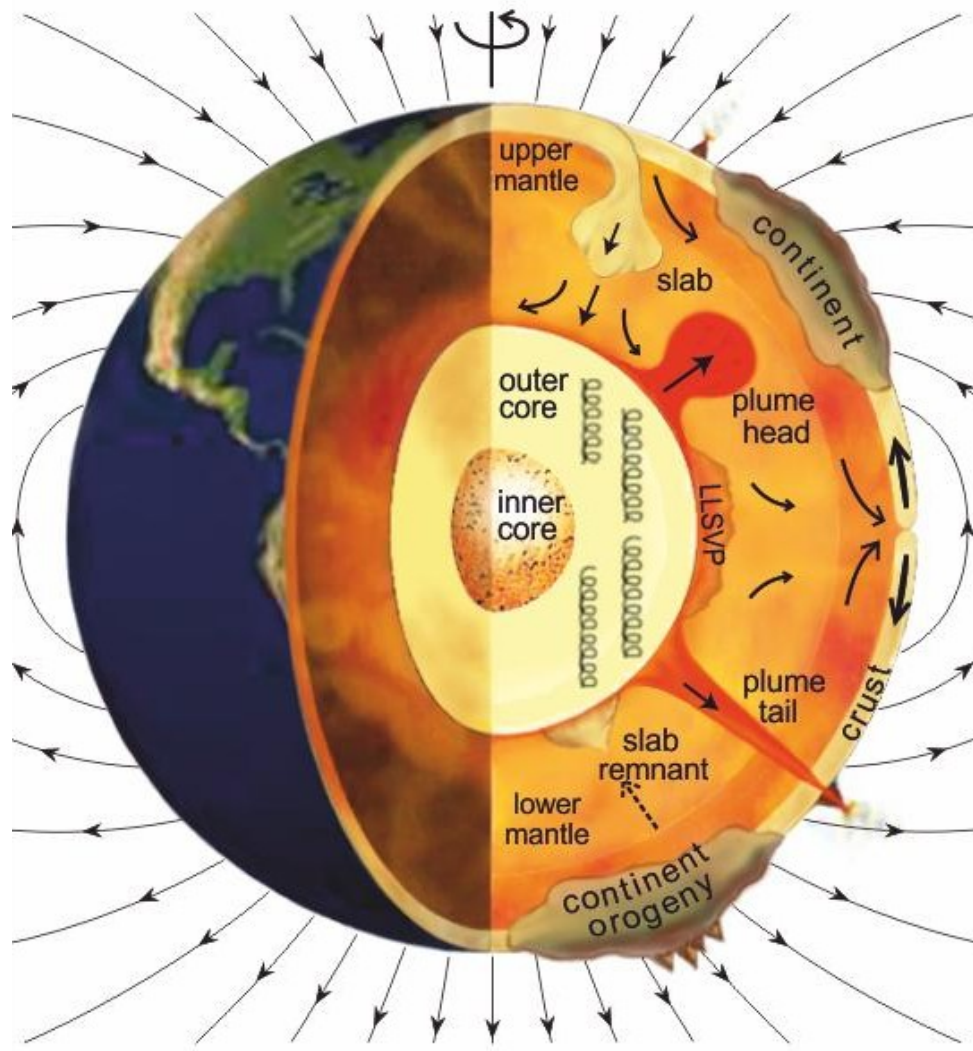


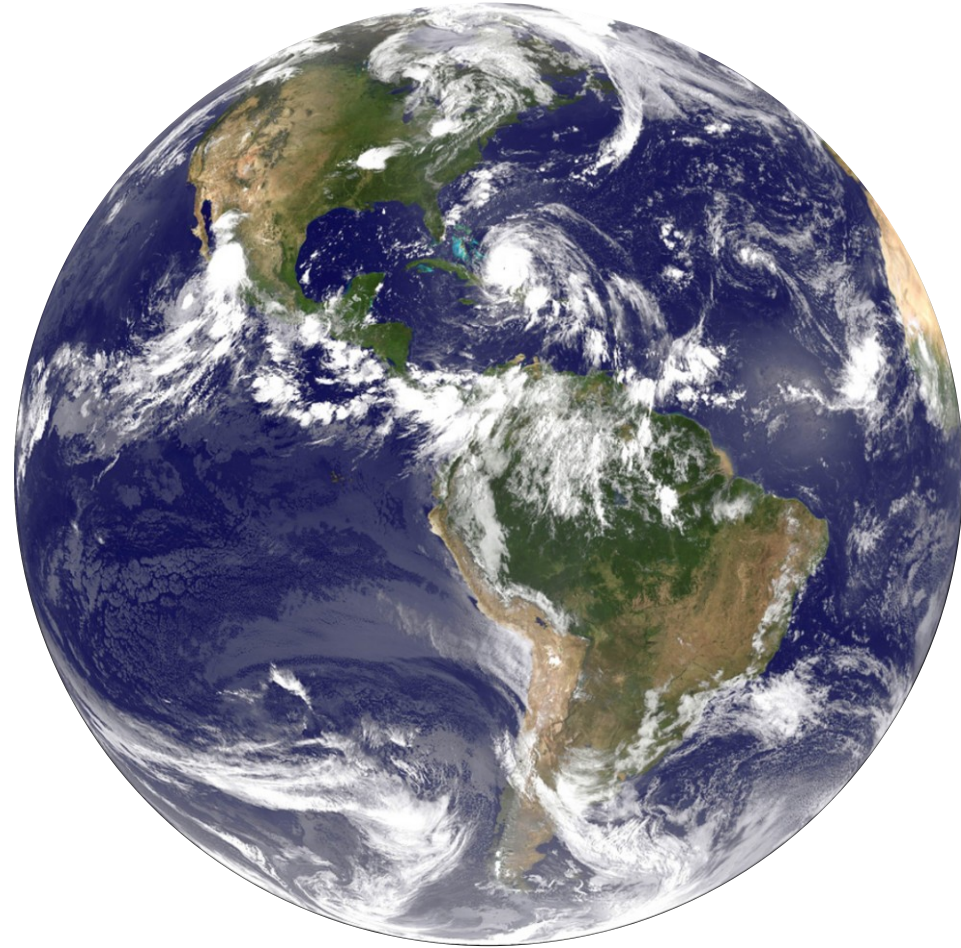
# 5. Interior e Magnetosferas



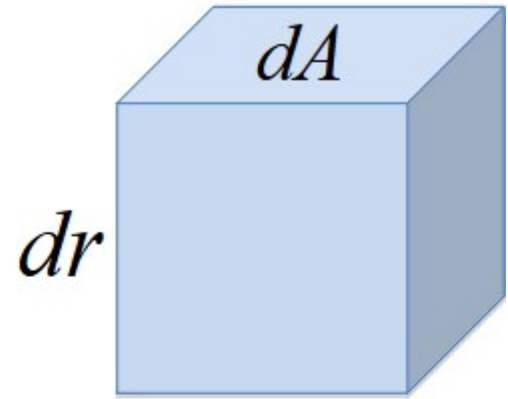
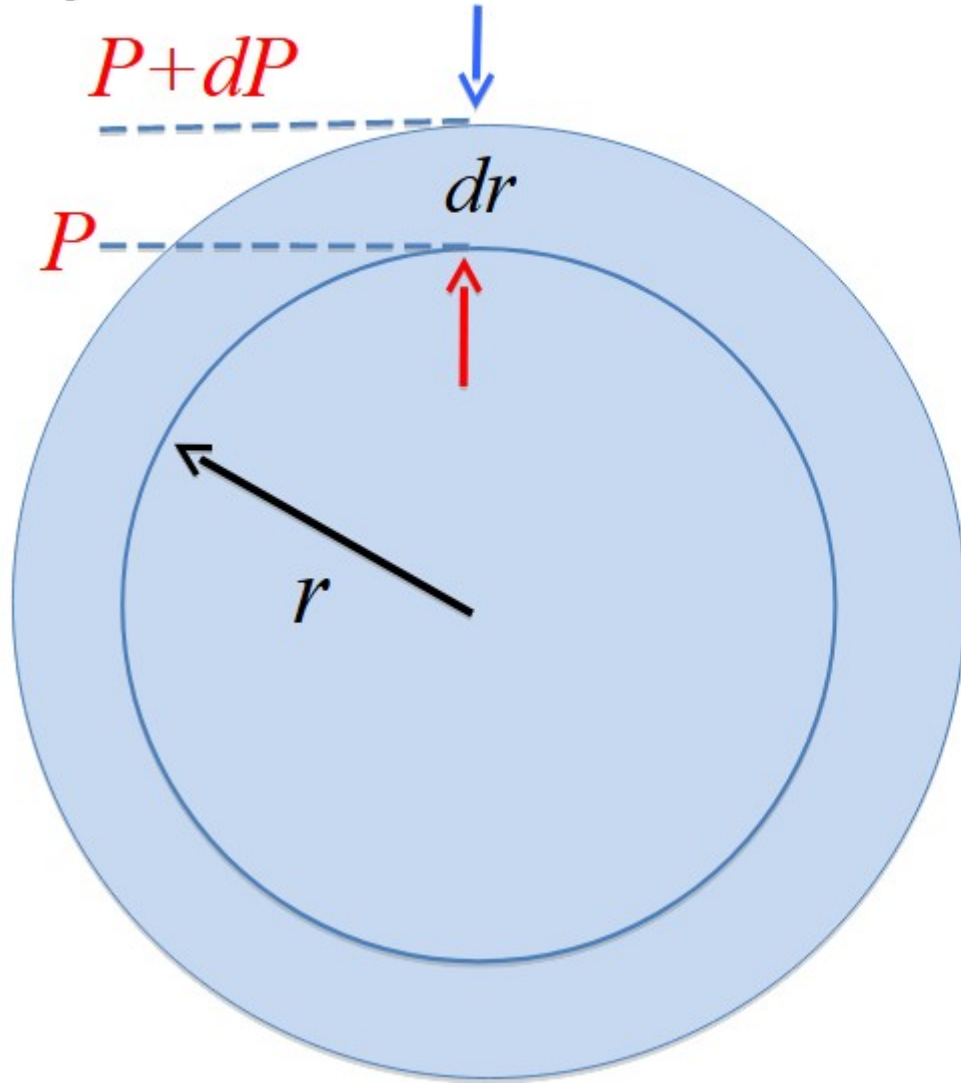
(c) Kay Lancaster, University of Liverpool

Para estudar o interior dos planetas, precisamos de diversas equações básicas, como por ex. a **equação de equilíbrio hidrostático**, que descreve a variação da pressão  $P$  com o raio  $r$  :

$$dP/dr = -\rho g$$



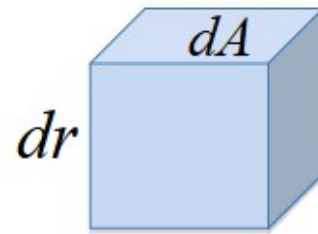
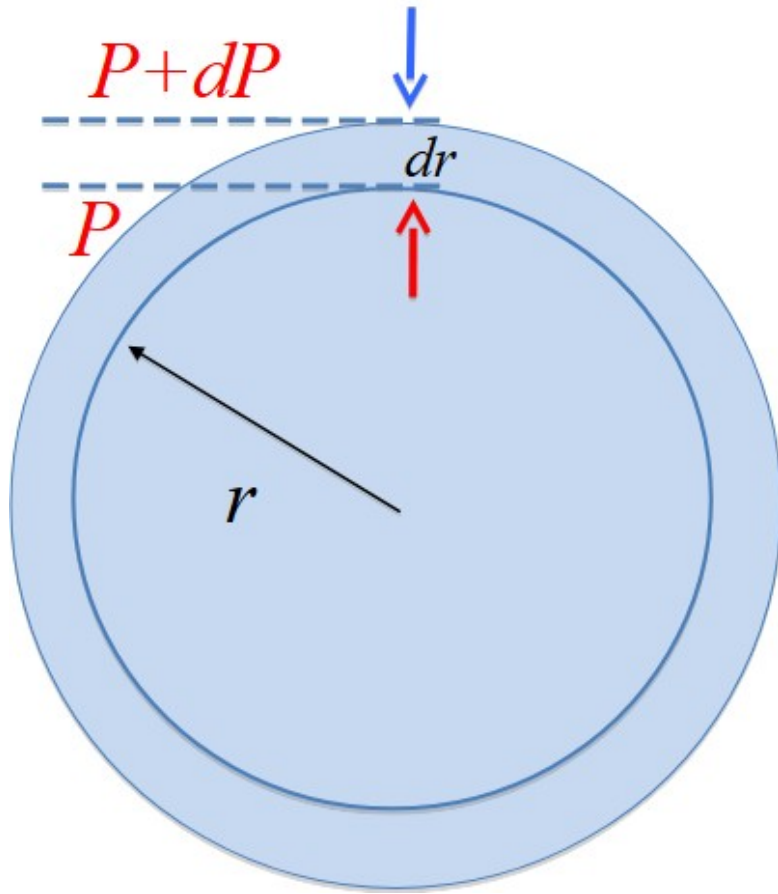
# Equilíbrio hidrostático



$$dV = dA dr$$

$$dM = \rho dV$$

# Equilíbrio hidrostático

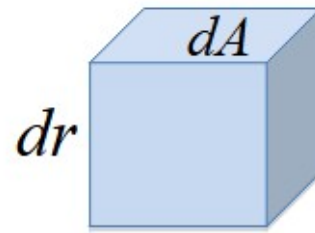
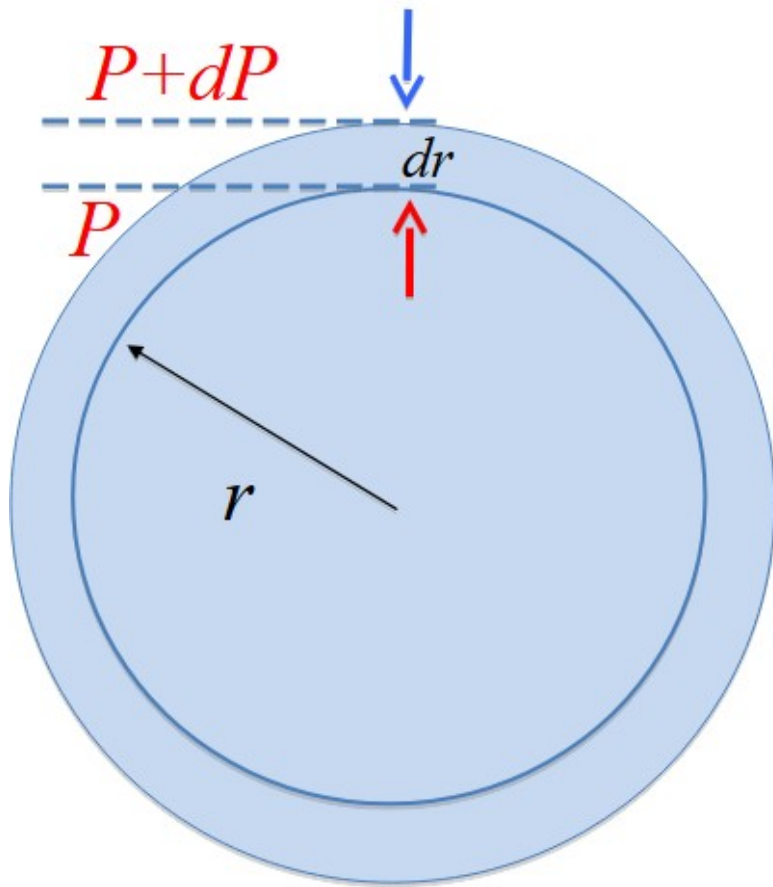


$$dV = dA dr$$
$$dM = \rho dV$$

$$F_{\text{grav}} = -dM \times g = -\rho dV g$$



# Equilíbrio hidrostático

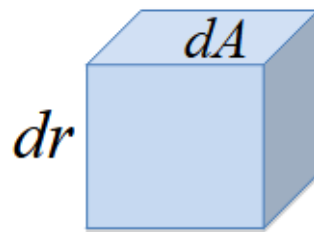
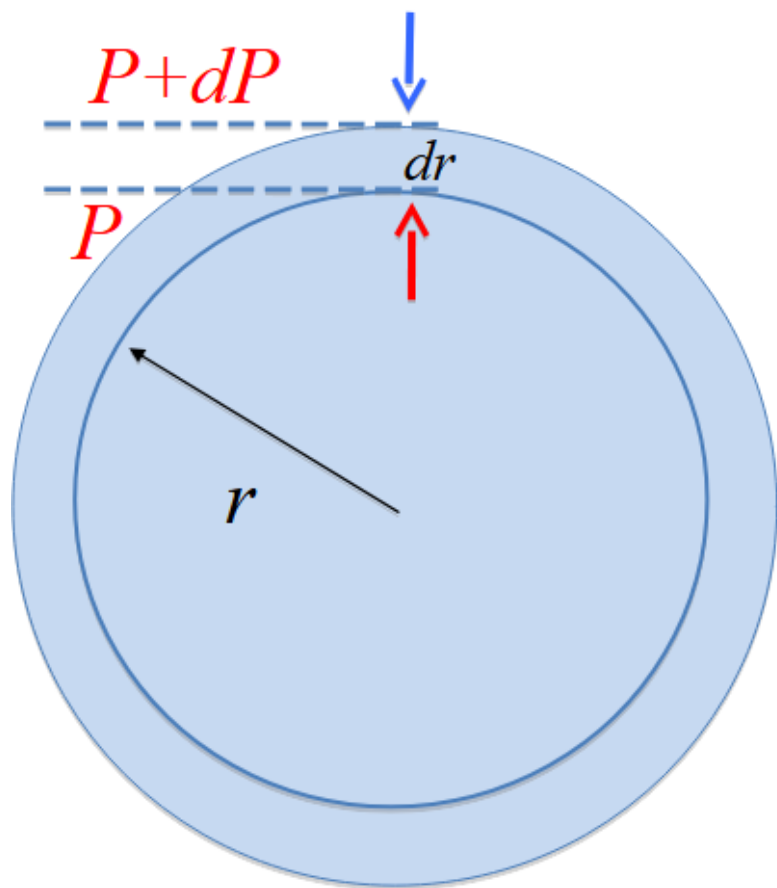


$$dV = dA dr$$
$$dM = \rho dV$$

$$F_{\text{grav}} = -dM \times g = -\rho dV g$$

$$F_{\text{pressão}} = dP \times dA = dP dV/dr$$

# Equilíbrio hidrostático



$$dV = dA dr$$
$$dM = \rho dV$$

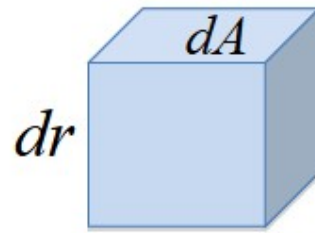
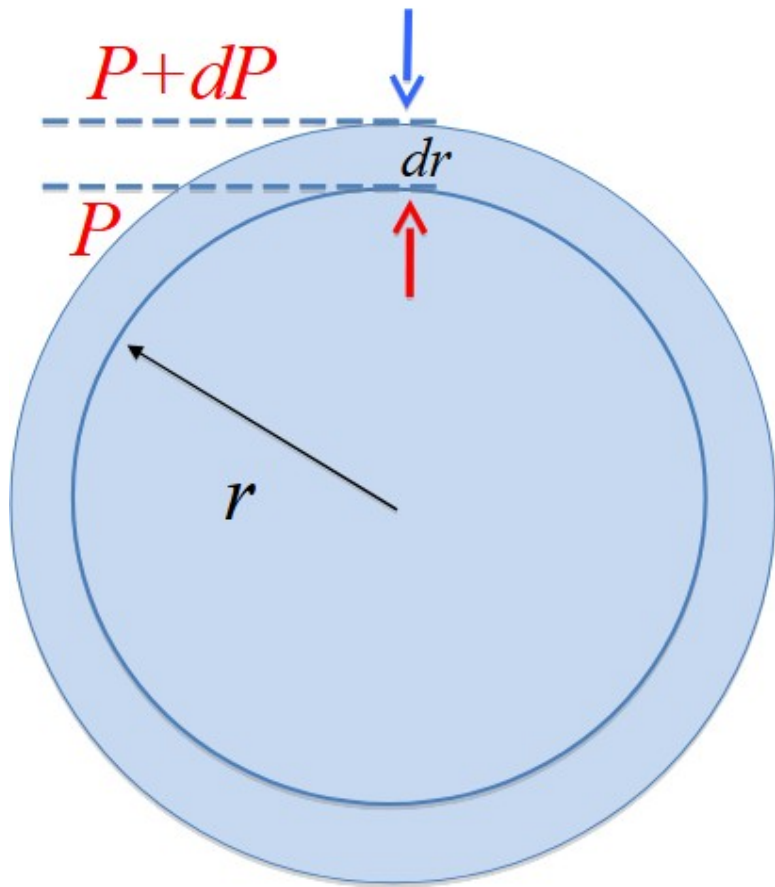
$$F_{\text{grav}} = -dM \times g = -\rho dV g$$

$$F_{\text{pressão}} = dP \times dA = dP dV/dr$$

$$\rightarrow dP dV/dr = -\rho dV g$$

$$dP/dr = -\rho g$$

# Equilíbrio hidrostático



$$dV = dA dr$$
$$dM = \rho dV$$

$$\frac{dP}{dr} = -\rho g$$

$$g \equiv GM_r / r^2$$

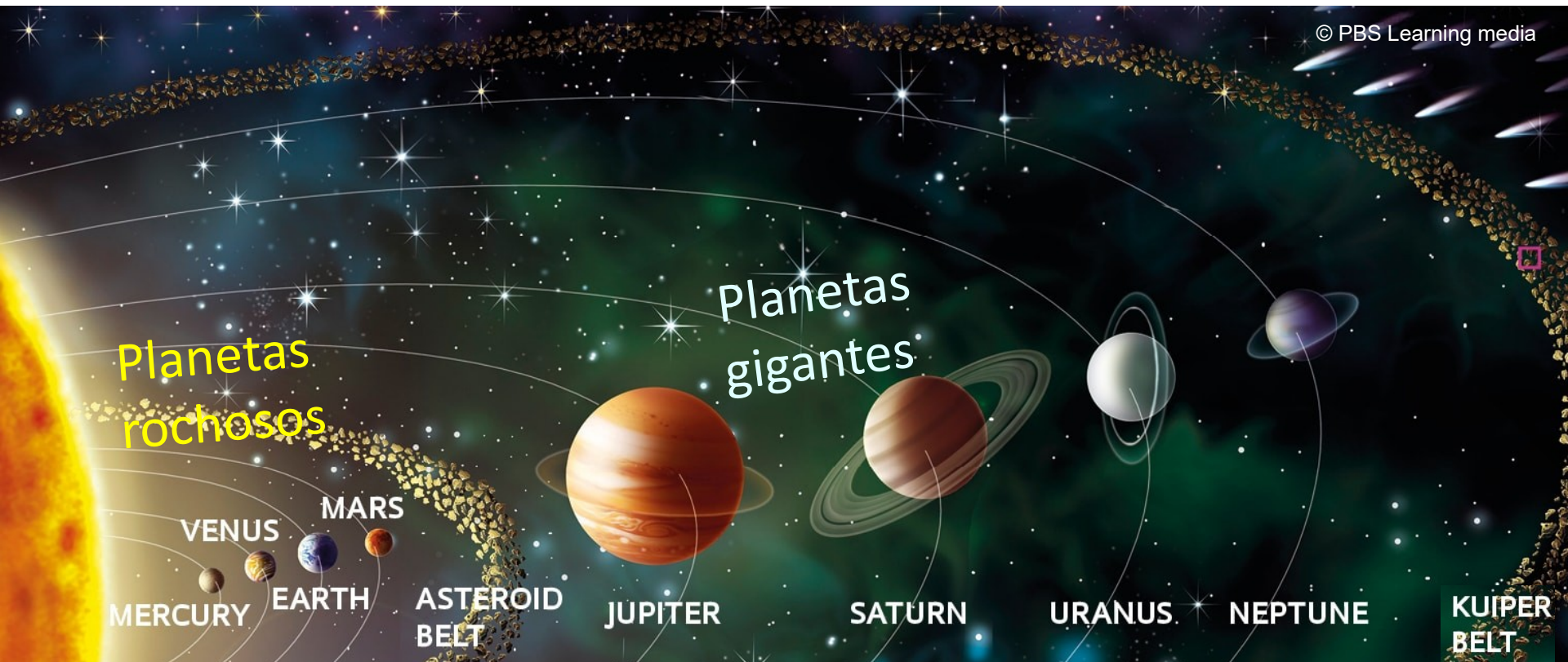
$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{M_r \rho}{r^2}$$

# Definição de planeta (União Astronômica Internacional, 2006):

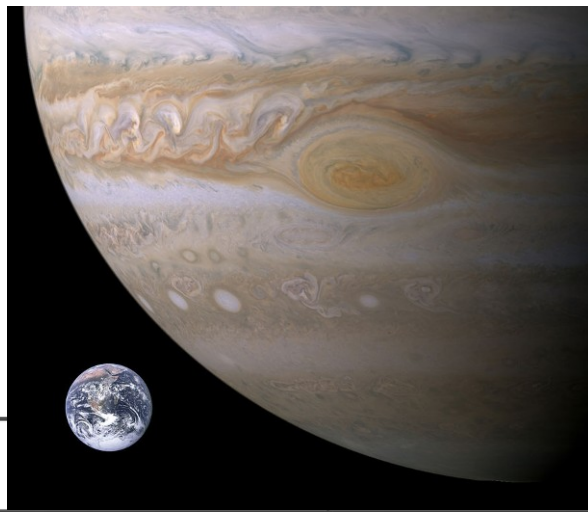
(a) está em órbita ao redor do Sol

(b) tem massa suficiente para sua gravidade superar forças rígidas do corpo, de modo que ele assume um equilíbrio hidrostático (quase redondo) e

(c) limpou a vizinhança em torno de sua órbita.







Dens. média:  $\rho_m = M/V$

$$V = (4/3)\pi R^3$$

Terrestres  
rocha/metal

Gigantes  
gás/gelo/rocha

Características

Characteristic

Terrestrial

Giant

Basic form

Rock

Gas/Ice/Rock

Mean orbital distance (AU)

0.39–1.52

5.2–30.0

Mean “surface” temperature (K)

215–733

70–165

Mass ( $M_{\oplus}$ )

0.055–1.0

14.5–318

Equatorial radius ( $R_{\oplus}$ )

0.38–1.0

3.88–11.2

Mean density ( $\text{kg m}^{-3}$ )

3933–5515

687–1638

Sidereal rotation period (equator)

23.9 h–243 d

9.9 h–17.2 h

Number of known moons

0–2

~~13–63~~ 14–82  
Net - Sat

Ring systems

no

yes

**TABLE 19.1** General Characteristics of the Planets. The range of values for some features of the terrestrial and giant planets ( $M_{\oplus}$  and  $R_{\oplus}$  represent the mass and radius of Earth, respectively).

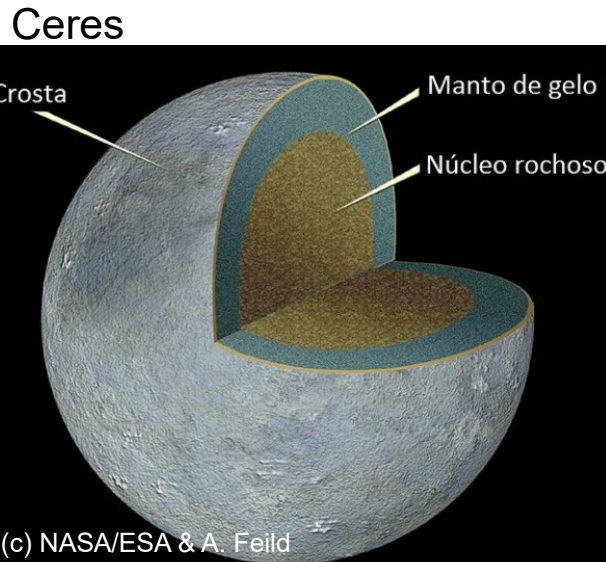
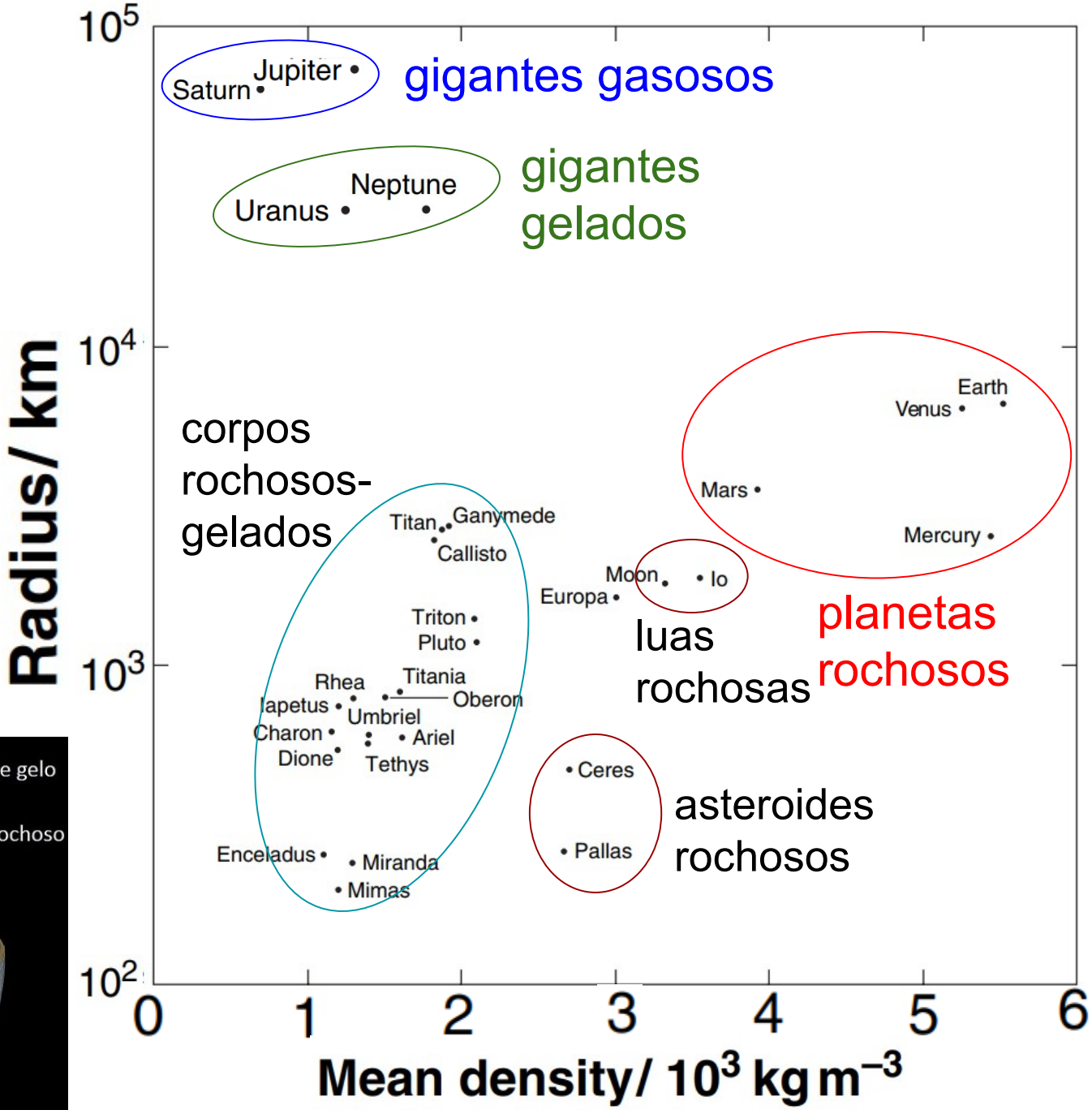
Table 3.1. Physical properties of the planets (Beatty et al., 1999; Hartmann, 2005; Hester et al., 2002)

Planet	Distance from Sun, AU	Radius, km	Mass, $10^{24}$ kg	Density, $\text{g/cm}^3$	Average surface temperature, $^{\circ}\text{C}$
Sun	—	695,510	1,989,000	1.410	+5507
Mercury	0.3871	2440	0.3302	5.43	+167 (−173 to +452)
Venus	0.7233	6052	4.865	5.20	+464
Earth <small>planetas rochosos</small>	1.0000	6378	5.974	5.52	+15 (−90 to +58)
Mars	1.5237	3396	0.6419	3.91	−33 (−140 to +20)
Ceres	2.768	457	0.0012	2.3	
Jupiter <small>gigantes</small>	5.2026	71,492	1898	1.33	−123 to −153
Saturn <small>gasosos</small>	9.5549	60,268	568.5	0.69	−113 to −153
Uranus <small>gigantes</small>	19.2184	25,559	86.83	1.318	−195*
Neptune <small>gelados</small>	30.1100	24,766	102.4	1.638	−204*
Pluto	39.5447	1150	0.0132	2.0	−236
Lua		1737	0.073	3.34	

\* Temperature where the atmospheric pressure is 1.0 bar. Pluto and Ceres are included in this table even though they are dwarf planets.

Raio vs.  
densidade média  
de planetas e  
outros corpos do  
sistema solar.

