

# Sistemas de Coordenadas: CARTESIANOS, GEODÉSICOS E ASTRONÔMICOS





# Introdução: *Tipos de Coordenadas*

## ◆ **Coordenadas Geográficas:**

- **Geodésicas ou Elipsóidicas:** latitudes e longitudes referidas à direção da normal.
- **Astronômicas:** latitudes e longitudes referidas à direção da vertical. Referidas a um ponto da superfície da Terra (topocêntrica).

## ◆ **Coordenadas Cartesianas:**

- **Terrestre:** os eixos são ortogonais e sua origem está no centro de massa da Terra.
- **Celeste:** os eixos são ortogonais e sua origem está no baricentro do Sistema Solar.



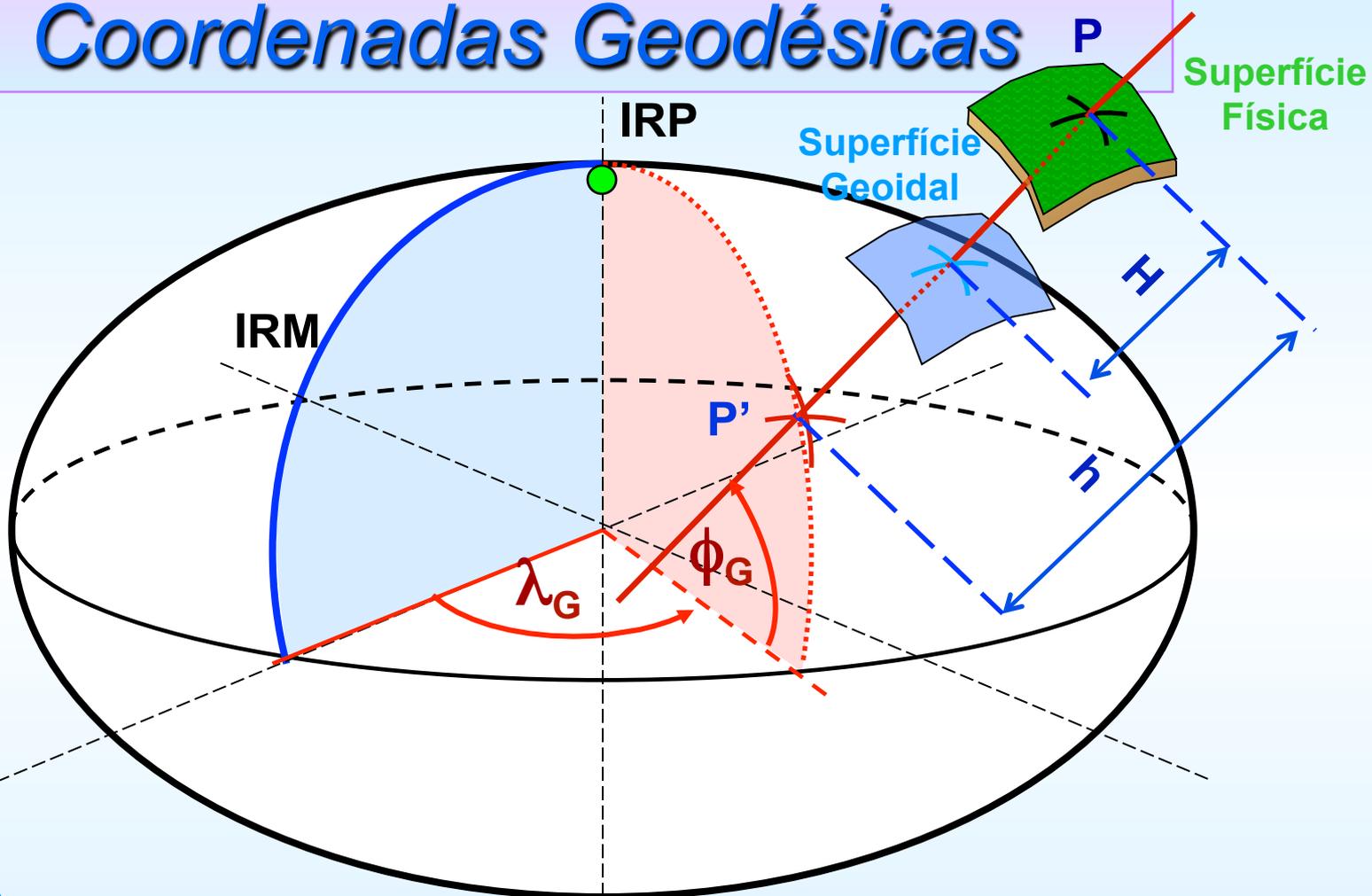


# 1 - Sistemas de Coordenadas Geográficas

- ◆ As Coordenadas Geográficas foram desenvolvidas com a Navegação e a Astronomia de posição.
- ◆ No passado, os navegadores obtinham sua localização na superfície terrestre pela observação dos astros, usando o **Sistema de Coordenadas Geográficas Astronômicas**.
- ◆ Atualmente, a determinação da posição na superfície da Terra é realizada através do rastreamento de satélites artificiais, utilizando o **Sistema de Coordenadas Geográficas Geodésicas**.



# Coordenadas Geodésicas



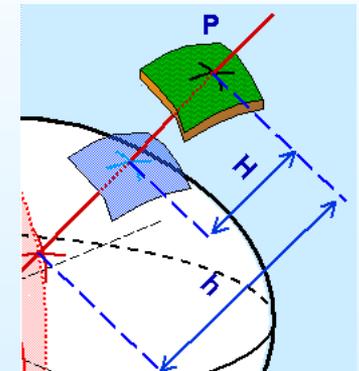
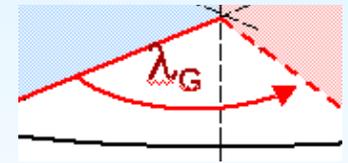
*IRM: International Reference Meridian (antigo Greenwich)*

*IRP: International Reference Pole (Norte)*



# Coordenadas Geodésicas

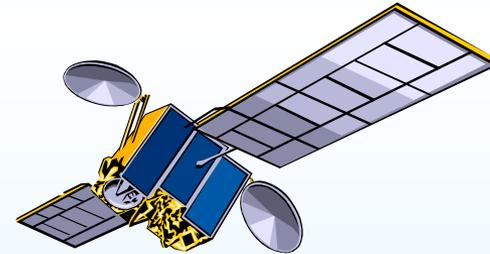
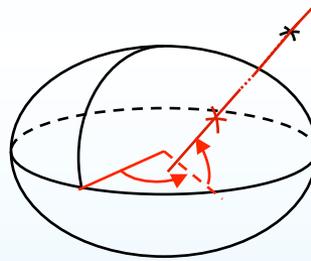
- ◆  $\lambda_G$  - **Longitude geodésica ou elipsóidica:** ângulo diedro formado pelo meridiano de referência (IRM) e o meridiano local.
- ◆  $\phi_G$  - **Latitude geodésica ou elipsóidica:** ângulo plano que a normal forma com sua projeção sobre o plano do equador.
- ◆ **h** - **Altitude geométrica:** separação entre as superfícies física e elipsoidal medida ao longo da normal.
- ◆ **H** - **Altitude Ortométrica:** separação entre as superfícies física e geoidal medida ao longo da vertical.





