de rotação da Terra) com um período de ~ 19 anos.

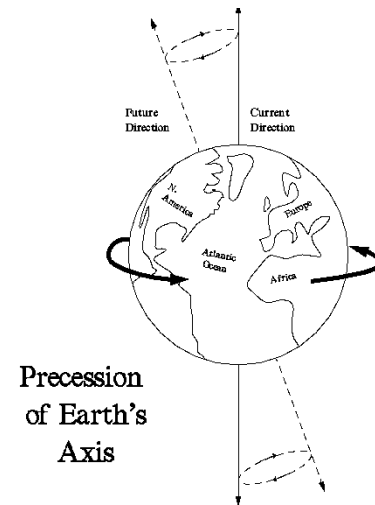
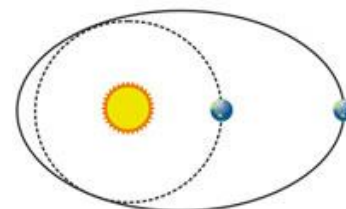


FIG. 3

* Not to scale *

Milankovitch Cycles



Eccentricity



Obliquity

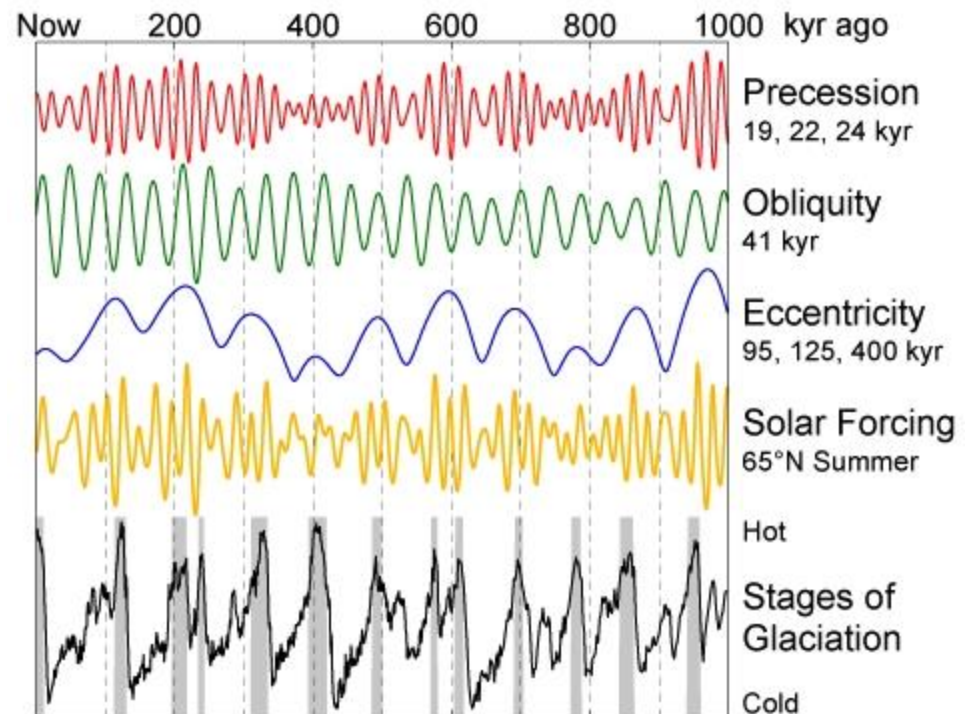


Precession

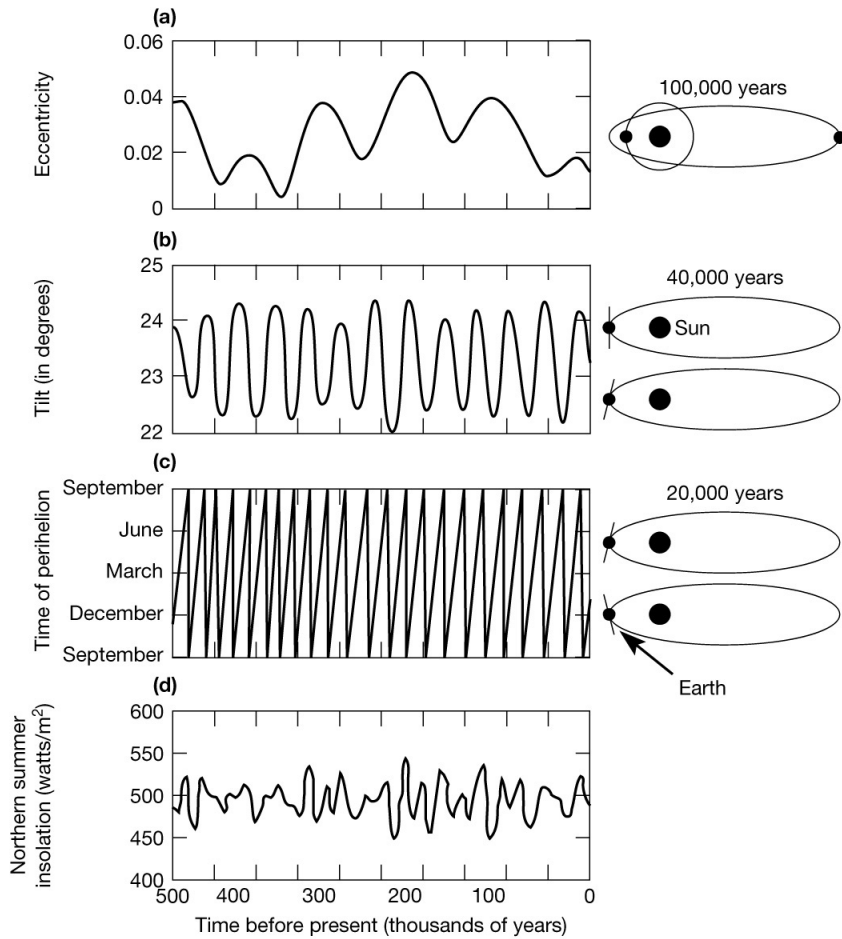
Órbita da Terra, Rotação e Eras Glaciais.

- **Teoria de Milankovich:** variações cíclicas na geometria Terra-Sol se combinam para produzir variações na quantidade de energia solar que alcança a Terra, em particular, as regiões de formação de gelo:
 1. Mudanças na obliquidade (inclinação do eixo de rotação)
 2. Excentricidade da órbita
 3. Precessão

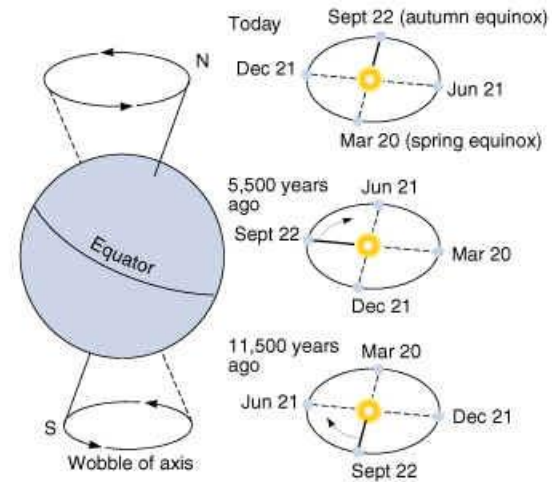