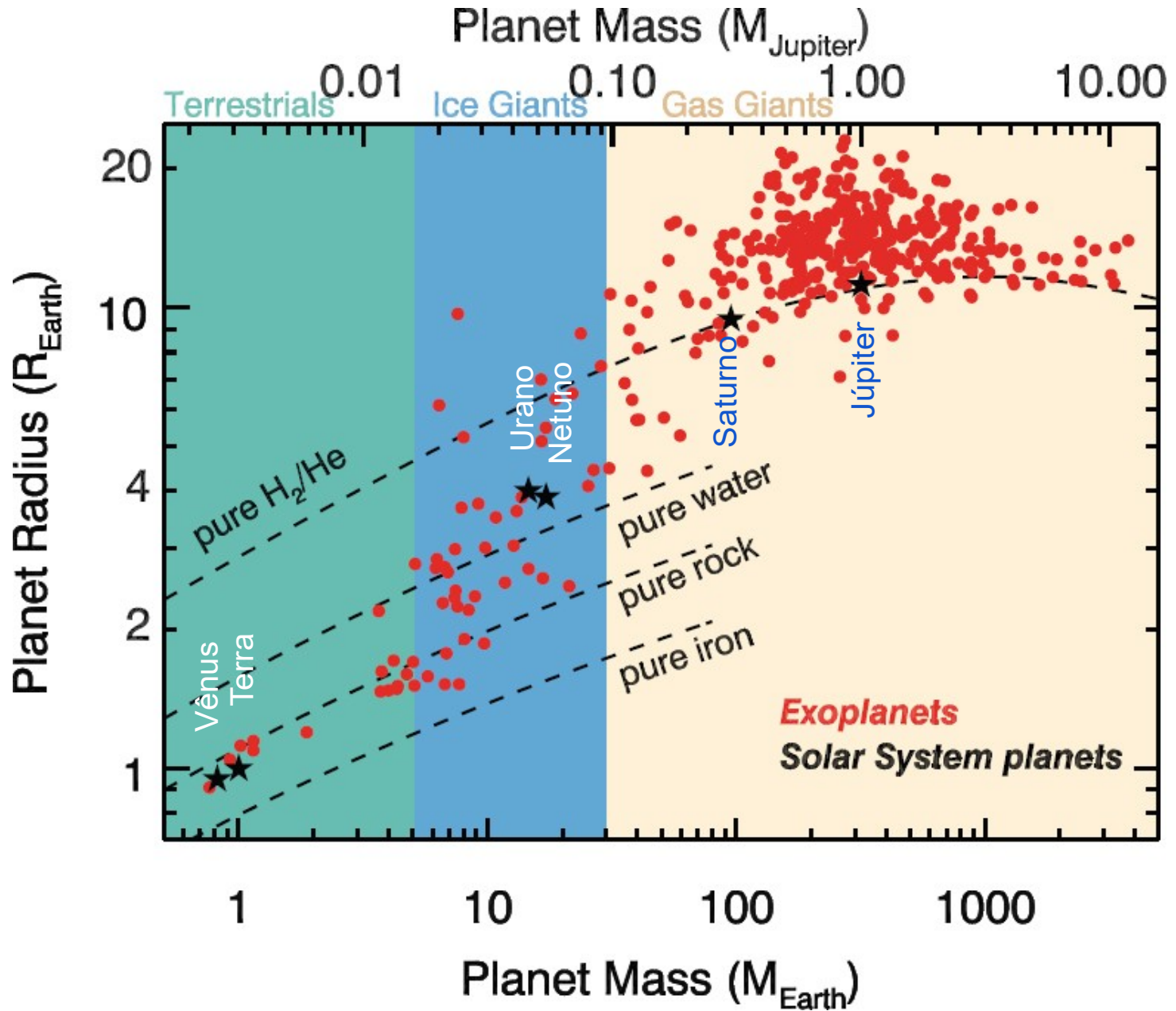
Observamos 3  
tipos de planetas





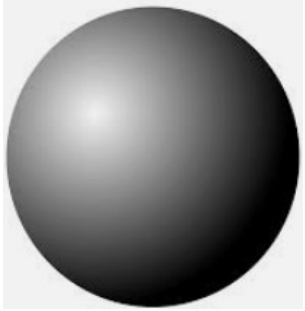
# 3 tipos de planetas:

- rochosos
- gigantes gelados
- gigantes gasosos





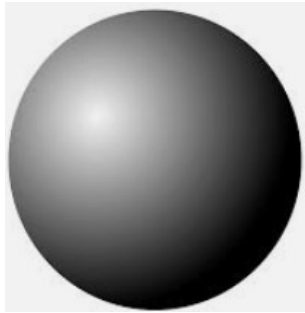
Estudando em mais detalhe o interior de planetas.



Gravidade por um corpo  
perfeitamente esférico:

$$g = GM/r^2$$

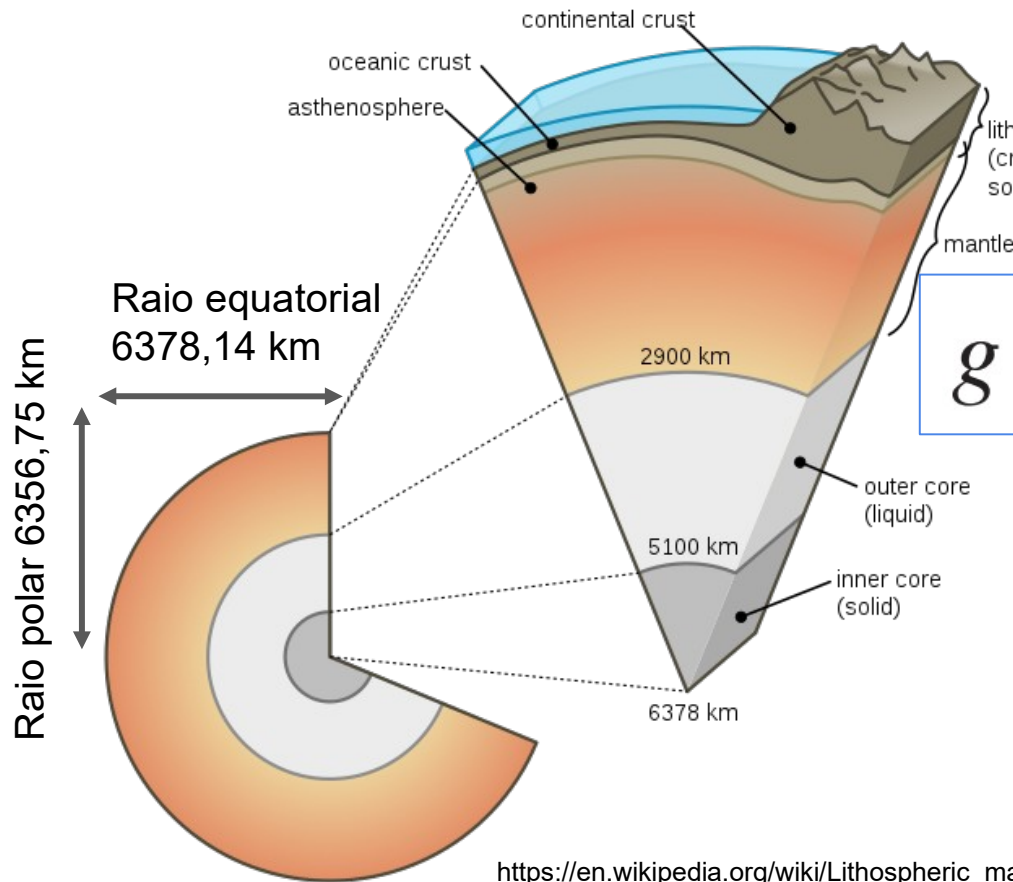
# Estudando em mais detalhe o interior de planetas.



Gravidade por um corpo  
perfeitamente esférico:

$$g = GM/r^2$$

Na prática, os corpos não  
são perfeitamente esféricos  
nem homogêneos.

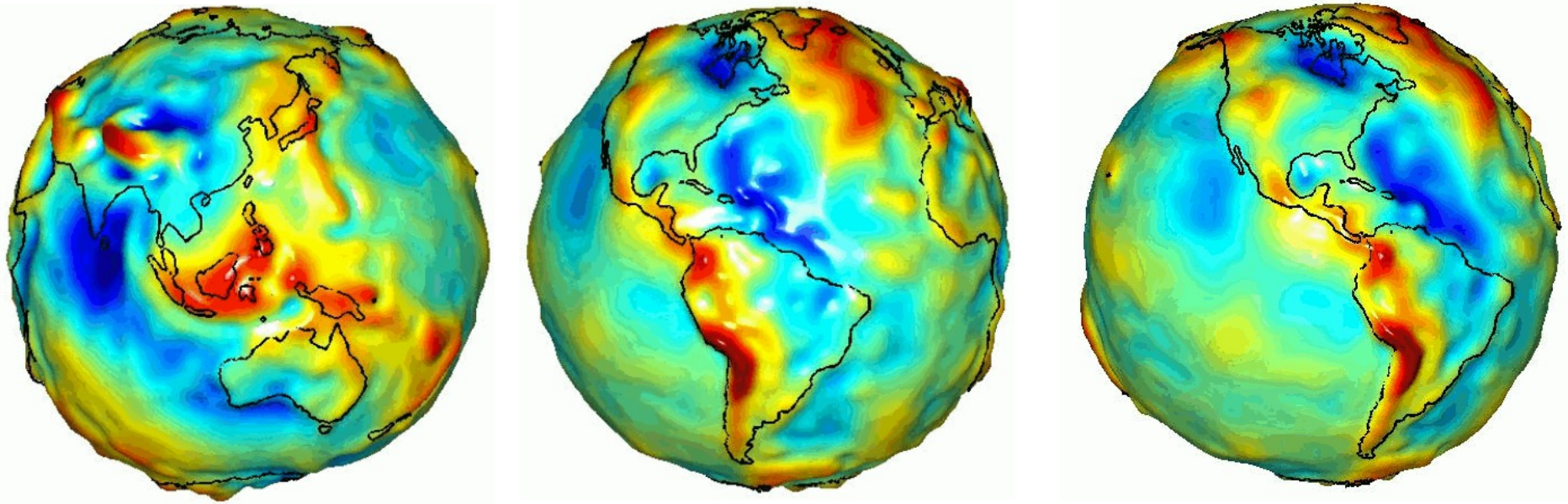


$$g = GM/r^2 + \text{termos extra}$$

Contribuição importante  
devido ao achatamento

Estudando em mais detalhe o interior de planetas.

**Anomalias do campo gravitacional da Terra**, em relação à gravidade de uma Terra idealizada (lisa). Esses dados são importantes para estudar a distribuição de massa no planeta.



Abaixo  
da média



Earth's Gravity Field Anomalies

-5 -4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5

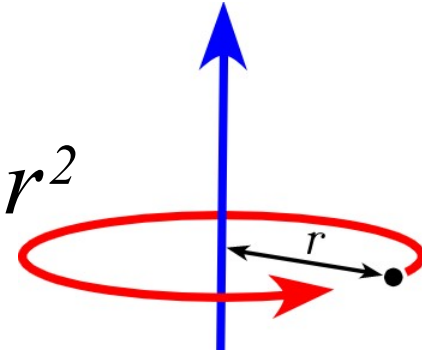
Acima da média

$10^{-4} \text{ m/s}^2$

**Momento de Inércia**  $I$  é o equivalente rotacional de massa, e expressa o grau de dificuldade em alterar o movimento de um corpo em rotação.

Para uma partícula de massa  $m$  a uma distância  $r$  do eixo de rotação:

$$I = mr^2$$



Para um sistema de  $N$  partículas:

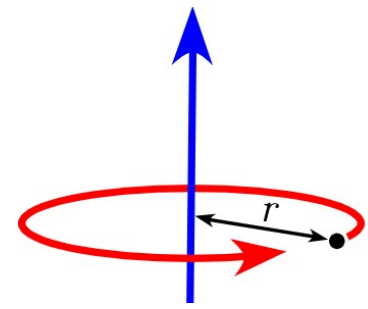
$$I = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2$$

No geral, podemos obter  $I$  integrando:

$$I = \int r^2 dm.$$

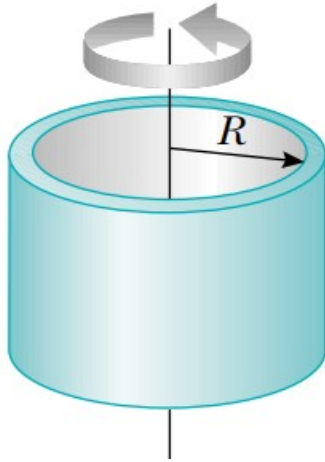


Partícula a distância  $r$  do eixo de rotação  $I = mr^2$



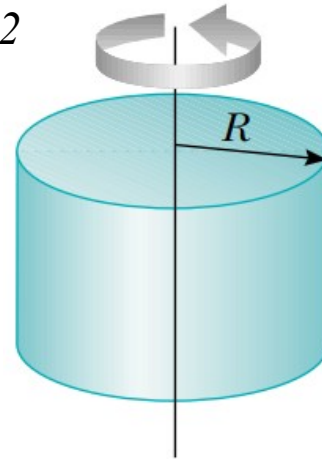
$$I = mR^2$$

Casca  
cilíndrica  
fina



$$I = \frac{1}{2} mR^2$$

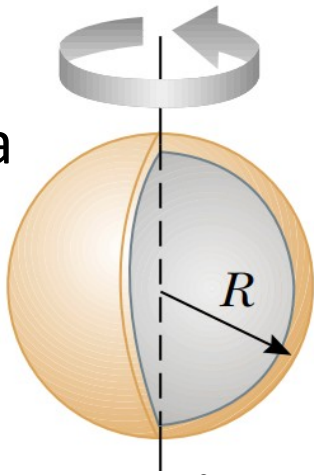
Cilindro  
sólido



$$I = C mR^2$$

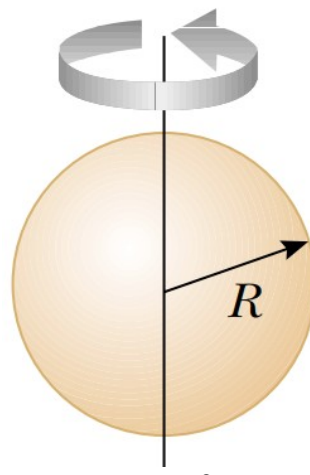
$$I = \frac{2}{3} mR^2$$

Esfera  
oca



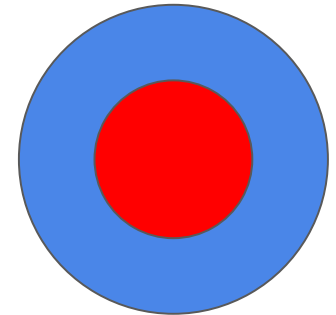
$$I = \frac{2}{5} mR^2$$

Esfera  
sólida



$$I = \frac{2}{6} mR^2$$

Esfera com  
núcleo: raio  $R/2$   
casca  $\Delta r = R/2$   
 $\rho_{\text{núcleo}} = 3\rho_{\text{casca}}$



$$I = 0,67 mR^2$$

$$I = 0,40 mR^2$$

$$I = 0,33 mR^2$$

The moment-of-inertia factors of some planets and the Moon.

$$I = C m R^2$$

Body	$C$
Mercury	0.33
Venus	0.33
Earth	0.331
Moon	0.392
Mars	0.366
Jupiter	0.254
Saturn	0.210
Uranus	0.225
Neptune	0.29
Io	0.38
Europa	0.35
Ganymede	0.31
Callisto	0.36

Planetary Science (Topic S). Cole & Woolfson, 2002

© Barrie Jones, Discovering the Solar System

$$I = \frac{2}{3} m R^2$$

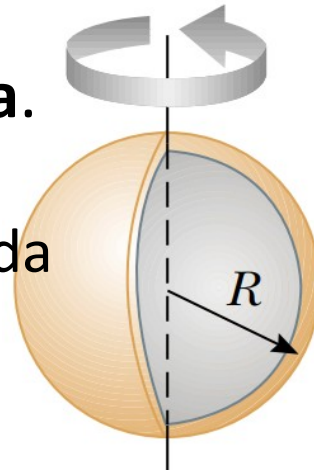
$$I = 0,67 m R^2$$

$$I = \frac{2}{5} m R^2$$

$$I = 0,40 m R^2$$

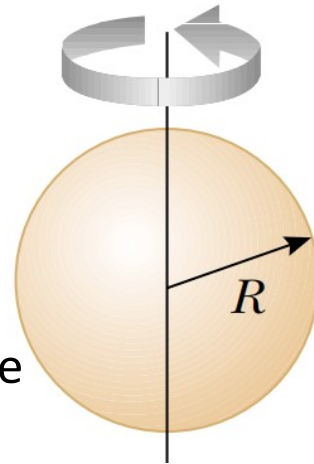
**Esfera oca.**

Massa concentrada próxima à superfície



**Esfera sólida.**

Massa distribuída homogeneamente



**Massa concentrada no interior**

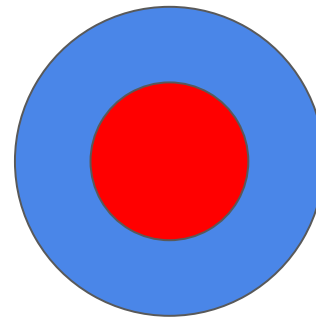
$$I = \frac{2}{6} m R^2$$

$$I = 0,33 m R^2$$

**Núcleo: raio  $R/2$**

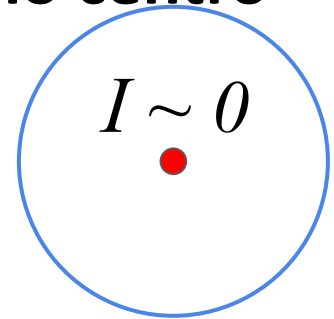
**casca  $\Delta r = R/2$**

$$\rho_{\text{núcleo}} = 3\rho_{\text{casca}}$$

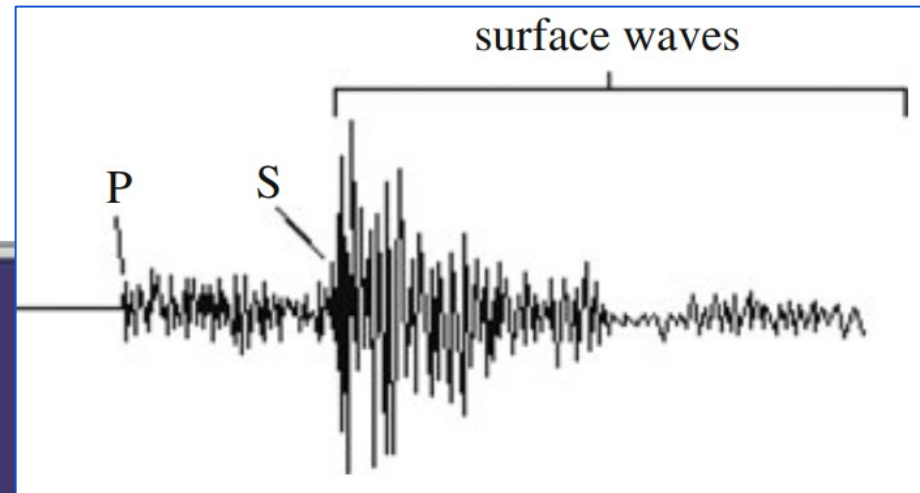
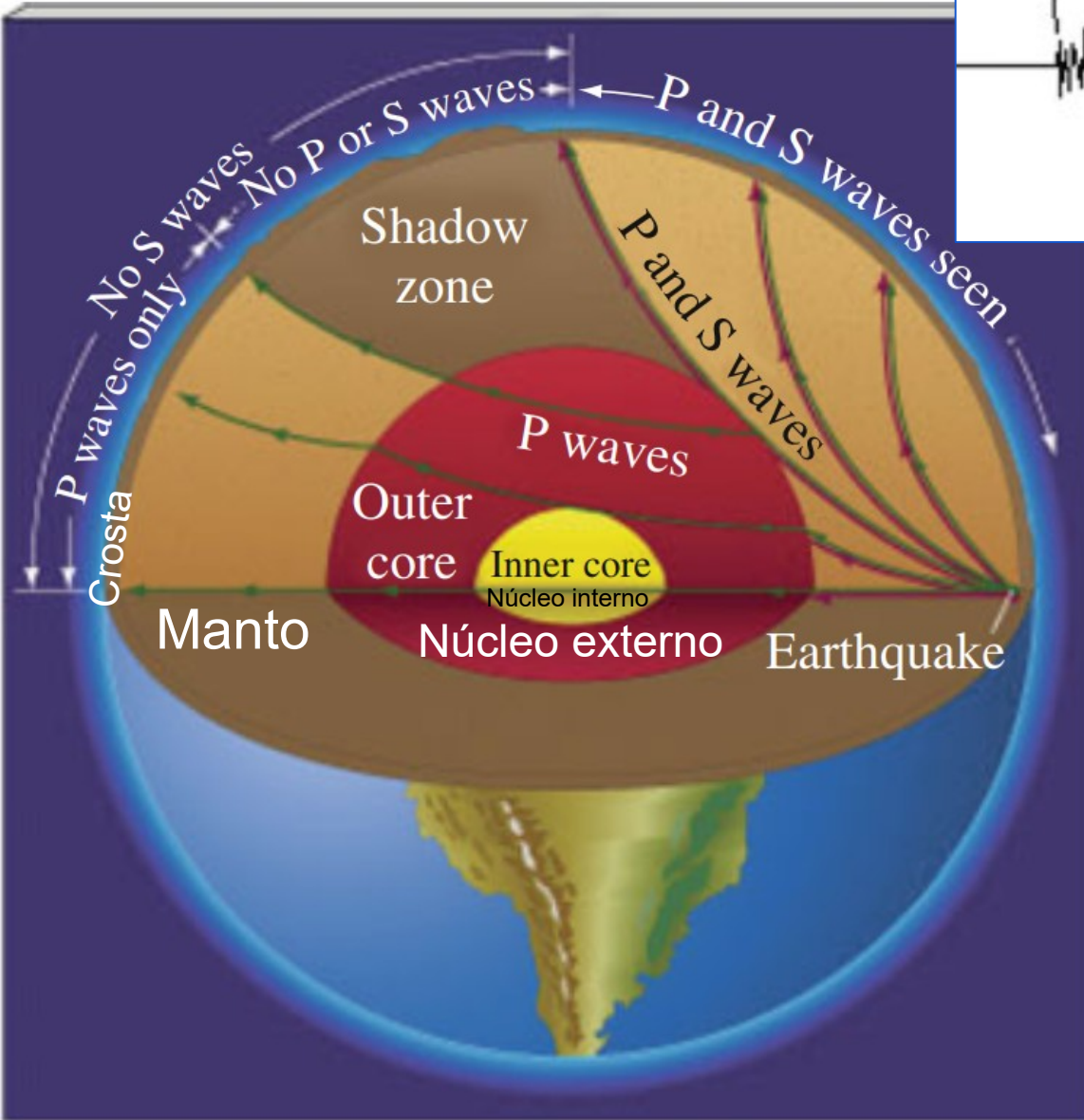


**Massa concentrada no centro**

$$I \sim 0$$



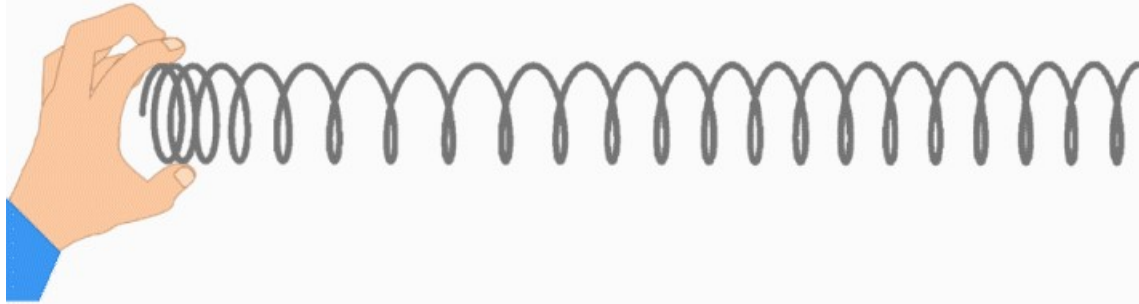
# Sismologia



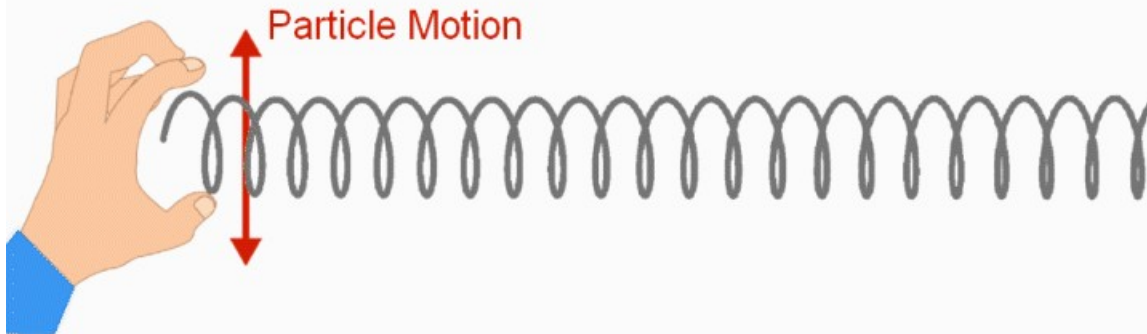
Ondas sísmicas fornecem vínculos importantes para o interior planetário.

**P** (primárias), mais rápidas  
**S** (secundárias), mais lentas

Ondas longitudinais (p.ex., **ondas sísmicas de tipo P**) são paralelas à direção de propagação

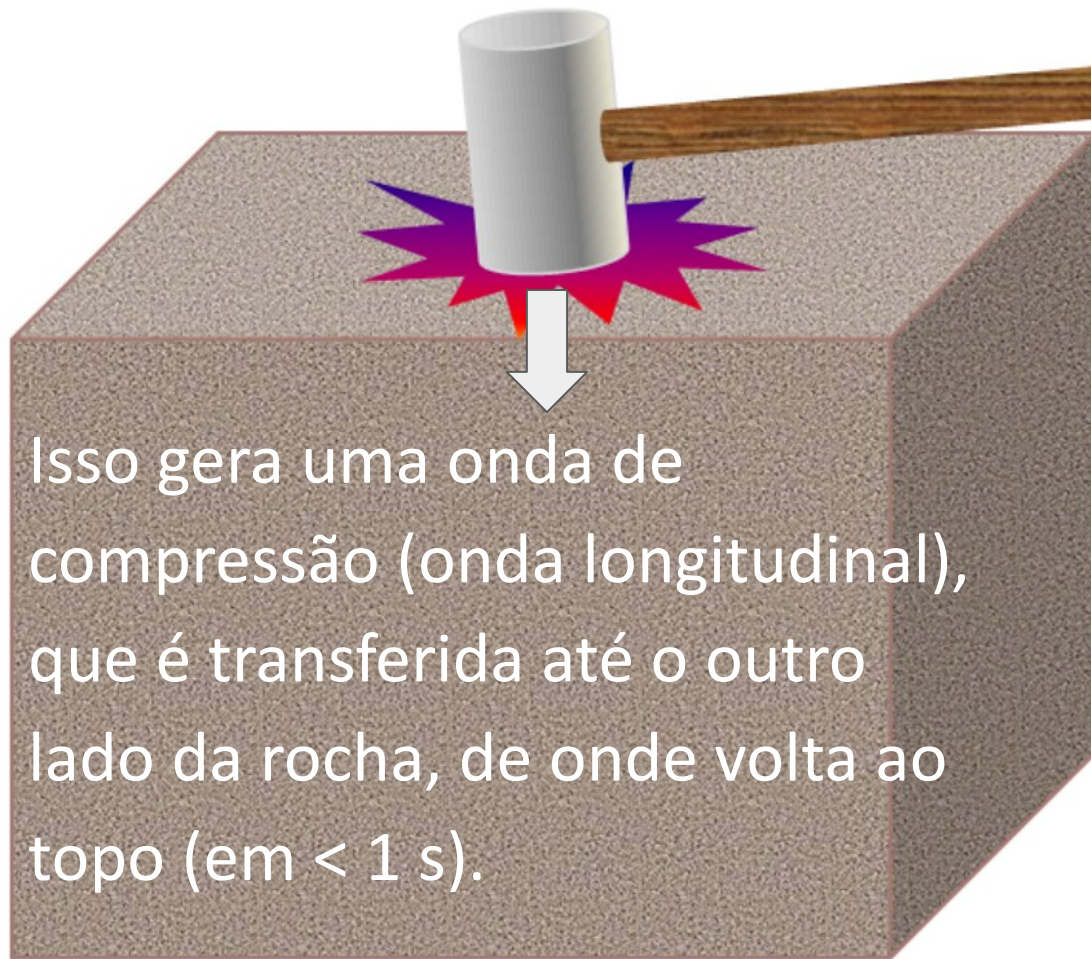


Ondas transversais (p.ex., **ondas sísmicas de tipo S**) são perpendiculares à direção de propagação



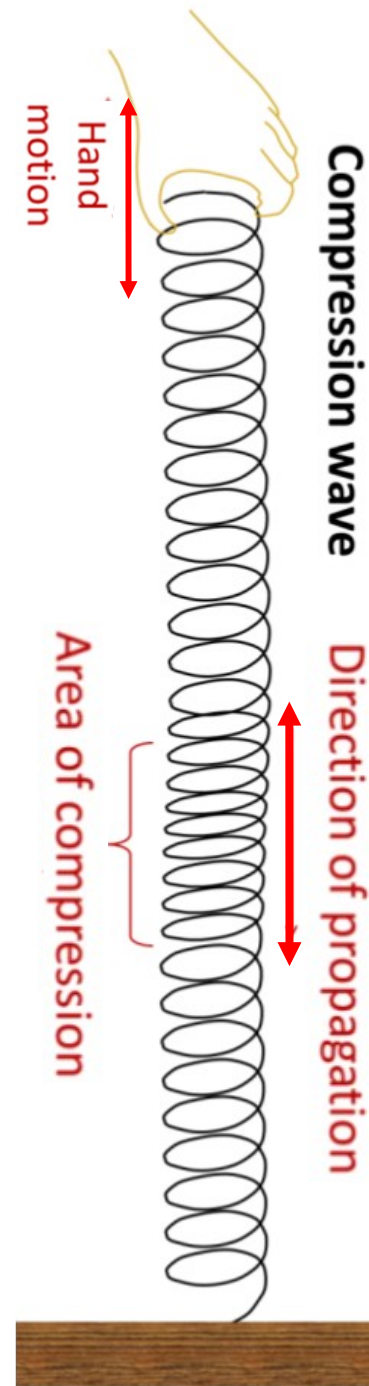


Ao bater uma rocha forte (p.ex. granito) com uma marreta, uma pequena parte será comprimida ( $< 1\text{mm}$ )

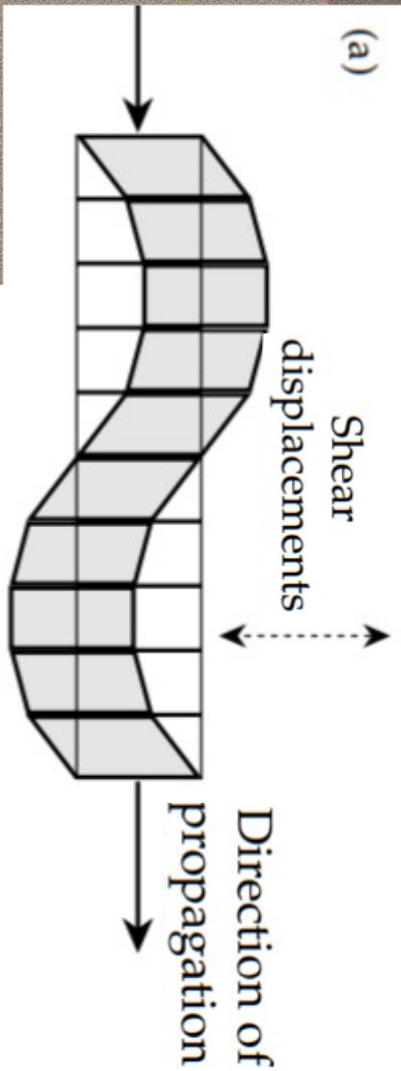
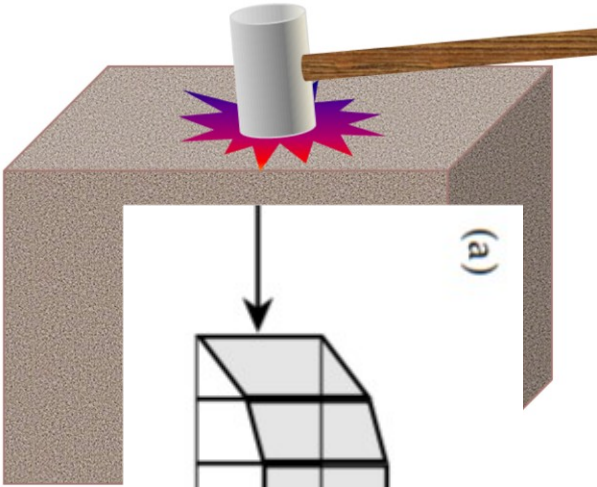


Ondas longitudinais são paralelas à direção de propagação.

Exemplo: ondas sísmicas de tipo P



*Figure 9.3 Hitting a large block of rock with a heavy hammer will create seismic waves within the rock. Please don't try this at home!*



Ao bater a rocha com a marreta, também são criadas ondas transversais, que têm vibrações perpendiculares à direção de propagação.