# Coordenadas Geodésicas

- ◆ As coordenadas geodésicas ( $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ) são suficientes para fixar um ponto no espaço. No passado as coordenadas  $\phi$  e  $\lambda$  eram obtidas através da triangulação, enquanto a altitude geométrica era praticamente impossível de ser obtida, pois não havia como obter as alturas geoidais.



- ◆ Com a era espacial, as observações sobre os satélites artificiais permitiram obter as coordenadas cartesianas tridimensionais, que são transformadas no **terno geodésico** ( $\phi$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ).



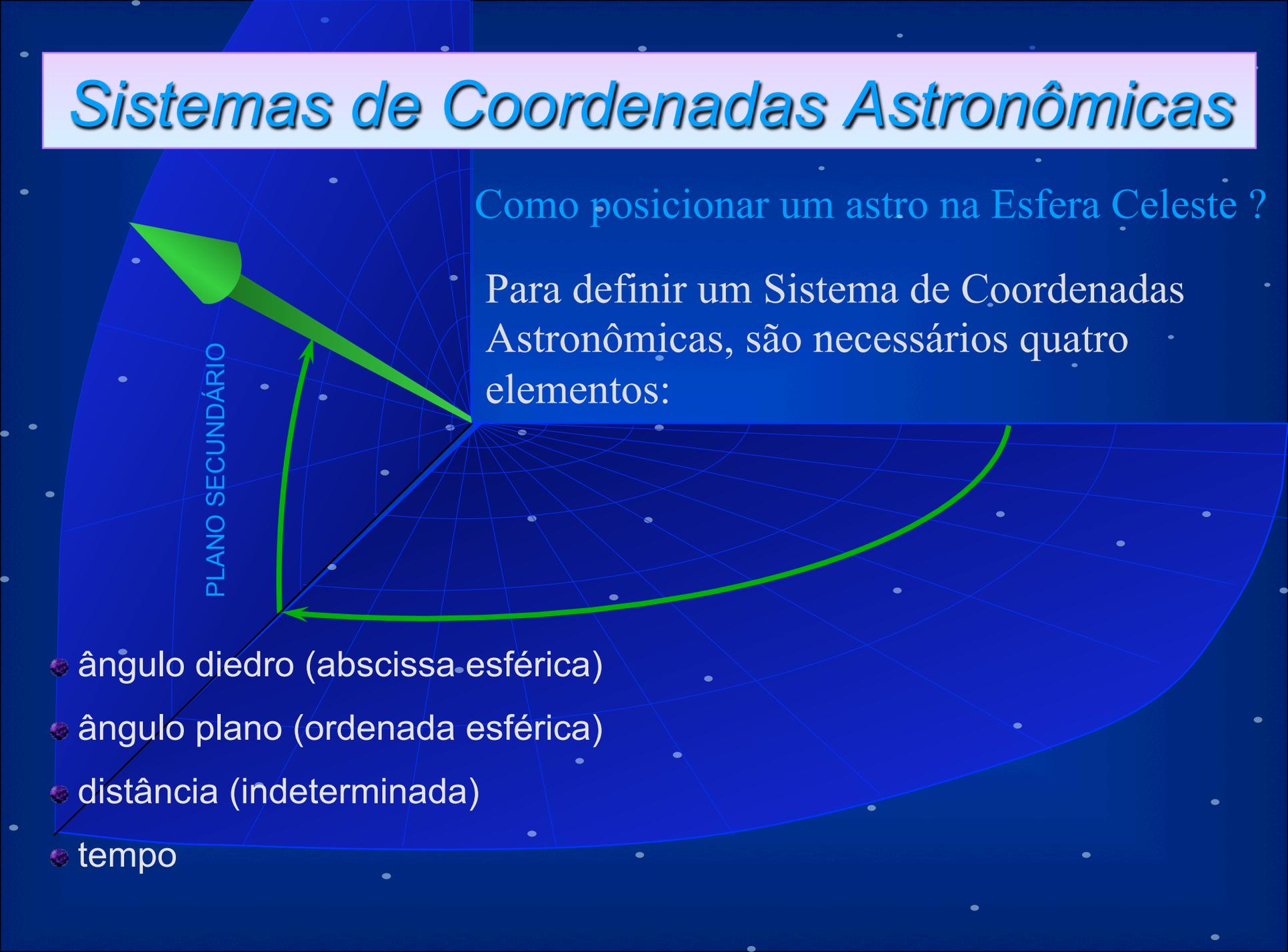
# Sistemas de Coordenadas Astronômicas

Como posicionar um astro na Esfera Celeste ?

Para definir um Sistema de Coordenadas Astronômicas, são necessários quatro elementos:

- ângulo diedro (abscissa esférica)
- ângulo plano (ordenada esférica)
- distância (indeterminada)
- tempo

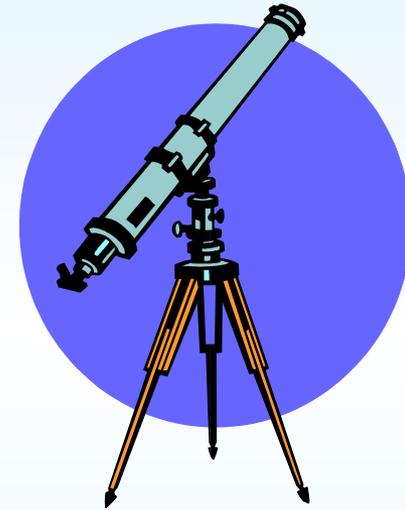
PLANO SECUNDÁRIO



# Sistemas de Coordenadas Astronômicas

Nestes elementos baseiam-se os seguintes Sistemas de Coordenadas Astronômicas:

- Sistema Horizontal ou Zenital
- Sistema Equatorial Horário
- Sistema Equatorial Uranográfico



Cada um destes Sistemas são baseados em *referências astronômicas* para a origem de coordenadas.

