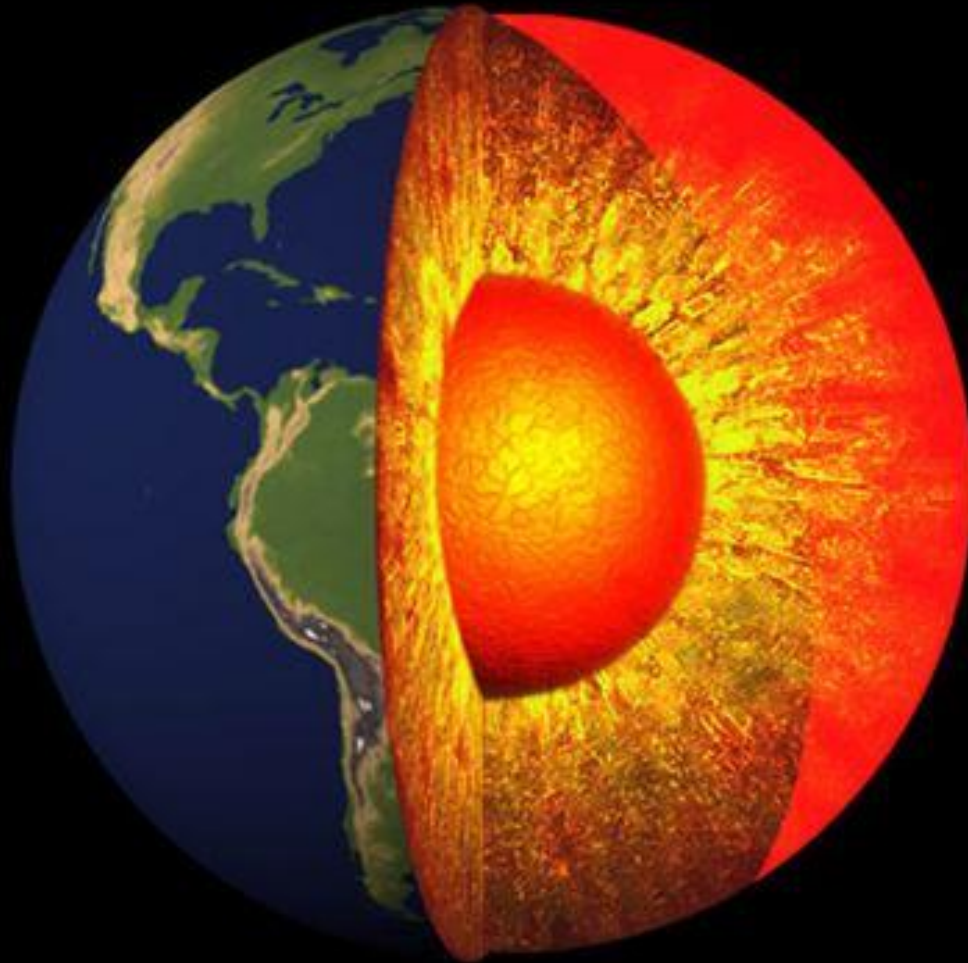


Conceitos Fundamentais da Física do Sistema Solar (MPA5004)

Enos Picazzio (IAGUSP)



**PLANETAS:  
ESTRUTURA INTERNA  
E MAGNETOSFERA**

*NÃO HÁ PERMISSÃO DE USO PARCIAL OU TOTAL DESTE MATERIAL PARA OUTRAS FINALIDADES.*

# ***Origem e evolução de um corpo planetário***

---

- reflete-se na composição do seu interior,
- as figuras geológicas nos planetas rochosos decorrem do transporte do calor interno até a superfície
- a existência de campo magnético auto-sustentável e/ou induzido requerem reservatório de fluido condutor interno em movimento
- uma camada fluída atua como interface entre as camadas interna e externa, logo a propagação de ondas sísmicas serão afetadas pelo estado físico do interior

# ***Origem e evolução de um corpo planetário***

---

- a forma do campo gravitacional está intimamente relacionada com a distribuição da massa

→ o achatamento do campo gravitacional revela a concentração de massa no interior

- um parâmetro importante para a determinação da distribuição de massa é o valor médio da densidade nas regiões incompressíveis que indica como a massa está distribuída em um volume unitário

→ também reflete as transições de fase de minerais causada pelo peso das camadas superiores

# ***Planetas terrestres (telúricos)***

---

- caracterizados por pouca massa, tamanhos pequenos, densidades elevadas se comparadas aos planetas gigantes

- a composição química é dominada por material rochoso e metais mais concentrados nas regiões centrais

- campos gravitacional e magnético indicam interiores diferenciados: núcleos metálicos líquidos, manto de silicatos, crosta.

- nos casos de Terra, Vênus e Marte as pressões nos mantos são suficientes para promover transições de fases nos minerais.

- as mudanças de densidade nas camadas descontínuas são dependentes da temperatura ambiente e do conteúdo de ferro. Dados sísmicos auxiliam a análise de tais casos

# ***Satélites dos planetas jovianos***

---

- excetuando Io, os satélites são recobertos por gelo de água ou da mistura de água, amônia e metano

- Io é vulcanicamente muito ativo e praticamente perdeu material volátil devido ao aquecimento produzido por forças de maré.

- as densidades de Ganimedes e Calisto, e Titan, os maiores satélites de congelados de Júpiter e Saturno, respectivamente, sugerem que seus interiores sejam compostos de gelo, silicatos e metais em proporções quase iguais.

# ***Satélites dos planetas jovianos***

---

- as densidades da Lua e de Io e Europa, sugerem interiores consistindo principalmente de silicatos e metais. Europa apresenta uma camada de água líquida abaixo de sua superfície congelada.

- a presença de campo magnético induzido nas vizinhanças dos satélites Europa, Ganimedes e Calisto sugerem a existência de reservatórios de água líquida eletricamente condutora (sais?).

# ***Modelando o interior planetário***

---

- os modelos são baseados em cálculos numéricos e dados de laboratório dos materiais disponíveis (rochas terrestres e meteoritos)

- eles fornecem pistas sobre a origem, evolução e estado atual dos corpos planetários.

- os perfis radiais resultantes de densidade e propriedades dos materiais devem ser consistentes com as evidências geofísicas e com a química obtida de medidas de sondas espaciais.

# ***Equações básicas***

---

*Descrevem como variam pressão, temperatura, densidade, química, distribuição de massa etc. com a profundidade.*

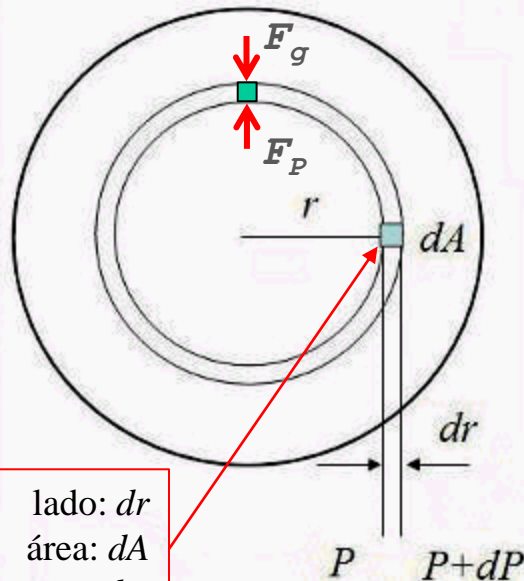


# Equações básicas

Descrevem como variam **pressão**, temperatura, densidade, química, distribuição de massa etc. com a profundidade.

## EQUILÍBRIO HIDROSTÁTICO

No equilíbrio hidrostático, as forças de pressão equilibram a força gravitacional:



$$dF_g = -\frac{GM_r dm}{r^2} = -\frac{GM_r \rho}{r^2} dA dr$$

$$dF_P = dP dA$$

$$dF_g = dF_P$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r \rho}{r^2} \\ g = \frac{GM_r}{r^2} \end{array} \right.$$

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

Equação de equilíbrio hidrostático

# Equações básicas

Descrevem como variam **pressão**, temperatura, densidade, química, distribuição de massa etc. com a profundidade.

Equilíbrio hidrostático

$$\frac{dP}{dr} = -\rho(r) \left[ g(r) - \frac{3}{2} \omega^2 r \right]$$

$P \equiv$  pressão ;  $r \equiv$  distância do centro

$\rho(r) \equiv$  densidade na posição  $r$

$\omega(r) \equiv$  velocidade angular em  $r$

$g(r) =$  ac. gravitacional em  $r$ ,

$$g(r) = \frac{GM(r)}{r^2} = \frac{G}{r^2} 4\pi \int_0^r \rho(x) x^2 dx ;$$

# Equações básicas

Descrevem como variam pressão, temperatura, densidade, química, distribuição de massa etc. com a profundidade.

## Equação do gás perfeito

$$P(r) = n(r)kT(r) = \frac{\rho(r)}{\mu(r)m_H} kT(r)$$

$$\langle T \rangle = \frac{\int_0^R T(r) dM(r)}{\int_0^R dM(r)} ; \quad T_c \geq \frac{\mu(r)m_H GM(r)}{2kR(r)}$$

$\mu(r) \equiv$  peso molecular em  $r$ ;  $m_H \equiv$  massa do hidrogênio  
 $k \equiv$  cte. de Boltzmann;  $T(r) \equiv$  temperatura em  $r$

# Equações básicas

---

Descrevem como variam pressão, temperatura, densidade, química, distribuição de massa etc. com a profundidade.

No caso dos planetas terrestres o equacionamento é mais complicado por não se tratar de meio gasoso. Essencialmente é o seguinte: para uma camada homogênea, sem variação de composição química e mudanças de fase:

$$\frac{d\rho}{dr} = \left( \frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T \frac{dP}{dr} + \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \frac{dT}{dr}$$

onde  $\rho$  = densidade,  $r$  = raio,  $P$  = pressão,  $T$  = temperatura

Para uma região homogênea, comprimida, com a temperatura aumentando com a compressão (i.é, sob *gradiente de temperatura adiabático*):

$$\frac{dP}{dr} = -g\rho; \quad g = \frac{GM(r)}{r^2}$$

# Equações básicas

Descrevem como variam pressão, temperatura, densidade, química, distribuição de massa etc. com a profundidade.

Sendo o manto convectivo (mas não líquido), o gradiente médio de temperatura, longe das camadas de transição, está próximo do adiabático (subscrito S):

$$\frac{dT}{dP} = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_S = \frac{T\alpha}{\rho C_p} \quad \text{onde} \quad \alpha = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P = \text{coeficiente volumétrico de expansão}$$

térmica;  $C_p$  = calor específico a pressão cte.

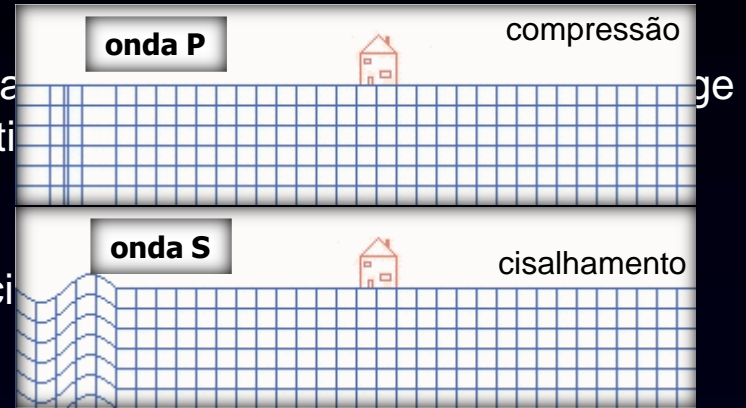
Pode-se escrever o gradiente de temperatura como:  
de correção de desvio do gradiente adiabático.

$$\frac{dT}{dr} = \frac{T\alpha}{\rho C_p} \frac{dP}{dr} - \tau \quad ; \quad \text{onde } \tau \text{ é o fator}$$

# Equações básicas

Descrevem como variam pressão, temperatura, **densidade**, química, distribuição de massa etc. com a profundidade.

Sendo o manto convectivo (mas não líquido), o grande número de Prandtl das camadas de transição, está próximo do adiabático.



$$\frac{dT}{dP} = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_S = \frac{T\alpha}{\rho C_p} \quad \text{onde} \quad \alpha = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P = \text{coeficiente}$$

térmica;  $C_p$  = calor específico a pressão cte.

Pode-se escrever o gradiente de temperatura como: de correção de desvio do gradiente adiabático.

$$\frac{dT}{dr} = \frac{T\alpha}{\rho C_p} \frac{dP}{dr} - \tau \quad ; \quad \text{onde } \tau \text{ é o fator}$$

No regime adiabático, a relação entre as velocidades  $V_P$  e  $V_S$  das ondas sísmicas é:

$$V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 = \frac{K_S}{\rho} = \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_S = \phi \quad ; \quad \text{com} \quad K_S = \left( \frac{\rho \partial P}{\partial \rho} \right)_S$$

ao gradiente adiabático de densidade de uma região auto-comprimida e adiabática:

$$\frac{d\rho}{dr} = -\frac{g\rho}{\phi} + \alpha\rho\tau$$

equação Williamson-Adams.