Essas variações se correlacionam muito bem com as eras glaciais!



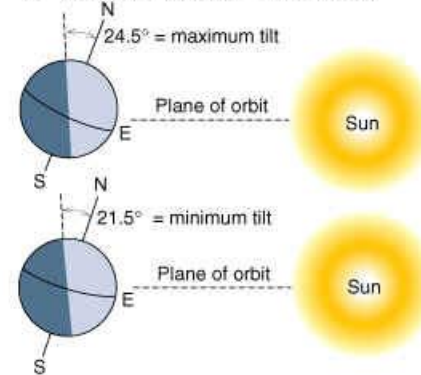
Para os mais curiosos...



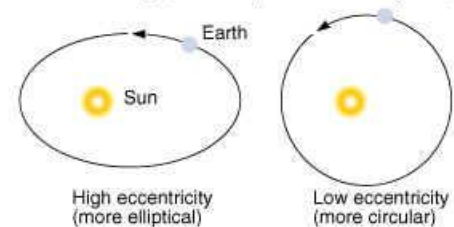
A. Precession of the equinoxes (period = 23,000 years)



B. Tilt of the axis (period = 41,000 years)



C. Eccentricity (dominant period = 100,000 years)



Algumas unidades bastante usadas

- **Distância:**

- Unidade astronômica: distância Terra-Sol

- $1 \text{ au} = 1.496 \times 10^{13} \text{ cm}$

- Ano luz (Light year): $c \times 1 \text{ ano}$, $1 \text{ ly} = 9.463 \times 10^{17} \text{ cm}$

- Parsec: distância a partir da qual 1 au subtende um ângulo de 1 arcsec,

- $1 \text{ pc} = 3.086 \times 10^{18} \text{ cm} = 3.26 \text{ ly} = 206,264.8 \text{ au}$