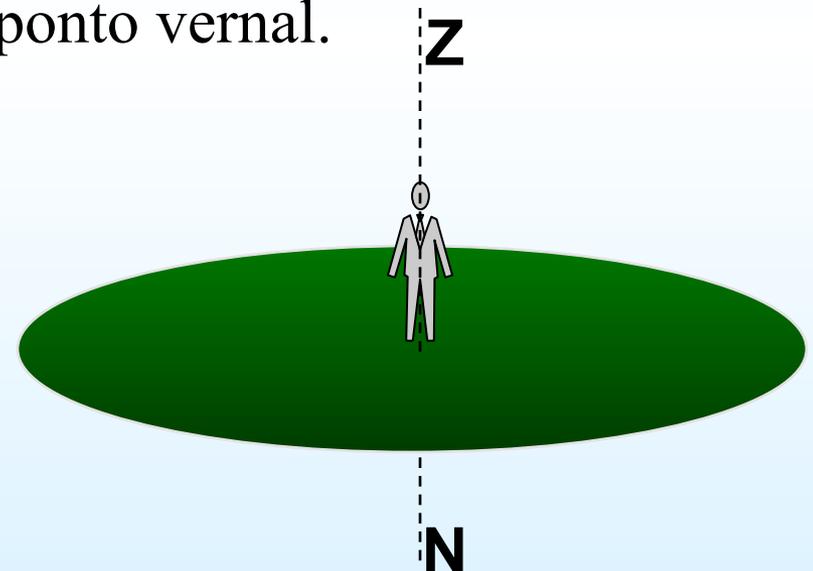
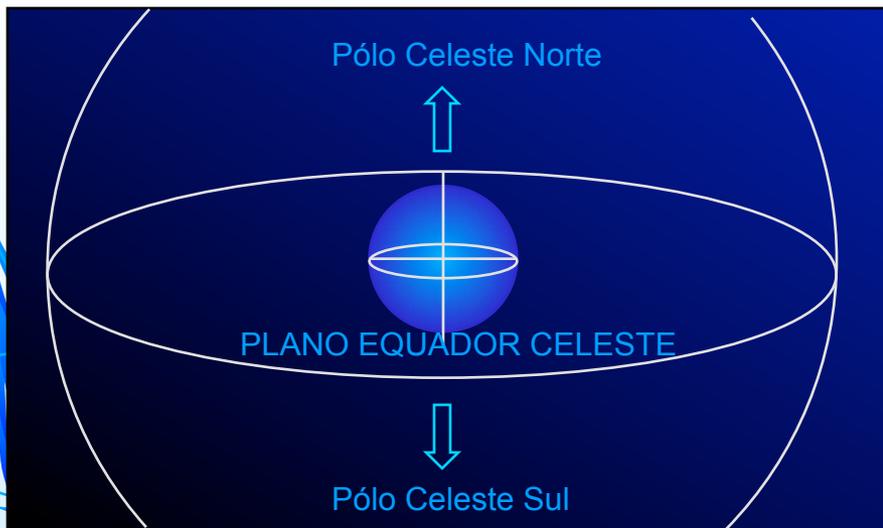




# Sistemas de Coordenadas Astronômicas

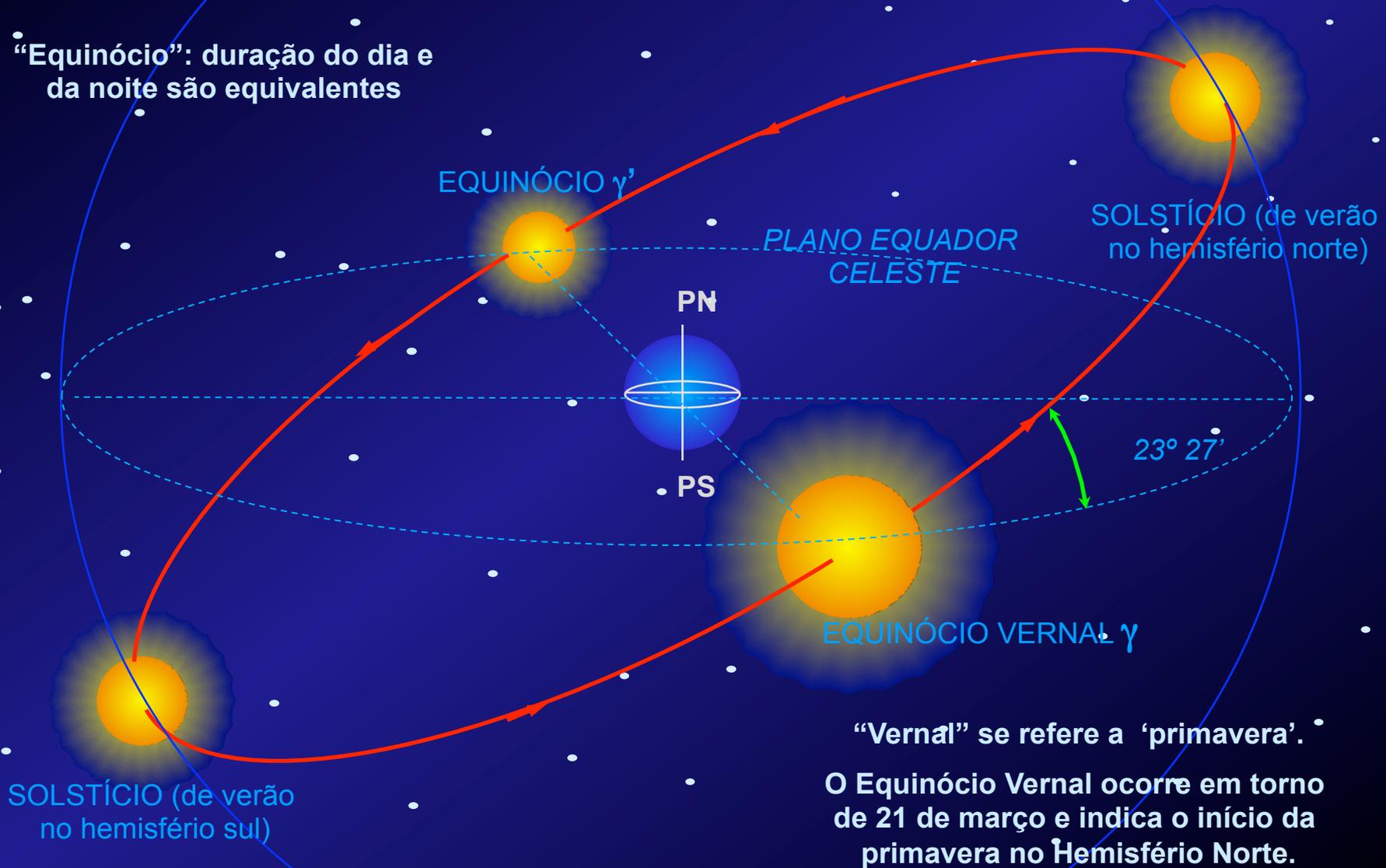
Algumas referências astronômicas:

- Plano do Equador Celeste e Pólos Celestes;
- Plano do Horizonte do Observador, Nadir e Zênite;
- Equinócio de primavera (HN) – ponto vernal.



# Posições do Sol na Esfera Celeste

“Equinócio”: duração do dia e da noite são equivalentes



“Vernal” se refere a ‘primavera’.

O Equinócio Vernal ocorre em torno de 21 de março e indica o início da primavera no Hemisfério Norte.