Primárias,  
Secundárias

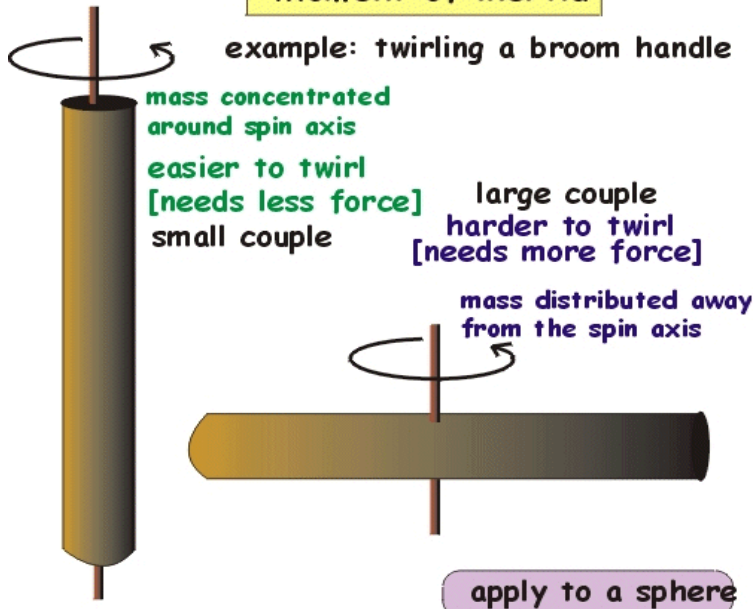
# Equações básicas

Descrevem como variam pressão, temperatura, **densidade**, química, distribuição de massa etc. com a profundidade.

## Momento de inércia

$$I = \int r^2 dm = \frac{8\pi}{3} \int_0^R \rho(r) r^4 dr$$

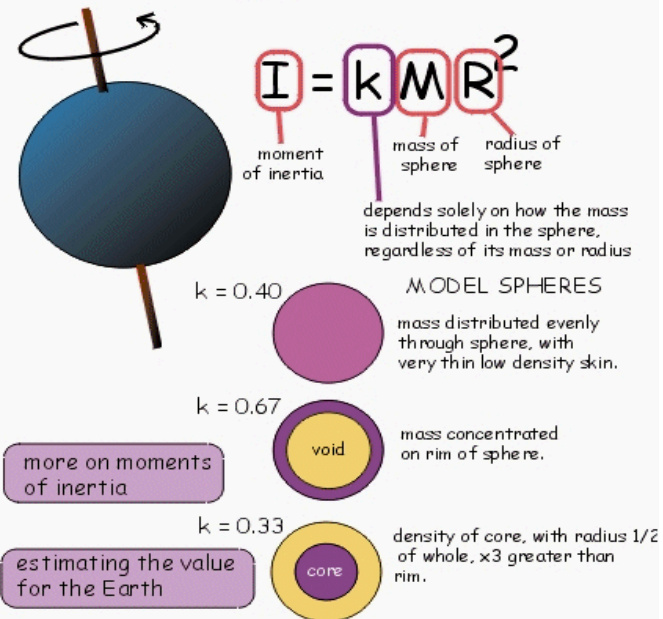
### Moment of inertia



### Moment of inertia

for a sphere

2



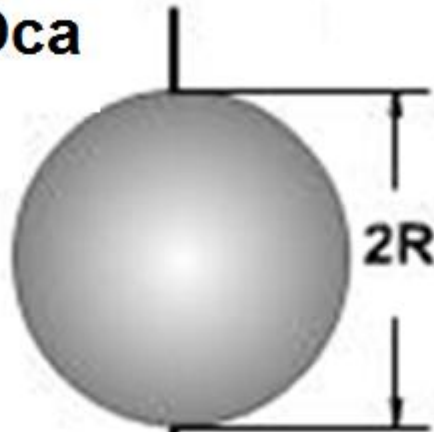
# Equações básicas

Descrevem como variam pressão, temperatura, densidade, química, distribuição de massa etc. com a profundidade.

## Momento de inércia

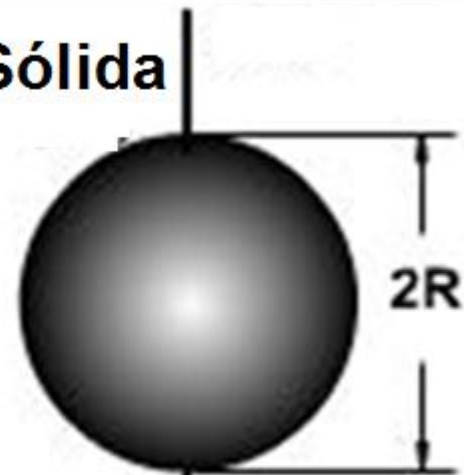
$$I = \int r^2 dm = \frac{8\pi}{3} \int_0^R \rho(r) r^4 dr$$

**Esfera Oca**



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

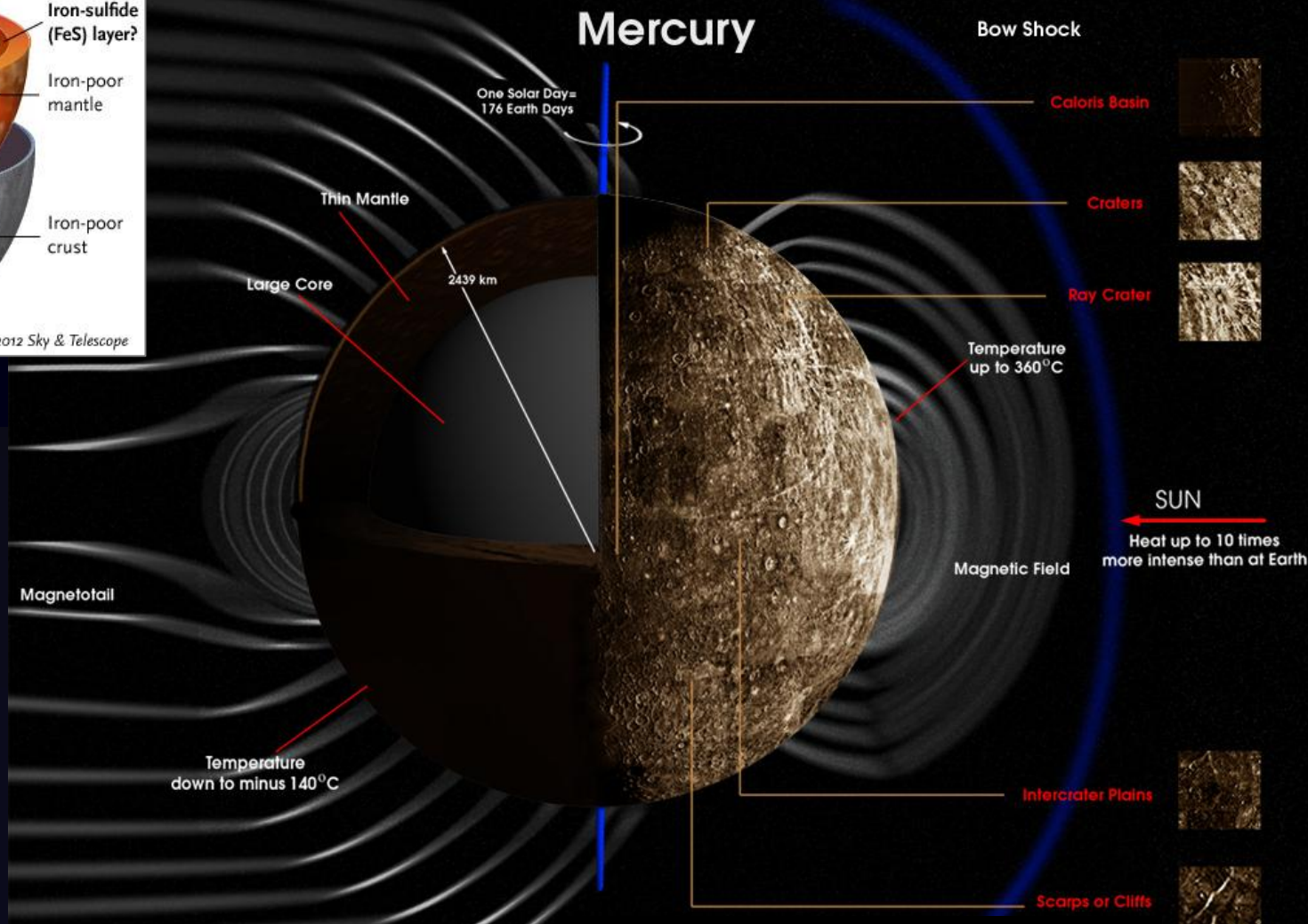
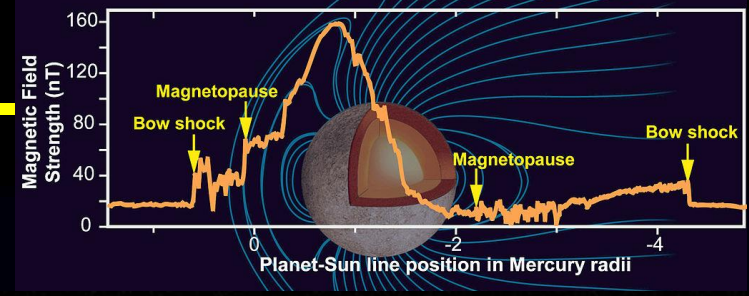
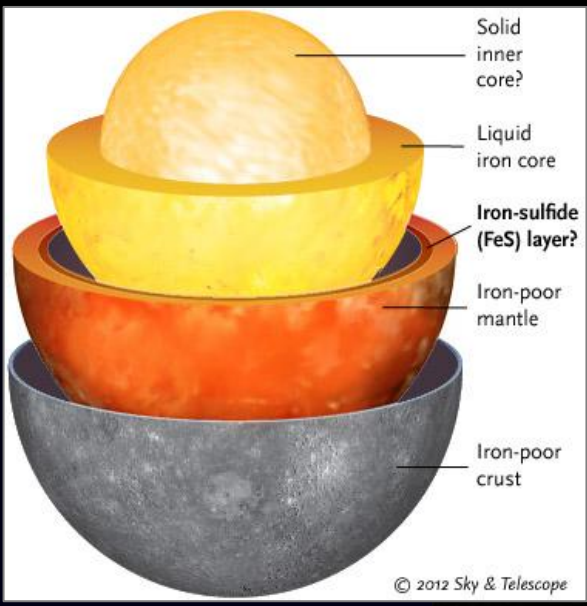
**Esfera Sólida**



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

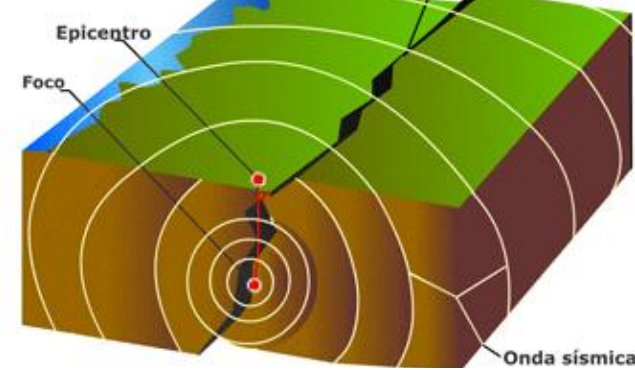


# Mercúrio

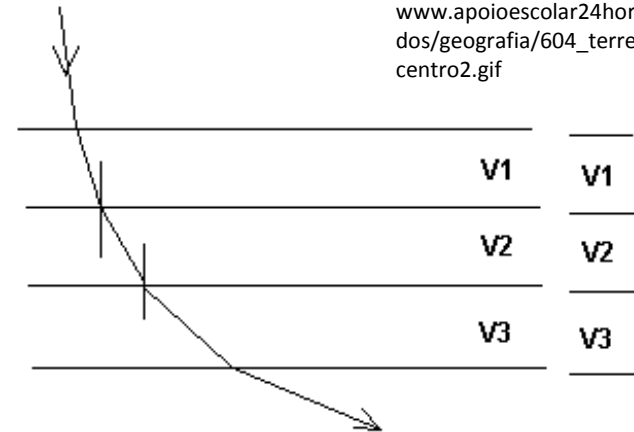
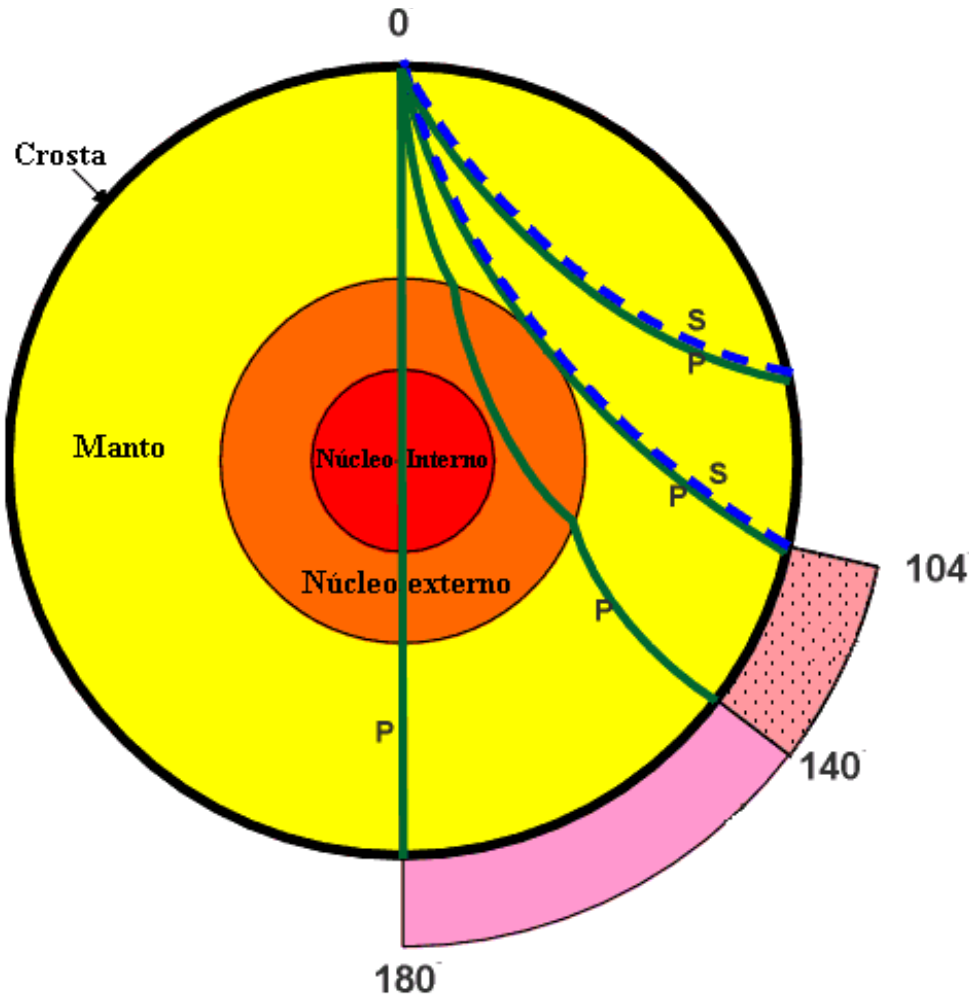