Exemplo:  
ondas sísmicas de tipo S

# Propagação de ondas sísmicas no interior da Terra.

As ondas S não viajam através do núcleo externo líquido → sombra no outro lado da Terra. As ondas P atravessam o núcleo, mas como as ondas que entram no núcleo são refratadas, também existem zonas de sombra das ondas P

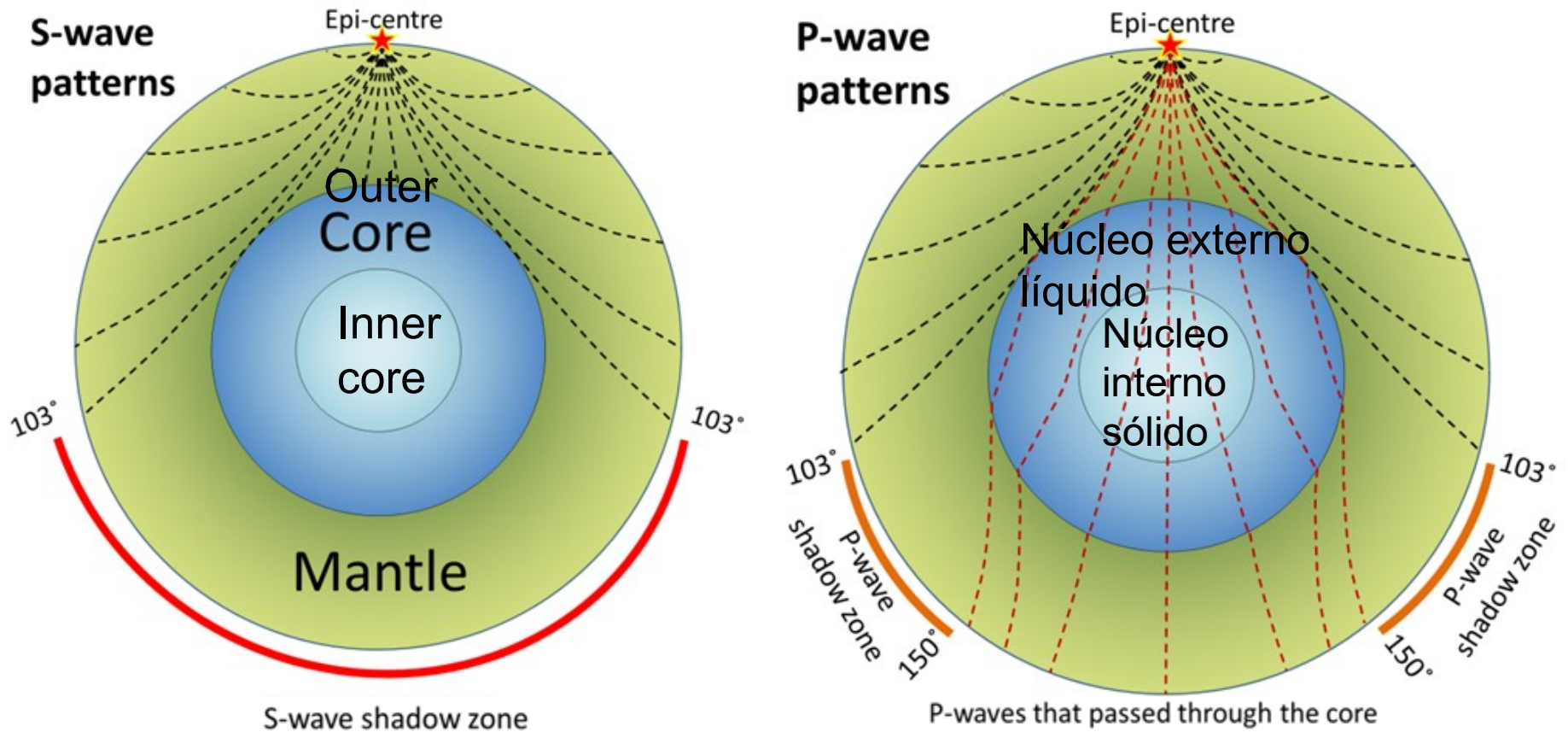
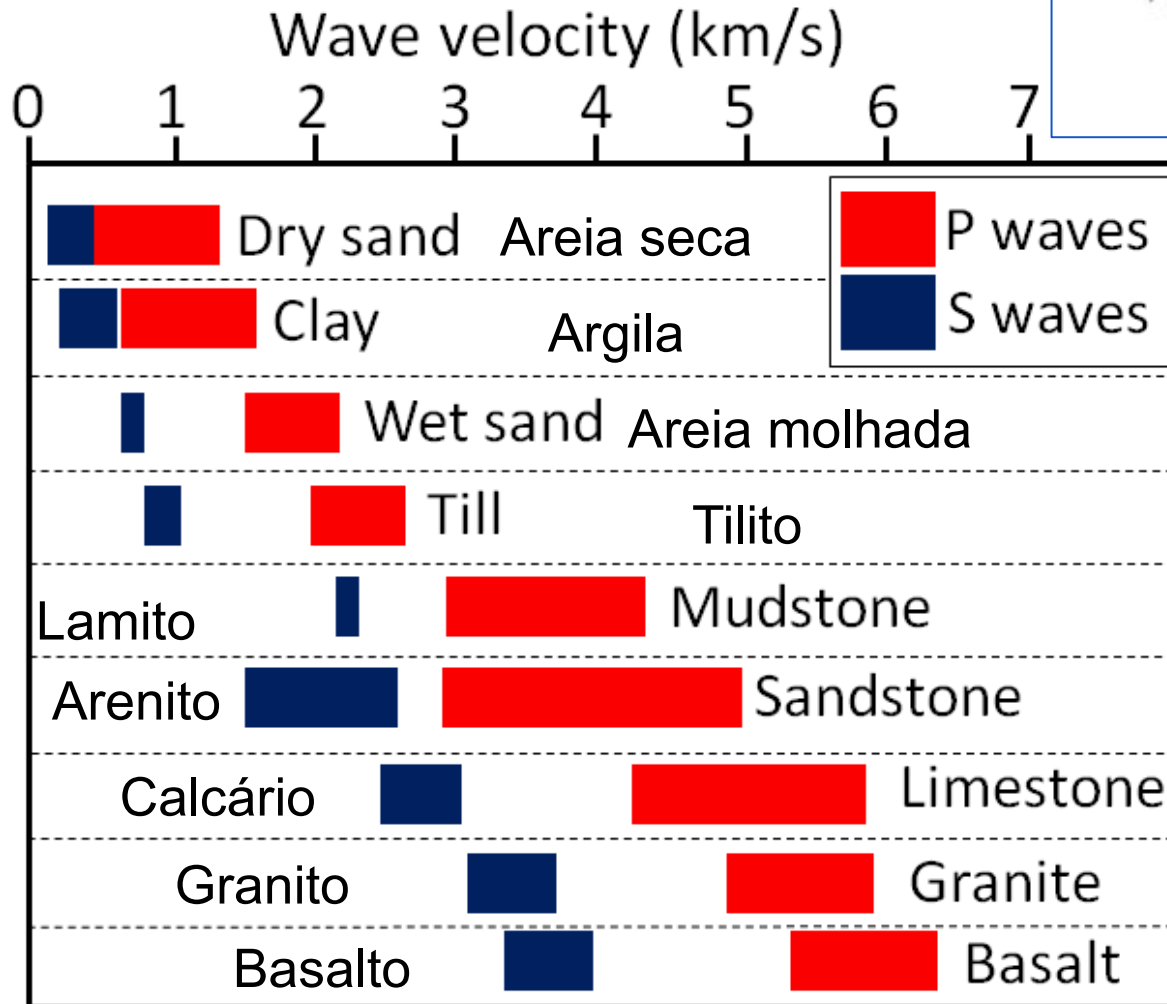
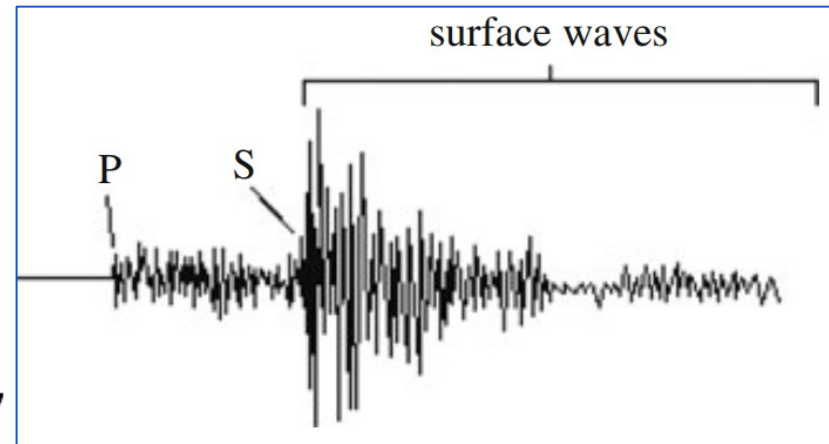


Fig 9.8 Patterns of seismic wave propagation through Earth's mantle and core. S-waves do not travel through the liquid outer core, so they leave a shadow on Earth's far side. P-waves do travel through the core, but because the waves that enter the core are refracted, there are also P-wave shadow zones.



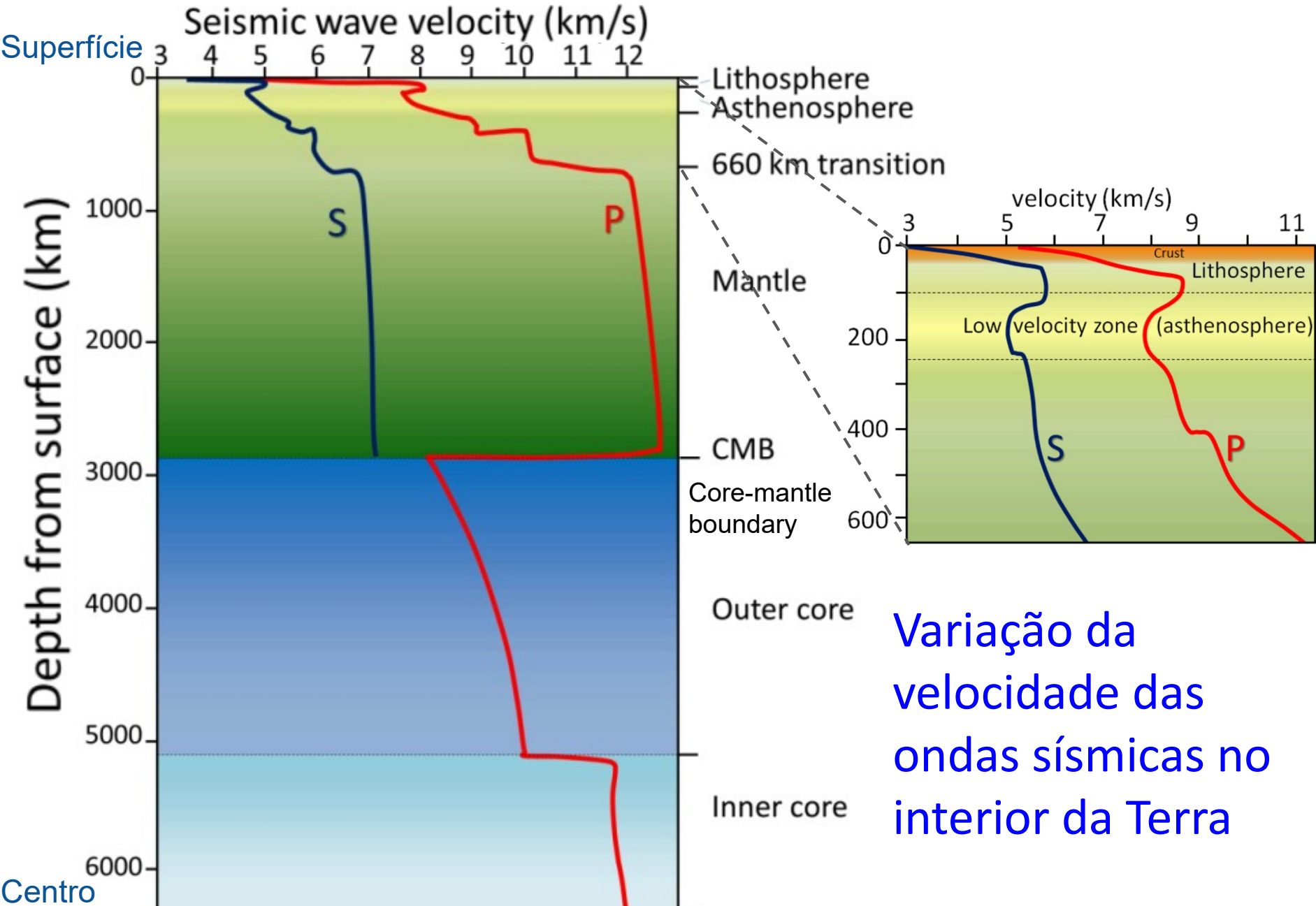
As ondas de **tipo P** são mais rápidas que as de **tipo S**



Ambas ondas são mais rápidas em rochas sólidas

Figure 9.5 Typical velocities of P-waves (red) and S-waves (blue) in sediments and in solid crustal rocks [SE after: US Env. Prot. Agency]





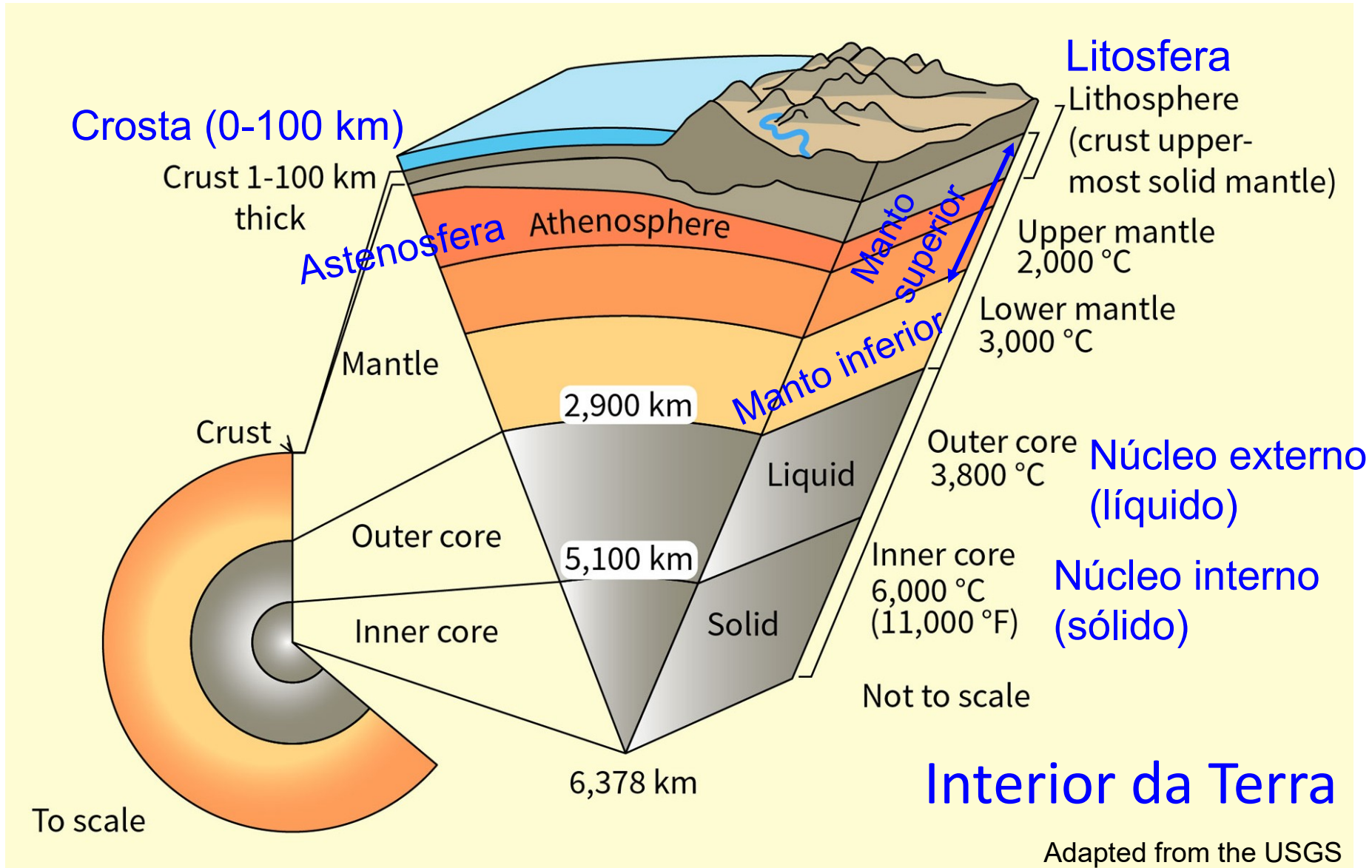
Varição da  
 velocidade das  
 ondas sísmicas no  
 interior da Terra

Figure 9.6a P-wave and S-wave velocity variations with depth in Earth. [SE]





**Litosfera:** rocha rígida. **Astenosfera:** camada mais plástica. **Manto:** camada mais viscosa. **Núcleo externo** é líquido e **interno** é sólido



NOTA: maior viscosidade → maior resistência

**Crusta**  
0-100 km  
(silicatos)

Composição  
Composition

oceânica:  
basalto,  
contín.:  
granito

**Crust**  
(bimodal in composition approximated by basalt and granite)

**Manto**  
100-2900 km  
(silicatos)

**Mantle**  
(mostly Mg-silicates with some Fe- and Al-bearing phases)

**Núcleo**  
2900-6370 km  
(ferro, nickel)

**Core**  
(Fe-Ni metal with minor light elements, such as H, O, C, S, or Si)

continental crust

oceanic crust

Propriedades  
mecânicas  
Rheology

**Litosfera**  
0-100 km  
(rígida)

**Lithosphere**  
(rigid)  
**Asthenosphere**  
(ductile)

**Asthenosfera**  
100 - 350 km  
(plástica)

**Lower mantle**  
(more rigid than the asthenosphere, but capable of flow)

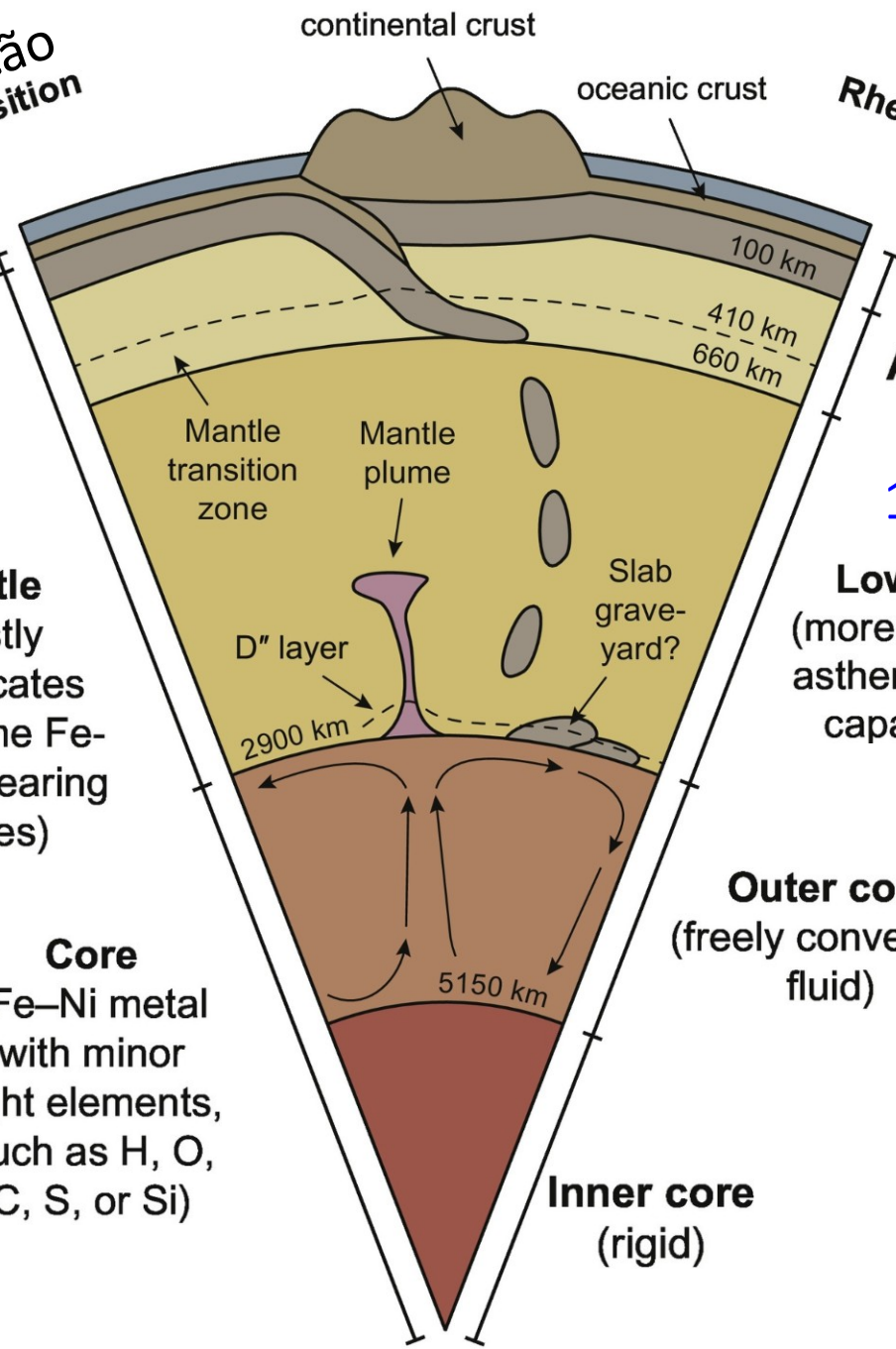
**Manto inferior**  
350-2900 km  
(viscosa)

**Outer core**  
(freely convecting fluid)

**Núcleo externo**  
2900 - 5100 km  
(líquido, convectivo)

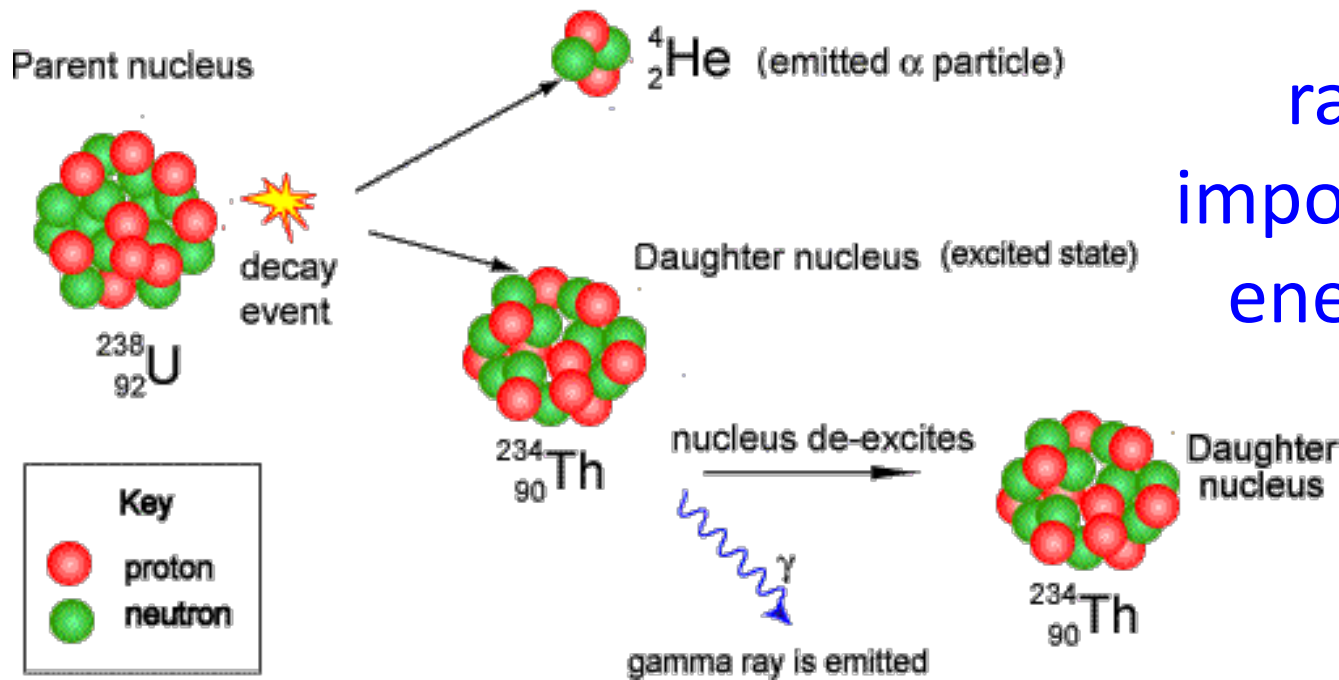
**Inner core**  
(rigid)

**Núcleo interno**  
5100 - 6370 km  
(sólido)





## Alpha Decay of a Uranium-238 nucleus

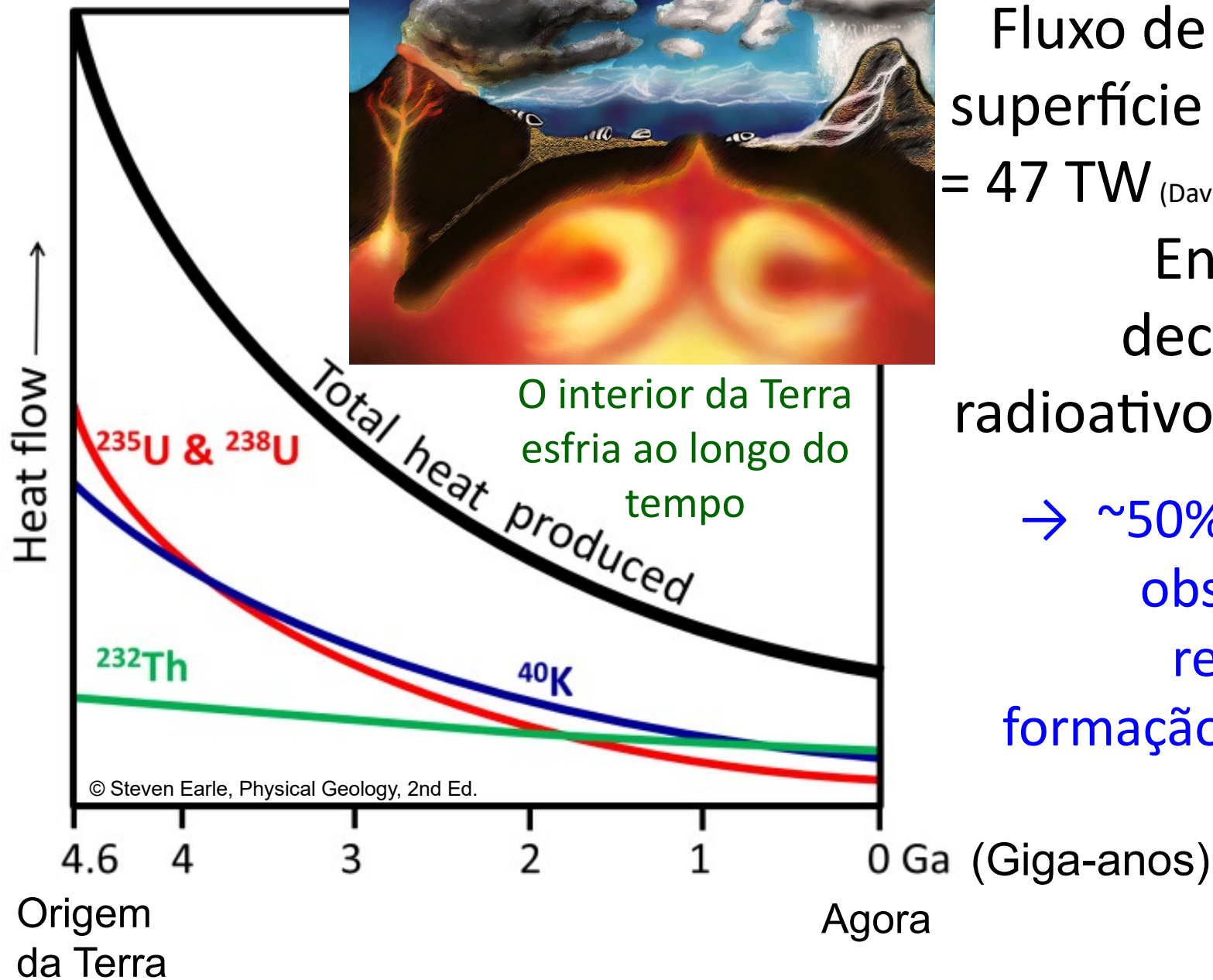


O decaimento radioativo é uma importante fonte de energia no interior da Terra

**Table 4.4** Radioactive isotopes that are important energy sources

Isotope	$^{26}\text{Al}$	$^{235}\text{U}$	$^{40}\text{K}$	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$
Half-life/ Ma	0.73	710	1300	4500	13 900
Power <sup>a</sup> /10 <sup>-12</sup> Wkg <sup>-1</sup>	10 <sup>4</sup>	3	30	2	1

<sup>a</sup>This is per kg of 'typical' rocky material 4600 Ma ago. The values are only illustrative.



Fluxo de calor na superfície da Terra = 47 TW (Davies & Davies 2010)

Energia do decaimento radioativo ~24 TW (Die 2012)

→ ~50% do calor observado é residual da formação da Terra

**Resfriamento de planetas.** Considerando planetas com fontes de energia e coeficientes de transferência de calor similares, planetas menores perdem sua energia mais rapidamente do que planetas maiores.

- A perda de energia interna é proporcional à área  $A$

$$A = 4\pi R^2$$

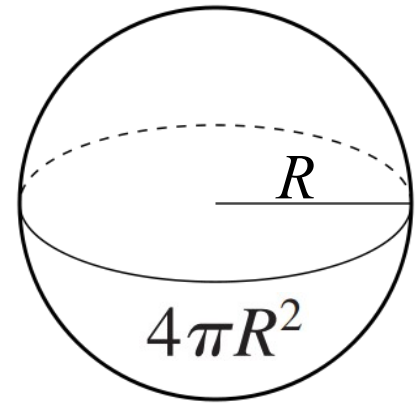
- A taxa de liberação de energia interna aumenta com a massa  $M$

$$M = 4\pi R^3 \rho_m / 3$$

- Taxa de perda de energia interna por unidade de massa é  $A/M$  :

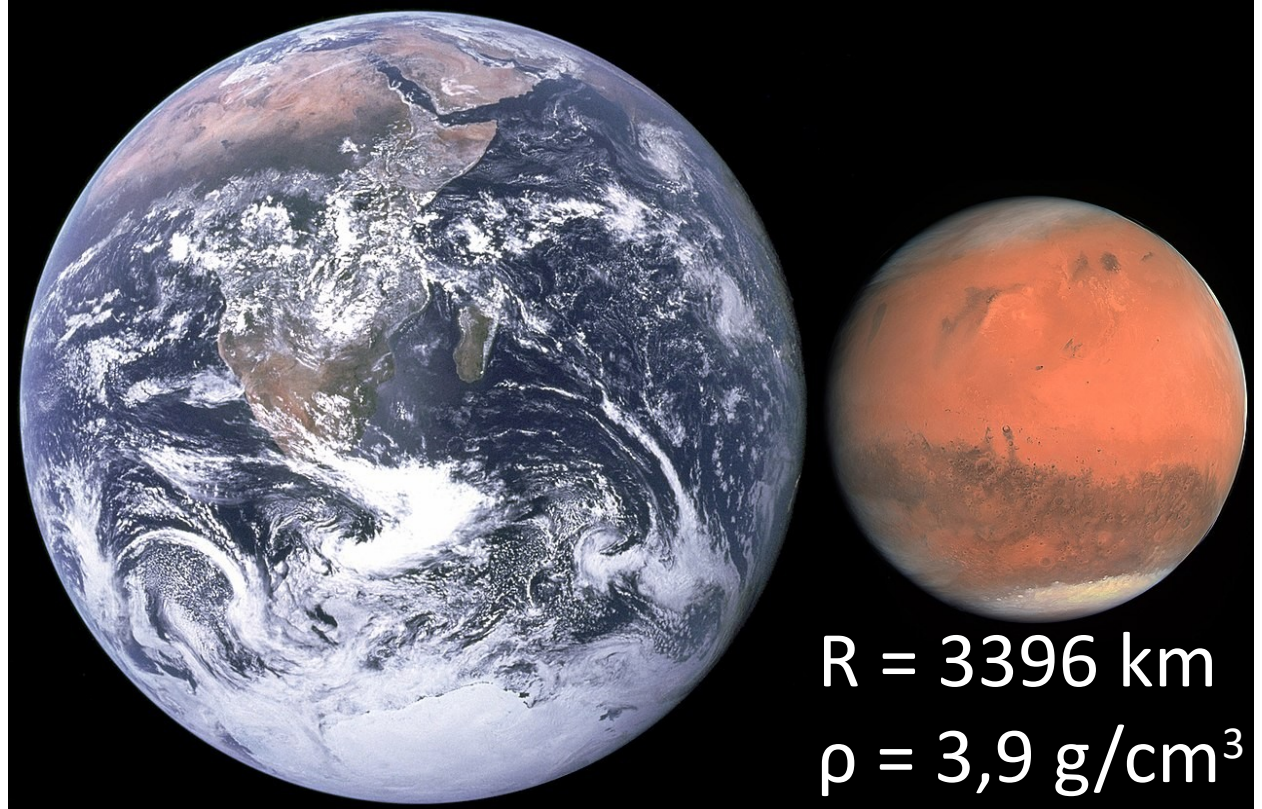
$$\frac{A}{M} = \frac{4\pi R^2}{4\pi R^3 \rho_m / 3} = \frac{3}{R\rho_m}$$

→ **Corpos com raios menores perdem sua energia mais rápido**



Como o resfriamento é proporcional a  $1/R\rho$ , Marte esfriou muito mais rapidamente que a Terra

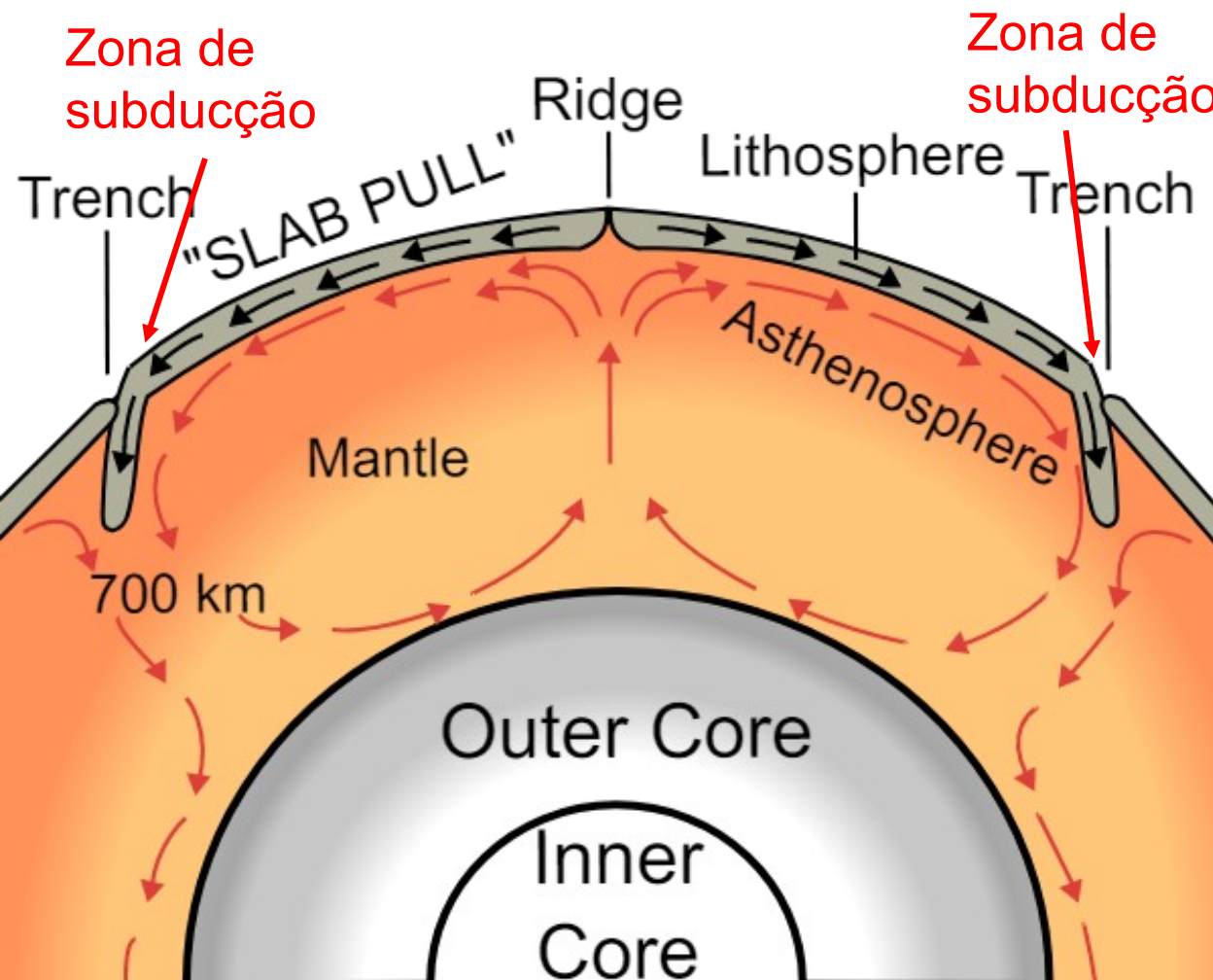
$R = 6378 \text{ km}$   
 $\rho = 5,4 \text{ g/cm}^3$



$R = 3396 \text{ km}$   
 $\rho = 3,9 \text{ g/cm}^3$



**A Terra é um planeta ativo**, devido à energia do decaimento radioativo e do calor residual da sua formação. O manto terrestre é convectivo.