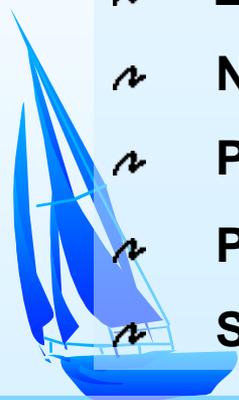
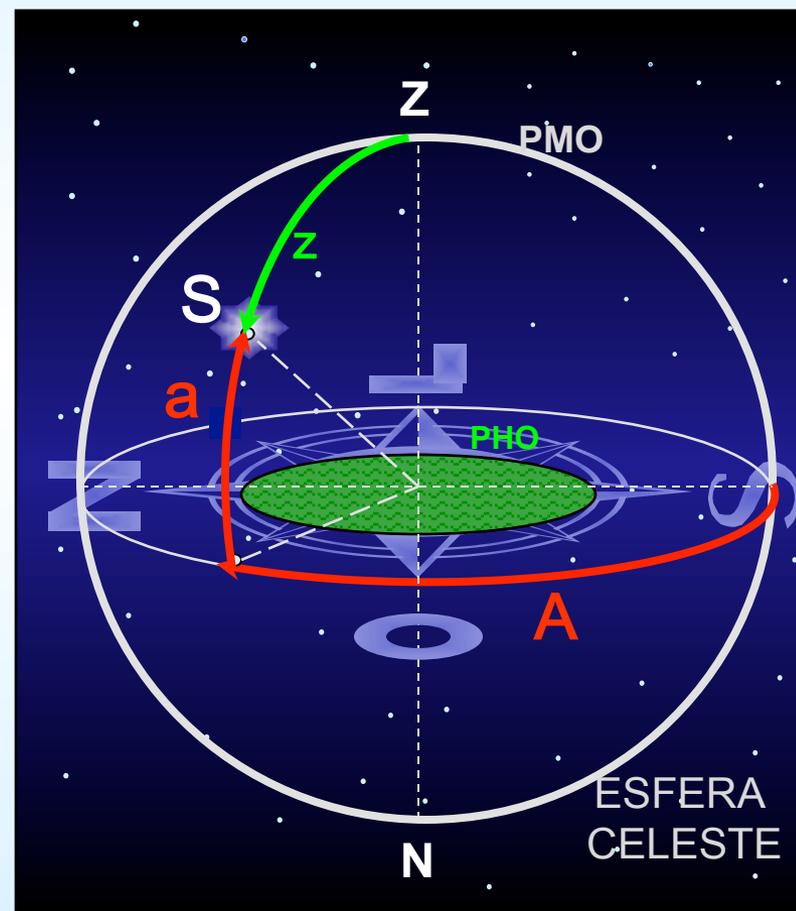


# Coordenadas astronômicas

## SISTEMA HORIZONTAL ou ZENITAL

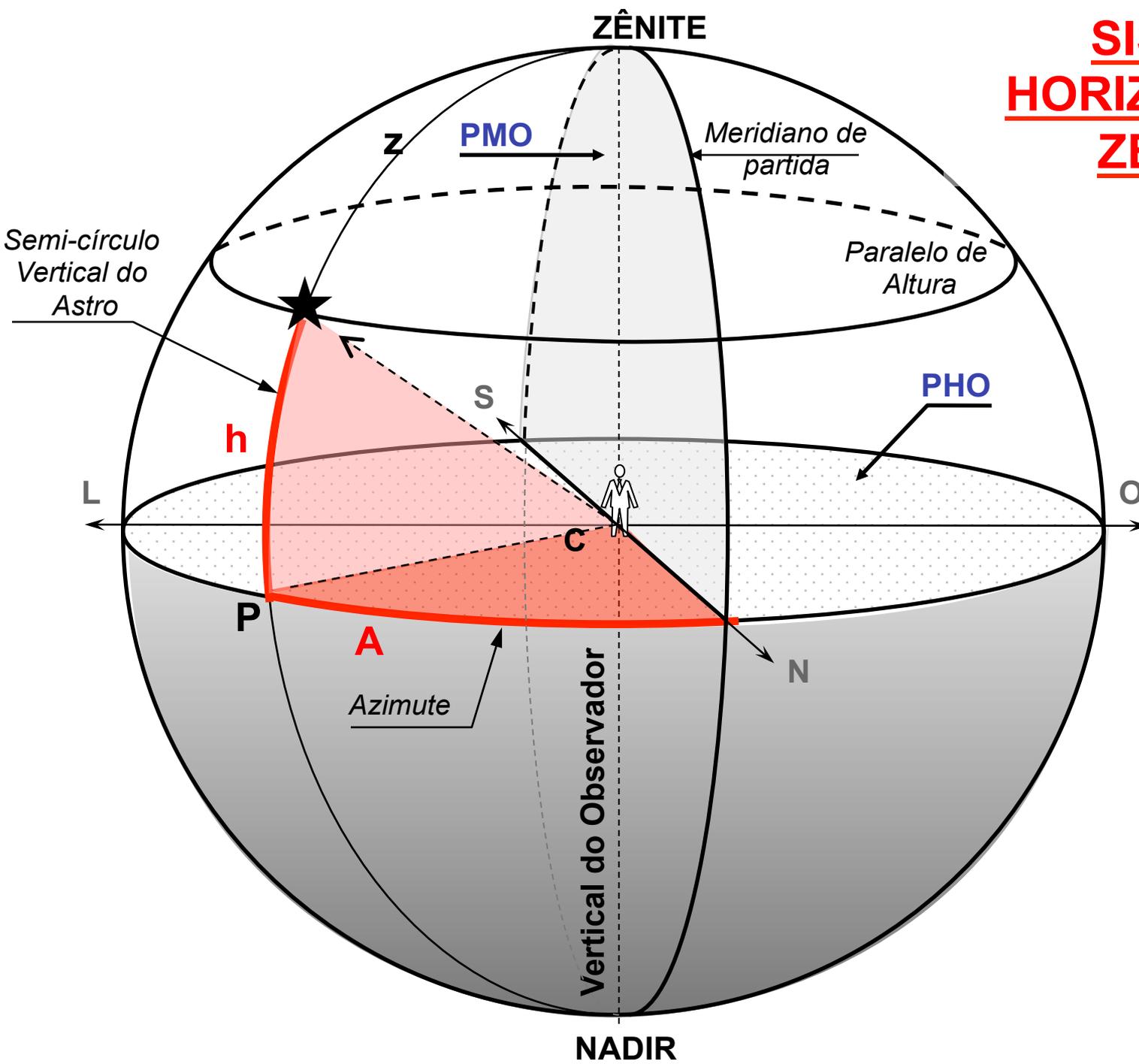
Referências: plano horizontal;  
zênite; meridiano do observador

- ~ **a** – altura angular do astro ( $0^\circ$  a  $90^\circ$ )
- ~ **z** - distância zenital
- ~ **A** – azimute, a partir do Norte\*, sentido oeste ( $0^\circ$  a  $360^\circ$ )
- ~ **Z** – zênite
- ~ **N** – nadir
- ~ **PHO**: plano do horizonte do observador
- ~ **PMO**: plano do meridiano do observador
- ~ **S**: posição do astro