# Terra

**Hipocentro ou foco** = ponto onde se inicia a ruptura e a liberação de energia;  
**Epicentro** = sua projeção na superfície  
**Profundidade focal** = distância entre o foco e o epicentro



[www.apoioescolar24horas.com.br/cf/salaaula/estudos/geografia/604\\_terremotos/images/estudo/epicentro2.gif](http://www.apoioescolar24horas.com.br/cf/salaaula/estudos/geografia/604_terremotos/images/estudo/epicentro2.gif)



$$V1 > V2 > V3$$

$$\frac{\text{sen } \theta 1}{V1} = \frac{\text{sen } \theta 2}{V2} = \frac{\text{sen } \theta 3}{V3}$$

onda P		compressão
onda S		cisalhamento

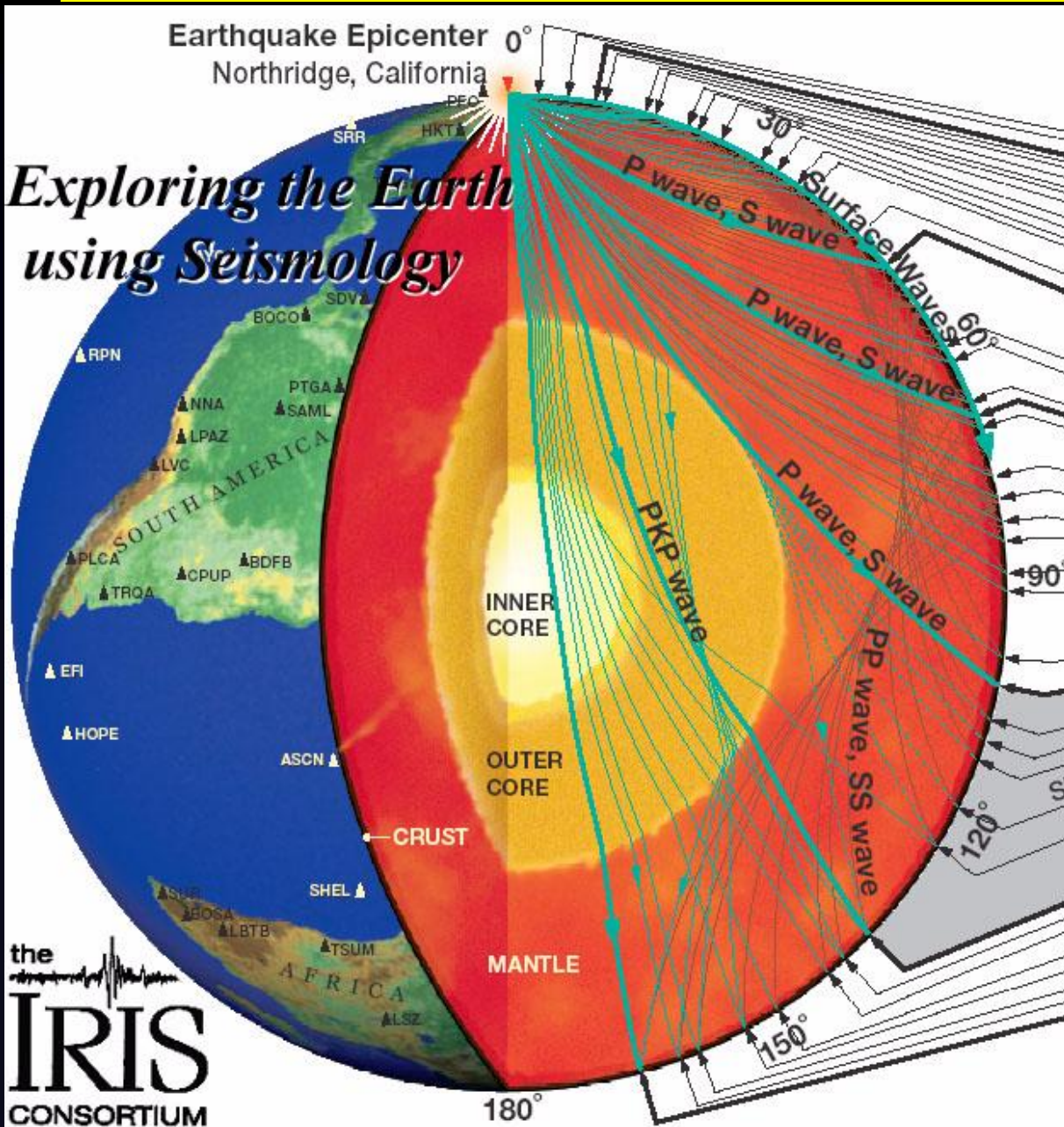
Em rochas, a velocidade de propagação das ondas sísmicas aumenta com a densidade do meio.

Sugestão para leitura: "Decifrando a Terra" (Wilson Teixeira e outros), Cap.3

# Terra

Earthquake Epicenter  
Northridge, California

## Exploring the Earth using Seismology



- *P e S: diretas*
- *PP e pP: refletidas*
- *PS: convertidas em fase:*
- *PKP: fase que atravessa o núcleo:*

*P traço forte*  
*S traço fraco*

onda P



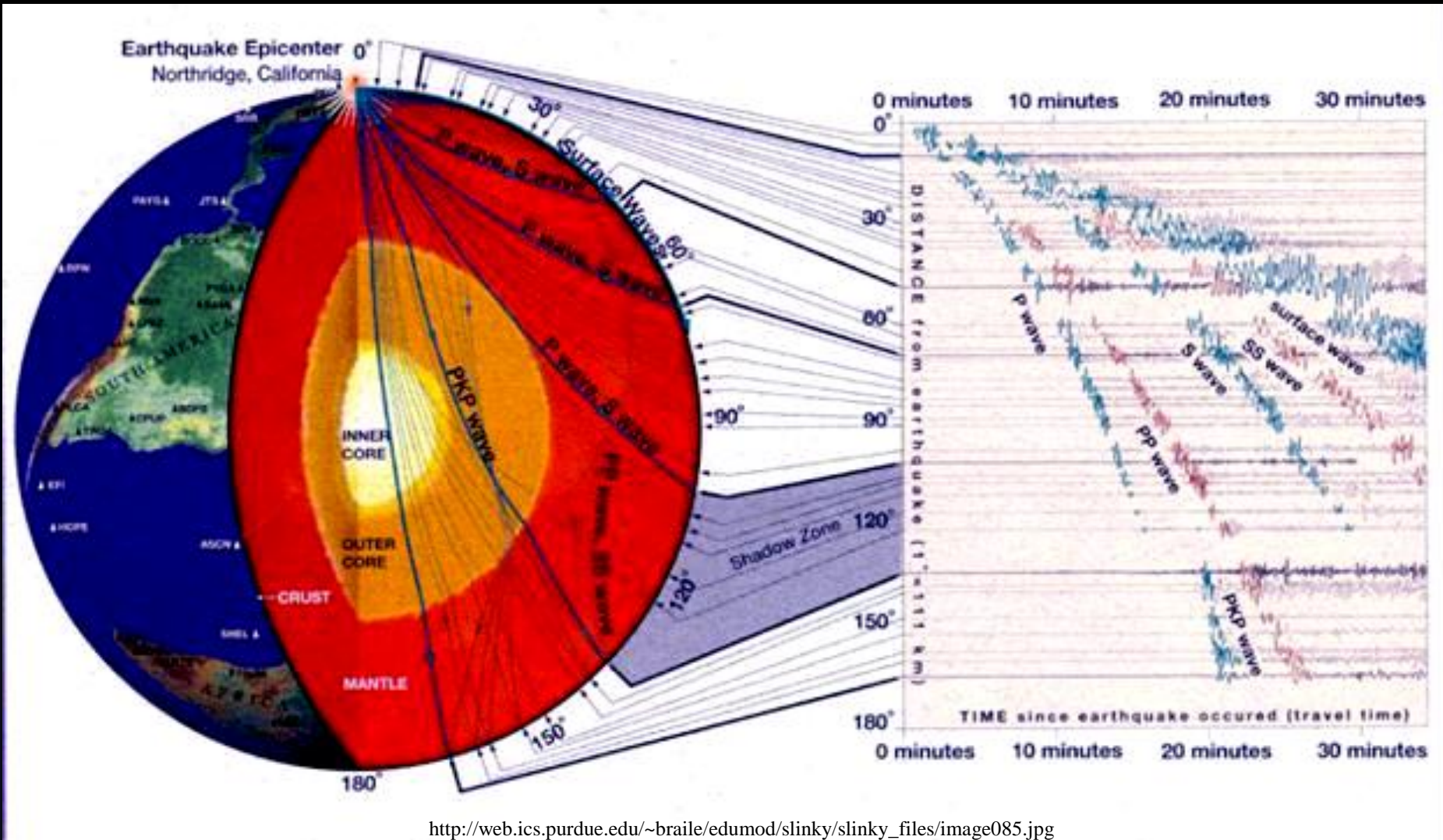
compressão

onda S



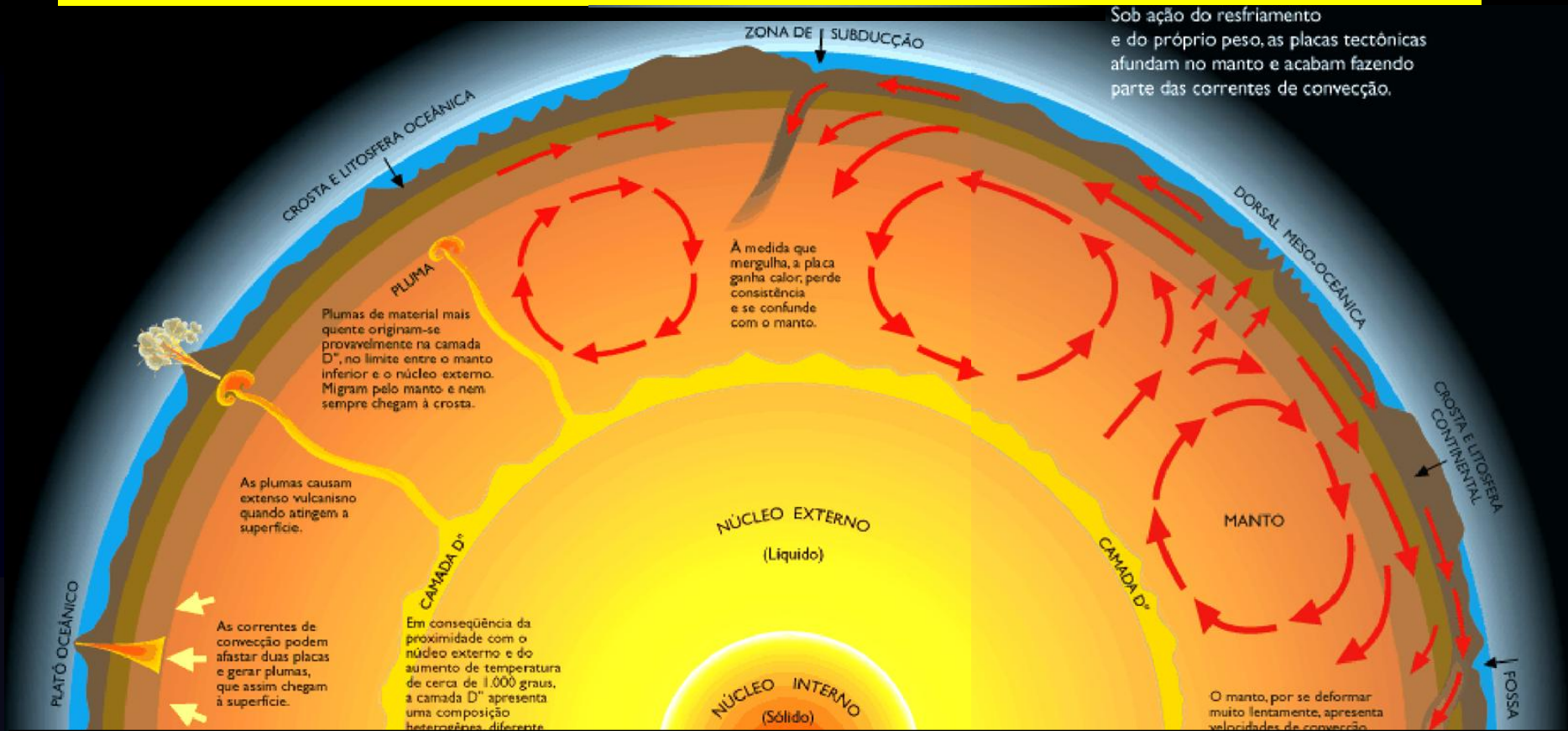
cisalhamento

# Terra



P e S: diretas - PP e pP: refletidas - PS: convertidas em fase - PKP: fase que atravessa o núcleo  
P: traço forte - S: traço fraco