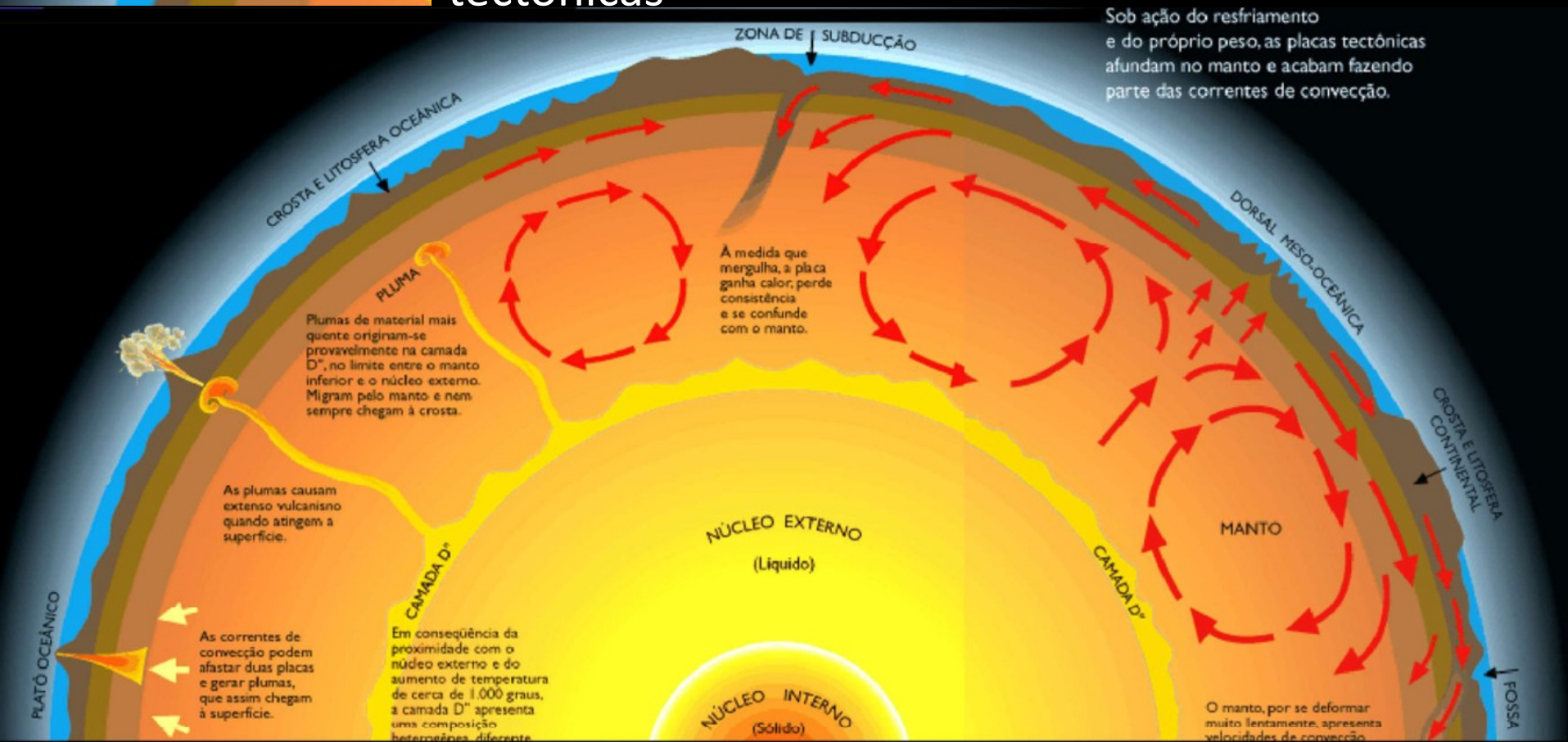


O fluxo quente emergente trinca a litosfera, a arrastando em direções opostas. Nessa região emerge lava (material rochoso fundido), causando o vulcanismo oceânico. Nas regiões de fluxo descendente as placas litosféricas são forçadas a se mover umas contra as outras, causando a subducção.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Mantle\\_convection#/media/File:Oceanic\\_spreading.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Mantle_convection#/media/File:Oceanic_spreading.svg)

# Convecção no interior da Terra

Nessa figura do Prof. Marcelo Assumpção, podemos ver em mais detalhe o efeito da convecção do manto no vulcanismo e no movimento das placas tectônicas



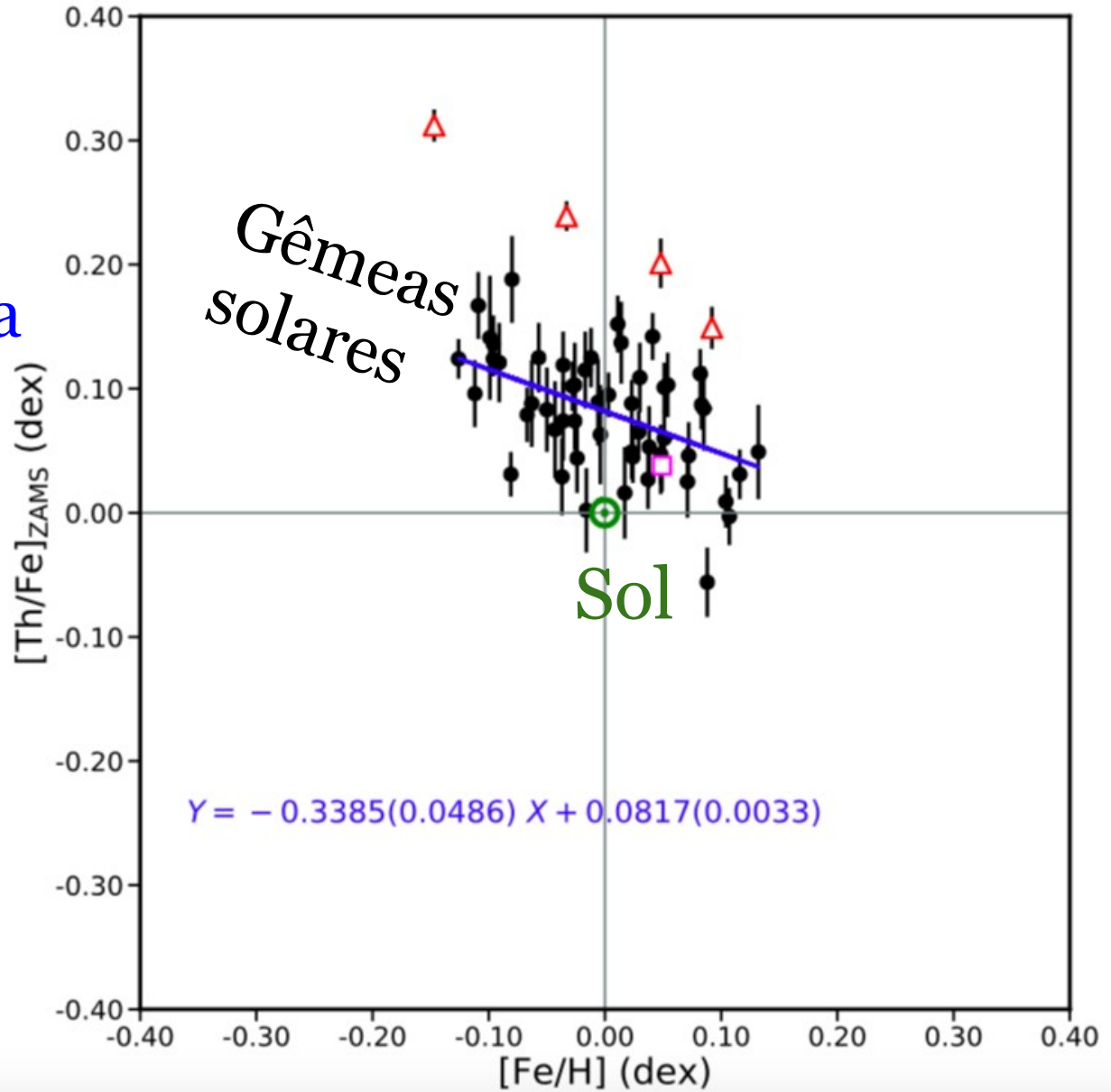
A abundância de tório em estrelas gêmeas solares é maior à abundância de Th no Sol

Monthly Notices  
of the  
ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY  
MNRAS **482**, 1690–1700 (2019)

Botelho, Milone,  
Meléndez et al. 2019

Thorium in Solar  
Twins: implications  
for habitability

[Th/Fe]



Metalicidad [Fe/H]

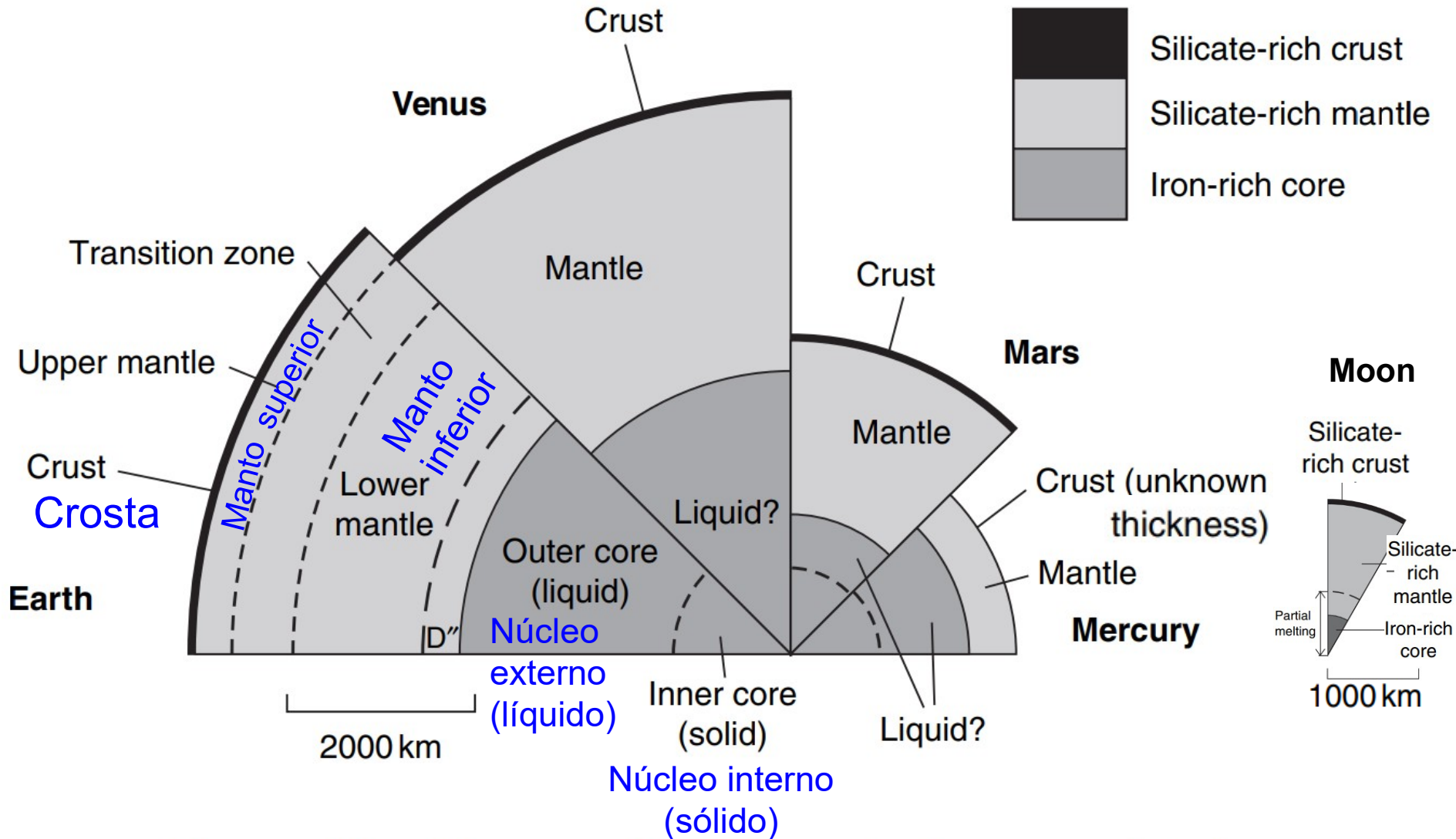


Outras estrelas com planetas rochosos podem ter planetas ativos!



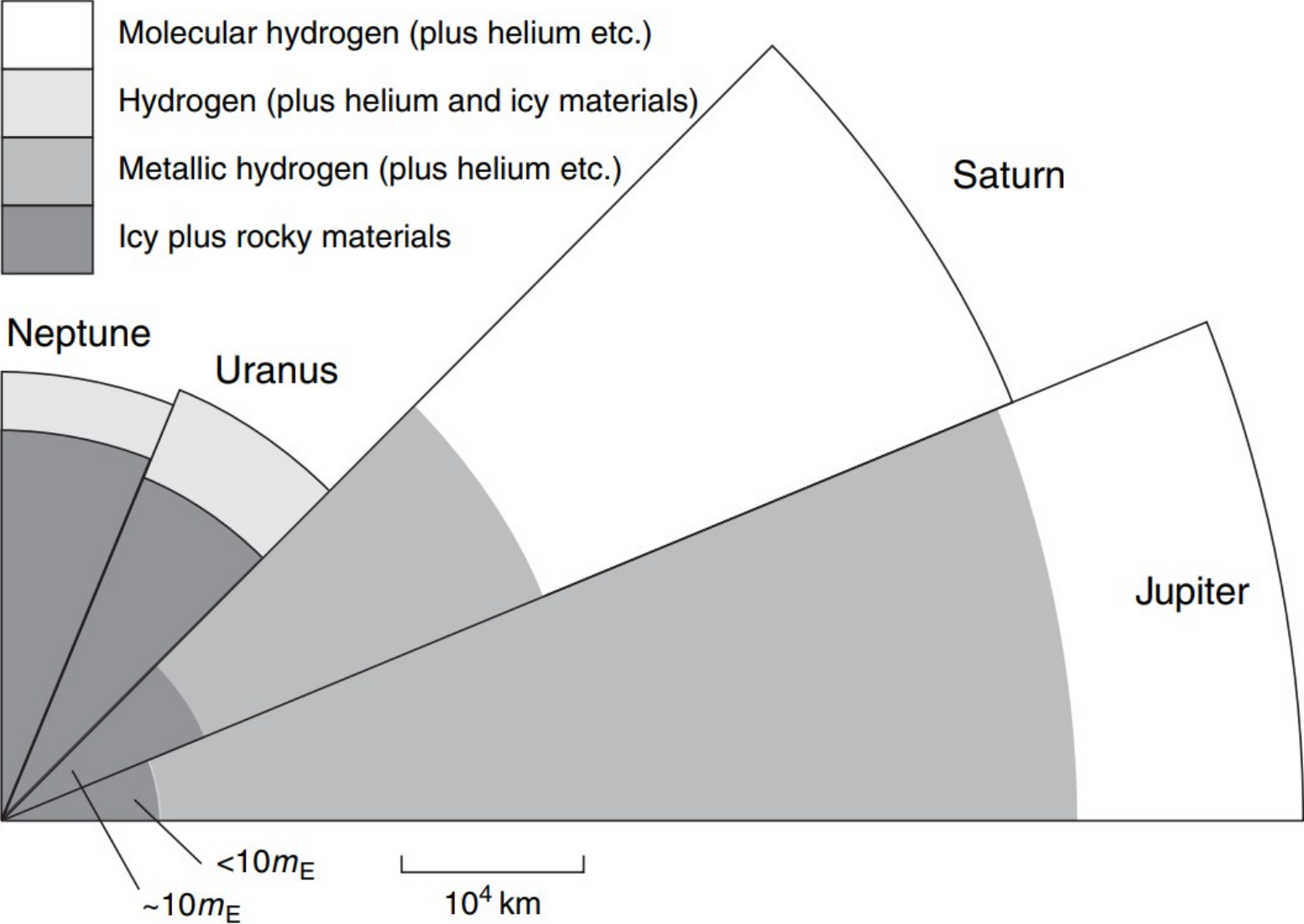


# Corte transversal nos planetas terrestres e a Lua



**Figure 5.1** Cross-sections through the terrestrial planets.

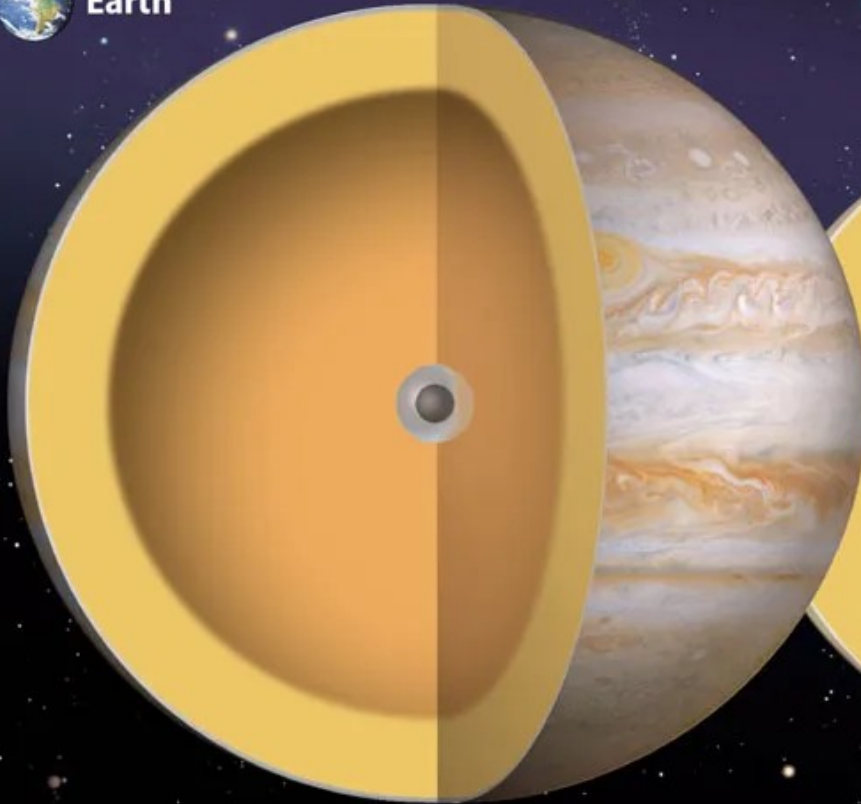
# Corte nos planetas gigantes gelados (Netuno e Urano) e gasosos (Saturno e Júpiter)



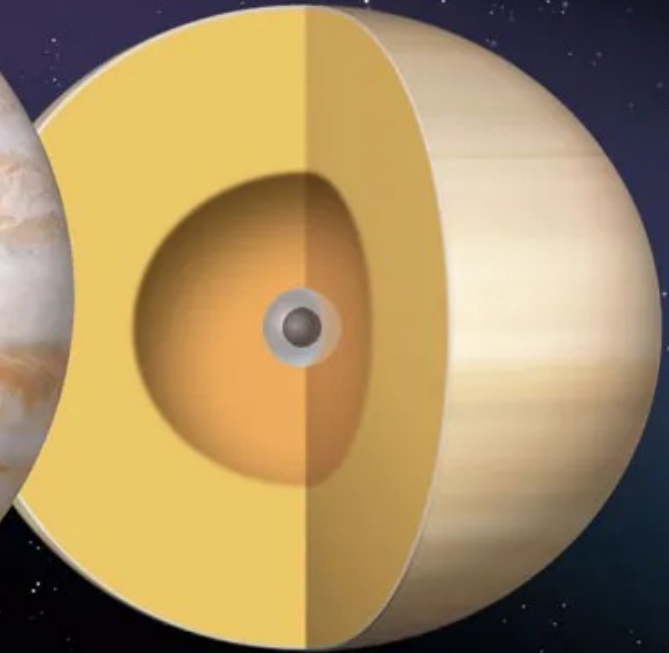


Earth

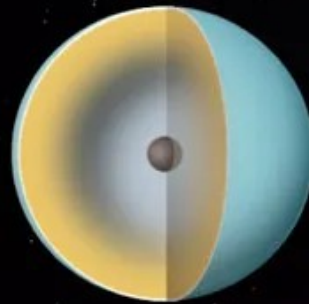
Jupiter



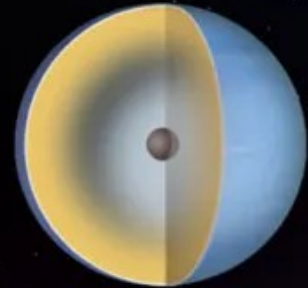
Saturn



Uranus



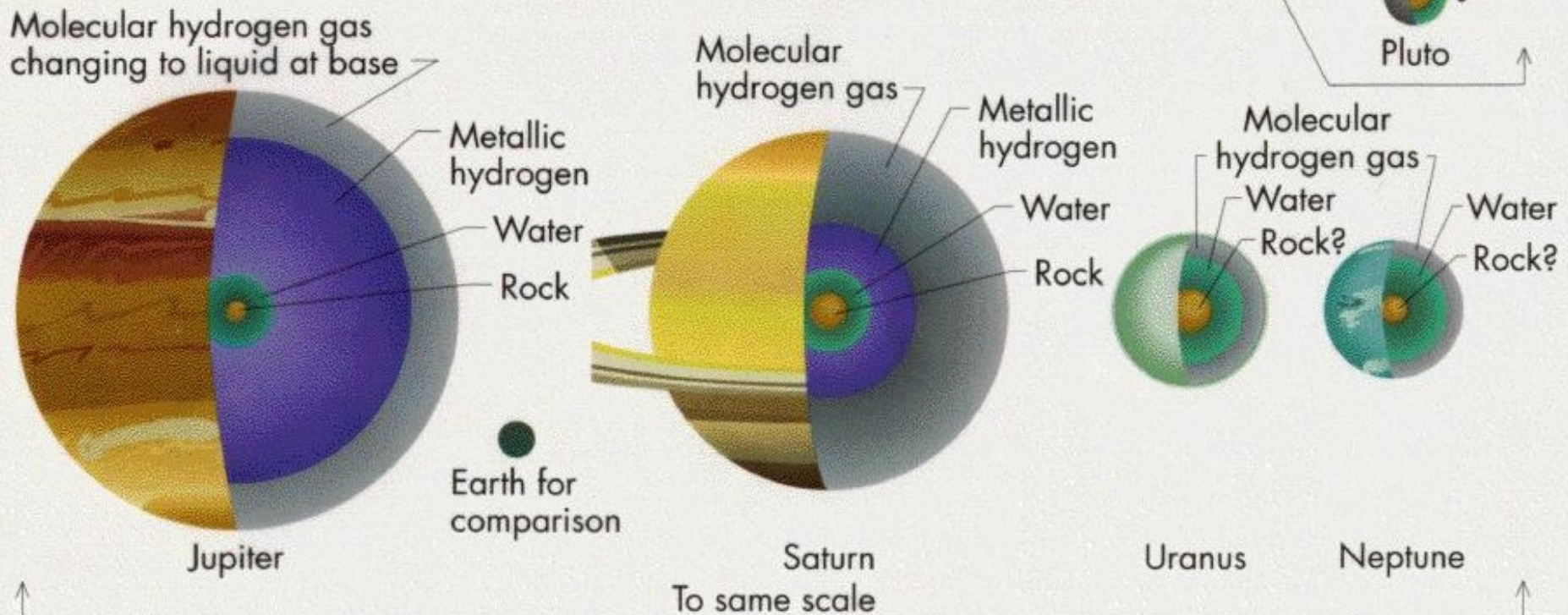
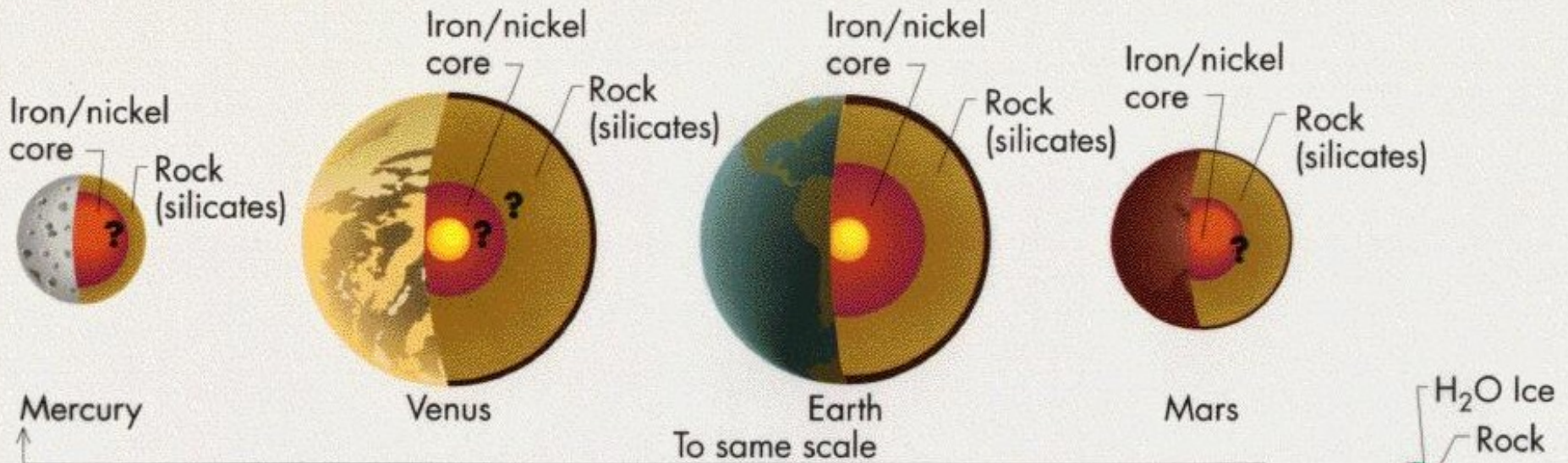
Neptune



- Rock
- Ionized liquid water, ammonia, and methane
- Liquid metallic hydrogen and atomic helium
- Molecular hydrogen and atomic helium

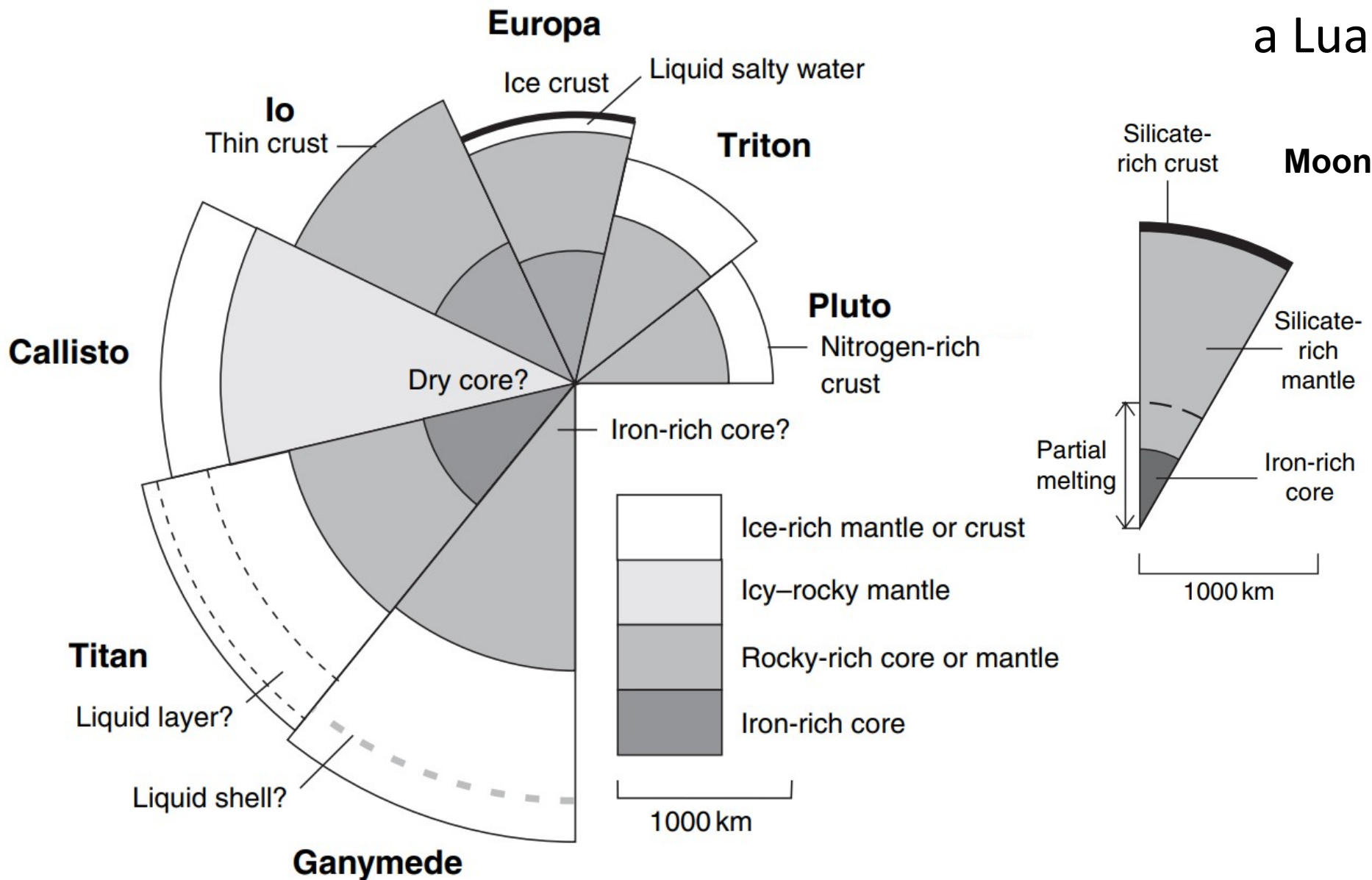
100,000 kilometers  
60,000 miles





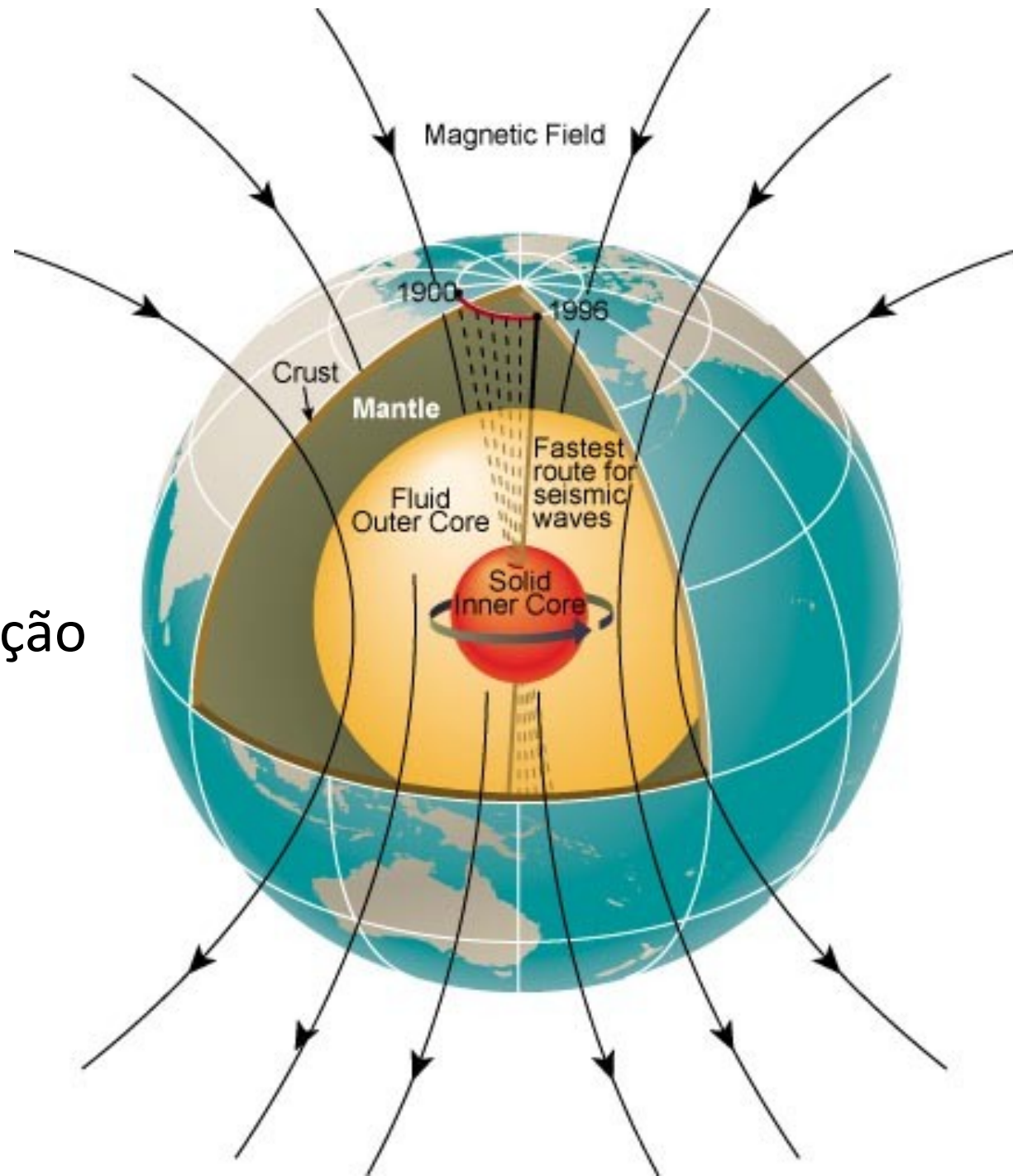


# Corte transversal em Plutão, satélites de planetas gigantes e a Lua



# Campo magnético

Medidas do campo magnético são importantes para estudos do interior planetário e a interação estrela-planeta