- **Ângulo:**

- Geralmente em “hex”, i.e., $12^\circ 34' 56.78''$ ou 12.5824389 deg, exceção feita à RA, usualmente dada em unidades de tempo, i.e,

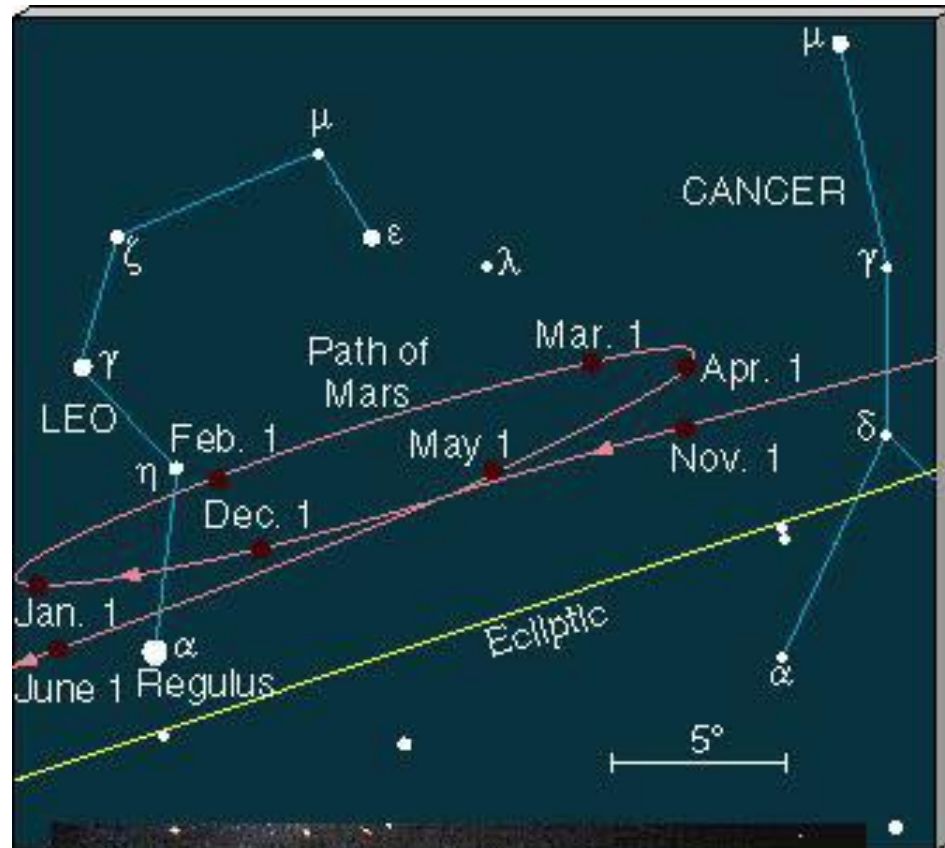
- 12h 34m 56.789s. Note que $\Delta\alpha [\text{deg}] = \Delta\alpha [\text{h}] \times 15 \cos \delta$

- **Massa e Luminosidade:**

- Massa solar: $1 M_\odot = 1.989 \times 10^{33} \text{ g}$

- Luminosidade solar: $1 L_\odot = 3.826 \times 10^{33} \text{ erg/s}$

Movimento Planetário



Breve Histórico

Pitágoras (550 a.C.) ⇒ números; intervalos musicais; geometria.

Platão (350 a.C.) ⇒ Universo Geocêntrico movimento dos astros em torno da Terra com velocidade uniforme (cte.) - **T centro do Universo**