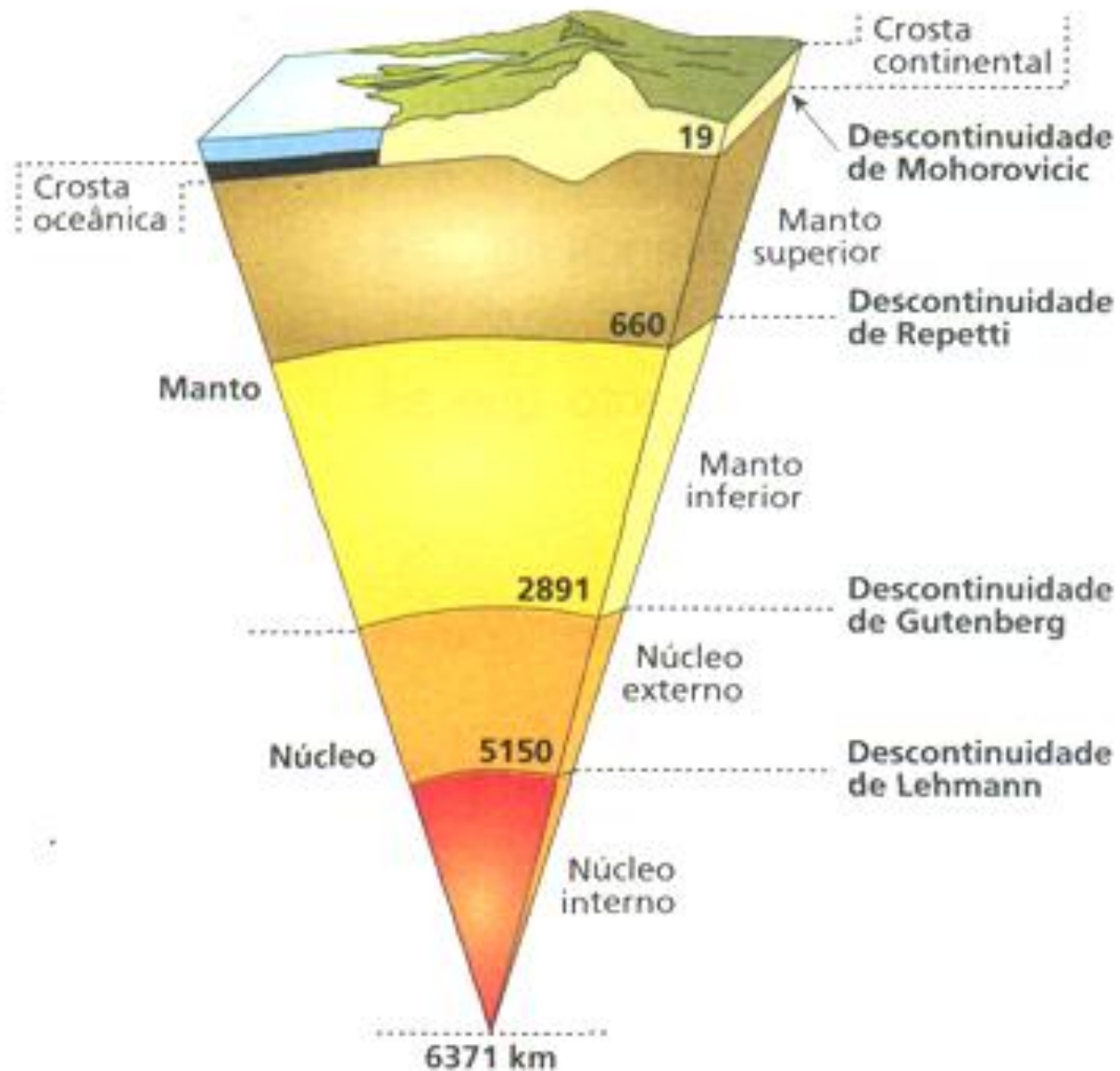
# Terra



Sob ação do resfriamento e do próprio peso, as placas tectônicas afundam no manto e acabam fazendo parte das correntes de convecção.

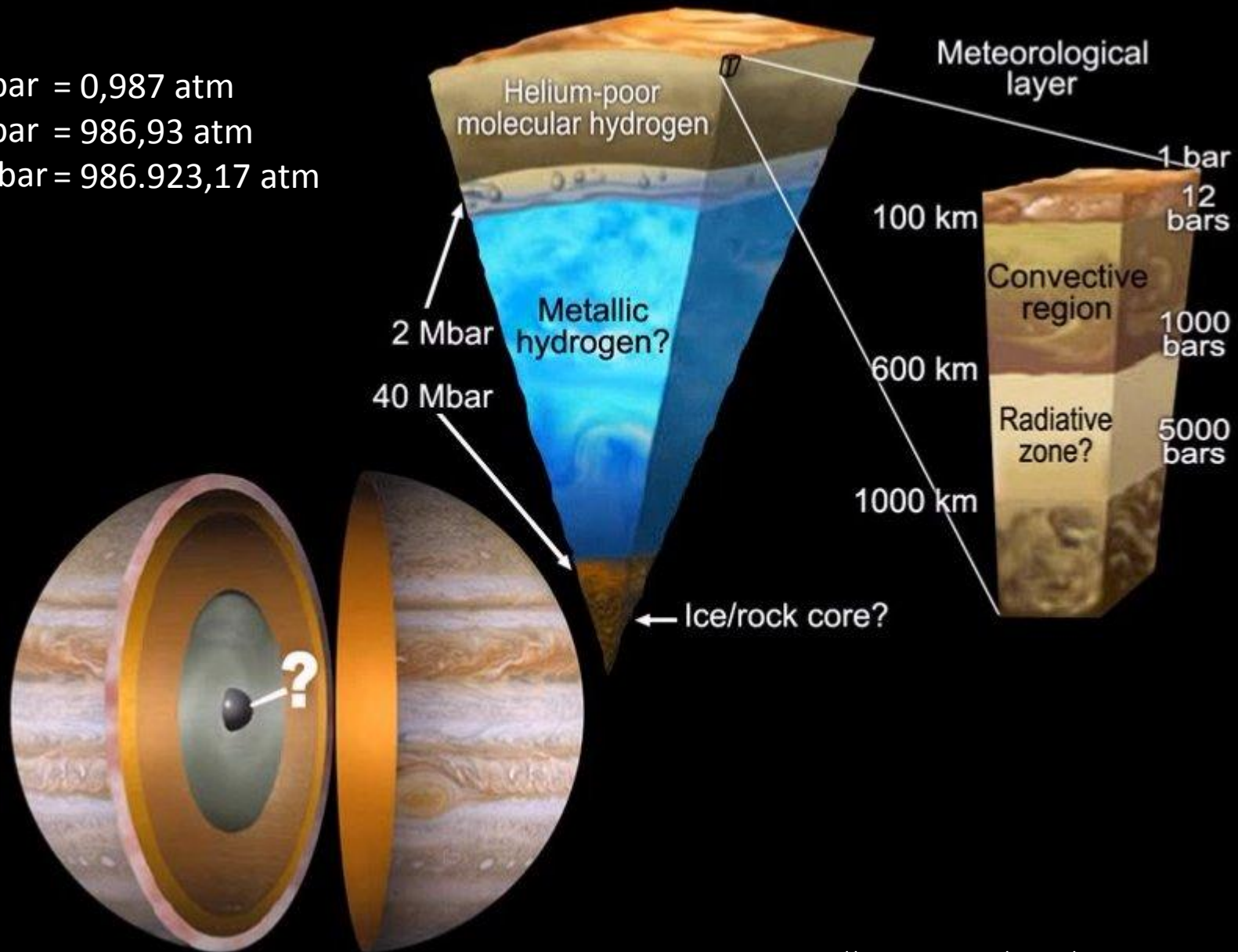
M. Assumpção, IAGUSP

# Terra



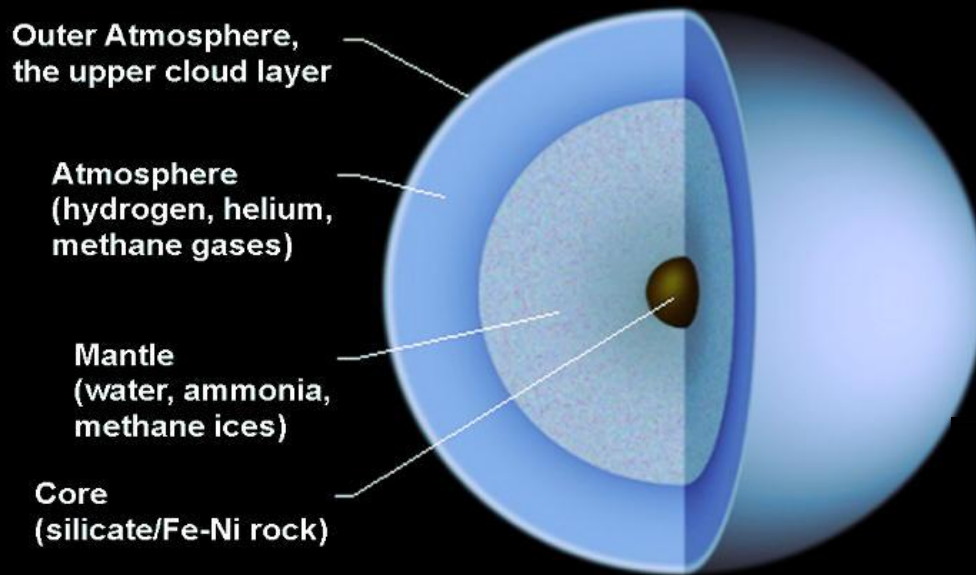
# Júpiter

1 bar = 0,987 atm  
1 kbar = 986,93 atm  
1 Mbar = 986.923,17 atm



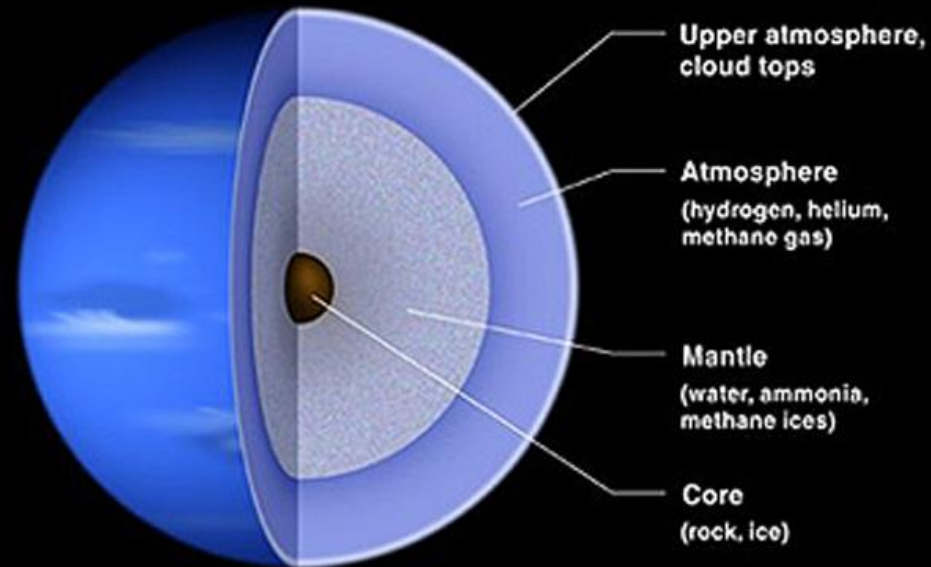
# Urano e Nettuno

<http://msnlv.com/Internal-structure-of-Uranus.jpg>



**Internal Structure of Uranus**

<http://planetfacts.org/wp-content/uploads/2010/03/neptune-core.jpg>



**NEPTUNE**



# Comparativo

Mercúrio



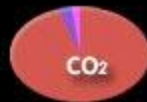
Vênus



Terra



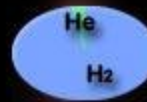
Marte



Júpiter



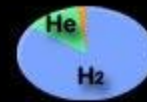
Saturno



Urano



Netuno

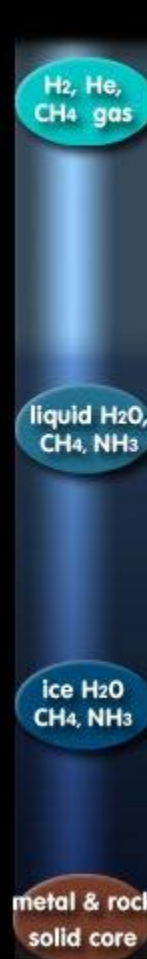
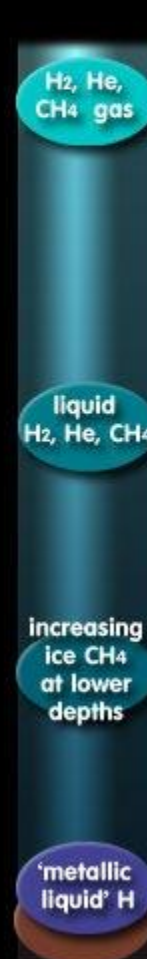
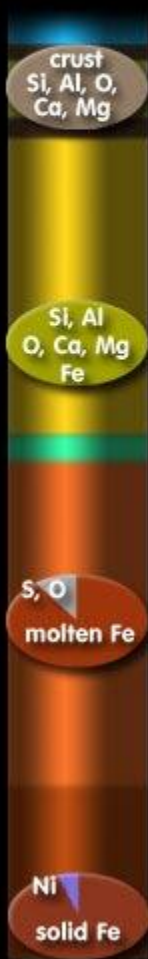


atmosphere

visible 'surface'