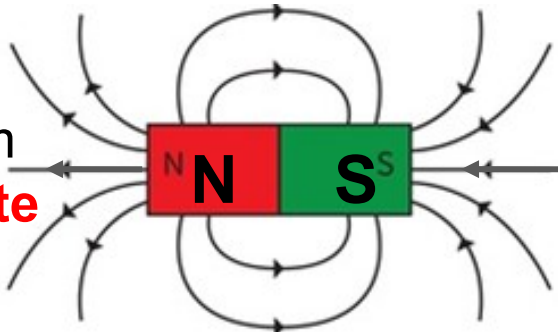


# Imãs (magnetos)

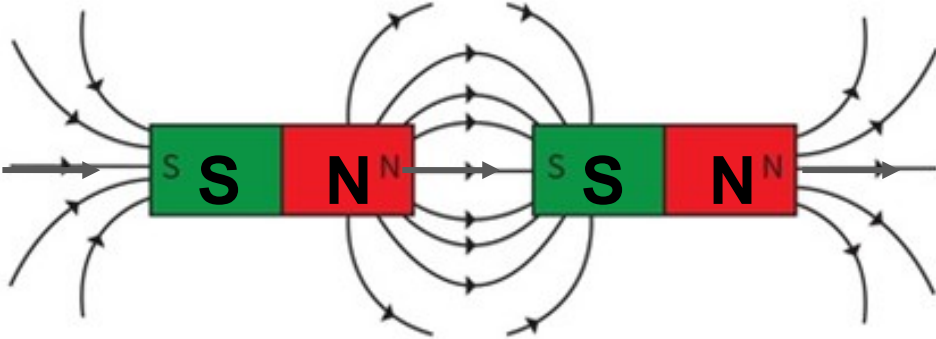
Campo magnético de um ímã em barra

As linhas de campo saem do polo **Norte**

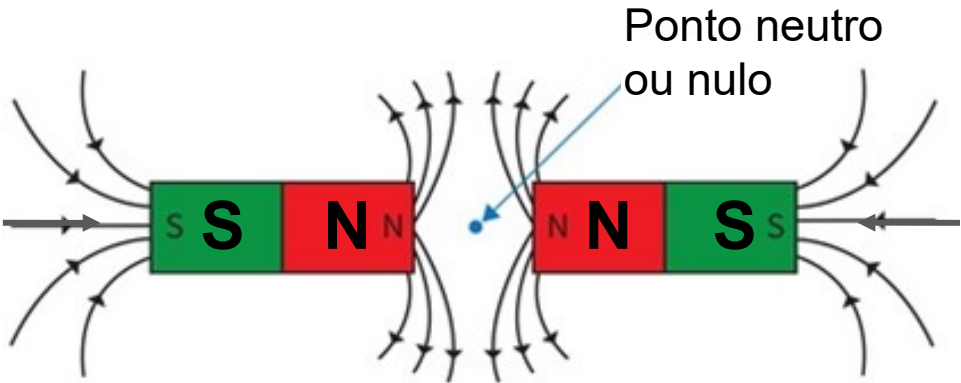
Linhas imergem no polo **Sul**



Atração entre polos opostos

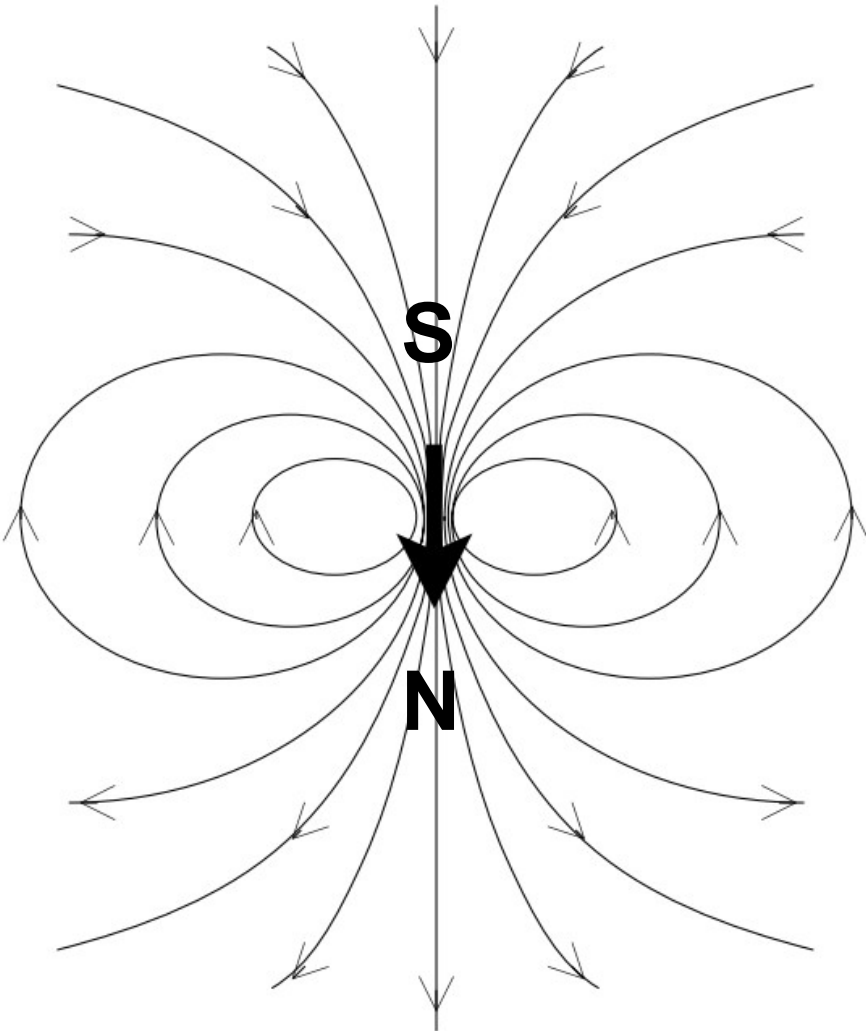


Repulsão entre polos iguais

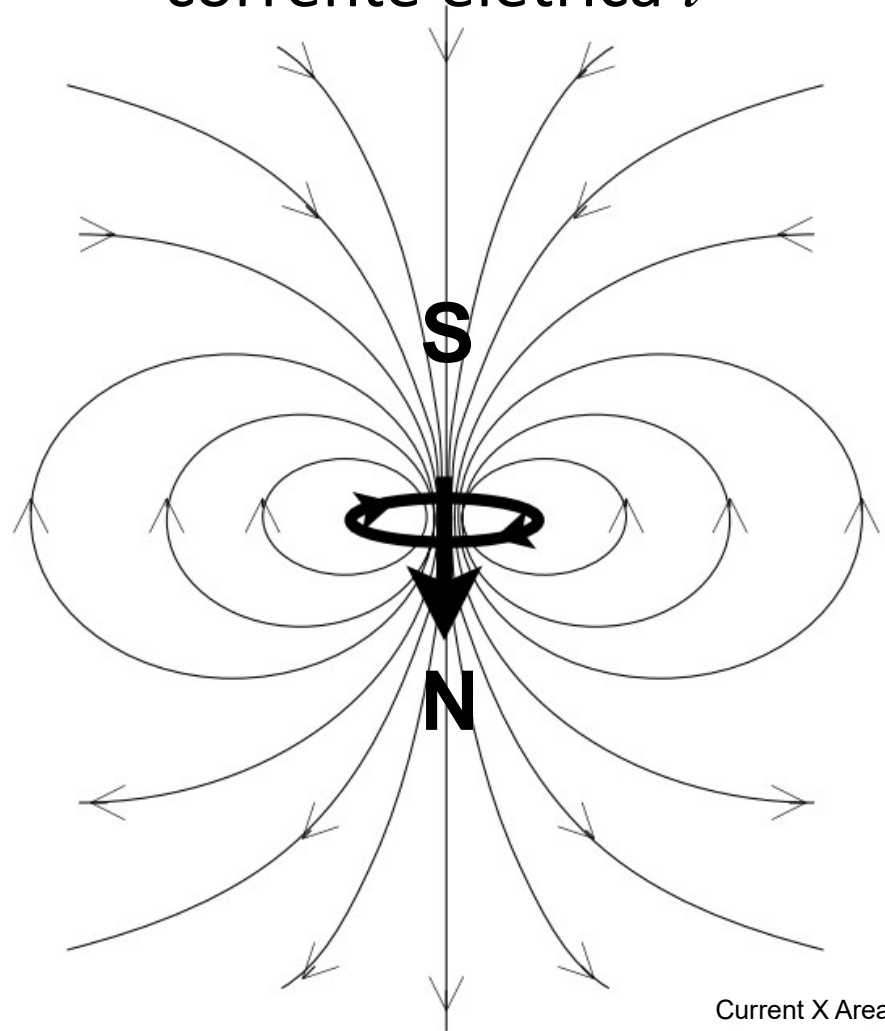


# Linhas de campo de um dipolo magnético em torno de:

(a) um ímã de barra



(b) uma espira de corrente elétrica  $i$

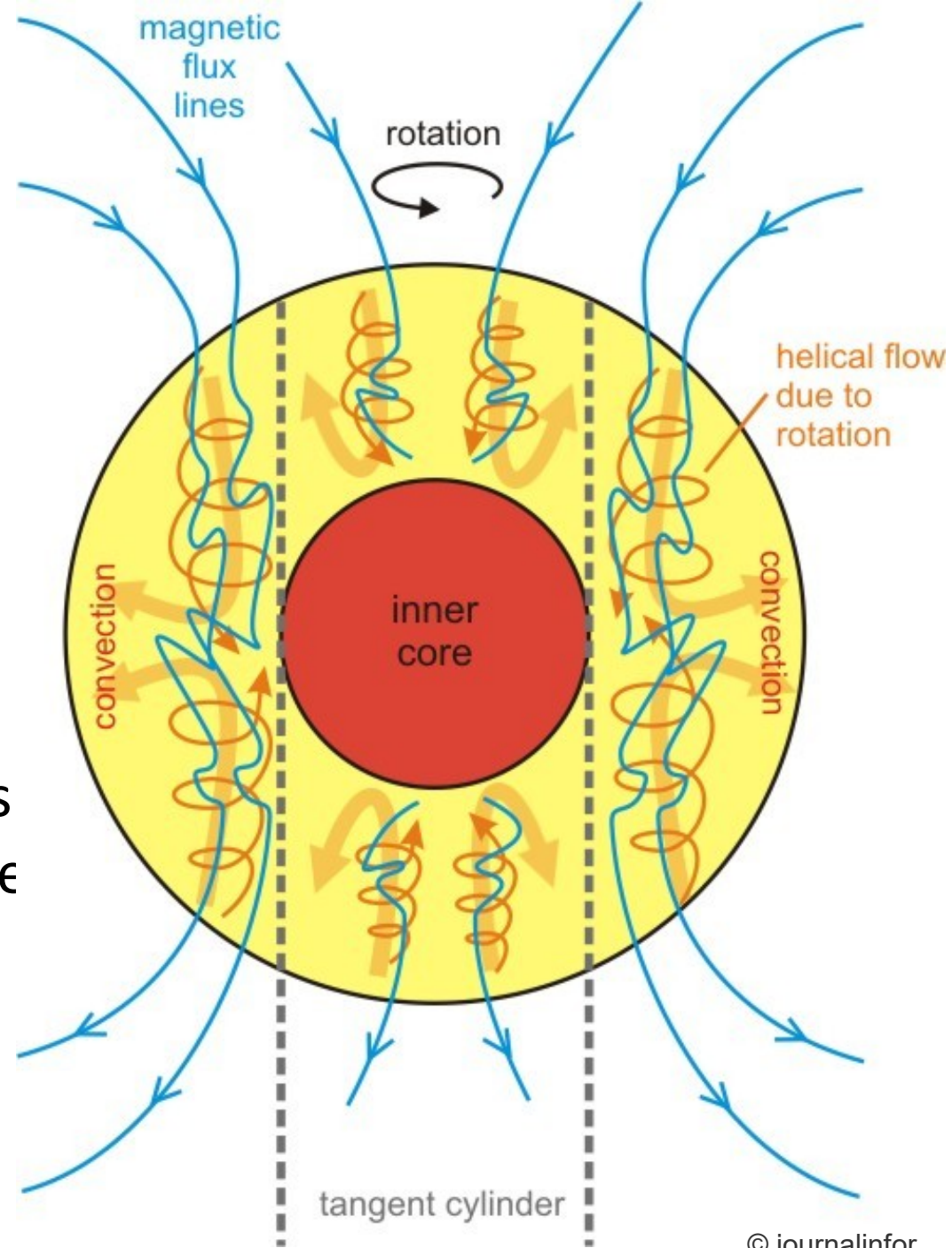


magnetic dipole moment  $\mu = i \times A$



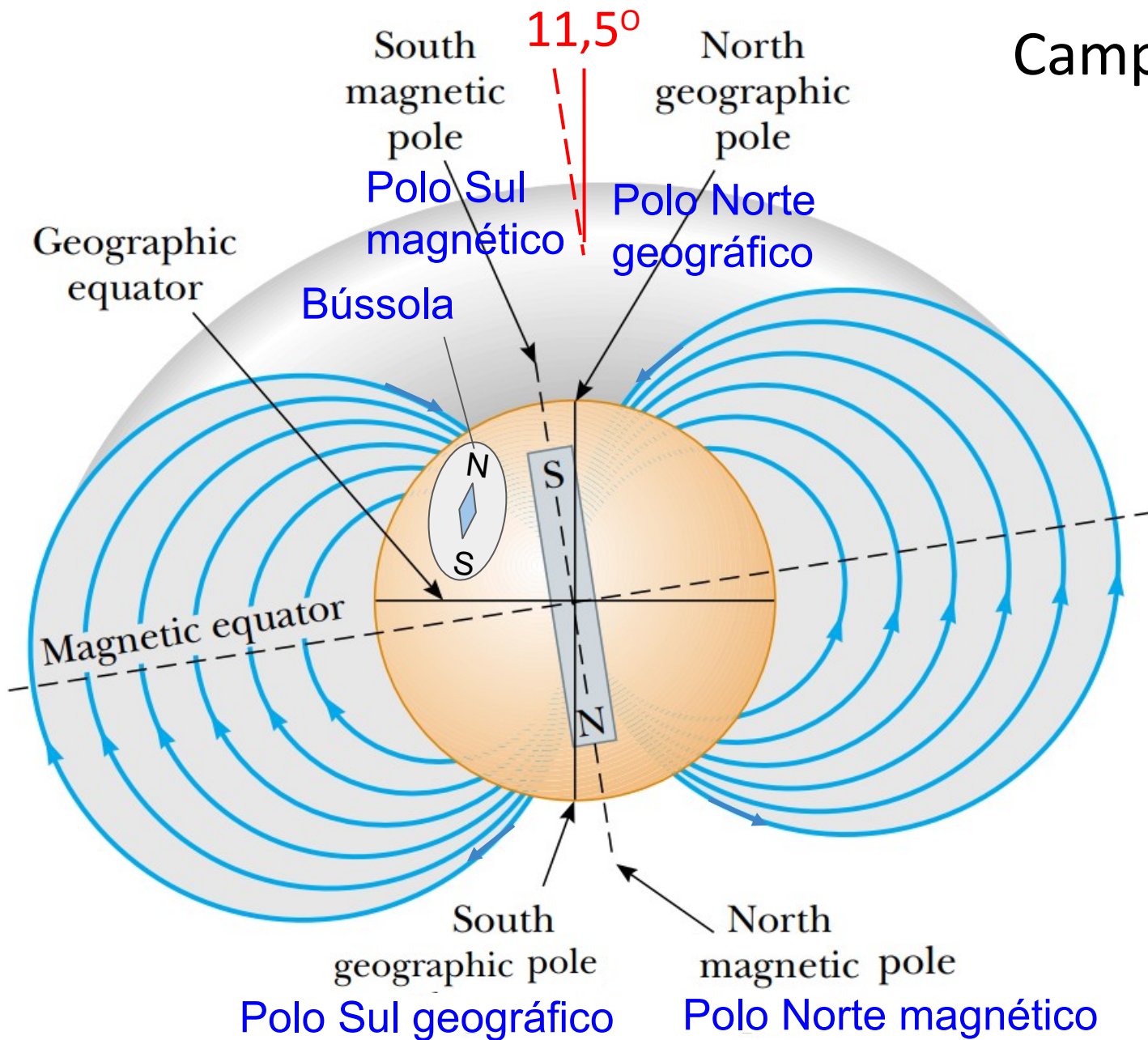
O “**dínamo**” é a fonte do campo magnético da **Terra, Mercúrio** e os **planetas gigantes** (Vênus e Marte não possuem dínamo global)

Correntes de convecção no núcleo fluido (externo) da Terra, impulsionadas pelo fluxo de calor e organizadas pela rotação, criam corrente elétrica circulantes, que geram o campo magnético com aparência dipolar



# Campo magnético da Terra

$$B \sim 5 \times 10^{-5} \text{ T}$$



$$1 \text{ Testa} = 1 \text{ Newton} / \text{Ampère} \times \text{metro}$$

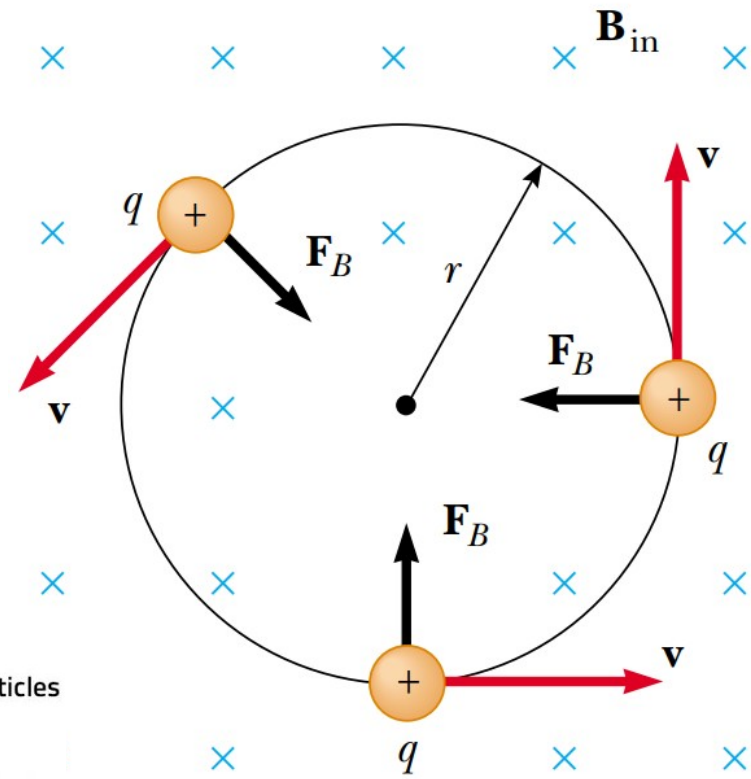
$$1 \text{ gauss} = 10^{-4} \text{ T}$$

# Força de Lorentz

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

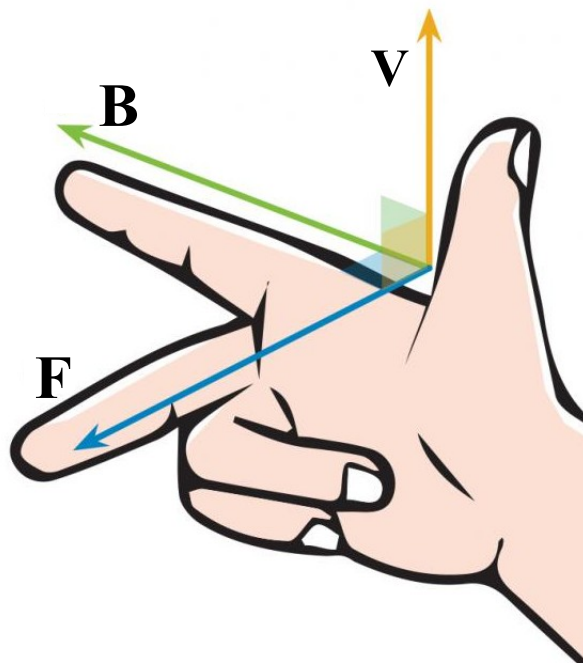
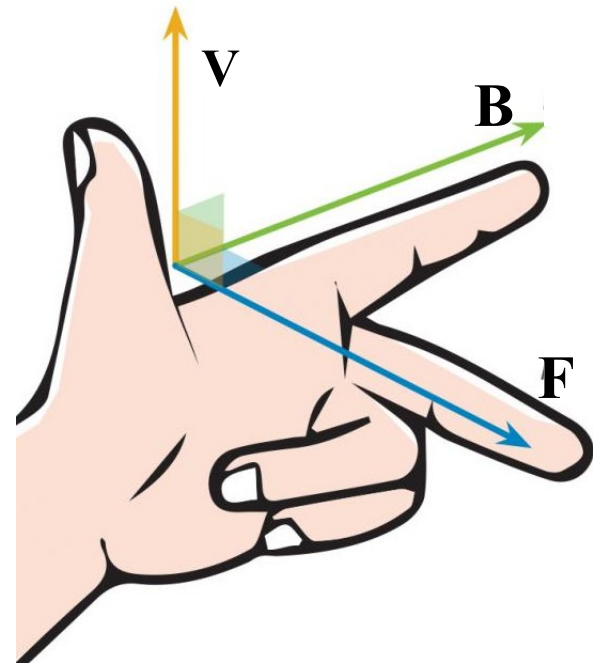
força      carga      velocidade      campo magnético

© Enos Picazzio



Left-hand rule for negatively charged particles

Right-hand rule for positively charged particles



Quando a velocidade de uma partícula carregada é perpendicular a um campo magnético, a partícula se move numa trajetória circular em um plano perpendicular a  $\mathbf{B}$ . A força magnética  $\mathbf{F}_B$  agindo sobre a carga é direcionada para o centro

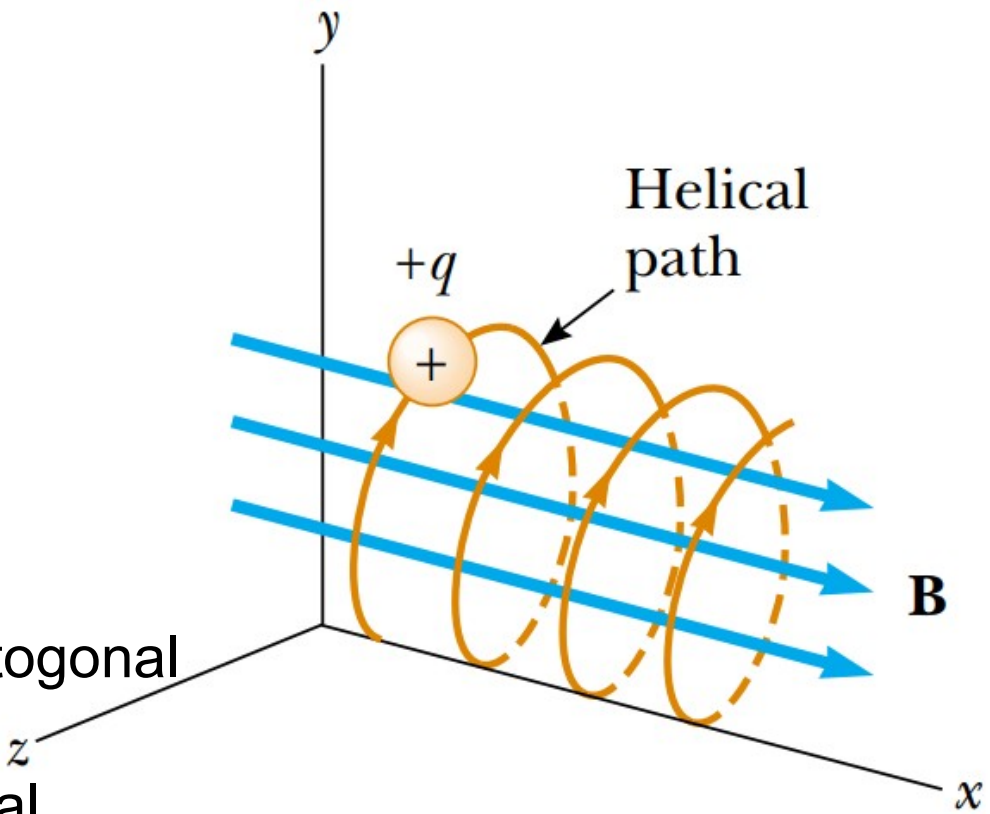


# Força de Lorentz

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

força      carga      velocidade      campo magnético

© Enos Picazzio



© Serway & Jewett, Physics for Scientists & Engineers, 6th ed.

Se o vetor velocidade  $\vec{v}$  não é ortogonal ao campo  $\vec{B}$ , a trajetória da partícula carregada será helicoidal

Trabalho:  $\vec{F} \cdot d\vec{r} = (\vec{F} \cdot \vec{v}) dt = 0$

= 0;  $\vec{F}$  e  $\vec{v}$  são ortogonais

© Enos Picazzio

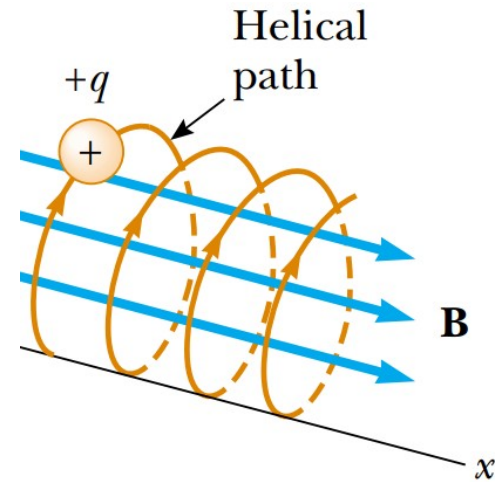
Não há trabalho  $\rightarrow$  partícula não perde energia ao espiralar



# Raio de partícula carregada ao longo de campo magnético:

Força centrípeta = Força de Lorentz

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$$



© Enos Picazzio

© Serway & Jewett, Physics for Scientists & Engineers, 6th ed.

Exemplo: qual o raio orbital de um próton movendo-se com  $v \sim 10^8$  m/s, em campo magnético de intensidade  $B = 10^{-4}$  T?

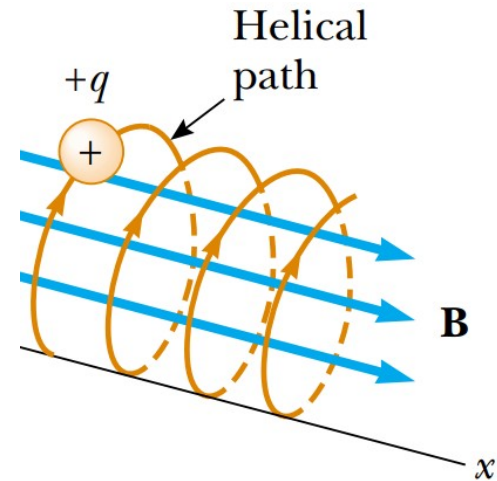
Para o próton,  $M = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg, e  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C. Substituindo estes valores na eq. acima obtém-se:  $r \sim 10$  km.

$B = 10^{-4}$  T  $\rightarrow r \sim 10$  km,  
 $B = 10^{-5}$  T  $\rightarrow r \sim 100$  km

# Raio de partícula carregada ao longo de campo magnético:

Força centrípeta = Força de Lorentz

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$$



© Enos Picazzio

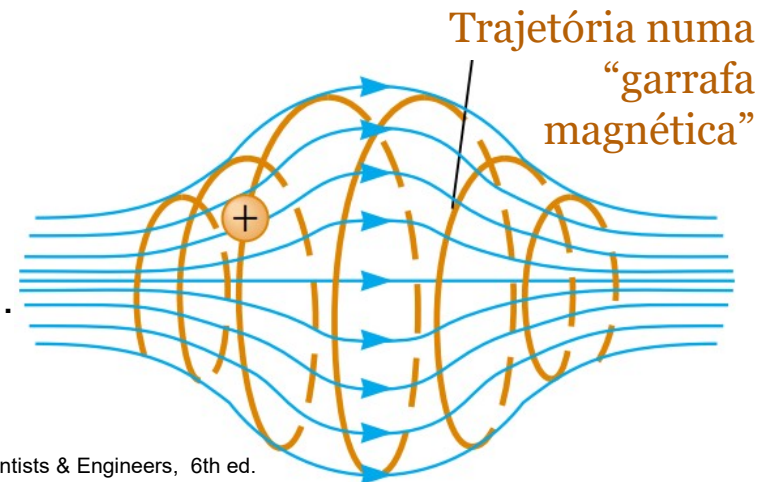
Exemplo: qual o raio orbital de um próton movendo-se com  $v \sim 10^8$  m/s, em campo magnético de intensidade  $B = 10^{-4}$  T?

Para o próton,  $M = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg, e  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C. Substituindo estes valores na eq. acima obtém-se:  $r \sim 10$  km.

$B = 10^{-4}$  T  $\rightarrow r \sim 10$  km,

$B = 10^{-5}$  T  $\rightarrow r \sim 100$  km

Uma partícula carregada movendo-se em um campo magnético não uniforme (uma garrafa magnética) espirala em torno do campo e oscila entre os extremos. A força magnética sobre a partícula perto de cada extremidade tem uma componente que faz com que a partícula seja “refletida”



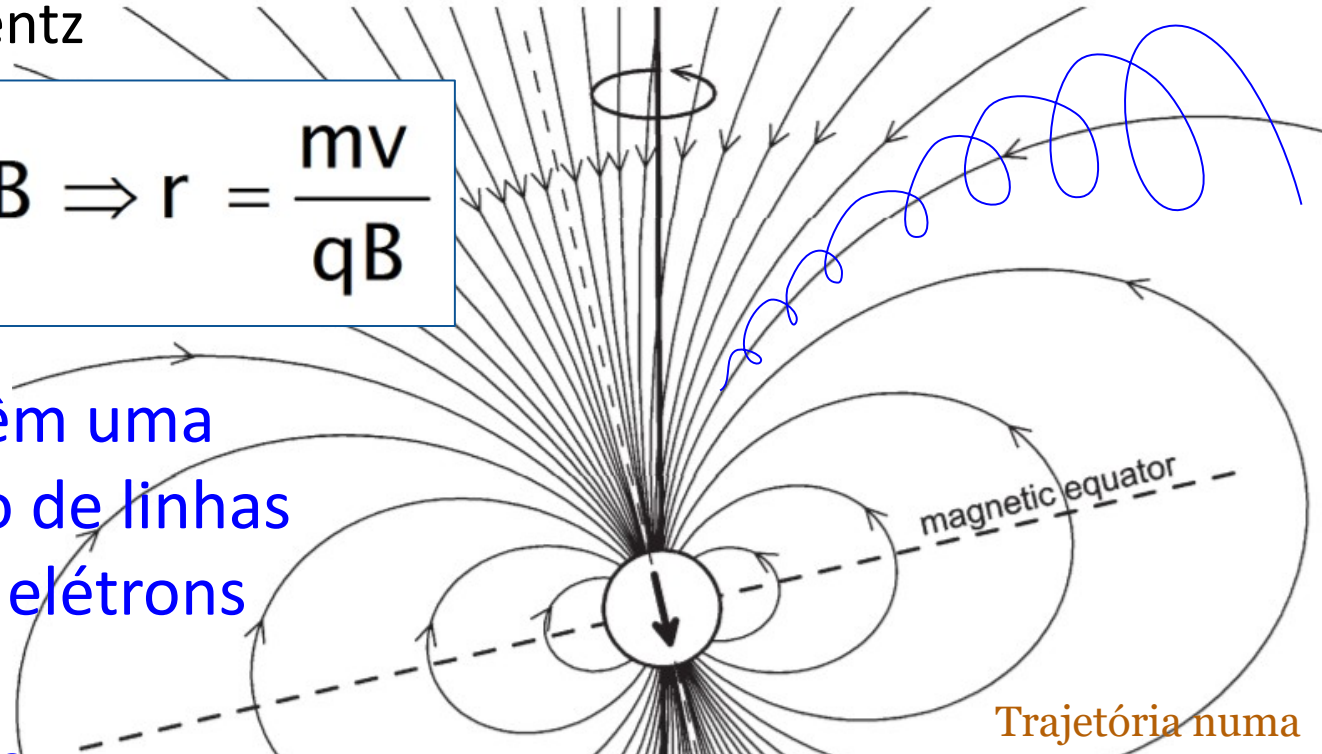
# Efeito de 'espelho magnético' nos polos magnéticos da Terra

Força centrípeta = Força de Lorentz

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$$

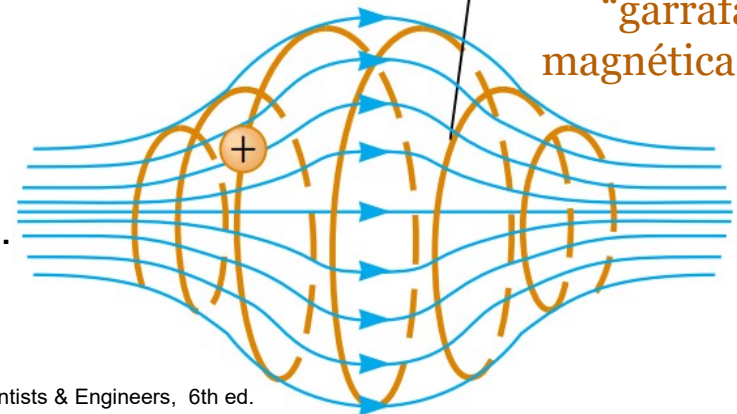
Ulrich Hambach et al. 2008, Magnetic dating of Quaternary sediments, volcanites and archaeological materials: an overview

Os polos da Terra têm uma maior concentração de linhas de campo → íons e elétrons são refletidos ao se aproximar dos polos



Trajectoria numa "garrafa magnética"

Uma partícula carregada movendo-se em um campo magnético não uniforme (uma garrafa magnética) espirala em torno do campo e oscila entre os extremos. A força magnética sobre a partícula perto de cada extremidade tem uma componente que faz com que a partícula seja "refletida"