\*alguns astrônomos contam o azimute a partir do Sul

# SISTEMA HORIZONTAL ou ZENITAL



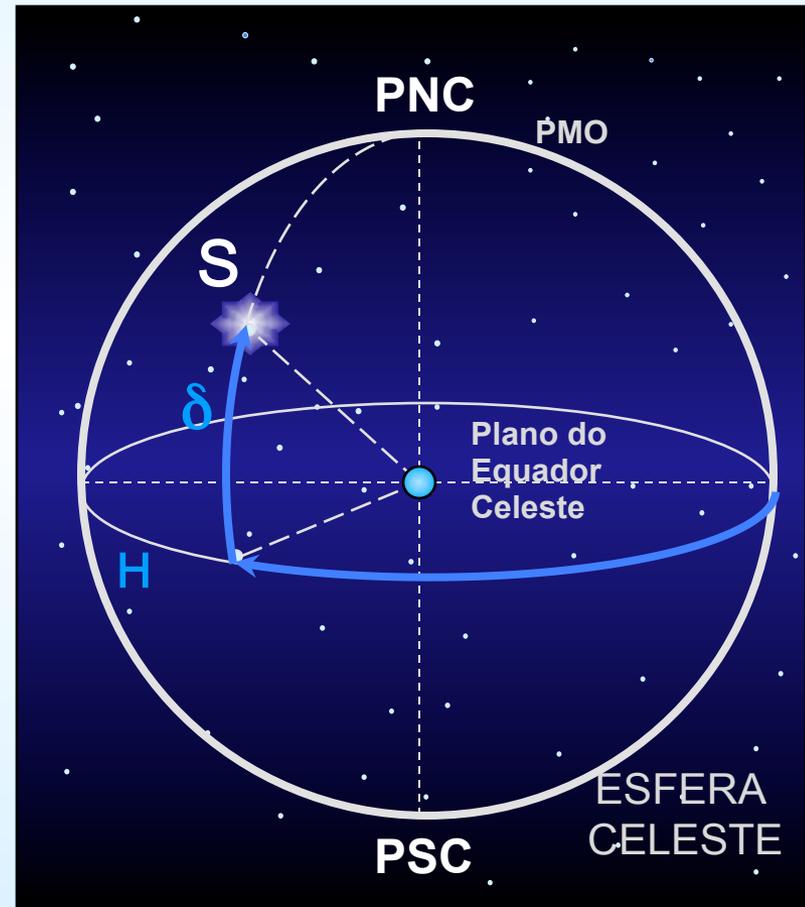


# Coordenadas astronômicas

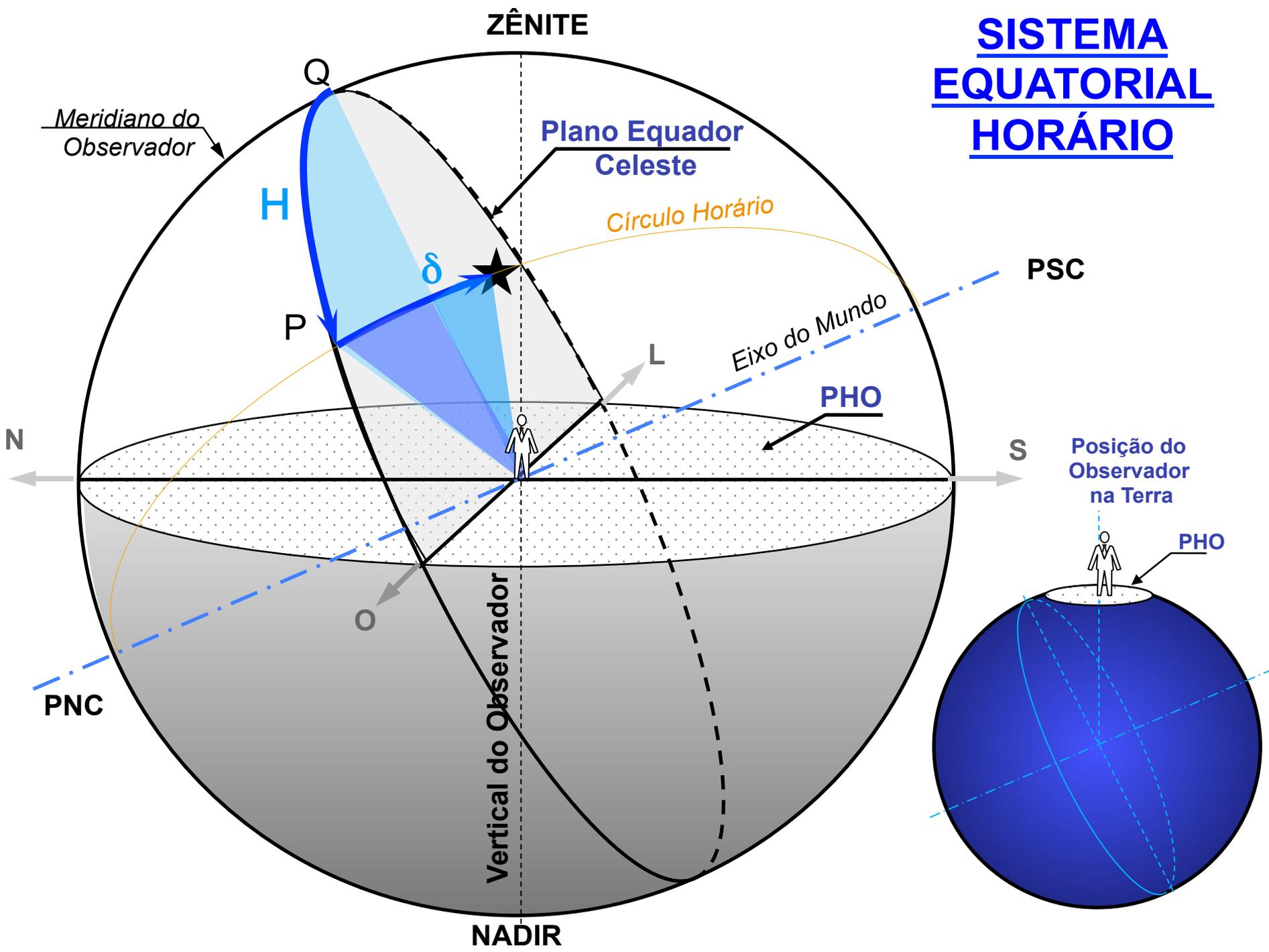
## SISTEMA EQUATORIAL HORÁRIO

Referências: equador; pólos celestes; meridiano do observador

- ~  $\delta$  – declinação ( $0^\circ$  a  $90^\circ$ )
- ~ **H** – ângulo anti-horário diedro entre o PMO e o meridiano que contém o astro (0h a 24 hs)
- ~ **PNC** – Pólo Norte Celeste
- ~ **PSC** – Pólo Sul Celeste