Mercury, Venus and Mars have solid metal cores surrounded by rocky mantels similar to Earth's, but lack any active tectonic plate activity of the crust as seen on Earth.



vertical scale is adjusted for each planet

planet center

# Comparativo

Mercúrio

Vênus

Terra

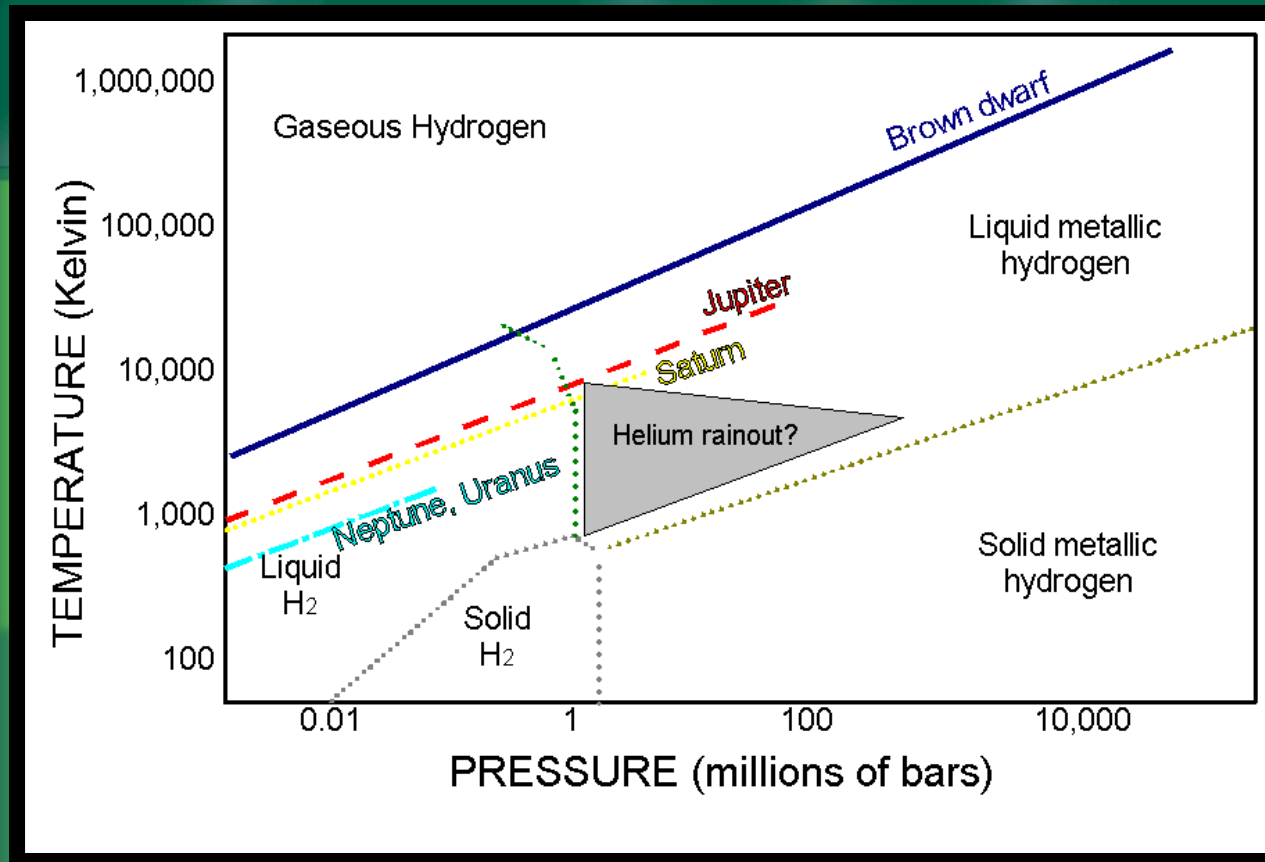
Marte

Júpiter

Saturno

Urano

Netuno



-173° C  
to 427° C

visible 'surface'



vertical scale  
is adjusted  
for each  
planet



4300° C

25,000° C

11,700° C

5,000° C

5,400° C

planet center

# Modelo simplificado: uma bolha de gás

$$dP = -\rho(r)g(r)dr$$

$dP$  aumenta quando  $dr$  diminui

Caso bem simplificado:  $\rho$  e  $T$  são constantes

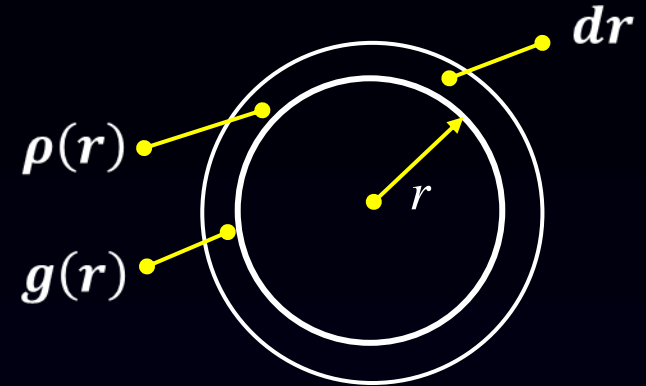
$$dP = -\rho \frac{G \frac{4}{3} \pi r^3}{r^2} \rho dr = \frac{-4\pi}{3} G \rho^2 r dr$$

$$\int_{R=\text{superf.}}^r dP = \frac{-4\pi}{3} G \rho^2 \int_R^r r dr$$

$$P(r) = \frac{2\pi}{3} G \rho^2 [R^2 - r^2]$$

No centro:  $r = 0$  e  $P(0) = P_c$

$$P_c = \frac{2\pi}{3} G \rho^2 R^2$$



$P(r)$ - pressão em  $r$

$\rho(r)$ - densidade em  $r$

$g(r)$ - aceleração em  $r$

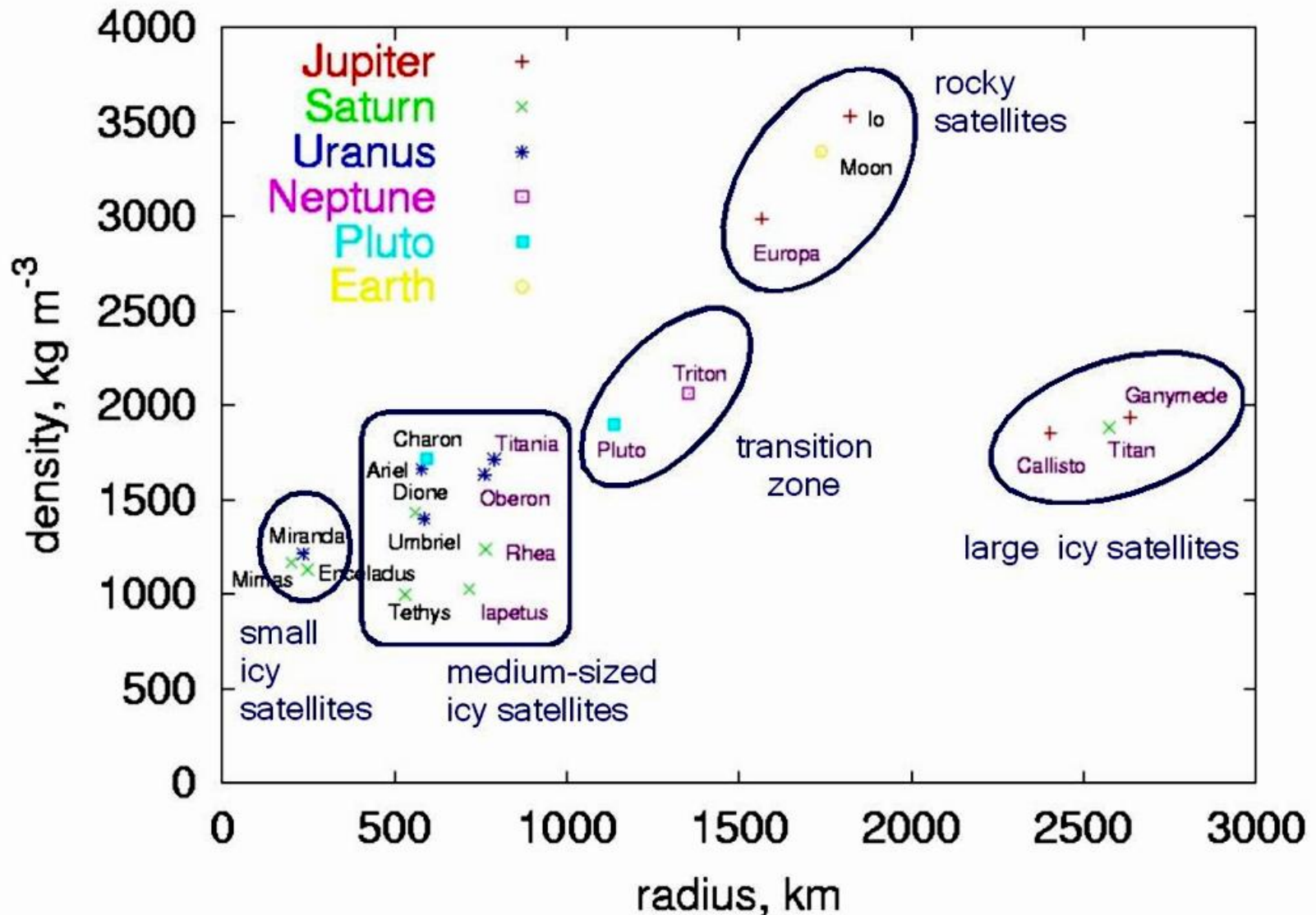
$$F_g = G \frac{Mm}{r^2} = gm ; g = \frac{GM}{r^2}$$

$$g = \frac{GM}{r^2} = \frac{G}{r^2} \frac{4}{3} \pi r^3 \rho = \frac{4\pi G \rho r}{3}$$

$$dP = -\rho g dr$$

$$dP = -\rho \frac{4\pi G \rho r}{3} dr = -\frac{4\pi G \rho^2 r}{3} dr$$

# Quadro Comparativo



# Magnetos



repulsivo



atrativo

Polaridades:  
iguais – atração  
diferentes – repulsão



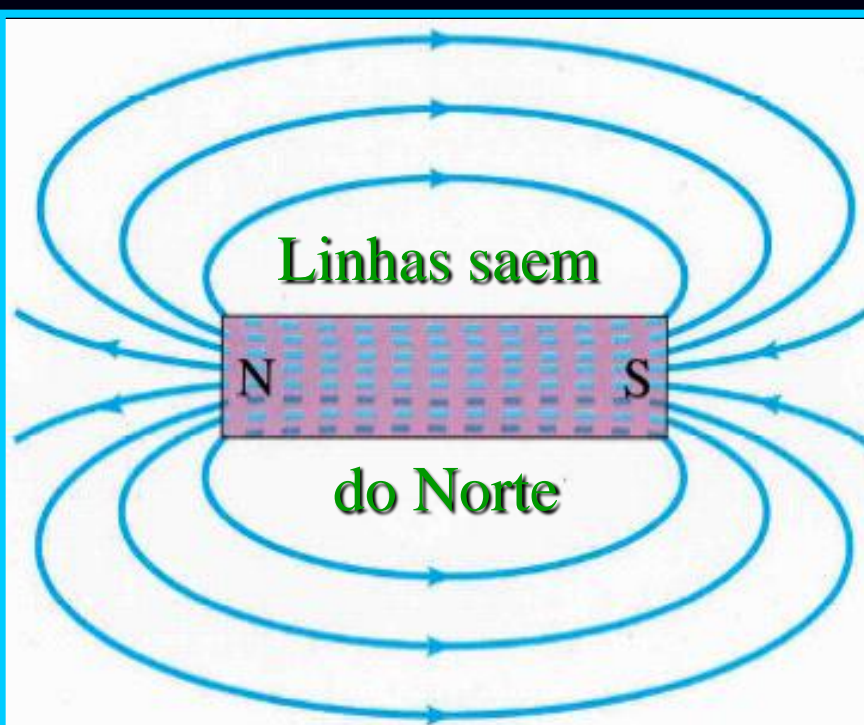
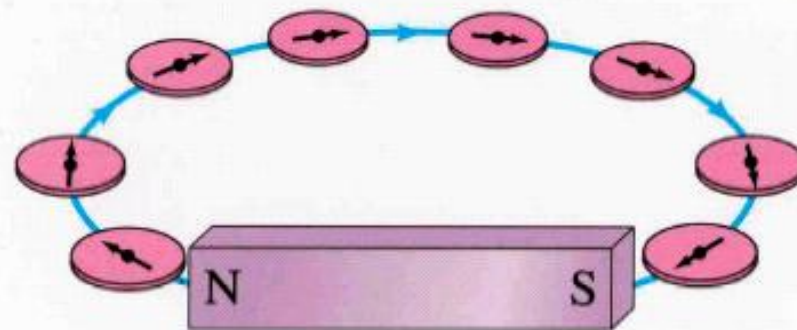
# Magnetos