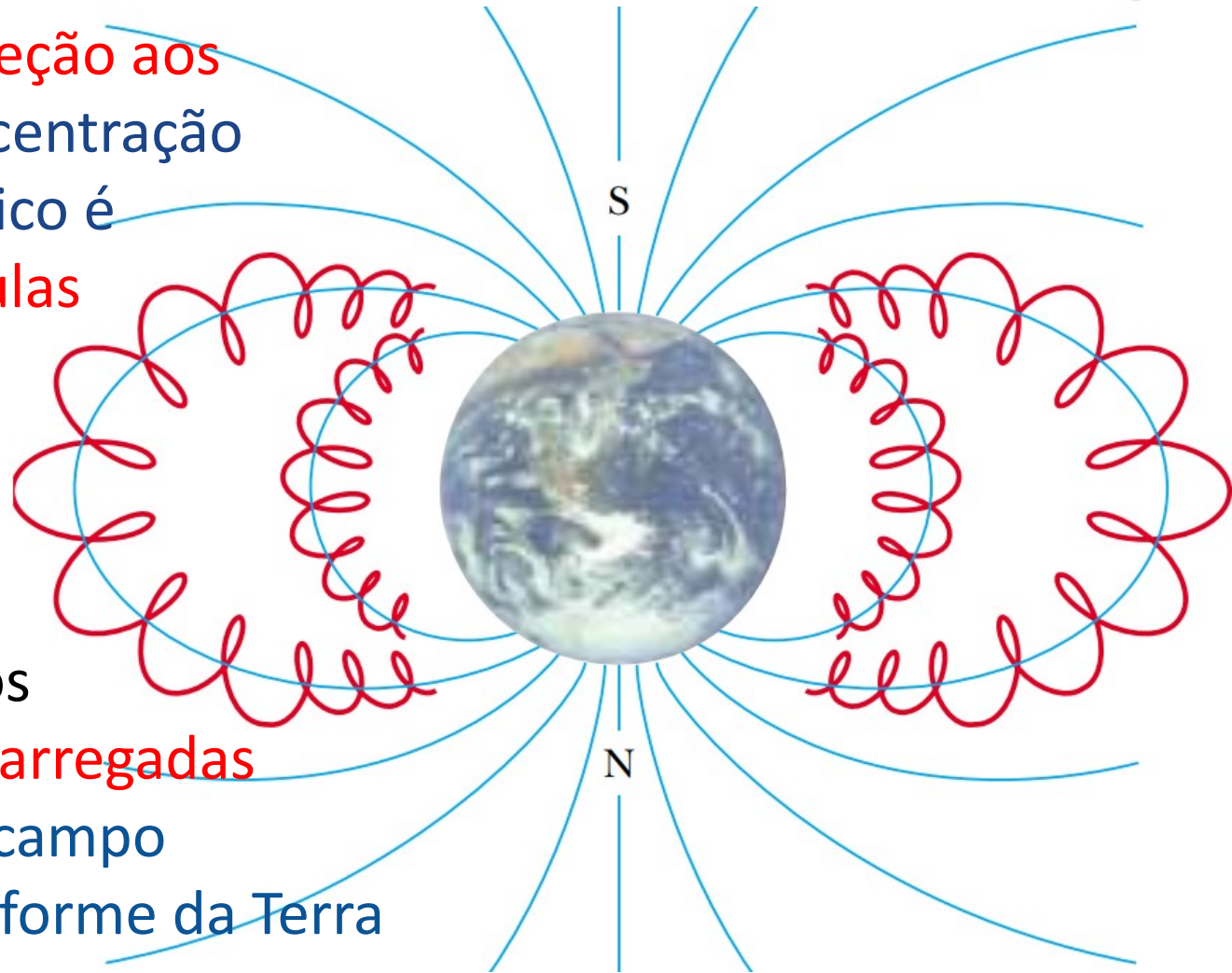


# Cinturões de Van Allen

$$r = \frac{mv}{qB}$$

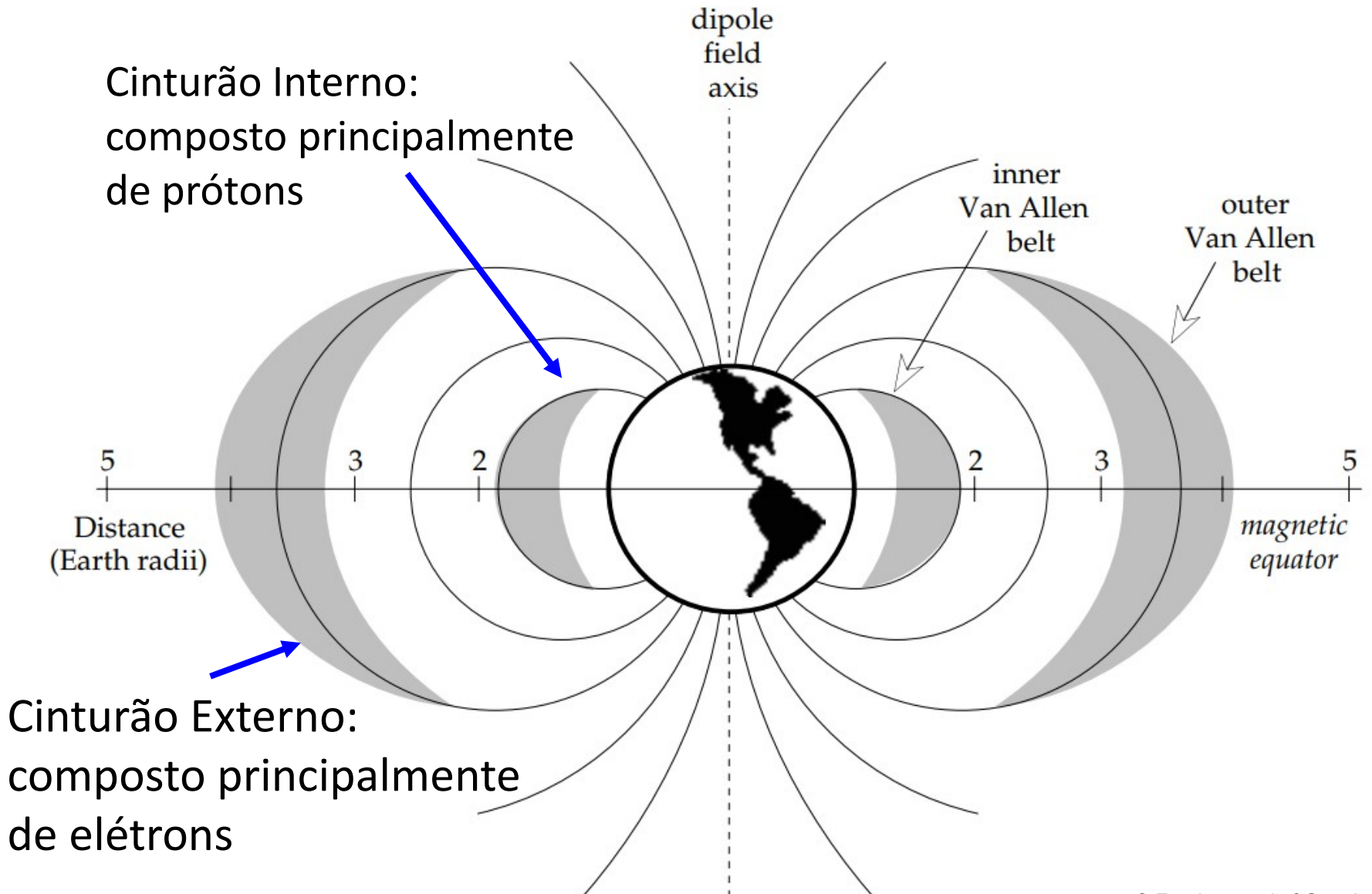
Movimento helicoidal com raio menor em direção aos polos (onde a concentração do campo magnético é maior) e as partículas carregadas são refletidas

Os cinturões de Van Allen são feitos dessas partículas carregadas aprisionadas pelo campo magnético não uniforme da Terra

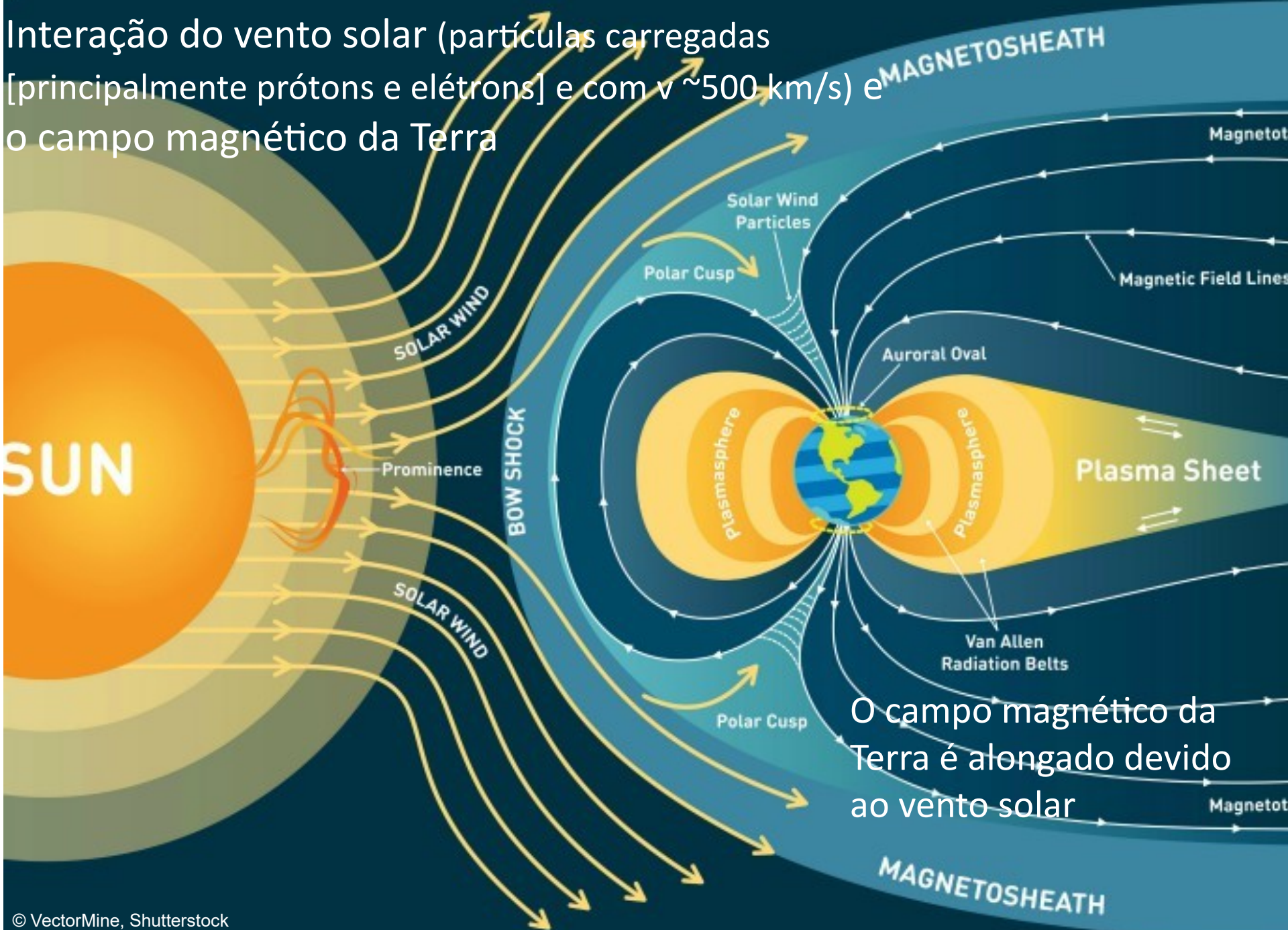




**Cinturões de Van Allen:** partículas (principalmente) do vento solar aprisionadas pelo campo magnético da Terra



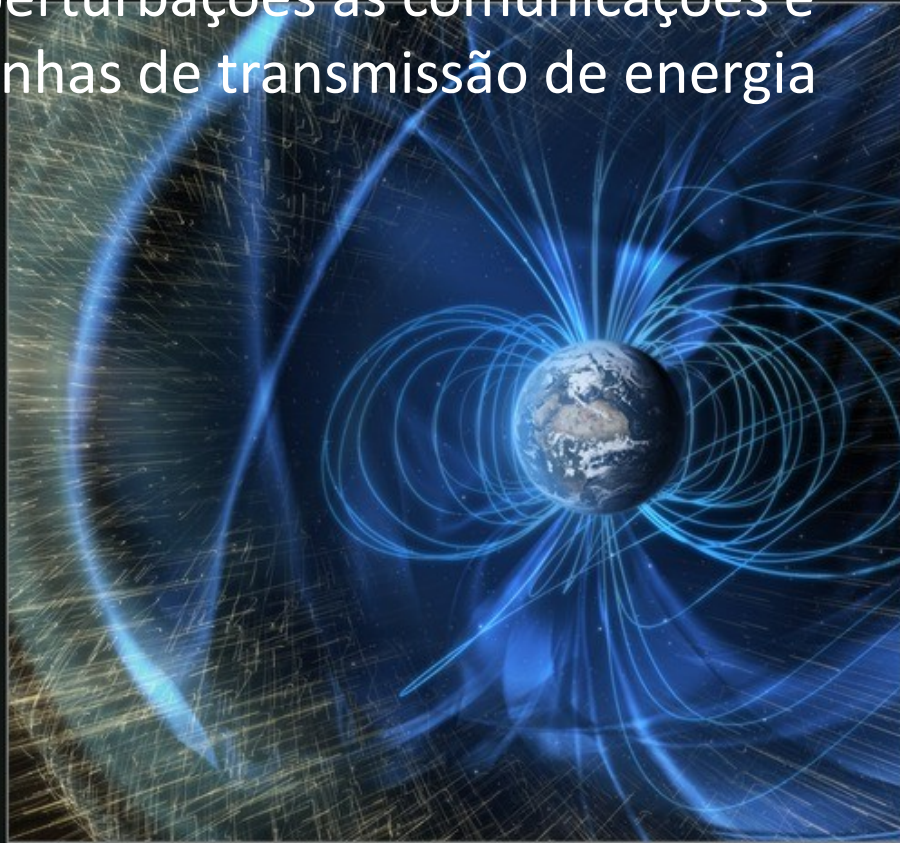
Interação do vento solar (partículas carregadas [principalmente prótons e elétrons] e com  $v \sim 500$  km/s) e o campo magnético da Terra



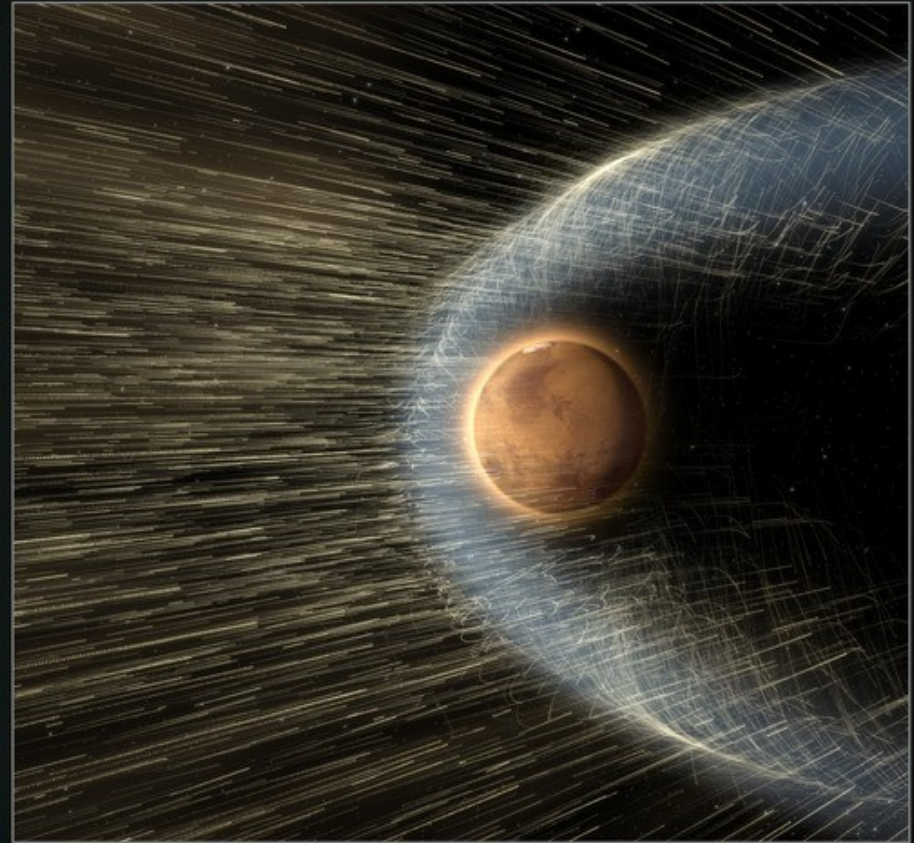
O campo magnético da Terra é alongado devido ao vento solar



O campo magnético da Terra protege o planeta do vento solar, sendo importante para preservar a atmosfera e minimizar perturbações às comunicações e linhas de transmissão de energia



Marte não possui um campo magnético global, e a atmosfera do planeta vermelho pode ter sido varrida pelo vento solar



Interação do vento solar com a Terra (esq.) e Marte (direita)

<https://svs.gsfc.nasa.gov/4370>



## Current Mars Map



## Ancient Mars Map

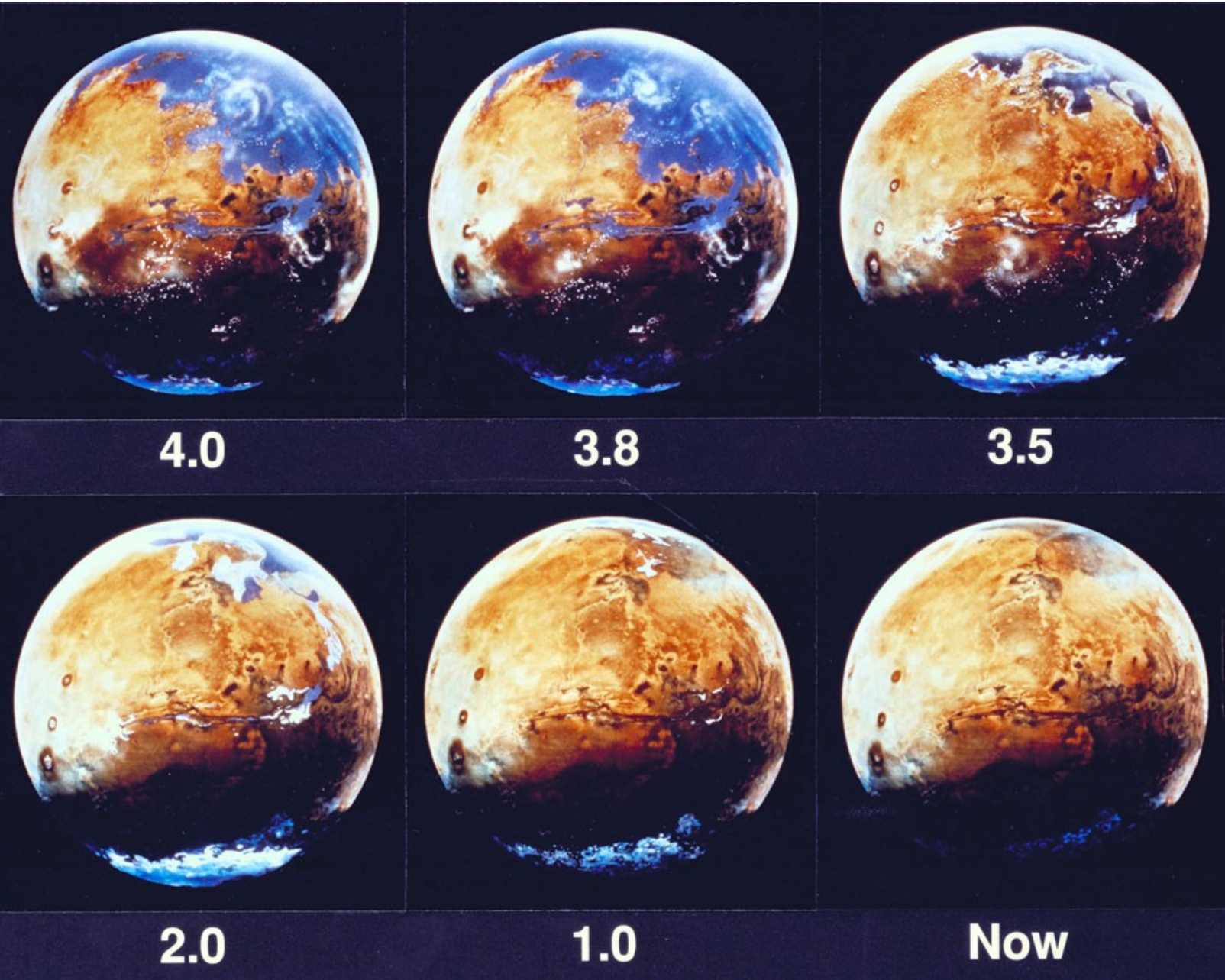


Marte agora. A maior parte do oceano foi perdida há  $\sim 3,5$  Gyr

Marte há  $\sim 3,8$  bilhões de anos, quando tinha uma atmosfera mais espessa, um ciclo hidrológico e água líquida na superfície, esculpindo canais de rios e formando deltas

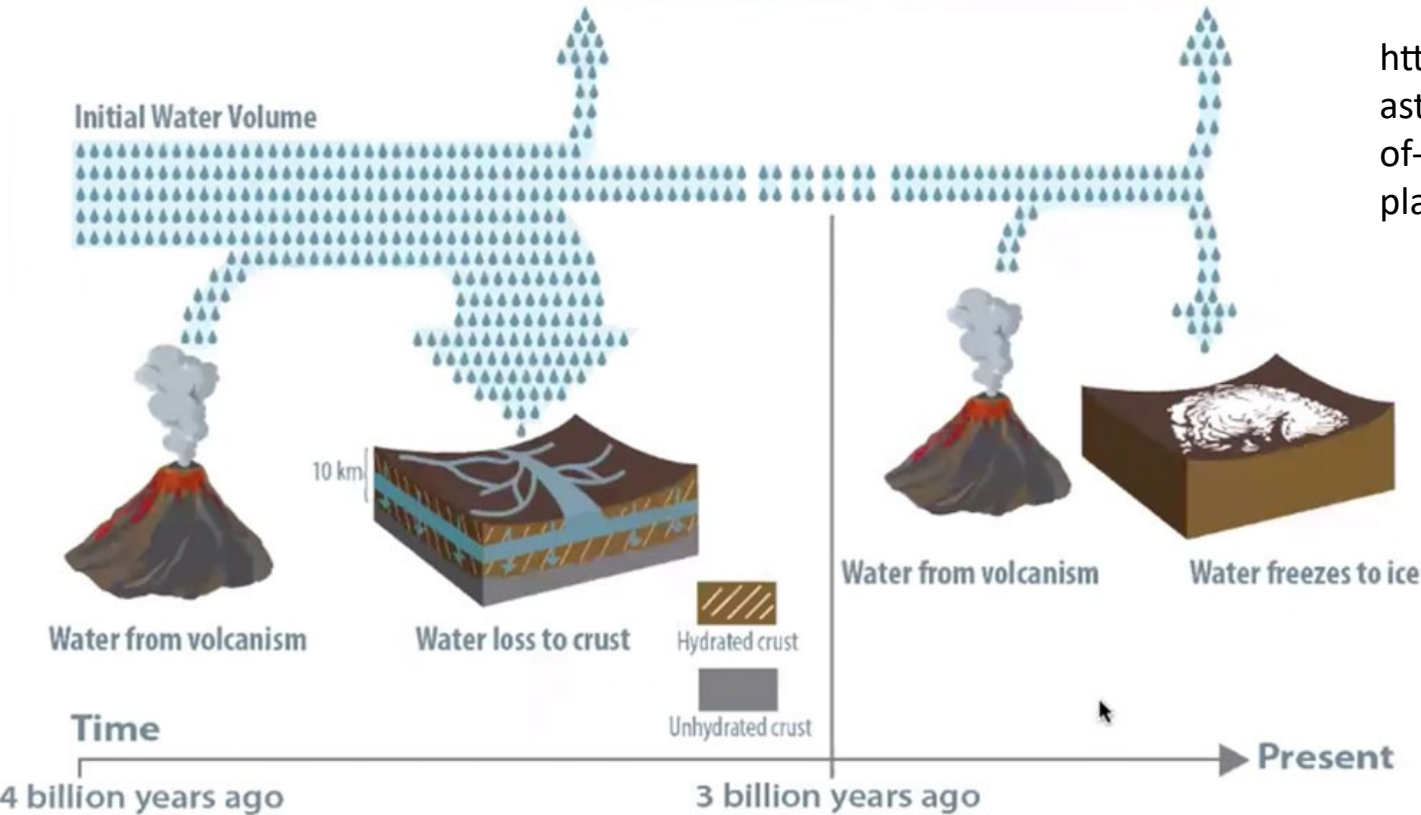


# Marte pode ter tido um oceano até há ~3,5 Gyr



Água pode ter sido perdida para o espaço ou ficou presa no interior, ou ambos

<https://skyandtelescope.org/astronomy-news/is-an-ocean-of-mars-water-trapped-in-the-planets-crust/>



<https://skyandtelescope.org/astronomy-news/is-an-ocean-of-mars-water-trapped-in-the-planets-crust/>

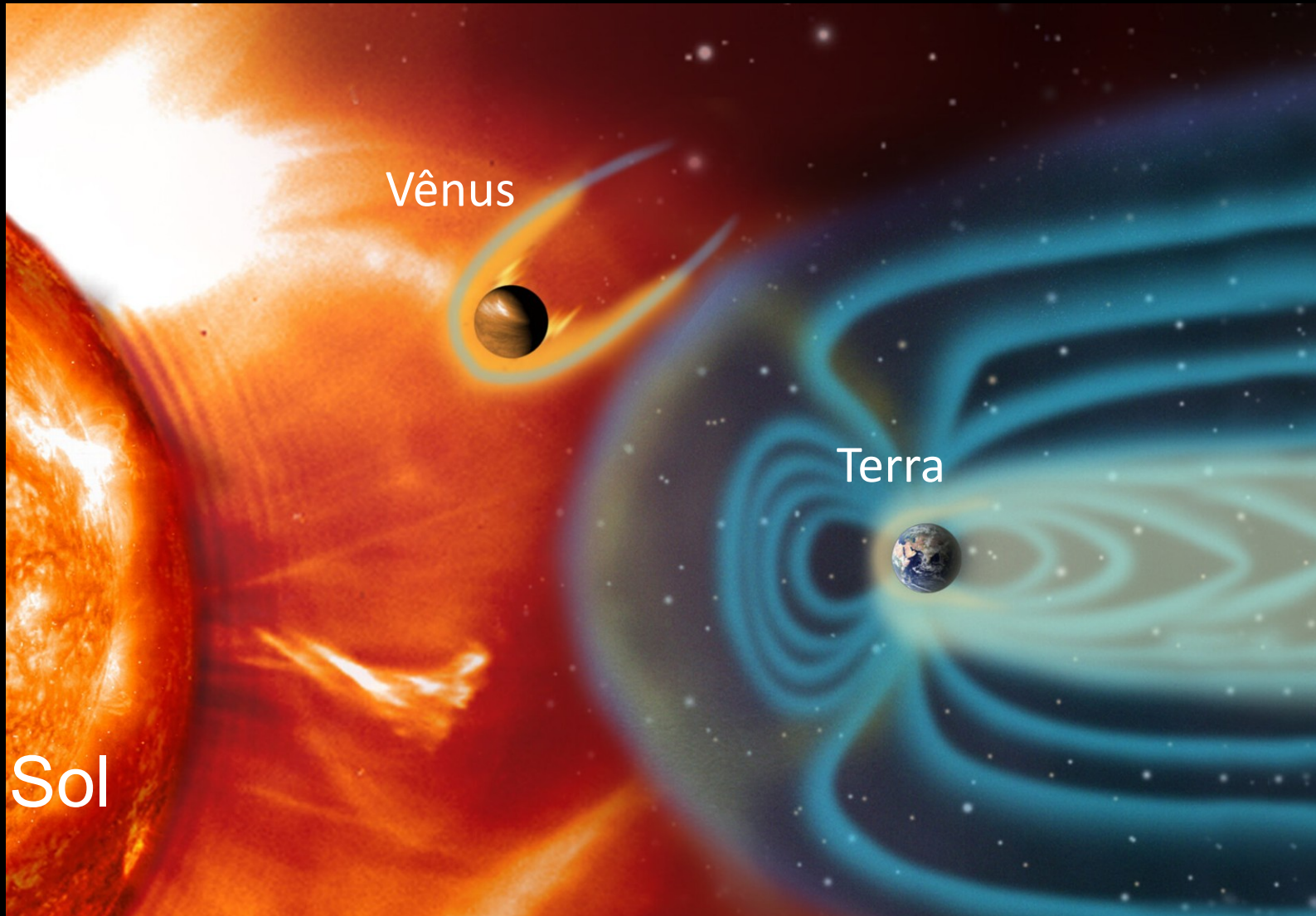
- 1) Marte é muito menor que a Terra → núcleo esfriou rapidamente (ou estratificação por materiais imiscíveis → sem convecção) → perdeu seu campo magnético global
- 2) Sem magnetosfera → vento solar varreu parte da atmosfera
- 3) Gravidade menor que na Terra → difícil reter sua atmosfera
- 4) A água (H<sub>2</sub>O) da atmosfera pode ter escapado para o espaço ou ficou retida em minerais



Se Vênus tem massa e raio similares ao nosso planeta, por que Vênus não tem um campo magnético como a Terra? Esse é um grande problema do Sistema Solar que ainda está sem solução.



**Jorge Melendez**  
@DrJorgeMelendez



# A magnetosfera é o limite da atmosfera superior ionizada do planeta, onde o campo magnético planetário domina

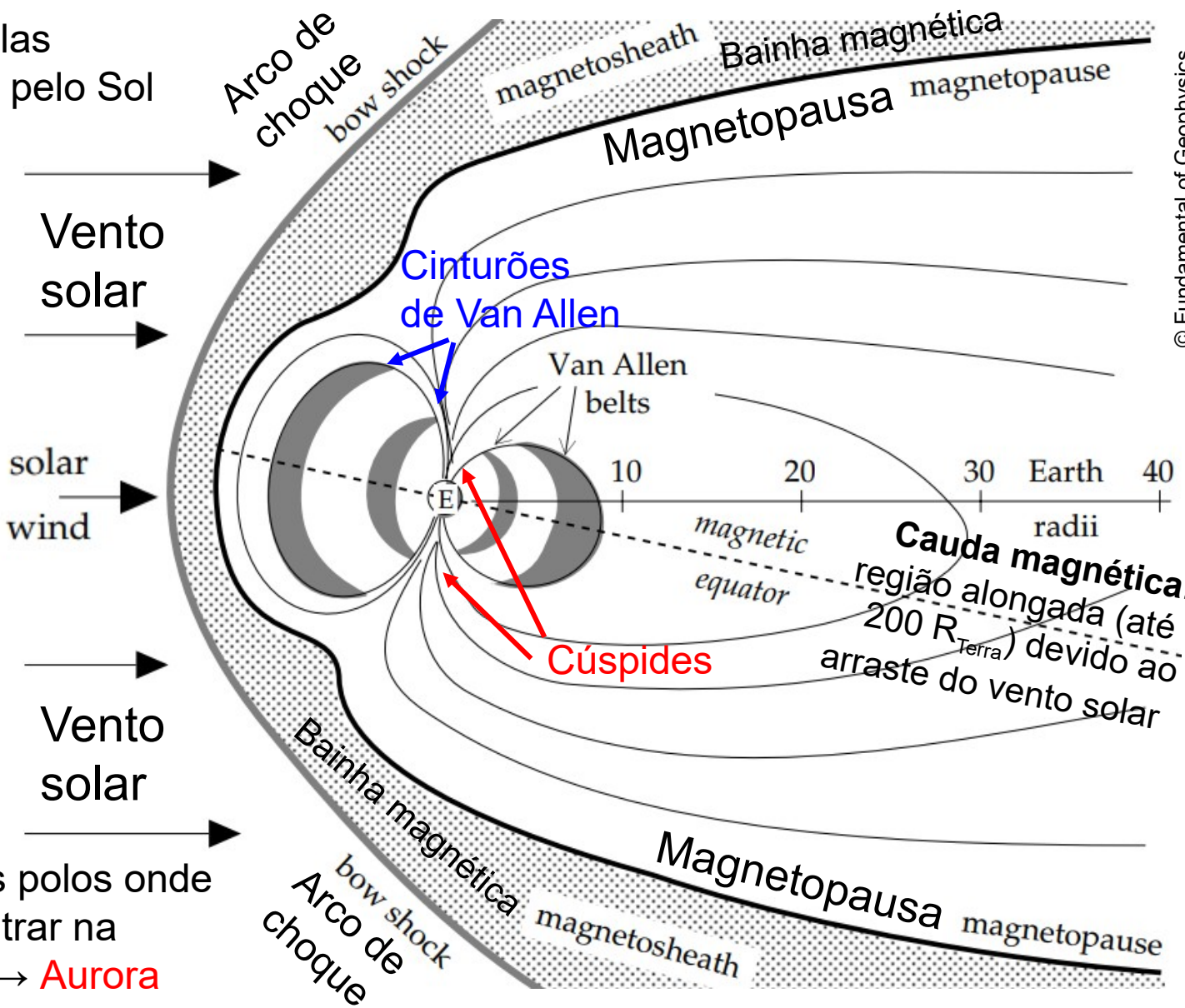
**Vento solar:** partículas carregadas emitidas pelo Sol

**Arco de choque:** região onde o vento solar é desacelerado

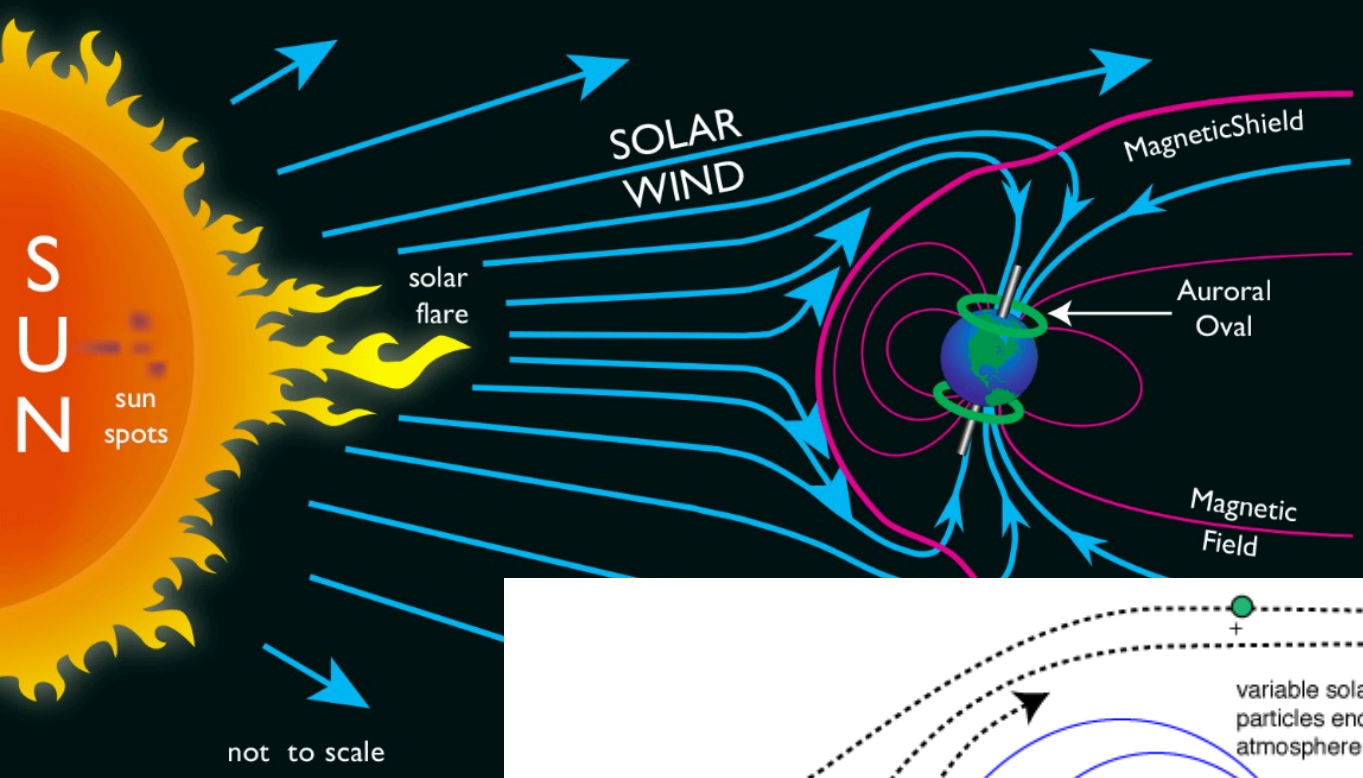
**Bainha magnética:** região turbulenta entre o arco de choque e a magnetosfera