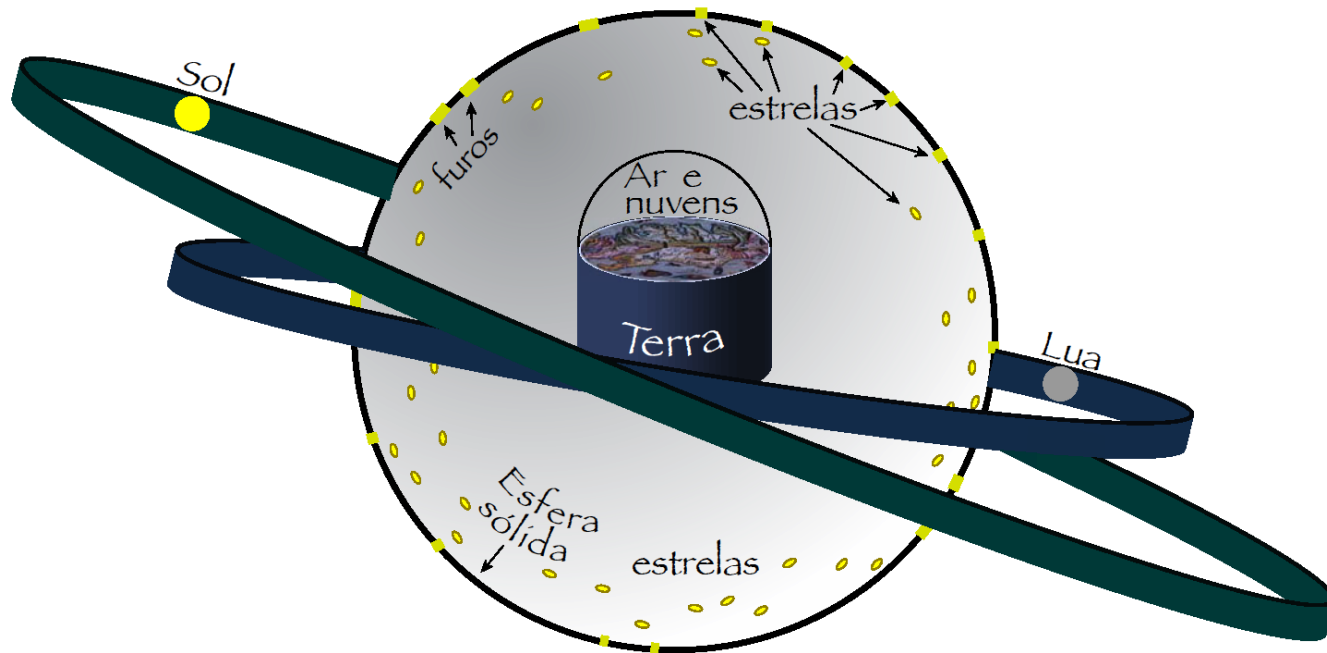
Universo Geocentrico: conceito que persistiu até o séc. XVI (pensamento Aristotélico)

Hiparco (150 a.C.) ⇒ planetas se movem em órbitas pequenas (epíclis) que giravam em torno de órbitas maiores (deferentes).

Ptolomeu (100 d.C.) ⇒ refinou o sistema de epíclis ⇒ Terra deslocada do centro do deferente ⇒ compromete o esquema anterior de movimento uniforme.

Sistema geocêntrico

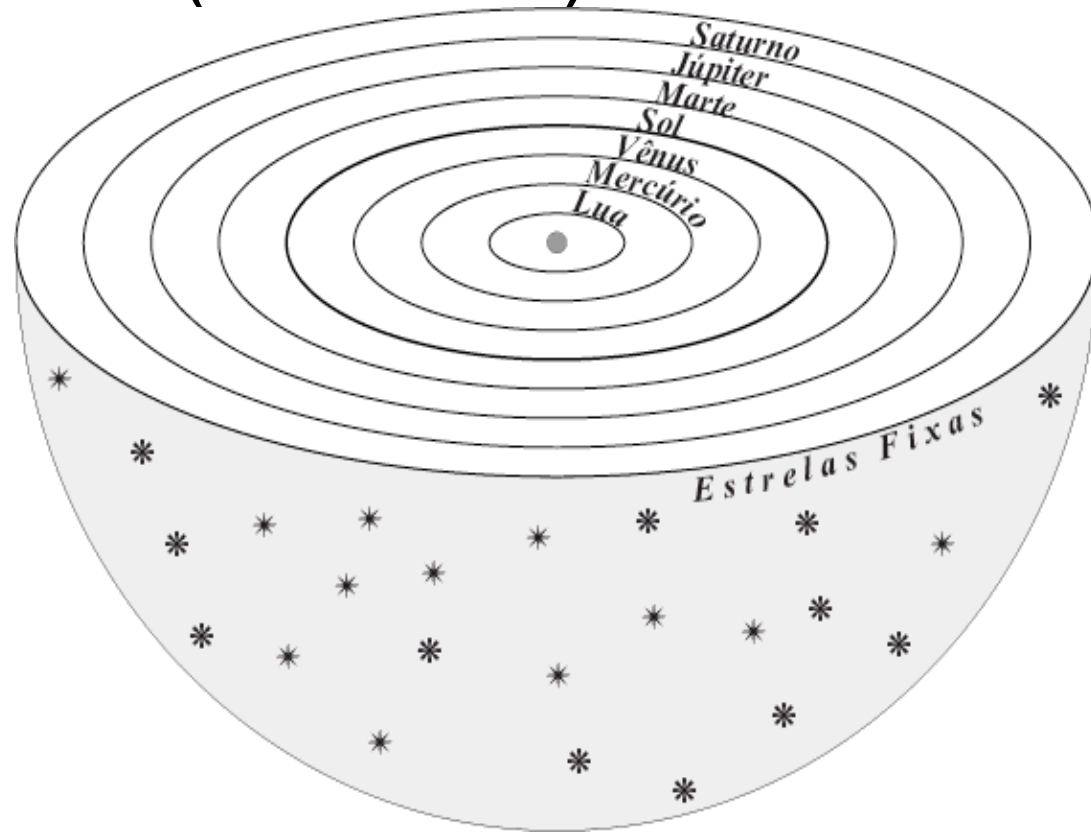
- Anaximandro (~560 a.c.)