repulsivo



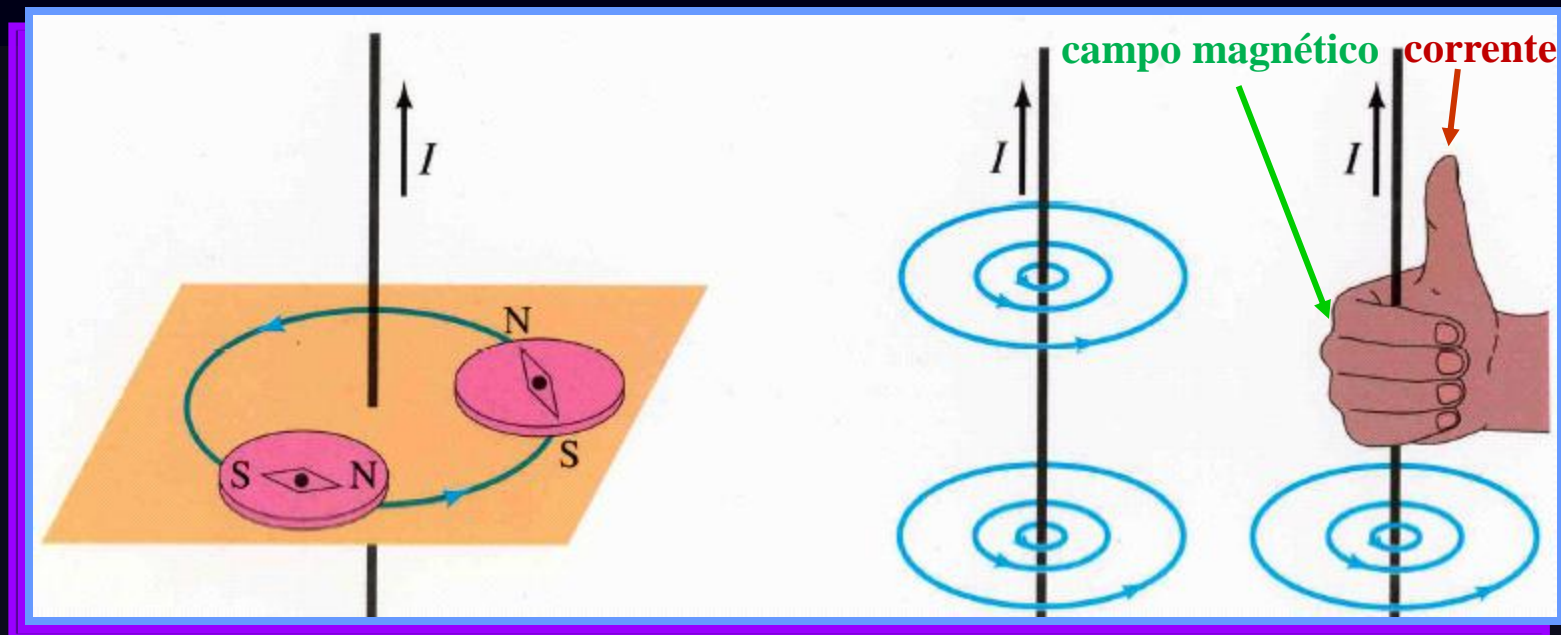
atrativo



# Magnetismo

Correntes elétricas – cargas elétricas em movimento – criam campos magnéticos

- Cargas elétricas estacionárias não criam campo magnético
- Regra da mão direita



# Magnetismo

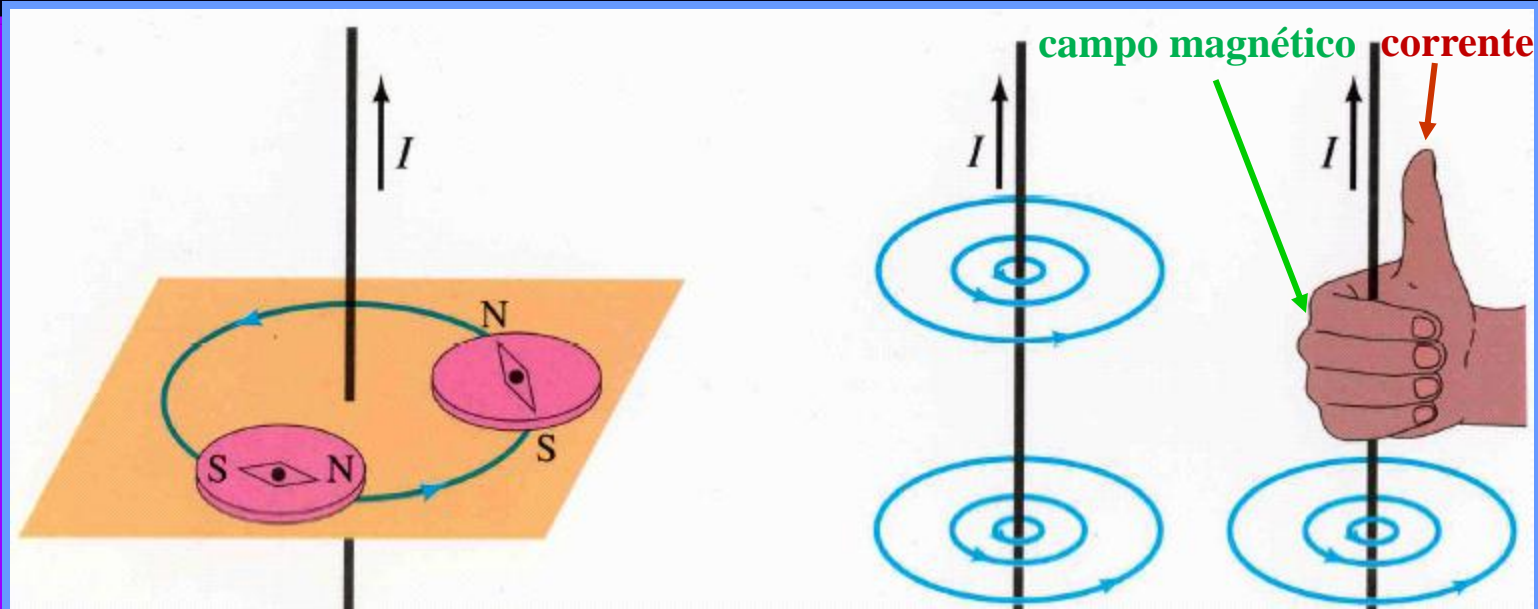
Campo magnético **B** criado por uma corrente **I**, a distância **r** do condutor:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Tm/A}$  [ T – tesla, m – metro, A – ampère ]

(permeabilidade magnética: uma constante de proporcionalidade.

Ela depende do material de que é feito o objeto e também do campo magnético existente)





# Magnetismo

A força magnética  $F$  é perpendicular à velocidade  $v$  de uma partícula com carga  $q$  movendo-se num campo magnético  $B$ :

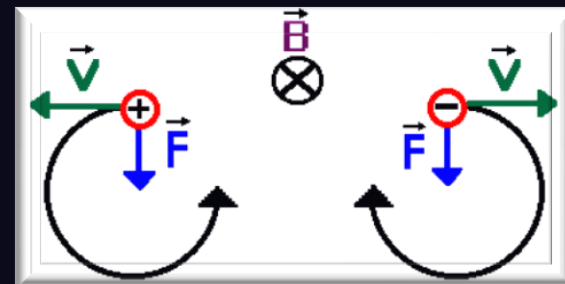
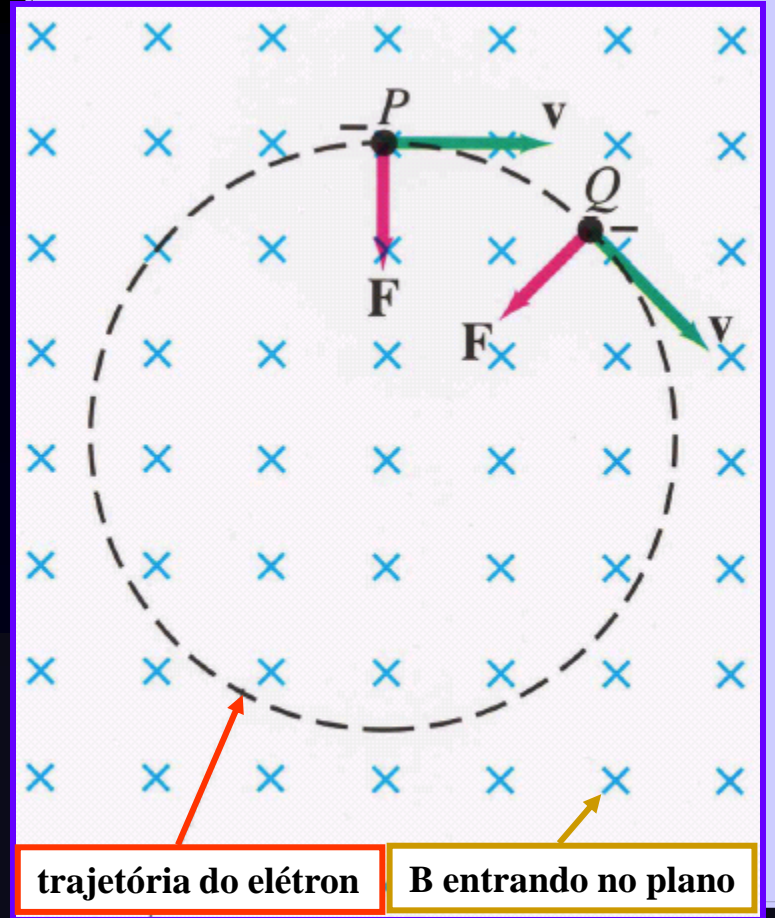
$$F = qvB \sin \theta$$

$\theta$  = ângulo entre os vetores  $v$  e  $B$

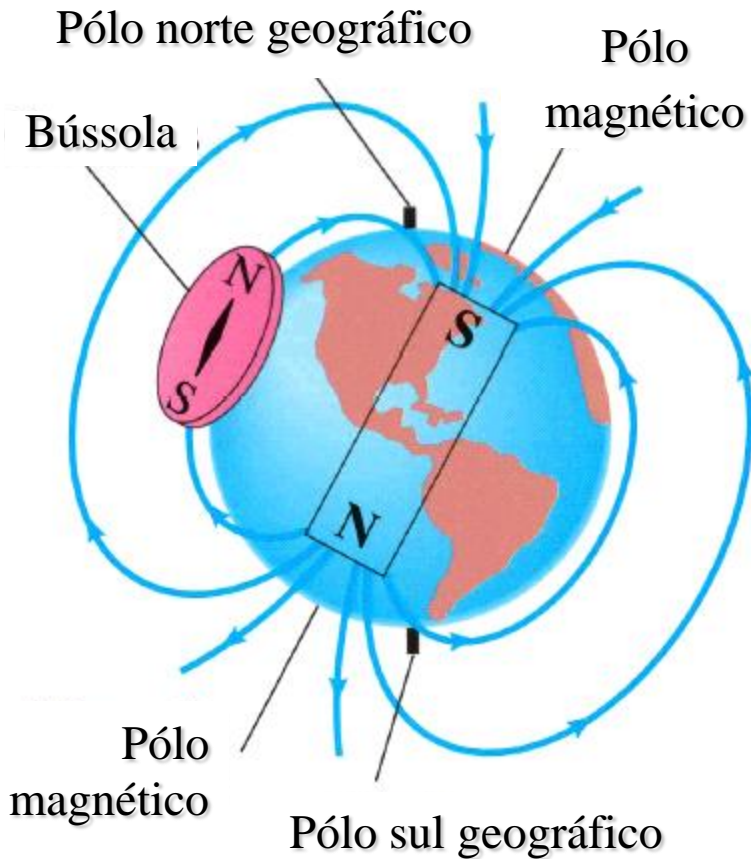
$\theta = 90^\circ$  (perpendiculares) - força máxima