# SISTEMA EQUATORIAL HORÁRIO



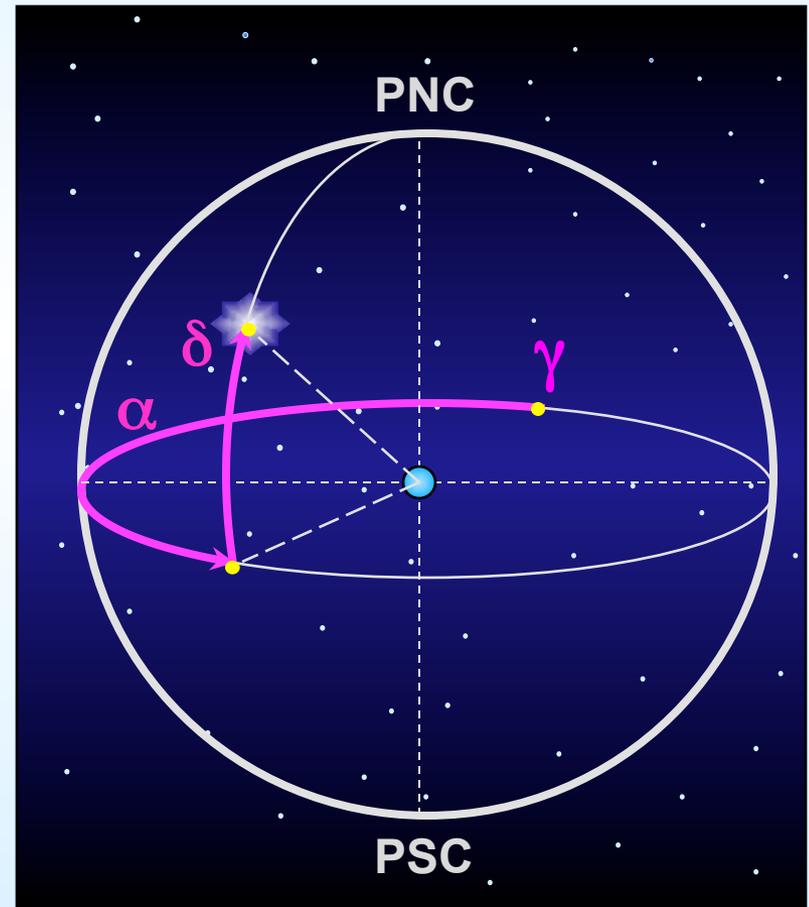


# Coordenadas astronômicas

## SISTEMA EQUATORIAL URANOGRÁFICO

Referências: equador; pólos celestes; e ponto vernal  $\gamma$

- $\alpha$  – ascensão reta, sentido anti-horário ( $0^\circ$  a  $360^\circ$  ou 0h a 24h)
- $\delta$  – declinação ( $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ )
- $\gamma$  – ponto vernal
- PNC** – Pólo Norte Celeste
- PSC** – Pólo Sul Celeste



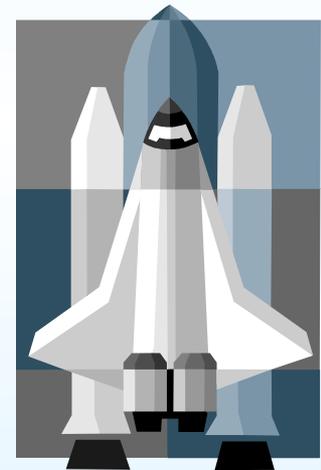




## 2 - Sistemas de Coordenadas Cartesianas

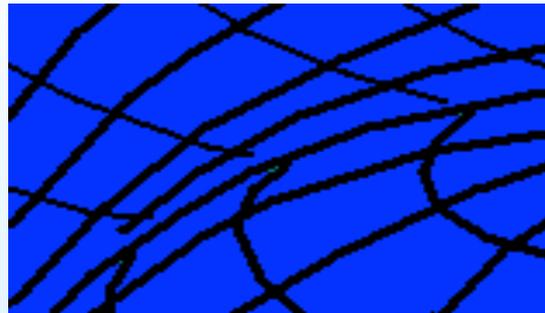
- ◆ A Era Espacial despertou o interesse por uma série de problemas envolvendo a forma, a dimensão e os movimentos da Terra. Concluiu-se que seria necessário, entre outros, estudar, qualificar e quantificar:

- O nível médio do mar;
- O movimento de rotação;
- As marés terrestres e oceânicas;
- O deslocamento em grandes estruturas;
- As variações no eixo de rotação (precessão, nutação, movimento do pólo)

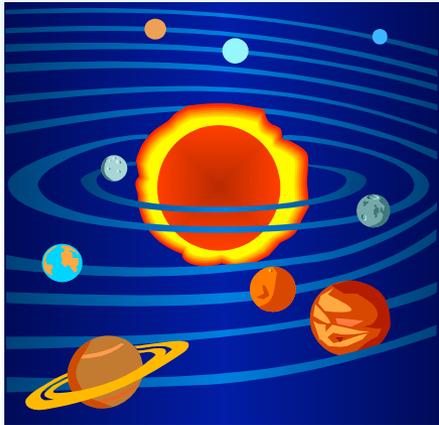




- ◆ Para realizar as referidas tarefas concluiu-se que dois sistemas cartesianos de referência seriam necessários e suficientes:
  - Referencial Cartesiano Celeste
  - Referencial Cartesiano Terrestre



# Referencial Cartesiano Celeste



- Origem: Baricentro do sistema solar
- o eixo OX é orientado na direção do Equinócio Vernal para a época J2000.0\*
- o eixo OZ é orientado na direção do Pólo Celeste de Referência para a época J2000.0\* o eixo OY a  $90^\circ$  de OX completando um sistema dextrógiro.

\* (corresponde a 1 de Janeiro de 2000, 11:58:55.816, UTC – Tempo Universal Coordenado)



# Referencial Cartesiano Celeste

O referencial celeste é materializado através de um certo número de **quasares** dos quais se conhecem as coordenadas uranográficas ( $\alpha$ ,  $\delta$ ).

Os quasares estão tão distantes da Terra que se comportam como se fossem objetos fixos no espaço. Com isso, o referencial que eles materializam (celeste) tem fixas a origem e a orientação dos eixos.

As observações aos quasares são conduzidas através do **VLBI (Very Long Baseline Interferometry)**.

# VLBI

Materialização do Referencial Celeste pela Interferometria de ondas emitidas por quasares

Quasar

Quasar

Noi Interferência

Interferência

Radio Telescope

Rádio Telescópico

Relógio de Hidrogênio  
(precisão de 1 seg em  
1 milhão de anos!)

Hydrogen clock  
1 sec in  
years)