- Terra (plana) imóvel, no centro do universo
- O Sol, a Lua e os astros se movem em círculos ao redor da Terra

Sistema geocêntrico

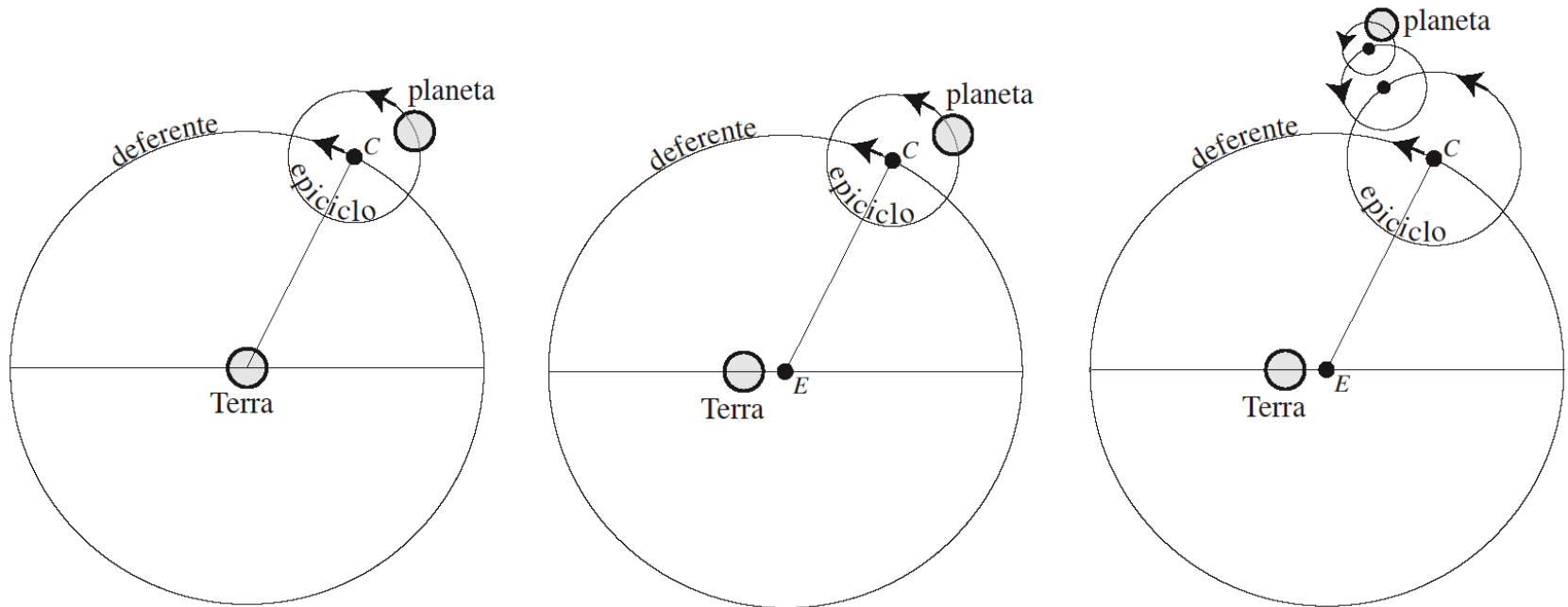
- Aristóteles (~320 a.c.)