$\theta = 0^\circ$  (paralelos) - força nula

Partículas carregadas movem-se em círculos quando estão em campos magnéticos



# Campo magnético da Terra



Pólo norte magnético localiza-se no pólo sul geográfico

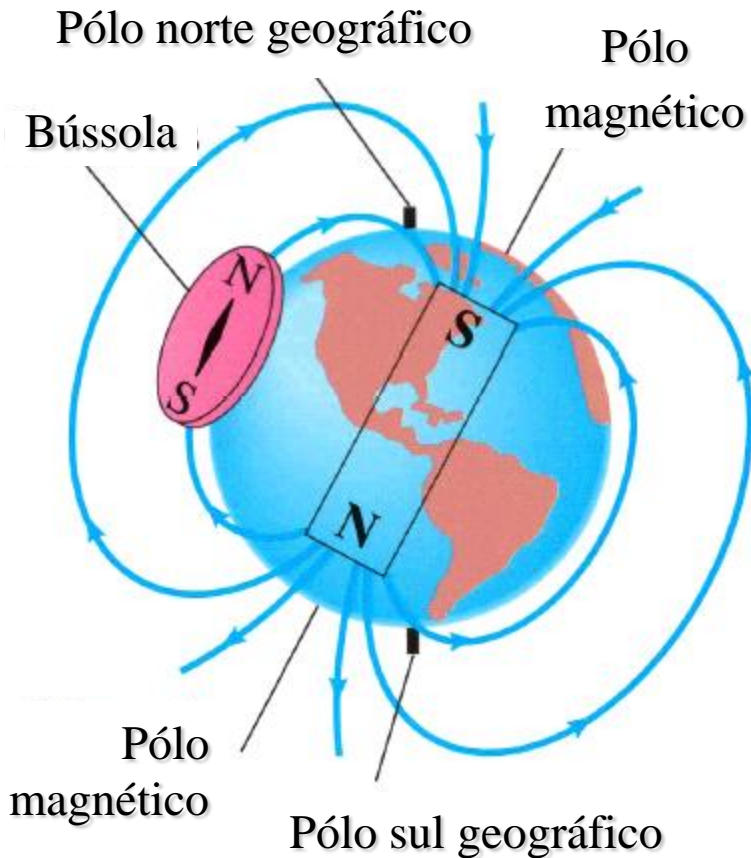
*Campo terrestre*

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

$$1 \text{ Tesla} = 10 \text{ kGauss}$$

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

# Campo magnético da Terra



Pólo norte magnético localiza-se no pólo sul geográfico

- A Terra se comporta como um ímã cujos pólos praticamente coincidem com o eixo de rotação, ou seja, com os pólos geográficos.
- No passado pensava-se que ele era causado por um material permanentemente magnetizado localizado no interior da Terra
- Em 1900, Pierre Currie descobriu que o magnetismo permanente se perde quando a temperatura do corpo imantado varia entre 500 a 700 °C (ponto de Currie).
- **Declinação magnética:** ângulo horizontal entre o N magnético e o N geográfico
- **Inclinação magnética:** ângulo relativo à horizontal

Por convenção o PNM está no hemisfério norte, e vice-versa. O eixo magnético desvia-se em cerca de 11°,5 do eixo de rotação.

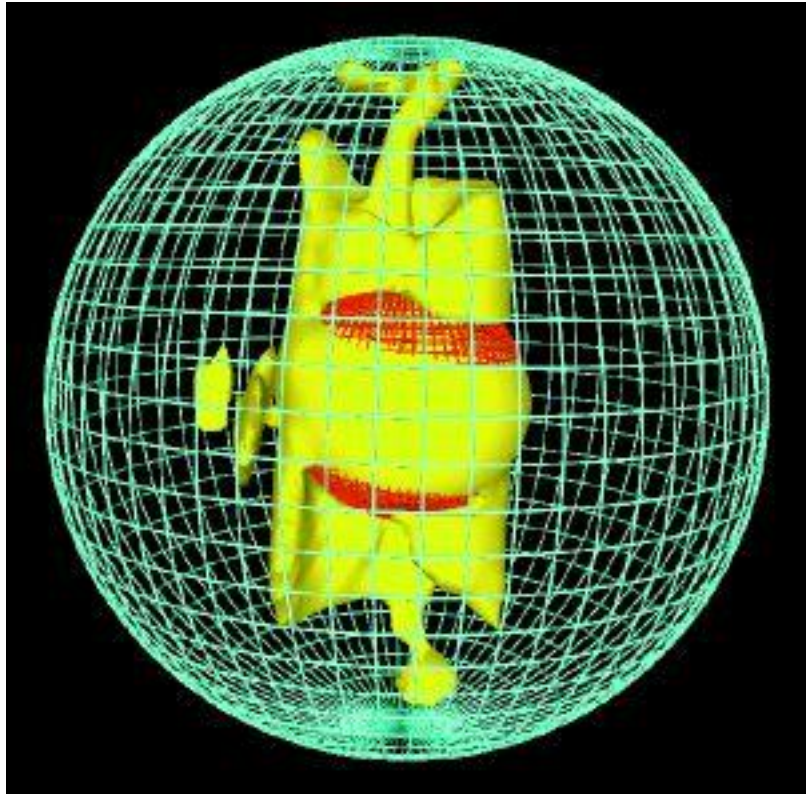
# Dínamo auto-excitante

---

Um dínamo produz corrente elétrica quando um condutor é movido dentro de um campo magnético, e *vice-versa*.

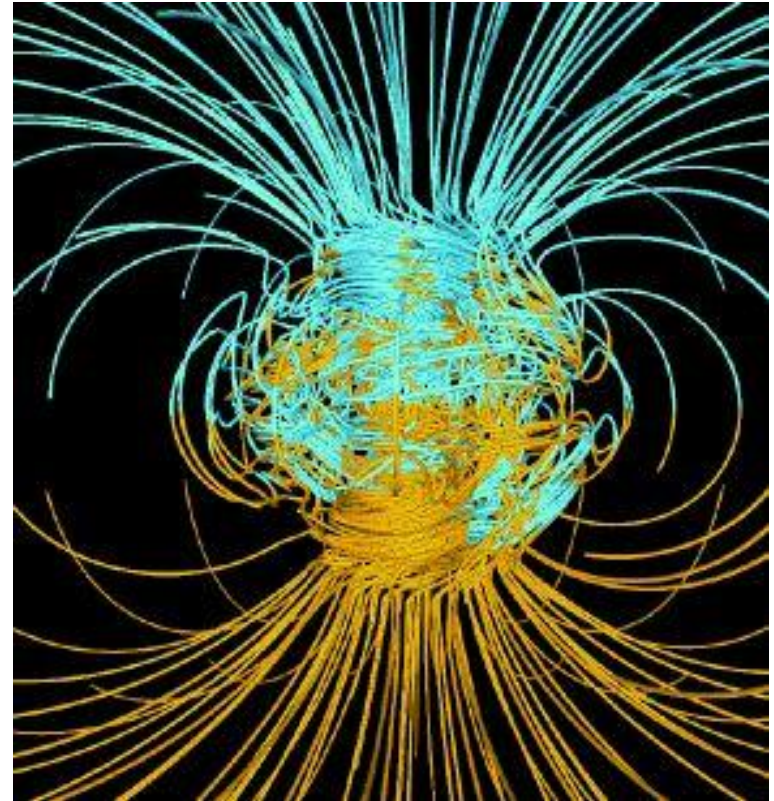
O magnetismo é uma propriedade dinâmica, depende da criação e manutenção de uma corrente elétrica. O “gerador” da Terra, ou geodínamo, localiza-se no seu interior, no núcleo metálico líquido que circunda o núcleo metálico sólido localizado no seu centro.

# Um modelo de dínamo para a Terra



Simulação teórica mostrando o núcleo interno sólido (vermelho), o núcleo externo líquido (amarelo), onde o fluxo do fluido é máximo, e a região de separação do manto (azul esverdeado).

Gary Glatzmaier, Robert S. Coe, Lionel Hongre, Paul H. Roberts ([www.npaci.edu/envision/v16.1/images/geo2.jpg](http://www.npaci.edu/envision/v16.1/images/geo2.jpg))



Resultado da simulação teórica da estrutura do campo magnético. As linhas azuis estão direcionadas para dentro da Terra, e as linhas amarelas, para fora. O eixo de rotação terrestre é vertical e passa pelo centro da Terra.

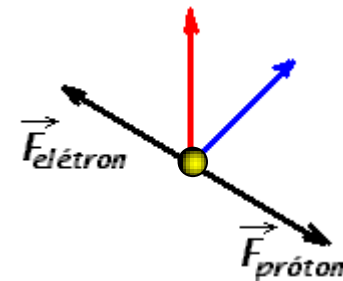
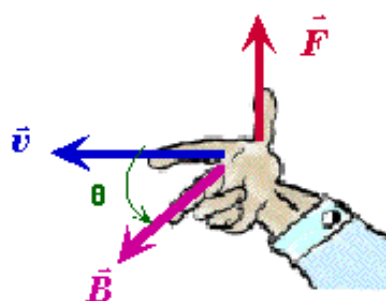
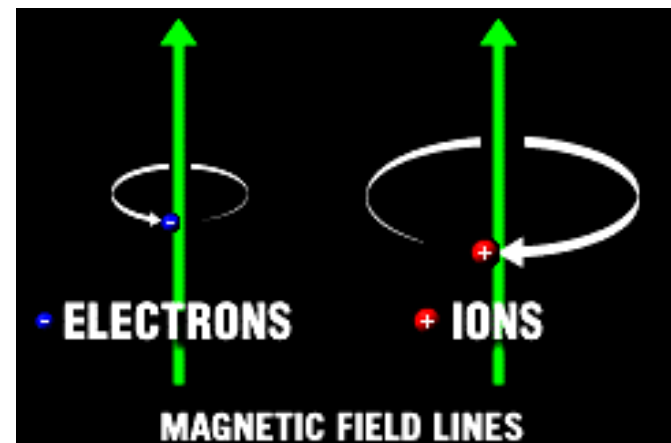
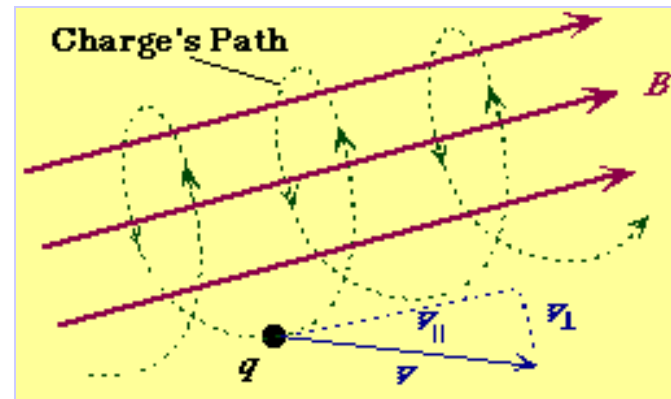
# Movimento de íons e elétrons em linhas de campo

- No espaço, partículas carregadas interagem com o campo magnético e ficam aprisionadas num movimento espiral.
- O sentido do movimento é oposto entre cargas positivas e negativas

• Razão? Força de Lorentz

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

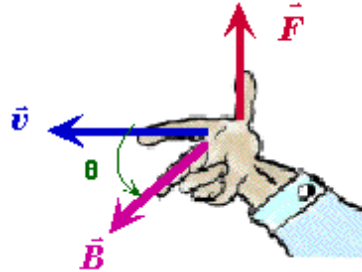
força —  $\vec{F}$  — carga —  $q$  — velocidade —  $\vec{v}$  — campo magnético —  $\vec{B}$



# Movimento de íons e elétrons em linhas de campo

Mauricio Peredo, August 11, 1999

- Trabalho:



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

= 0;  $F$  e  $v$   
são ortogonais

Não havendo trabalho, a partícula não perde energia espiralando pelas linhas.

Raio orbital da partícula eletricamente carregada movendo-se ao longo da linha de campo magnético:  
força centrípeta = força de Lorentz

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

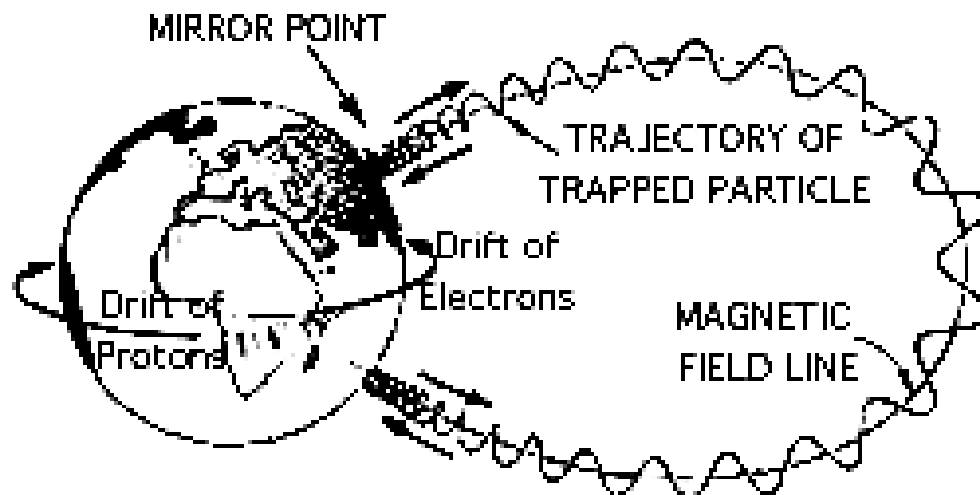
Exemplo: qual o raio orbital de um próton movendo-se com  $v \sim 10^8$  m/s, em campo magnético de intensidade  $B = 10^{-4}$  T?