**Magnetopausa:** região mais externa da magnetosfera

**Cúspide:** região nos polos onde partículas podem entrar na atmosfera terrestre → **Aurora**



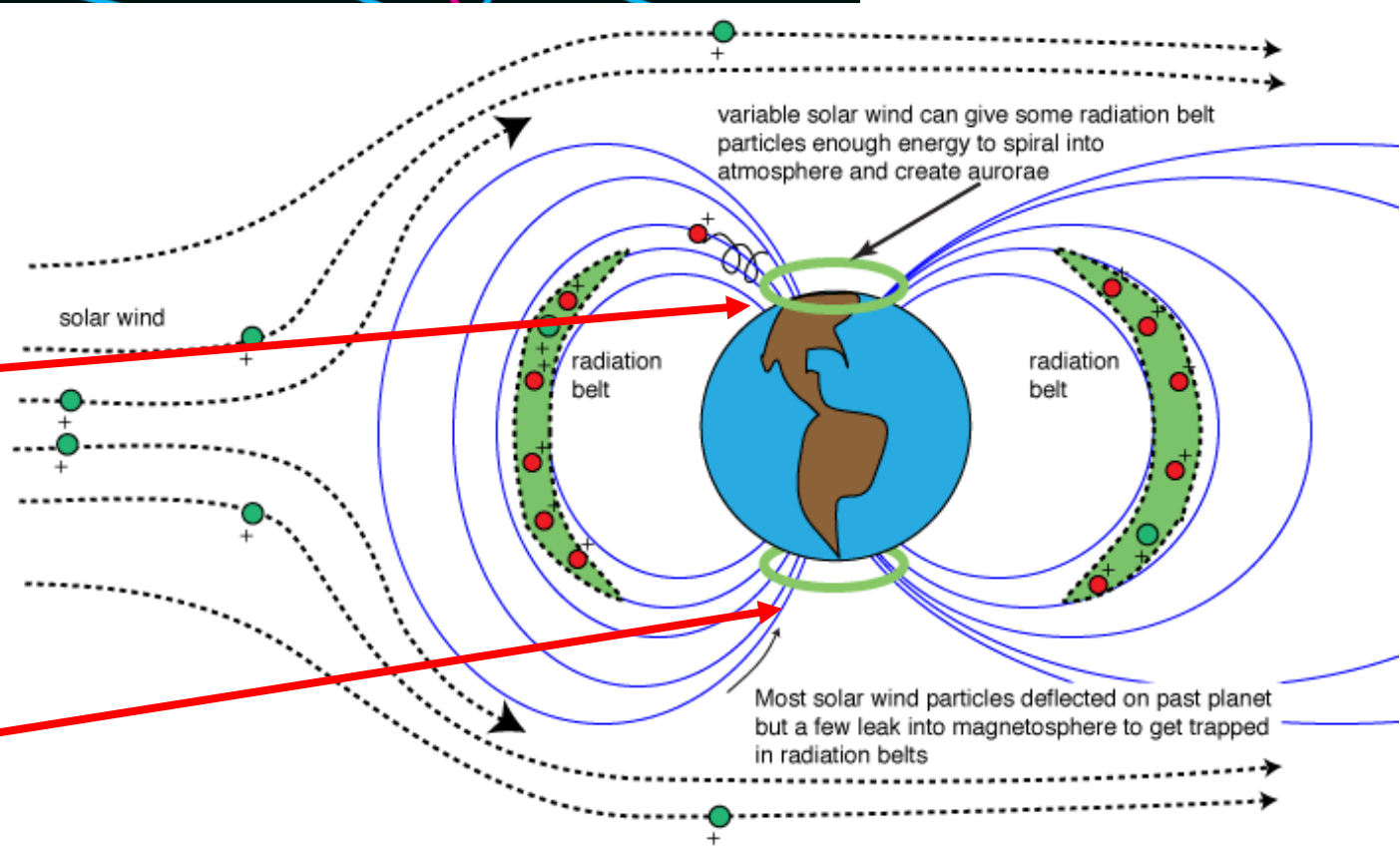


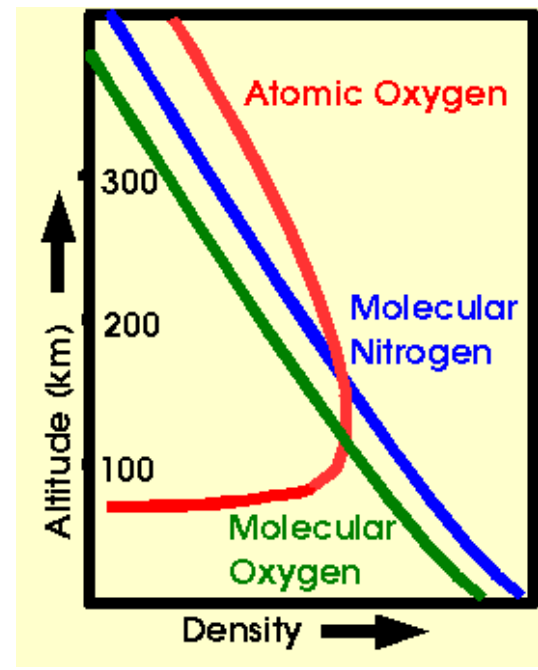
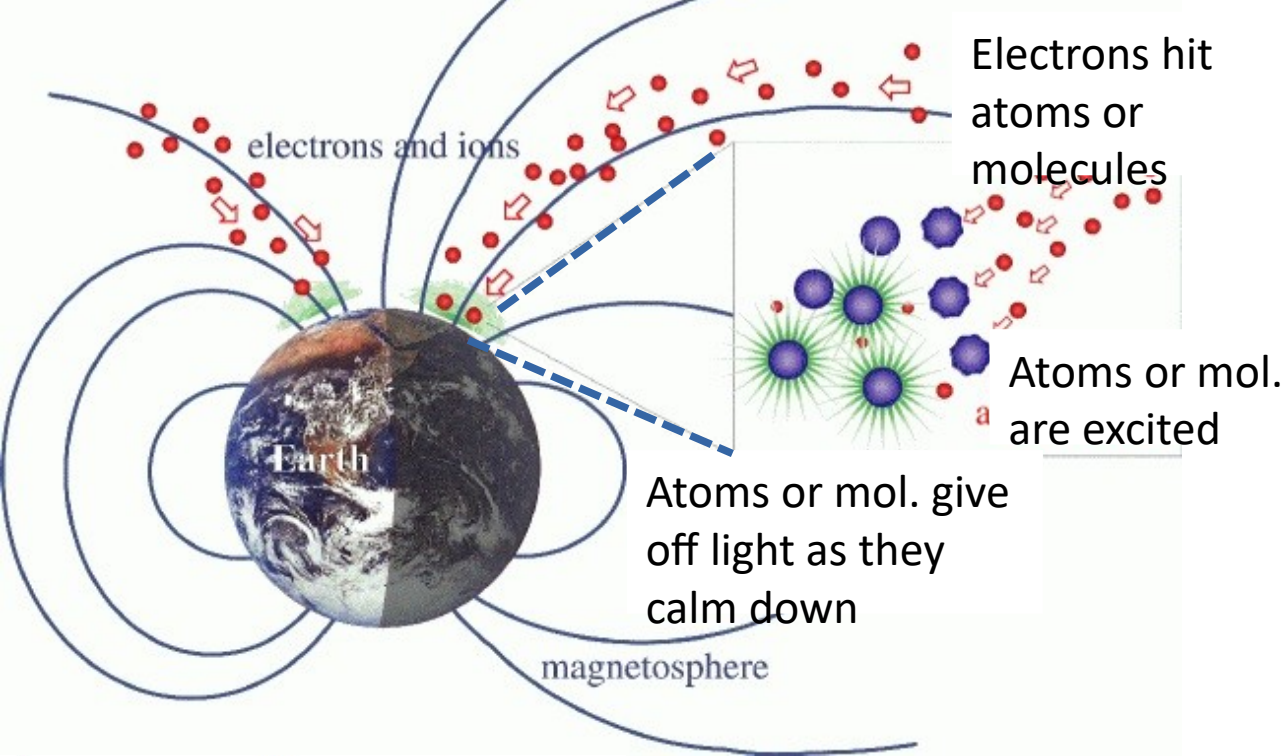


Partículas do vento solar espiralando na atmosfera superior da Terra ⇒ Auroras

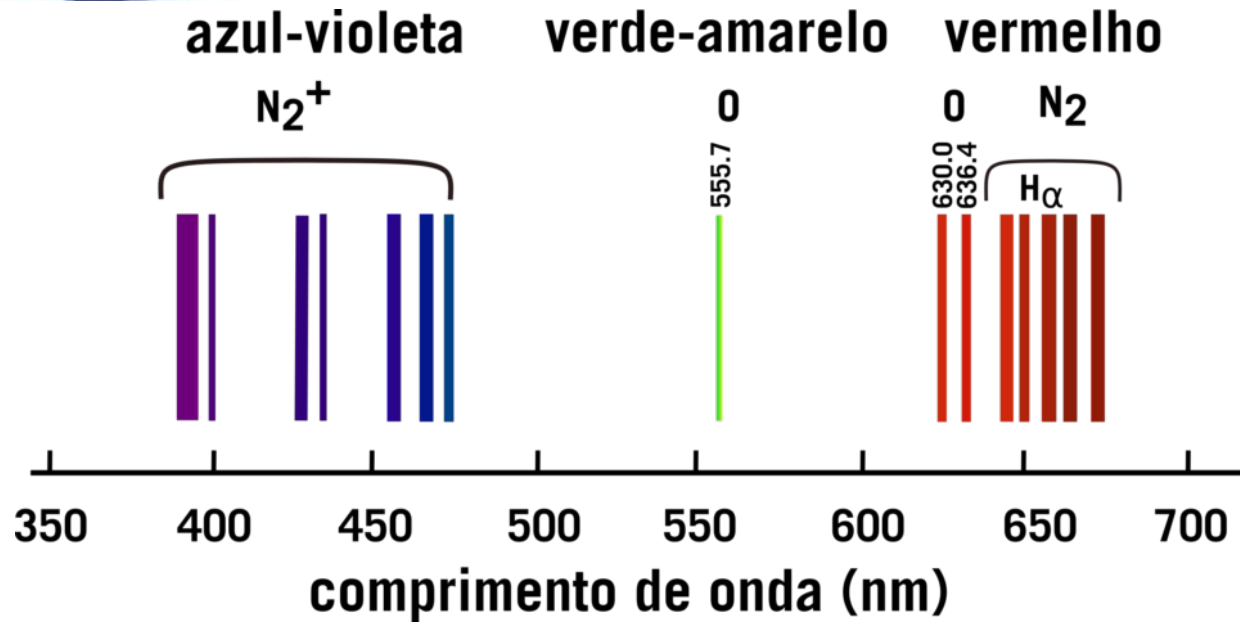
Hemisfério Norte:  
Aurora boreal

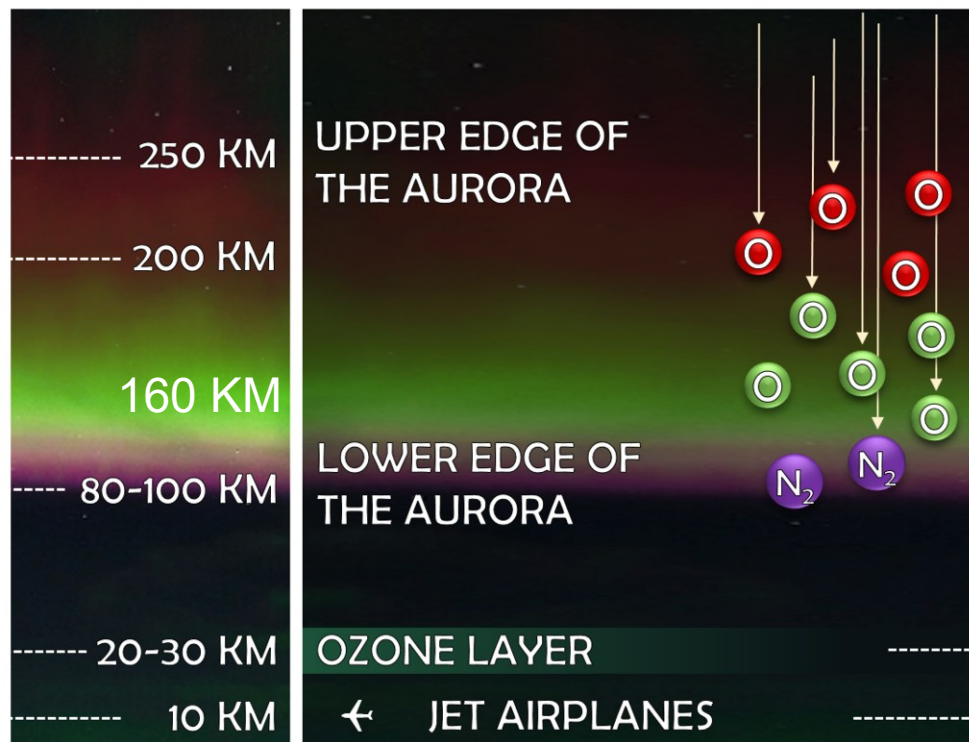
Hemisfério Sul:  
Aurora austral



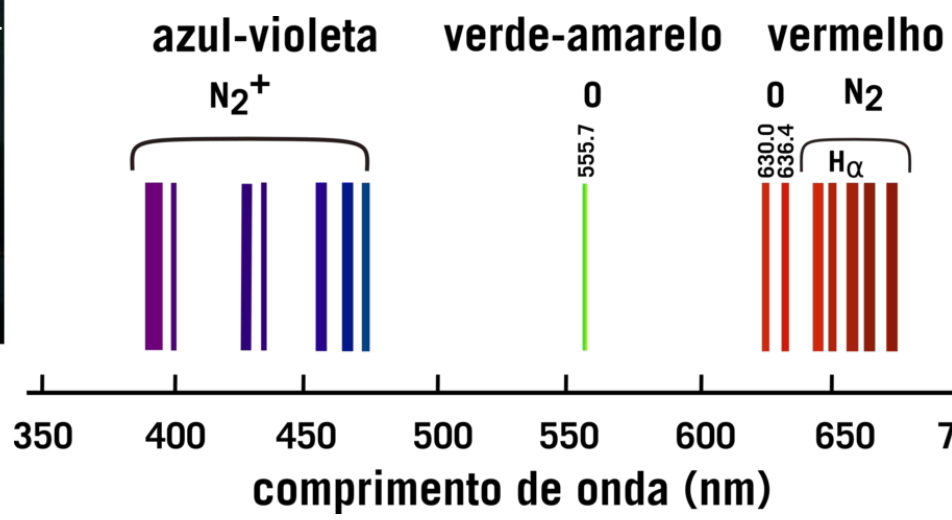
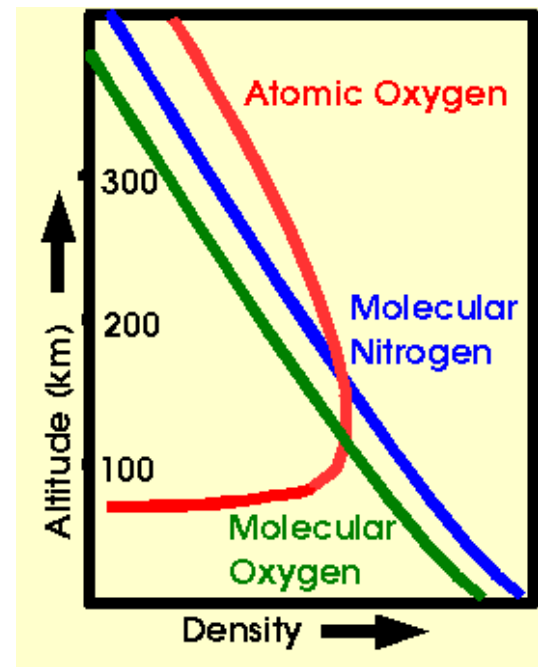


Weatherby.Eth in Iceland 🇫🇮 @whereisweatherb · 31 de out de 2021  
 Last night in Iceland 🇫🇮





Weatherby.Eth in Iceland 🇮🇸 @whereisweatherb · 31 de out de 2021  
 Last night in Iceland 🇮🇸🇳🇪





Suécia

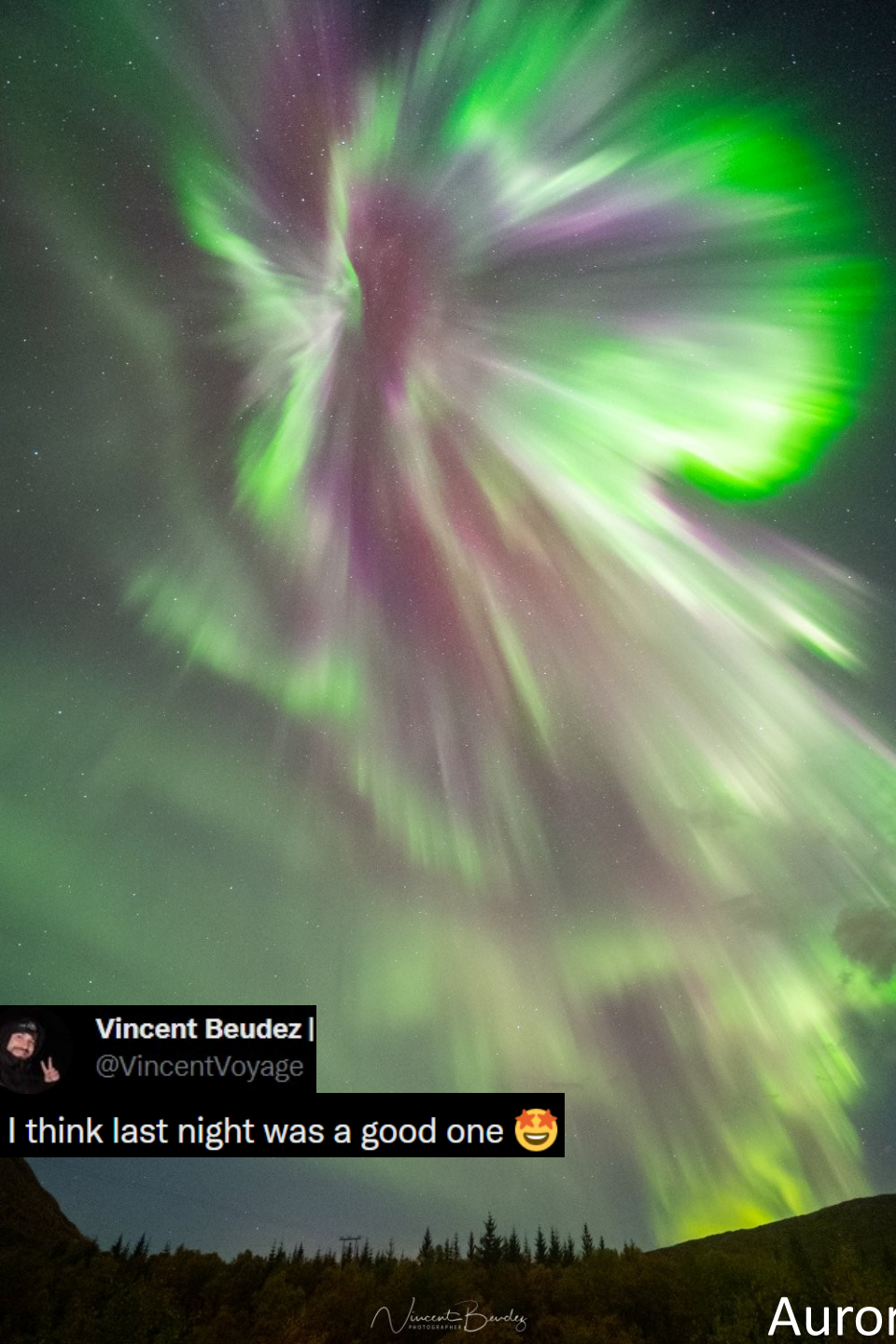


Aurora em Kiruna, 28/2/2019  
(c) Mia Stålnacke

Noruega







**Nordiclightphoto** @Nordiclightpho1 · 4 h  
Gm 😄 oh what a Night Last Night in Northern Norway. The Aurora exploded. @NightLights\_AM @PolarNightStud1 @dartanner @Tamit

 **Vincent Beudez |**  
@VincentVoyage

I think last night was a good one 😄

*Vincent Beudez*  
PHOTOGRAPHY

*Headshot by Jacek Szmit*

Auroras borealis, noite de 19 a 20/9/2022

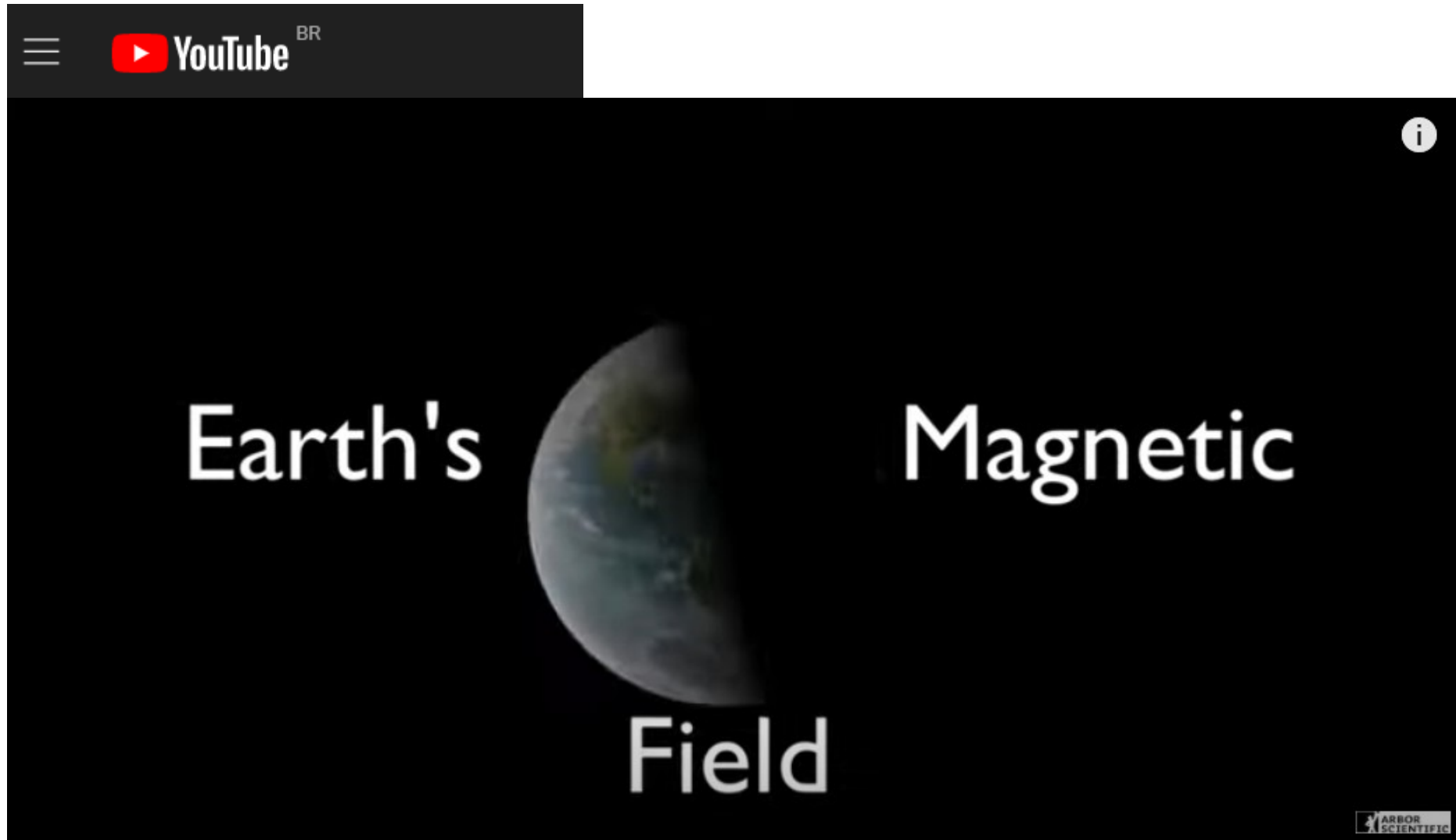


Nova  
Zelândia



# Vídeo sobre o campo magnético terrestre

[https://www.youtube.com/watch?v=Gea4cEA5Ris&ab\\_channel=ArborScientific](https://www.youtube.com/watch?v=Gea4cEA5Ris&ab_channel=ArborScientific)





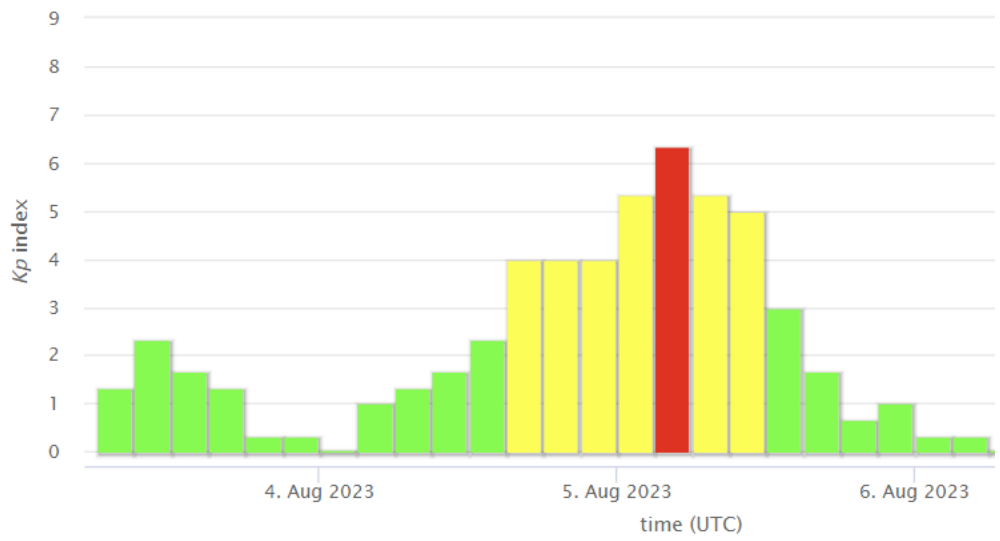
# Previsão de Auroras

<https://capturetheatlas.com/northern-lights-forecast/>

Depende principalmente do índice geomagnético Kp (índice K planetário),  $Kp > 4$

Most recent geomagnetic storm with  $Kp$  index  $> 6$

GFZ German Research Centre for Geosciences (CC BY 4.0)



<https://kp.gfz-potsdam.de/en/>

<p><b>KP0</b></p> <p>Quiet</p> <p>Very Low</p> <p>-</p> <p>Faint Glow</p> <p>Faint Green</p>	<p><b>KP1</b></p> <p>Quiet</p> <p>Low</p> <p>-</p> <p>Faint Glow</p> <p>Faint Green</p>
<p><b>KP2</b></p> <p>Quiet</p> <p>Moderate</p> <p>Very Low</p> <p>Glow/Arch</p> <p>Green</p>	<p><b>KP3</b></p> <p>Unsettled</p> <p>High</p> <p>Low</p> <p>Small Movement</p> <p>Green/Possible Yellow</p>
<p><b>KP4</b></p> <p>Unsettled</p> <p>High</p> <p>Low</p> <p>Active Auroras and Movement</p> <p>Green/Yellow/Pink</p>	<p><b>KP5 (G1)</b></p> <p>Active</p> <p>Very High</p> <p>Medium</p> <p>Multiple Substorms/Coronae</p> <p>Green/Yellow/Purple/Blue</p>
<p><b>KP6 (G2)</b></p> <p>Very Active</p> <p>Very High</p> <p>Medium/High</p> <p>Multiple Substorms/Coronae</p> <p>Active Green/Yellow/Purple/Blue</p>	<p><b>KP7 (G3)</b></p> <p>Strong Storm</p> <p>Extremely High</p> <p>High</p> <p>Longer Substorms</p> <p>Active Green/Blue/Yellow/Purple</p>
<p><b>KP8 (G4)</b></p> <p>Strong Storm</p> <p>Extremely High</p> <p>Very High</p> <p>Longer Substorms</p> <p>All the Previous + Red</p>	<p><b>KP9 (G5)</b></p> <p>Extreme Storm</p> <p>Extremely High</p> <p>Extremely High</p> <p>Extremely Long Substorms</p> <p>All the Previous + Red</p>



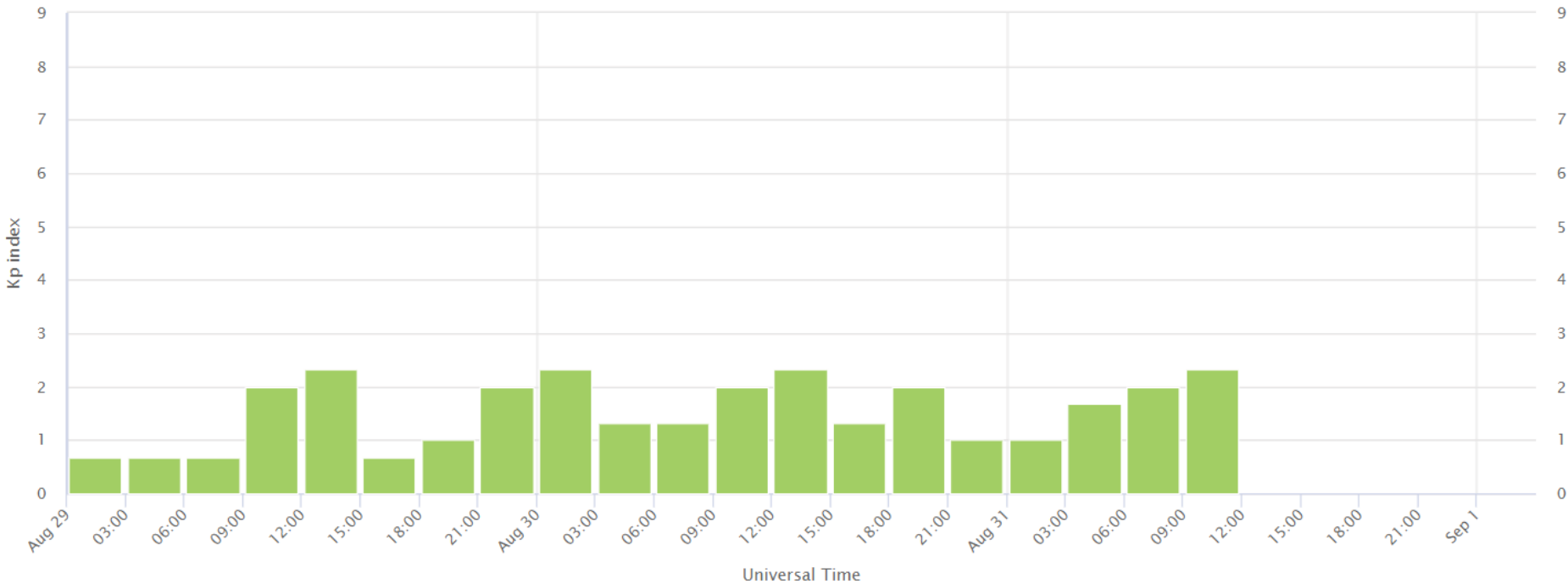
# SPACE WEATHER PREDICTION CENTER

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION

## PLANETARY K-INDEX

Estimated Planetary K index (3 hour data)

Begin: Tue, 29 Aug 2023 00:00:00 GMT



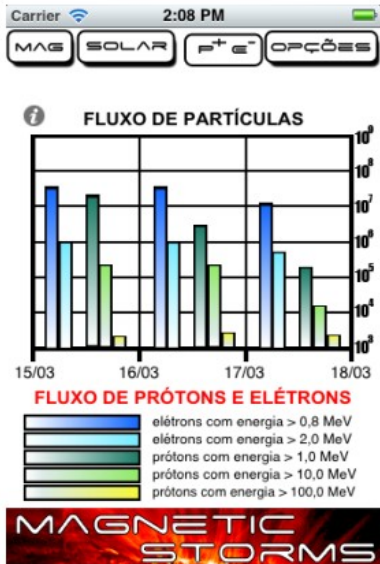
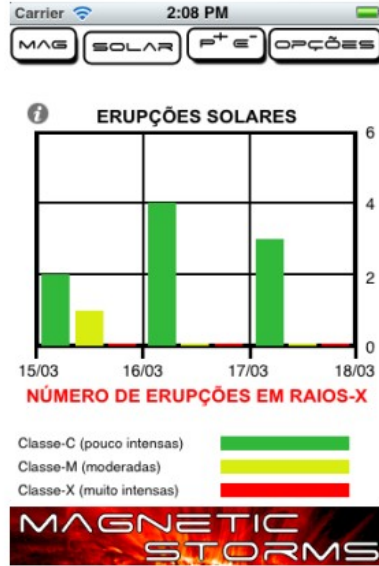
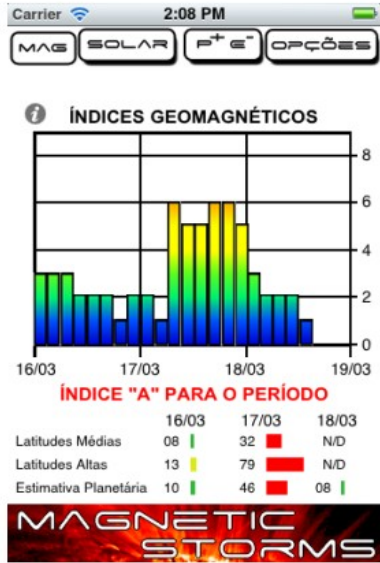
Updated Time: 2023-08-31T09:00:00.000Z

Space Weather Prediction Center

NOAA Scales Geomagnetic Storms

Kp < 5	Kp = 5 (G1)	Kp = 6 (G2)	Kp = 7 (G3)	Kp = 8, 9- (G4)	Kp = 9+ (G5)
--------	-------------	-------------	-------------	-----------------	--------------

# AURORA OBSERVADA NO "SAINT PATRICK'S DAY" ORIGINADA PELA CHEGADA DA CME OCORRIDA EM 15/MAR/2013, E EFEITOS OBSERVADOS NO CAMPO GEOMAGNÉTICO PELO APLICATIVO "MAGNETIC STORMS"