- Terra imóvel, no centro do universo
- O Sol e os astros se movem em círculos ao redor da Terra
- Inspirou Universo de Dante

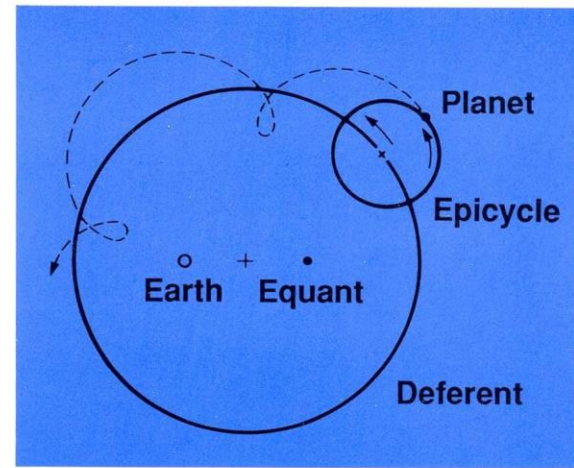
Sistema geocêntrico

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



- Terra imóvel, no centro do universo
- O Sol e os astros se movem em vários círculos ao redor da Terra:
- complexidade do movimento aparente dos planetas: Mercúrio e Vênus « oscilam em torno do Sol com distâncias angulares máximas de 41° (Vênus) e 25° (Mercúrio)
- **Teoria dos epicíclis**

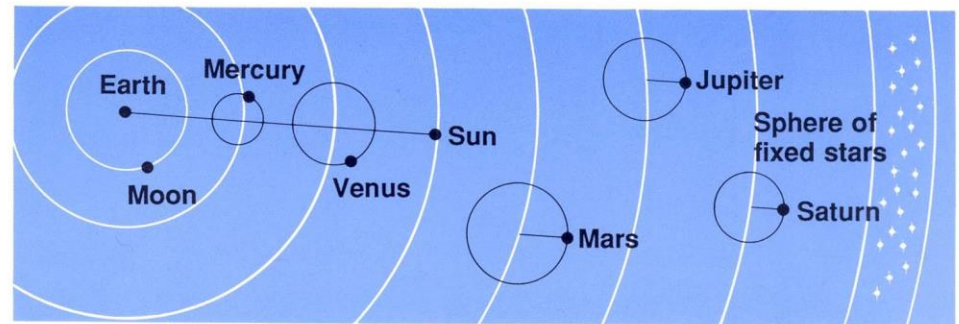
Epículos -
Modelo Ptolomaico:
dezenas de ciclos
(perdurou 13 secs.)



Epicycle and deferent

Seeds/Horizons, 3rd ed., Fig. 4-6; Foundations of Astronomy, 1990 ed., Fig. 4-12

© 1991 Wadsworth, Inc.



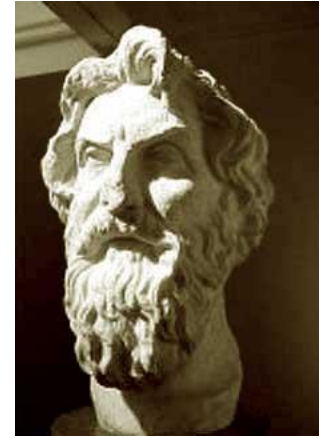
The Ptolemaic system

Seeds/Horizons, 3rd ed., Fig. 4-7; Foundations of Astronomy, 1990 ed., Fig. 4-13

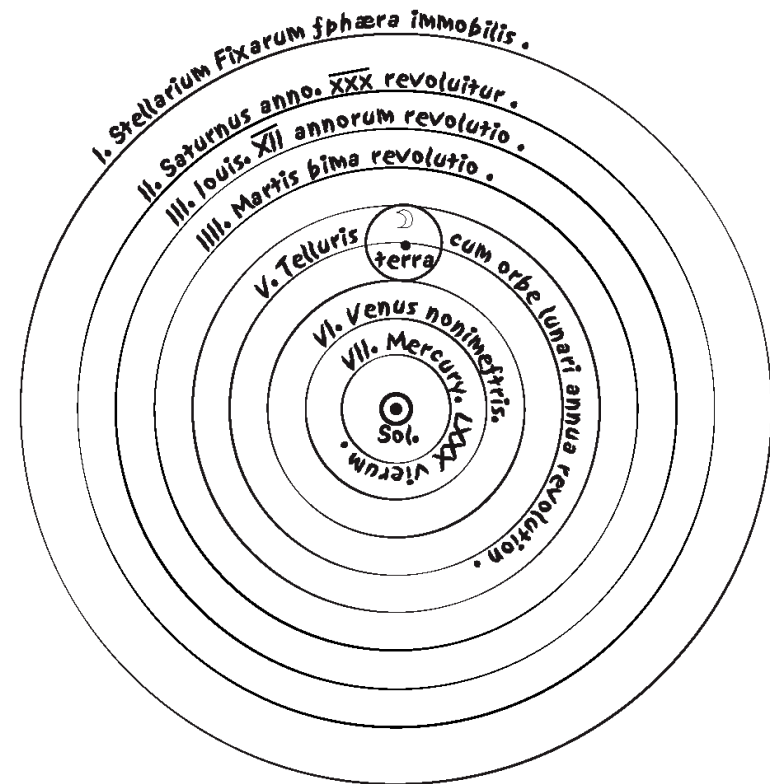
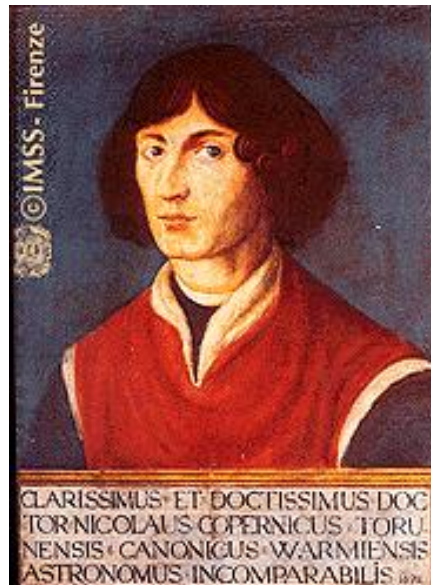
© 1991 Wadsworth, Inc.