Mark III

Fita Magnética

Correlator

Mark III



# Estações VLBI no mundo





# *Estação VLBI*

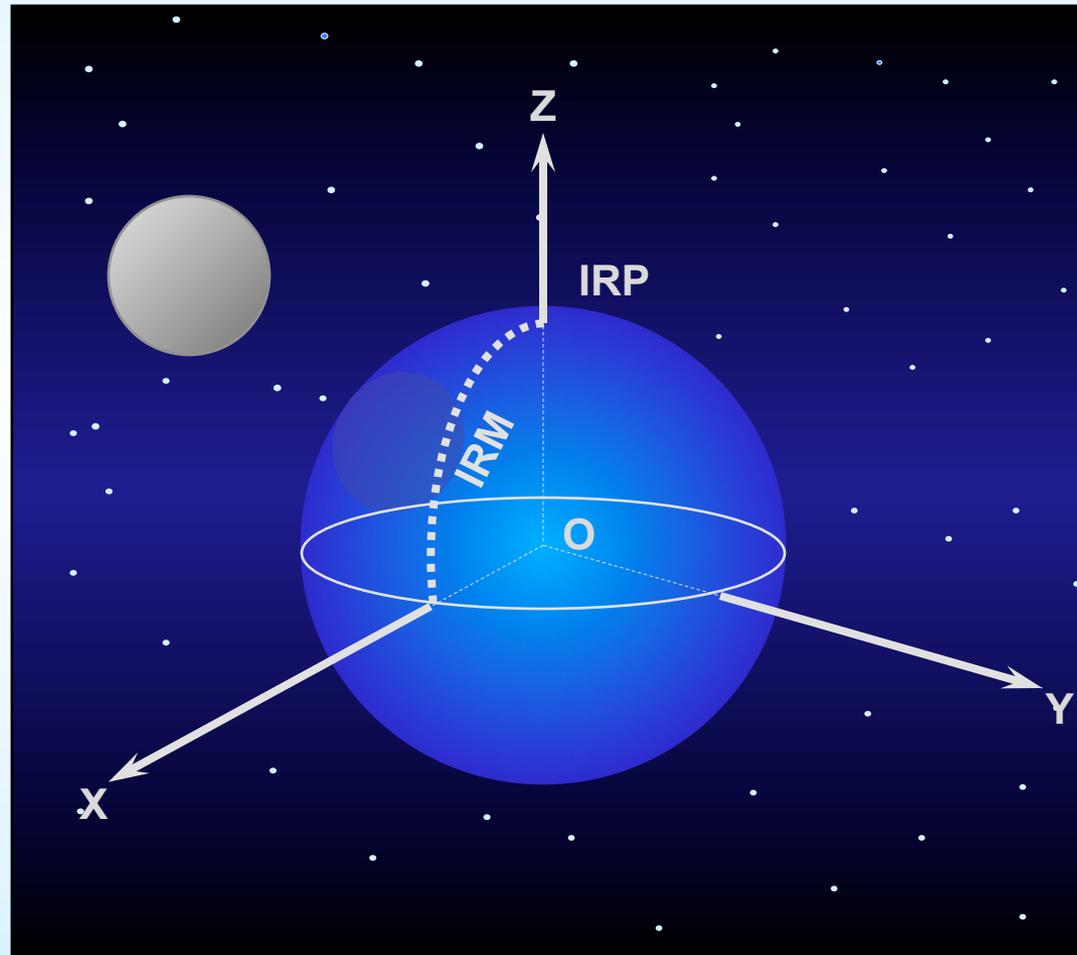


# Referencial Cartesiano Terrestre

- Origem: Centro de massa da Terra (geocêntrico);
- o eixo OX é orientado na direção do IRM (International Reference Meridian);
- o eixo OZ é orientado na direção do IRP (International Reference Pole);
- o eixo OY a  $90^\circ$  de OX completando um sistema dextrógiro.



# Referencial Cartesiano Terrestre





# *Sistema Terrestre de coordenadas cartesianas*

O Sistema de Referência Terrestre é fixo à Terra. Portanto, rotaciona, translada e sofre mudanças de origem e orientação em relação ao Sistema Celeste.

Uma de suas materializações é o **WGS-84**, utilizado pelo GPS. Outra materialização muito usada atualmente é oriunda das observações da **rede IGS (International GNSS Service)**. Trata-se de um catálogo de coordenadas das estações IGS, bem como suas velocidades, conhecidas pela sigla ITRF.

ITRF2000 refere-se à materialização do ano 2000.

**SIRGAS2000** está referido à época 2000,4.



# *Vinculação entre os sistemas Terrestre e Celeste*

- ◆ A vinculação entre os sistemas terrestre e celeste é essencial em várias aplicações que envolvam Informações Espaciais.
- ◆ No caso da Engenharia Civil, atualmente é possível controlar os deslocamentos das estruturas com confiabilidade utilizando o GPS. Com efeito, os pontos de referência, usados no controle podem ser monitorados em relação ao sistema celeste e, desta forma, garantir a independência da determinação do deslocamento em relação ao referencial.





# Vinculação entre os sistemas Terrestre e Celeste

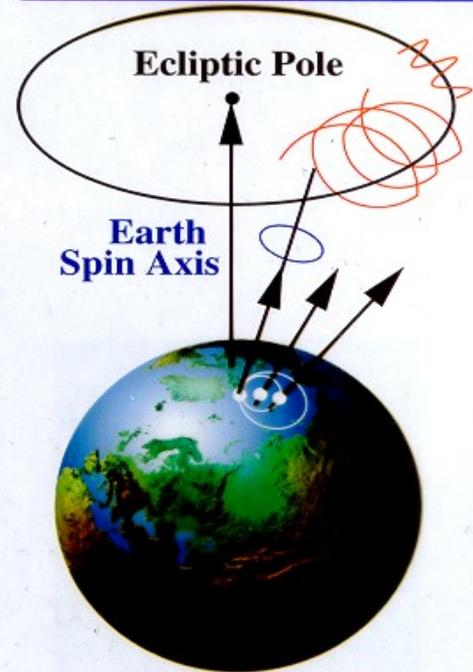
- ◆ A vinculação entre os sistemas terrestre e celeste é dada pelos parâmetros de orientação da Terra: **precessão, nutação e movimento do pólo**, variáveis com o **tempo sideral**. Os modelos de precessão e nutação são muito bem conhecidos atualmente.
- ◆ A rede IGS (*International GNSS Service*) permite monitorar e determinar a variação do movimento de rotação e o movimento do pólo.
- ◆ Com isso pode-se monitorar coordenadas do sistema terrestre (variável) em relação ao celeste (fixo).





# Vinculação entre os sistemas Terrestre e Celeste

## Earth Orientation Representation

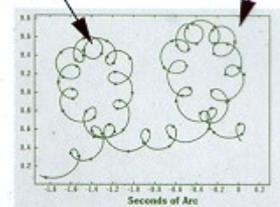


### Transformation between Frames

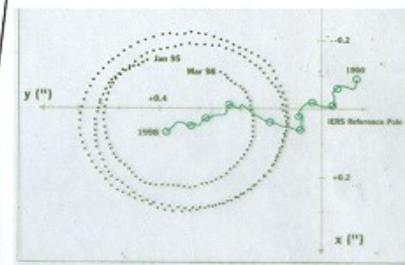
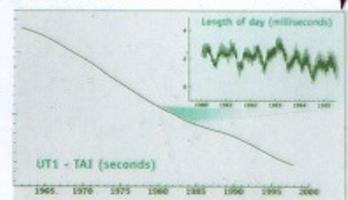
*Inertial*

*Terrestrial*

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = P(\zeta_a, \theta_a, Z_a) N(\Delta\mu, \Delta\nu, \Delta\varepsilon) S(\theta) W(u, v) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$