Entrevista de domingo: App brasileiro monitora as atividades solares

Por Vanessa Daraya, de RFD Online - Domingo, 17 de março de 2013 - 19h13



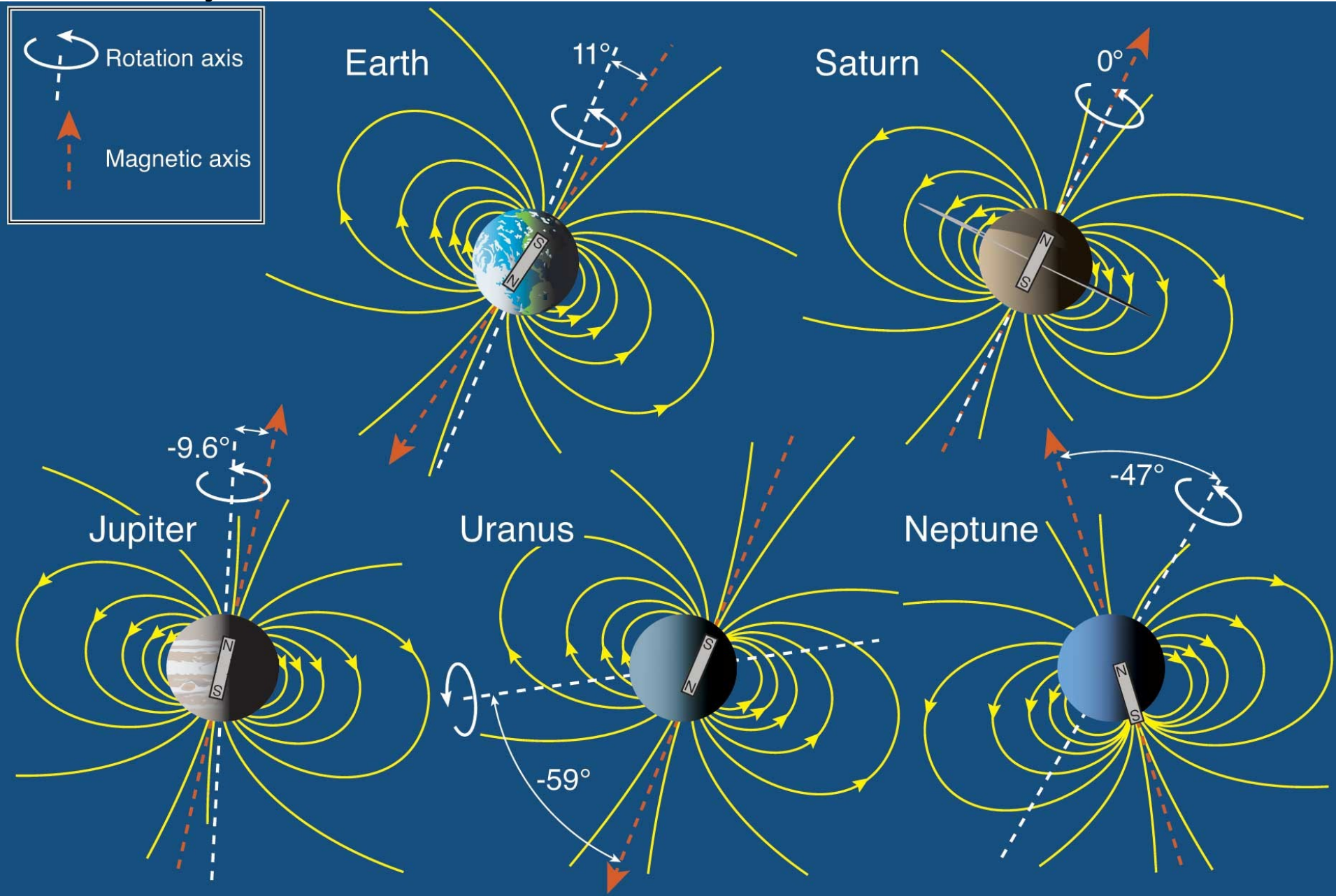
(c) Prof. Eder Molina (IAG-USP)



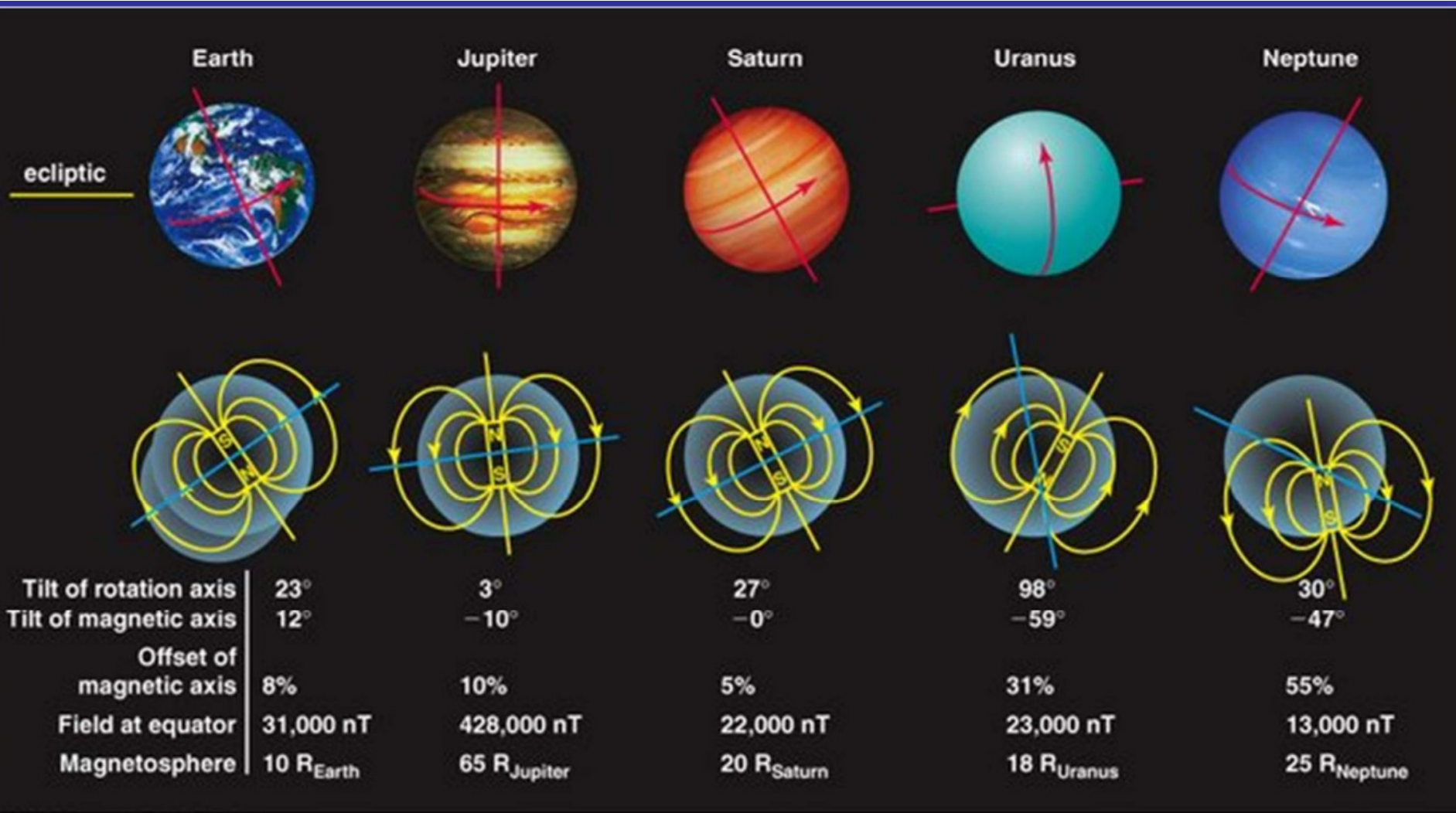


# Orientações do campo magnético da Terra e planetas gigantes, em relação ao seu eixo de rotação

<https://lasp.colorado.edu/home/mop/resources/graphics/>

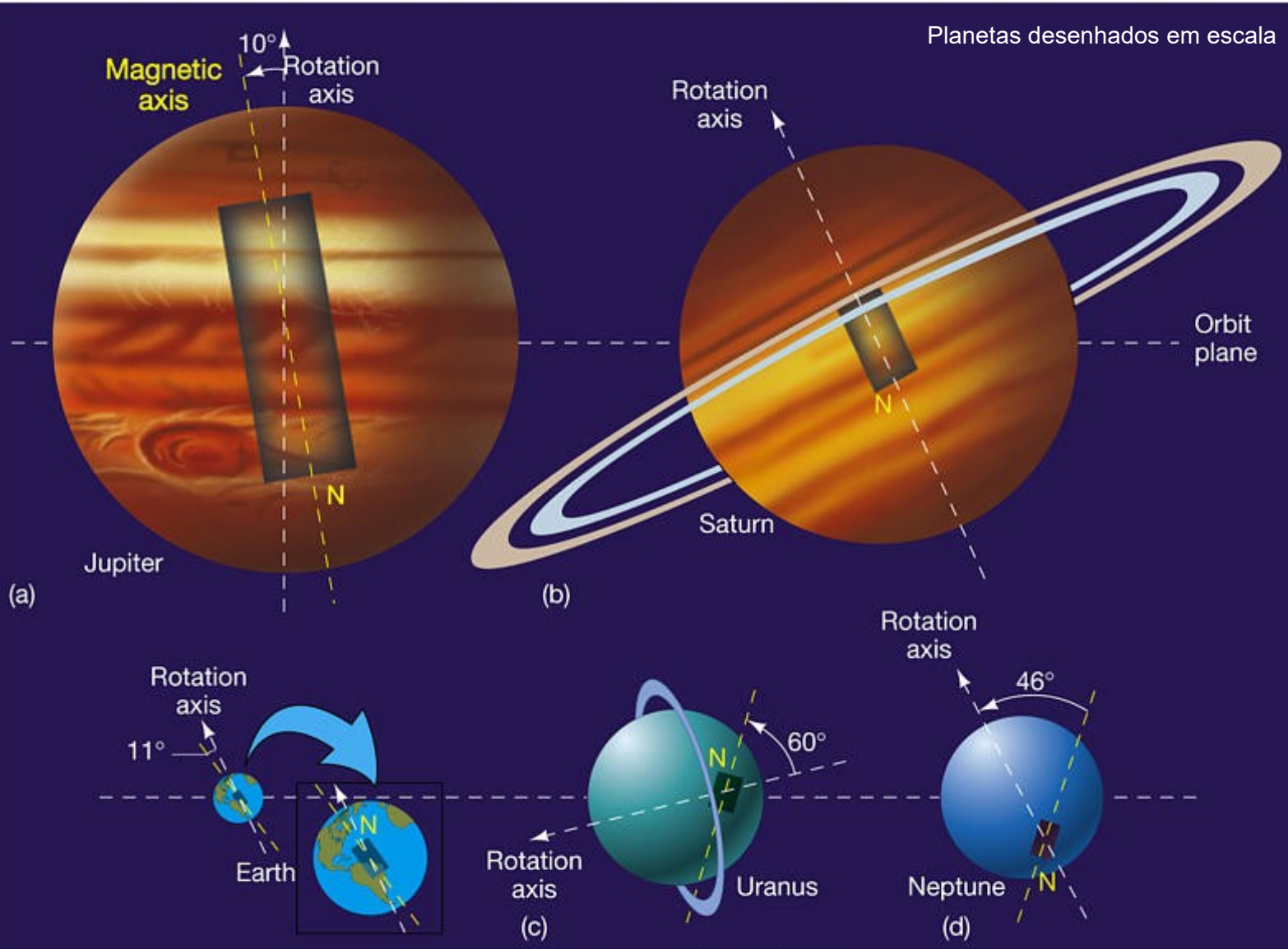


# Comparação dos campos magnéticos da Terra e planetas gigantes





# Comparação das intensidades, orientações e deslocamentos do campo magnético da Terra e planetas gigantes

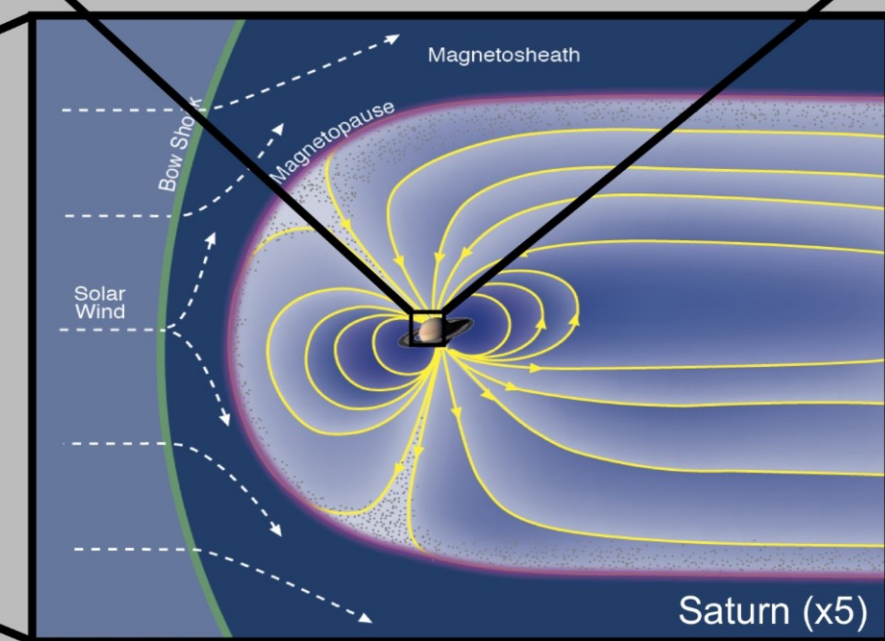
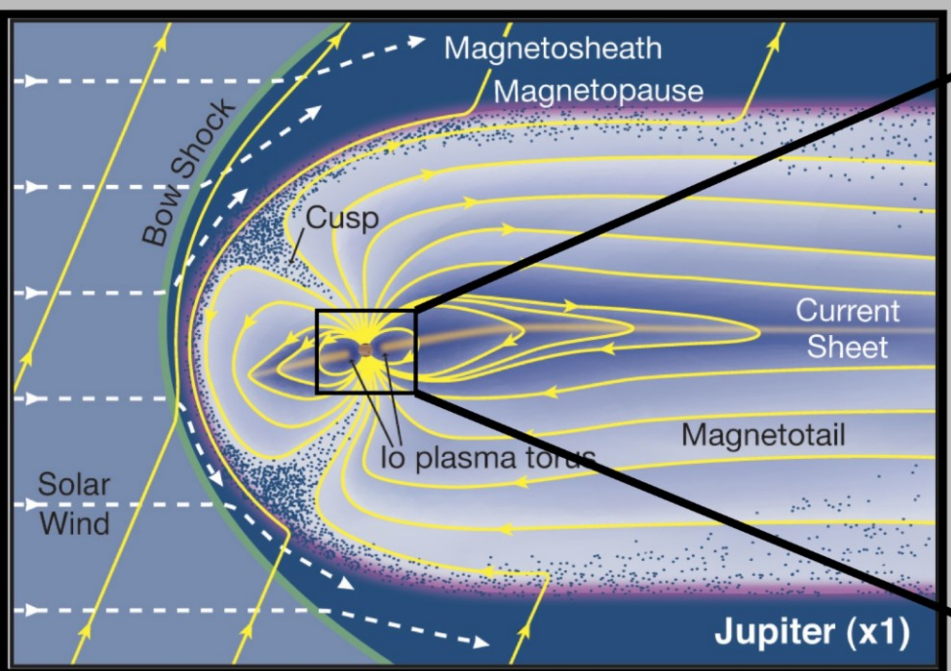
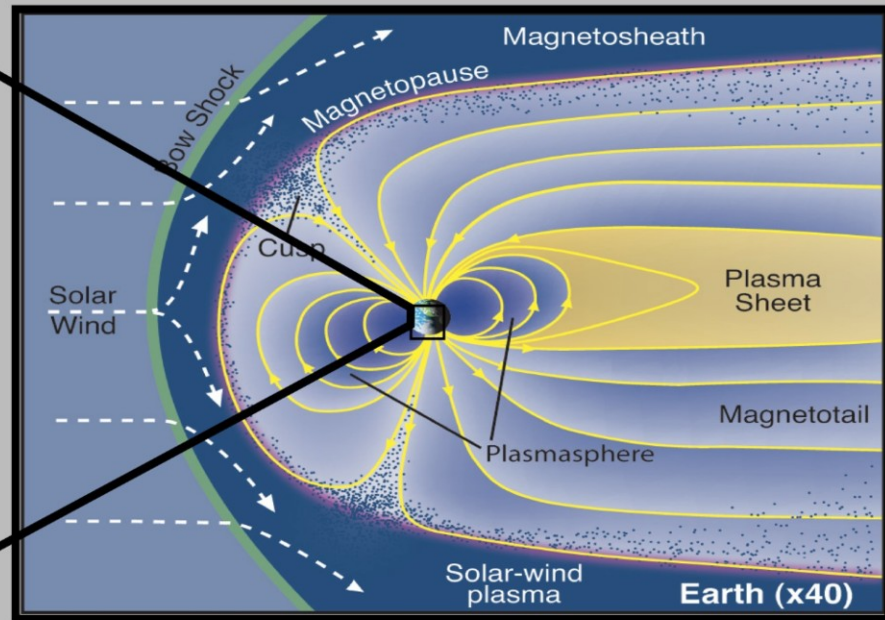
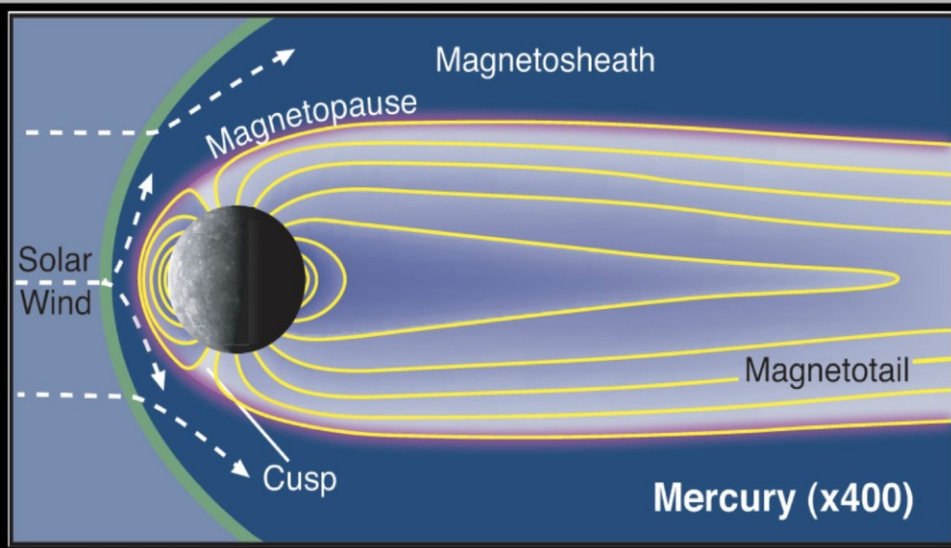


Planetas desenhados em escala

O campo magnético é representado como vindo de um ímã (magneto); tamanho e localização representam a intensidade e orientação do campo.

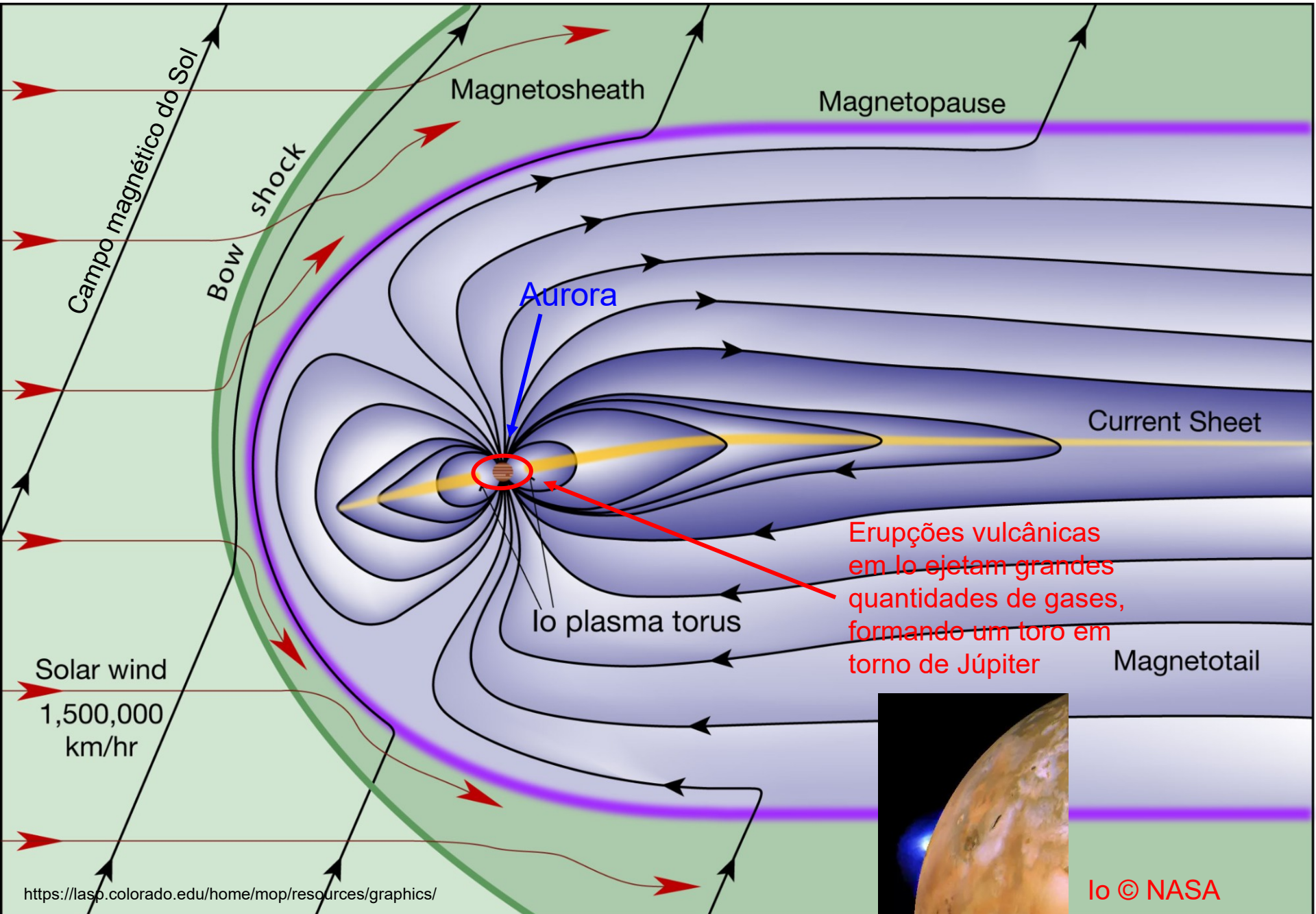
Urano e Netuno estão significativamente deslocados do centro do planeta e significativamente inclinados em relação ao eixo de rotação do planeta.





Comparação das magnetosferas de Mercúrio, Terra, Saturno e Júpiter

# Magnetosfera de Júpiter e Toro de Plasma de Io (lua galileana mais interna)

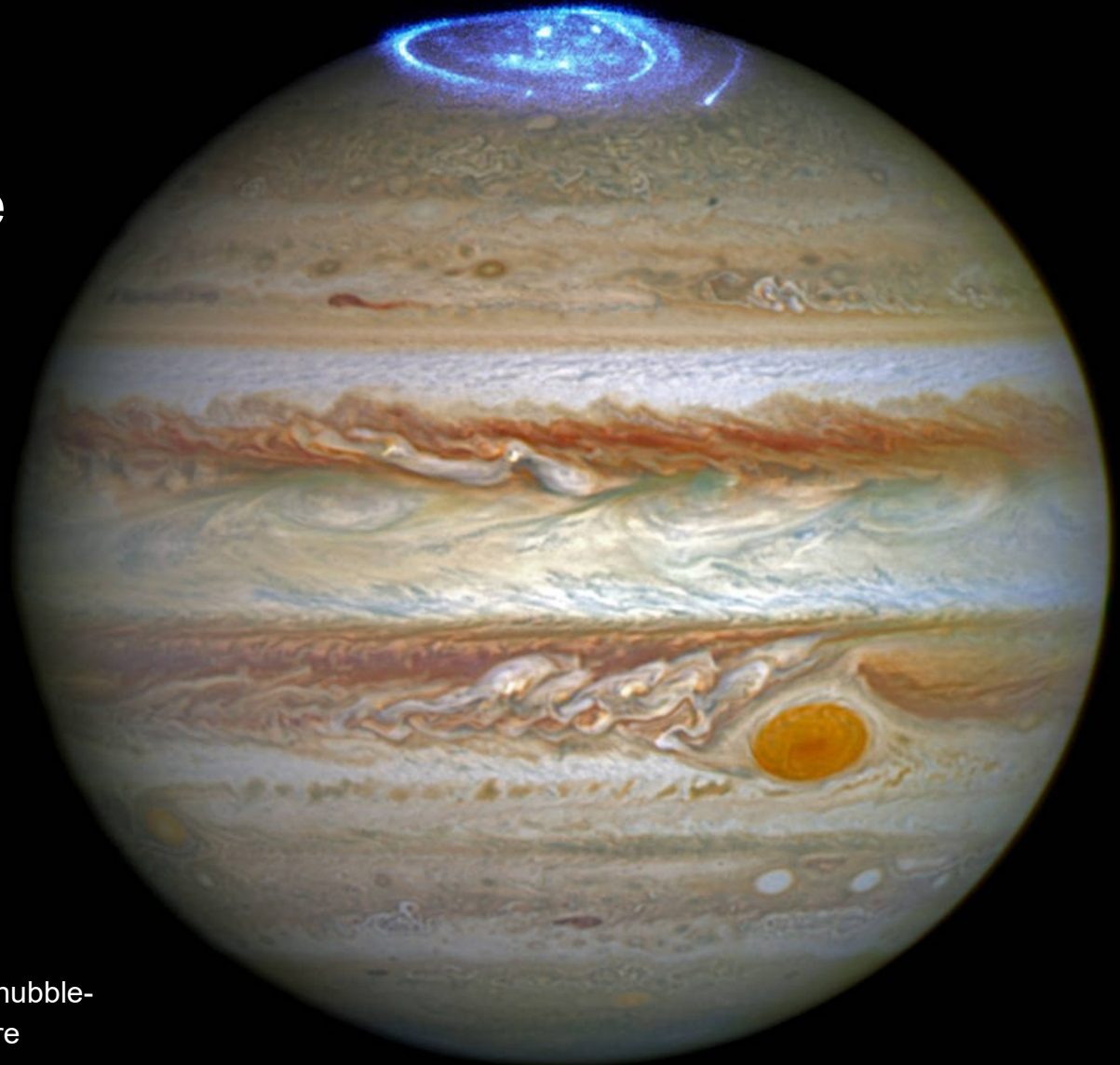


<https://lasp.colorado.edu/home/mop/resources/graphics/>



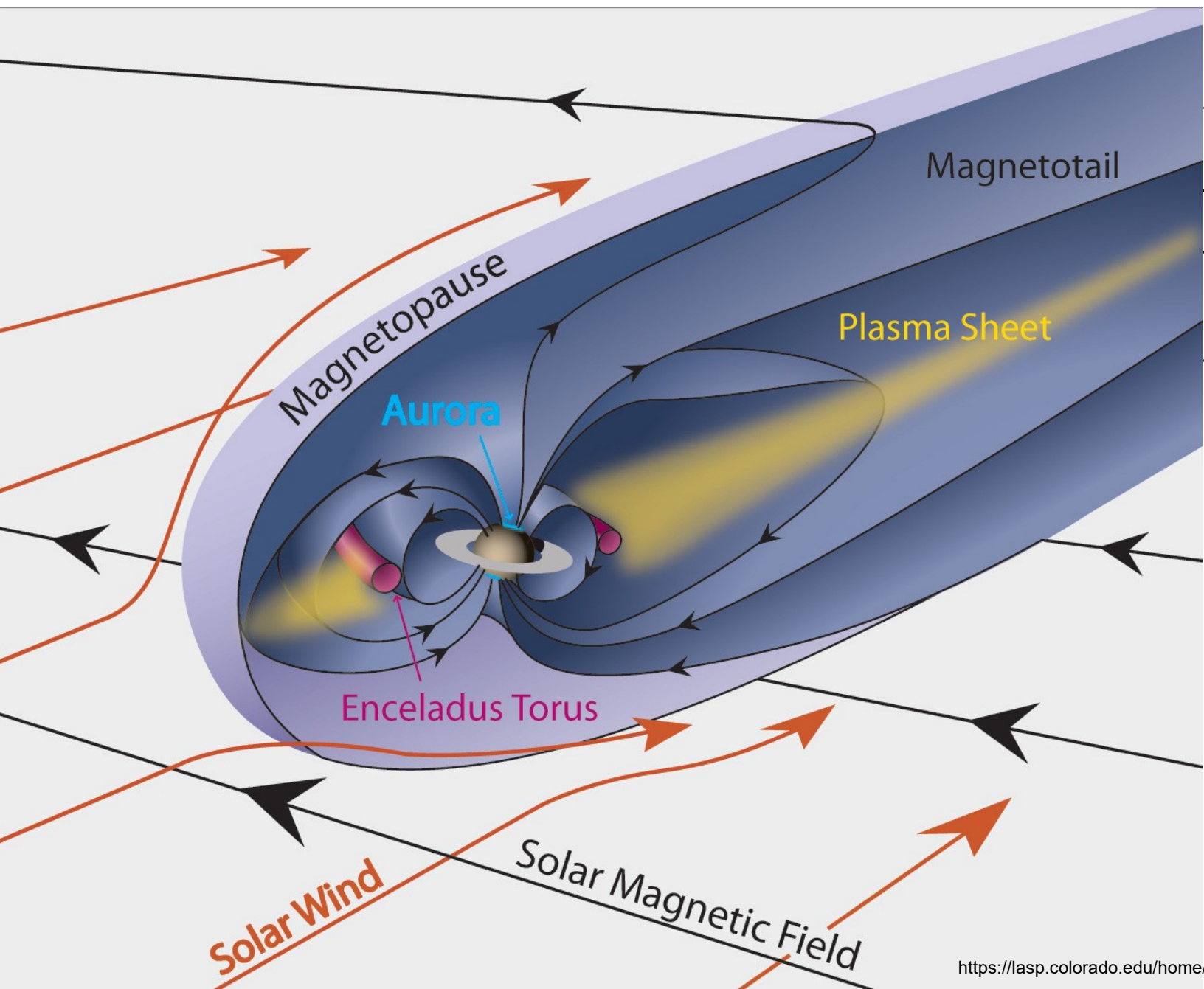
# Auroras em Júpiter

Imagem composta de duas observações do Telescópio Espacial Hubble: imagem do disco de Júpiter no visível e imagem da auroras em luz ultravioleta.



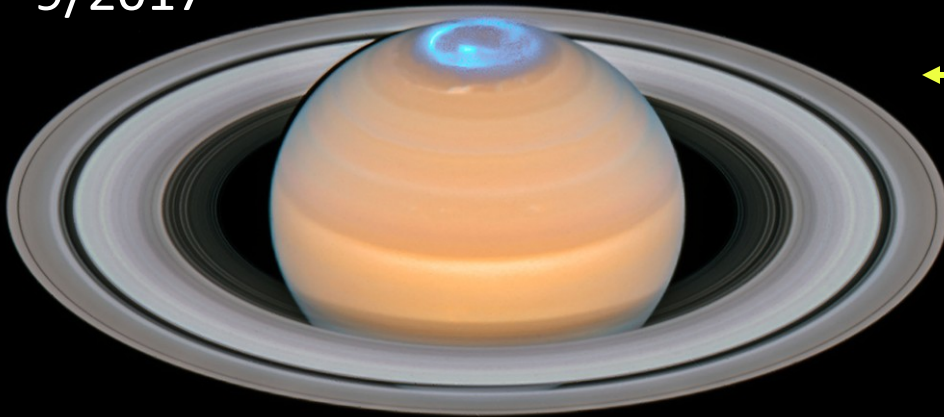


# Magnetosfera de Saturno e Toro de Vapor de água de Encélado



Assim como na Terra, também são formadas auroras em Saturno

9/2017

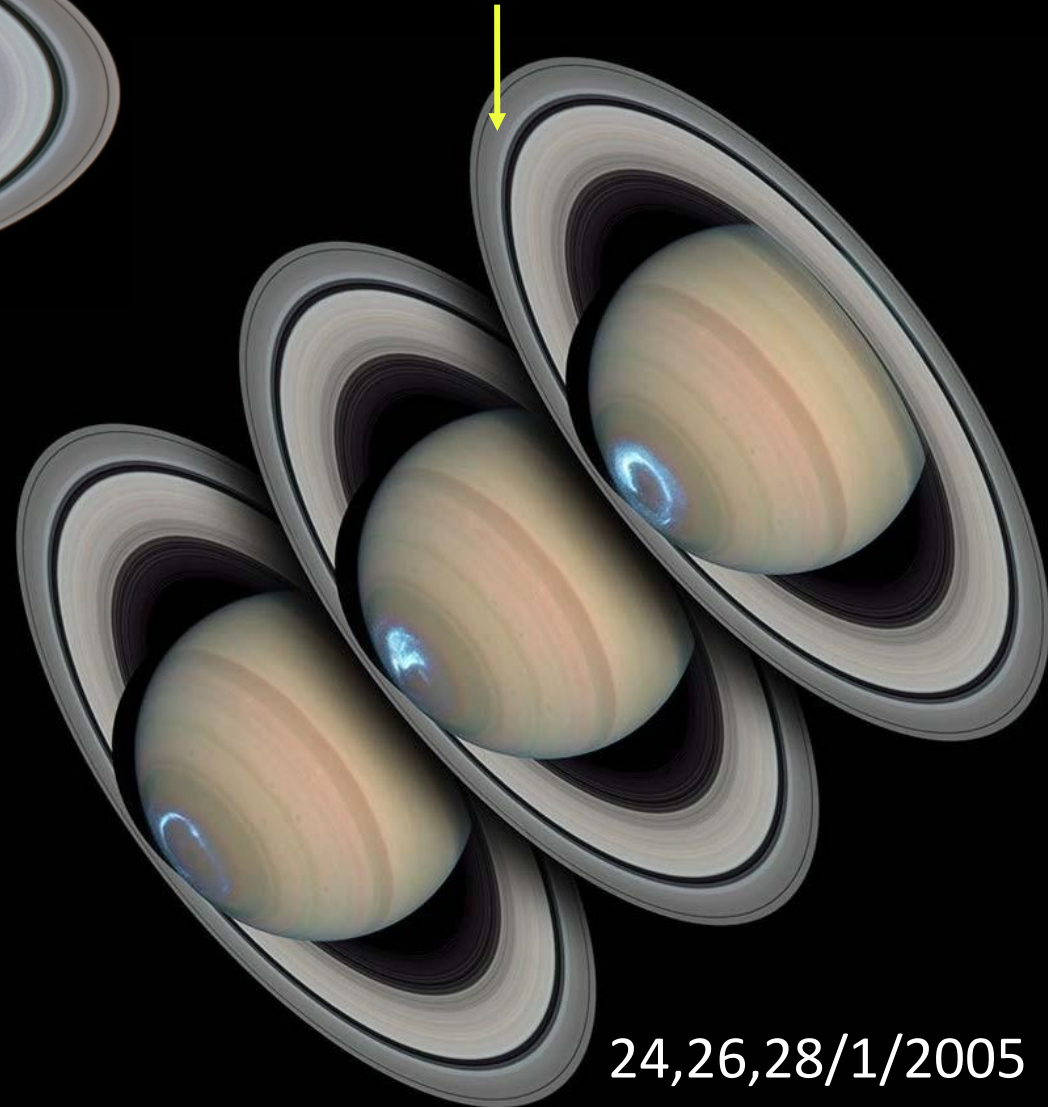


<https://apod.nasa.gov/apod/ap180903.html>

Imagens compostas  
de duas observações  
do Telescópio  
Espacial Hubble:  
imagem do disco de  
Saturno no visível e  
imagem da auroras  
em luz ultravioleta.

Auroras no polo

← Norte e Sul de Saturno



24,26,28/1/2005

<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/hubble-captures-vivid-auroras-in-jupiter-s-atmosphere>