Modelo Heliocentrico

- Aristarco (~260 a.c.)
 - Universo heliocêntrico
 - A Terra se move em torno do Sol



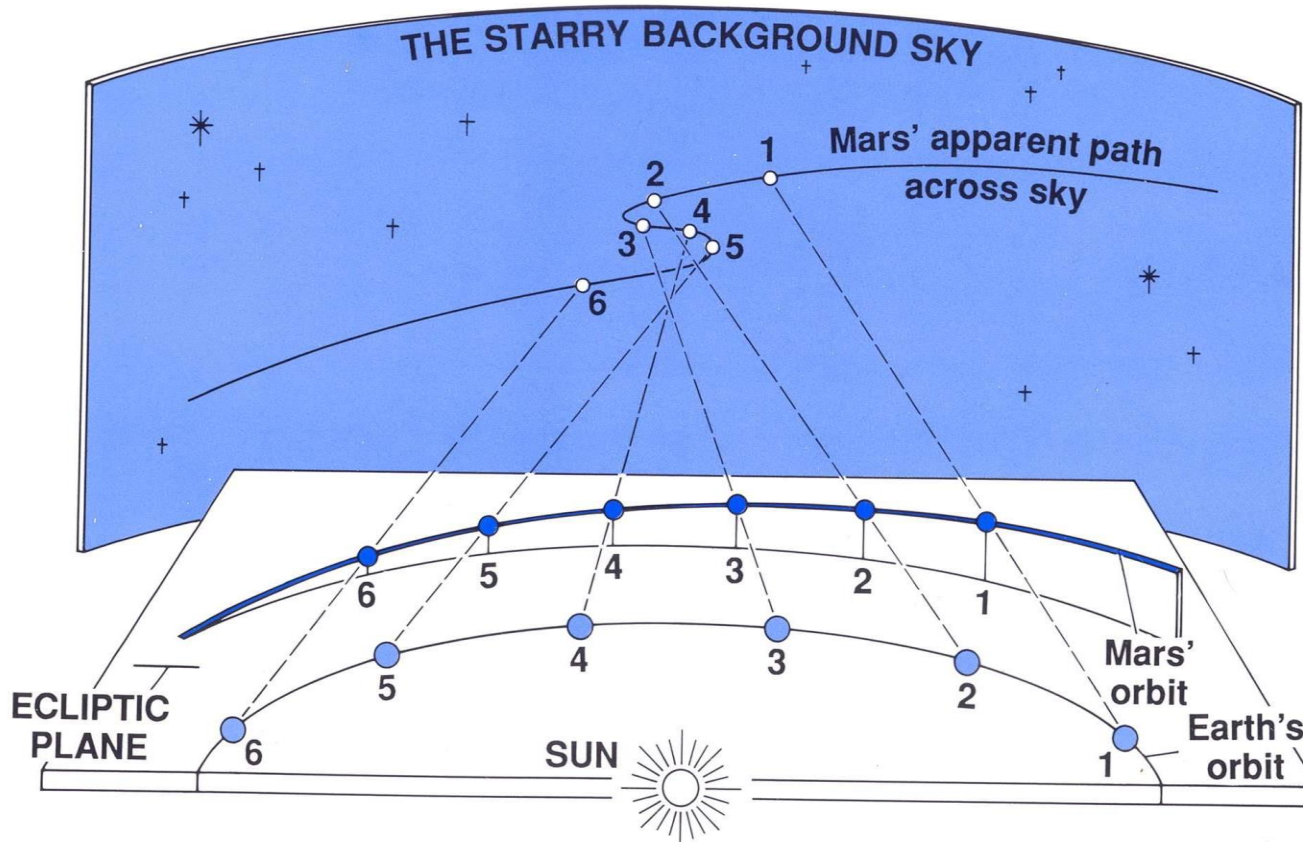
- Nicolau Copérnico (1543)
 - Órbitas circulares em torno do Sol