**Precession & Nutation**

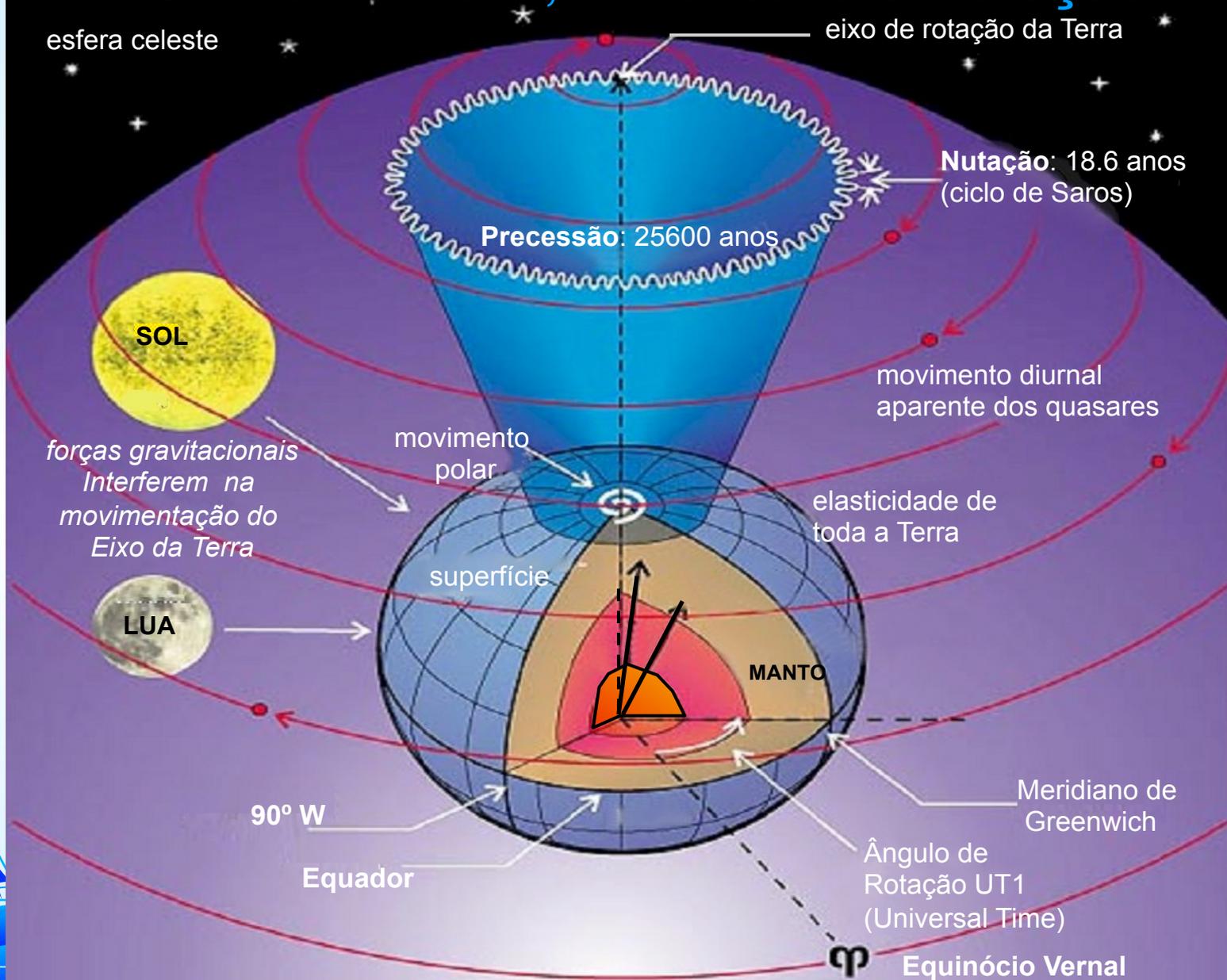


**Pole Components**

**Sidereal Time**



# Movimentação do Eixo de Rotação Terrestre: Movimento Polar, Precessão e Nutação





# Movimento das placas

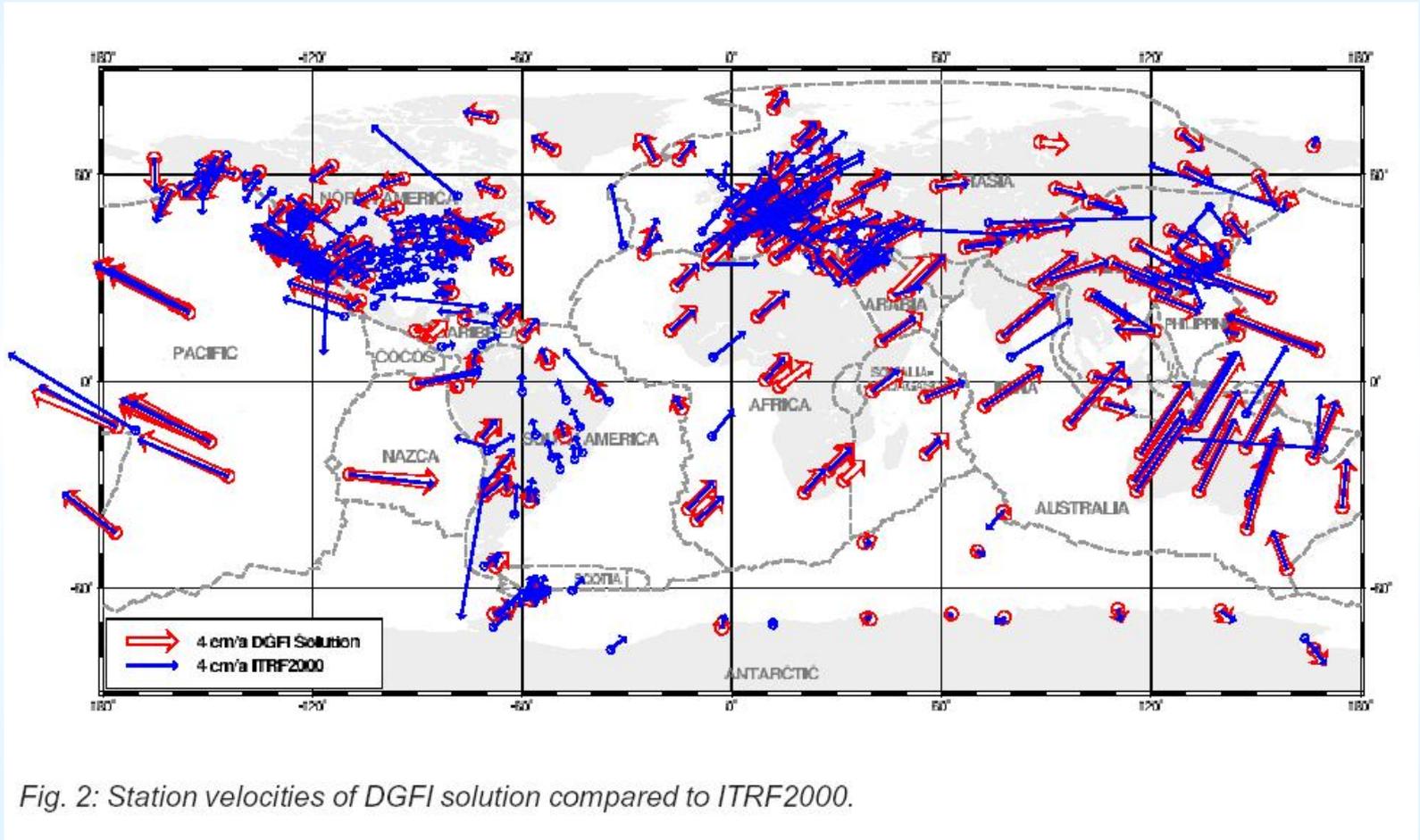


Fig. 2: Station velocities of DGFI solution compared to ITRF2000.