Modelo Heliocêntrico

- Sol no centro; T gira em torno do próprio eixo e do Sol
- Explica movimentos diurnos e sazonais, e mudanças sazonais no céu
- Explica movimento dos planetas: circular e uniforme (como convinha aos dogmas da época)
- Ordem dos planetas ao redor do Sol: quanto > período da órbita: > distância do planeta
- Explica os loops dos planetas

Modelo Heliocentrico: explica *loops* dos planetas



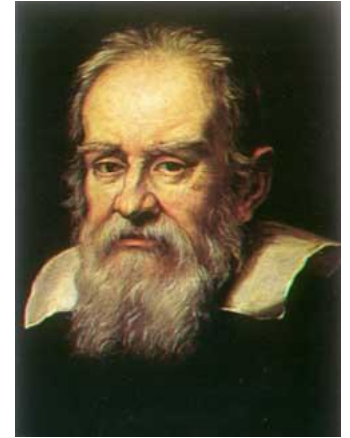
Mars' apparent path across sky

Hartmann/The Cosmic Journey, 4th ed., Fig. 3-2

Modelo Heliocentrico: era moderna

- **Galileu Galilei (1564–1642)**

- “Epur si muove”:
- Prova irrefutavel do modelo heliocentrico: construiu 1^a luneta: detectou 4 luas de Jupiter que orbitavam indiscutivelmente em torno de Jupiter e não da T !



Modelo Heliocentrico: era moderna

- **Tycho Brahe (~ 1590)**

- observações detalhadas do movimento dos planetas, em particular de Marte. (mas acreditava no universo geocêntrico)



- **Johannes Kepler (1609)**

- Utiliza dados de Tycho Brahe.
- Inicialmente acredita no universo geocêntrico, mas adota a visão heliocêntrica devido à sua própria análise
- Observando dados: abandona movimento circular do SS: adota elipses

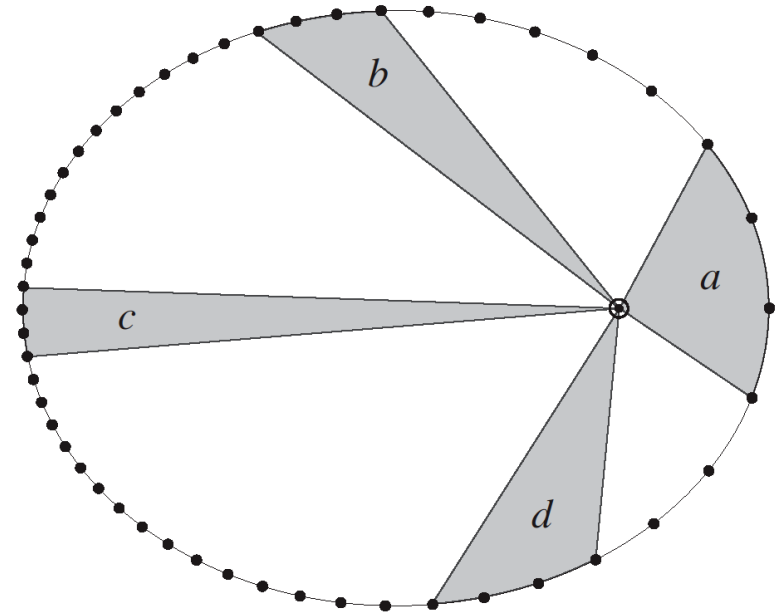


Movimento Heliocentrico

- **Johannes Kepler**

- Órbitas elípticas em torno do Sol
- **3 leis empíricas dos movimentos planetários** (entre 1609–1619):
 - Os planetas se movem em elipses, com o Sol em um dos focos;
 - A linha que liga o Sol a um dado planeta varre áreas iguais em tempos iguais;
 - O quadrado da razão dos períodos de translação de 2 planetas é igual ao cubo da razão entre as distâncias dos planetas ao Sol

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



**Explicadas pela
teoria da gravitação
de Newton (1687)**