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.

# Movimento de íons e elétrons em linhas de campo

Mauricio Peredo, August 11, 1999

- Ao atingir a região de forte campo magnético, as partículas são refletidas, e assim ficam aprisionadas num movimento de vai-e-vem pelas linhas e entre os dois hemisférios.



Tratamento teórico:  
[http://www.physics.nps.navy.mil/ph2514/chapter\\_05.pdf](http://www.physics.nps.navy.mil/ph2514/chapter_05.pdf)

Este efeito é conhecido como **Espelho Magnético**

*Birkeland demonstrou experimentalmente a focalização das partículas nos pólos magnéticos.  
Poincaré demonstrou matematicamente o movimento delas nas proximidades de um pólo magnético isolado.*

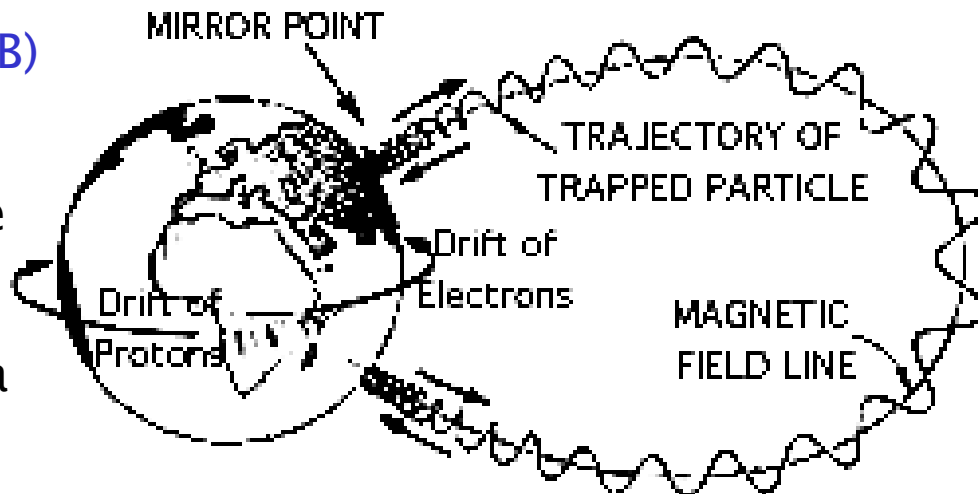


# Movimento de íons e elétrons em linhas de campo

Mauricio Peredo, August 11, 1999

## Efeito espelho magnético:

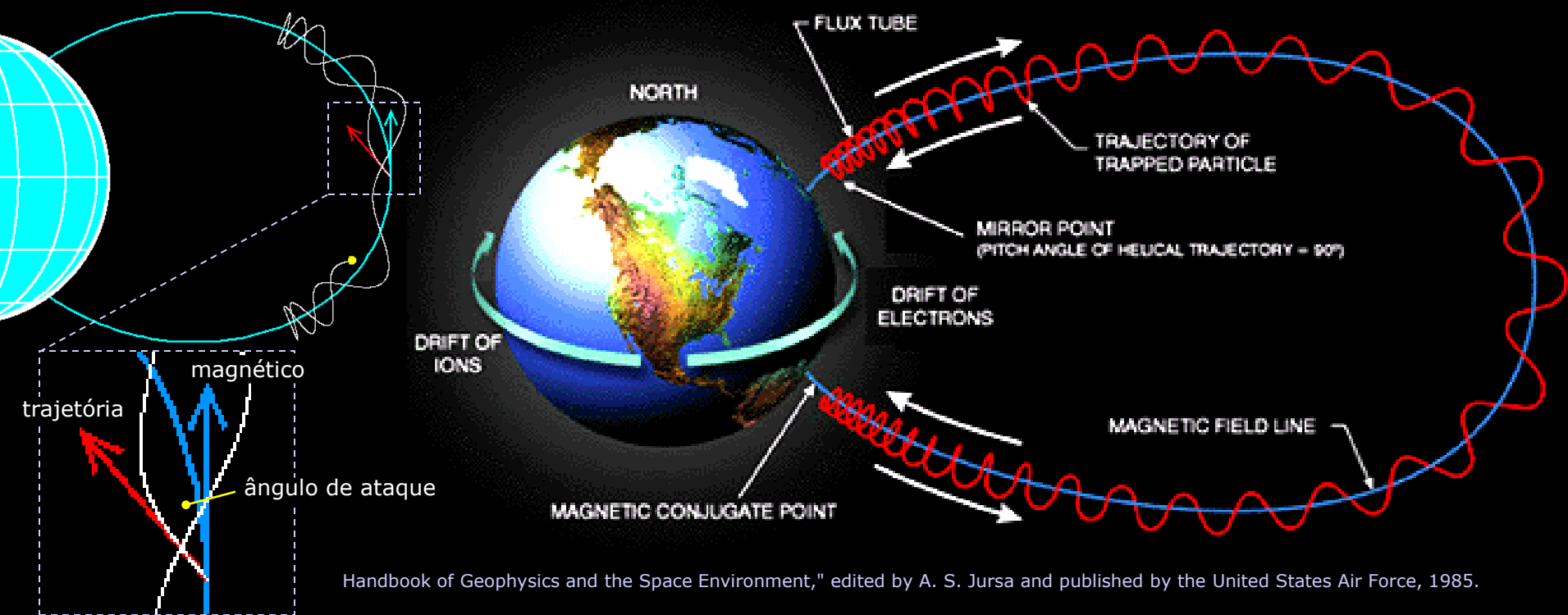
como o raio-de-giro ( $r=mv/qB$ ) é inversamente proporcional ao campo, quanto mais forte for B, menor o raio. O campo magnético B aumenta em direção aos pólos. Por conseguinte, o movimento helicoidal vai tendo um raio cada vez menor, espiralando até o raio cair a zero. Por **conservação de momento angular**, a partícula é refletida neste ponto e o raio volta a crescer.



Tratamento teórico:

[http://www.physics.nps.navy.mil/ph2514/chapter\\_05.pdf](http://www.physics.nps.navy.mil/ph2514/chapter_05.pdf)

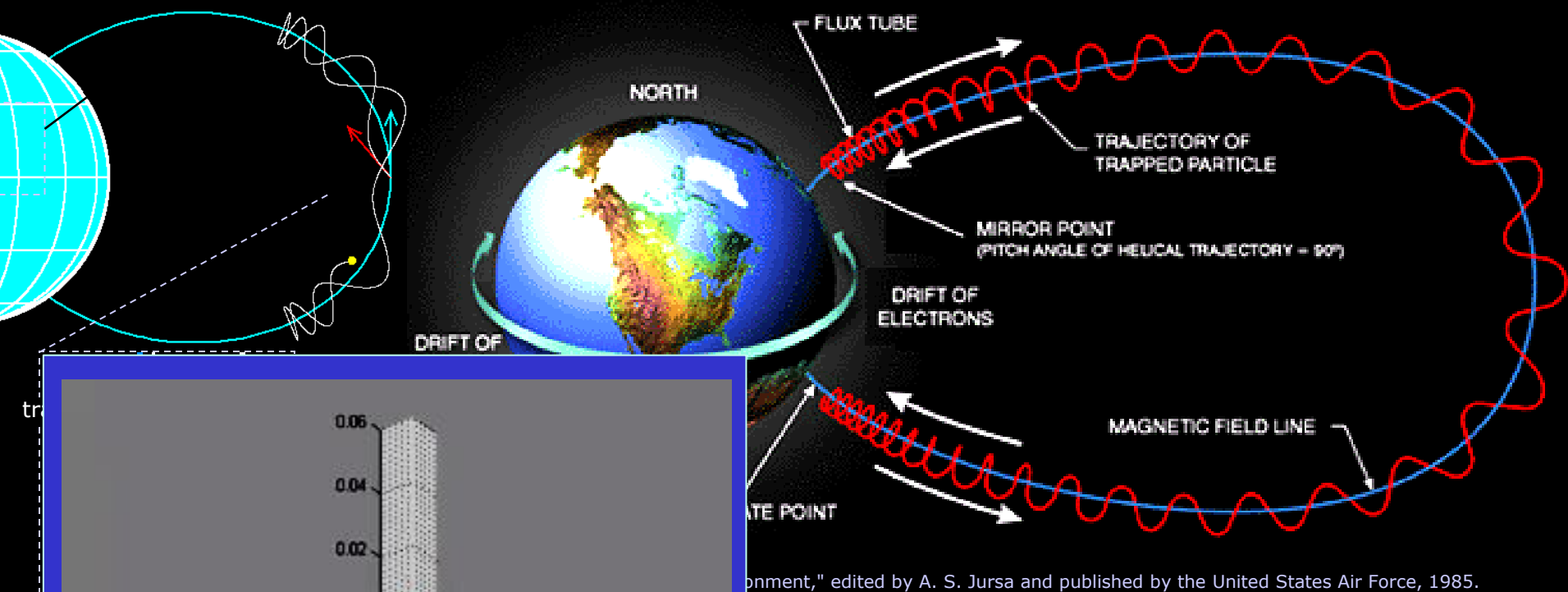
# Movimento de íons e elétrons em linhas de campo



Em campo magnético não-uniforme, o ângulo entre a direção do campo magnético e da trajetória da partícula (ângulo de ataque) muda de acordo com a razão entre as componentes paralela e perpendicular da velocidade da partícula. O ângulo de ataque é importante porque define se uma partícula fica, ou não, retida na atmosfera.

Quando as partículas espiralam em direção aos pólos magnéticos a intensidade do campo aumenta e altera as intensidades das componentes de velocidade: a paralela diminui e a vertical aumenta. Quando a componente paralela se aproxima de zero o ângulo de ataque se aproxima de  $90^\circ$  e reverte a direção de movimento. Este é o efeito espelho magnético que aprisiona as partículas na magnetosfera.

# Movimento de íons e elétrons em linhas de campo



Environment," edited by A. S. Jursa and published by the United States Air Force, 1985.

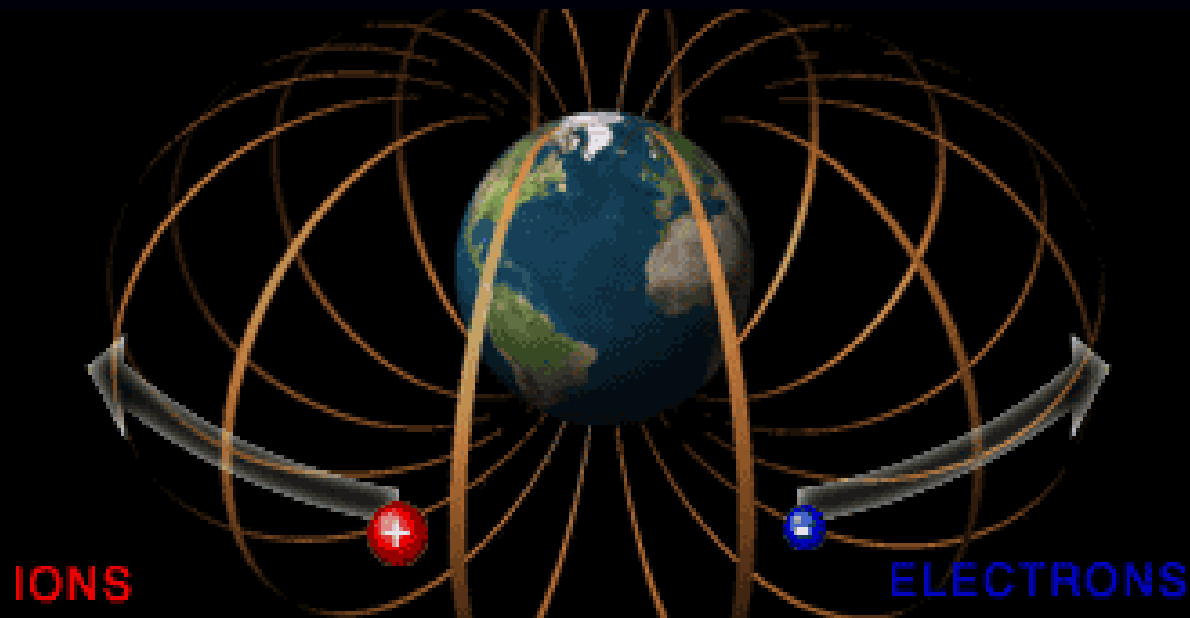
ângulo entre a direção do campo magnético e da velocidade (ou seja, o ângulo de ataque) muda de acordo com a razão entre as componentes da velocidade da partícula. O ângulo de ataque é crítico, ou não, retida na atmosfera.

Quando a partícula se aproxima dos pólos magnéticos a intensidade do campo magnético aumenta e as componentes de velocidade: a paralela diminui e a perpendicular aumenta.

Quando a componente paralela se aproxima de zero o ângulo de ataque se aproxima de 90° e reverte a direção de movimento. Este é o efeito espelho magnético que aprisiona as partículas na magnetosfera.

# A deriva das partículas carregadas

---



- Sob a influência de forças magnéticas, íons e elétrons derivam ao redor da Terra em direções opostas.
- Esse movimento cria um Anél de Corrente Elétrica que flui em sentido horário, quando se vê o hemisfério norte de cima.

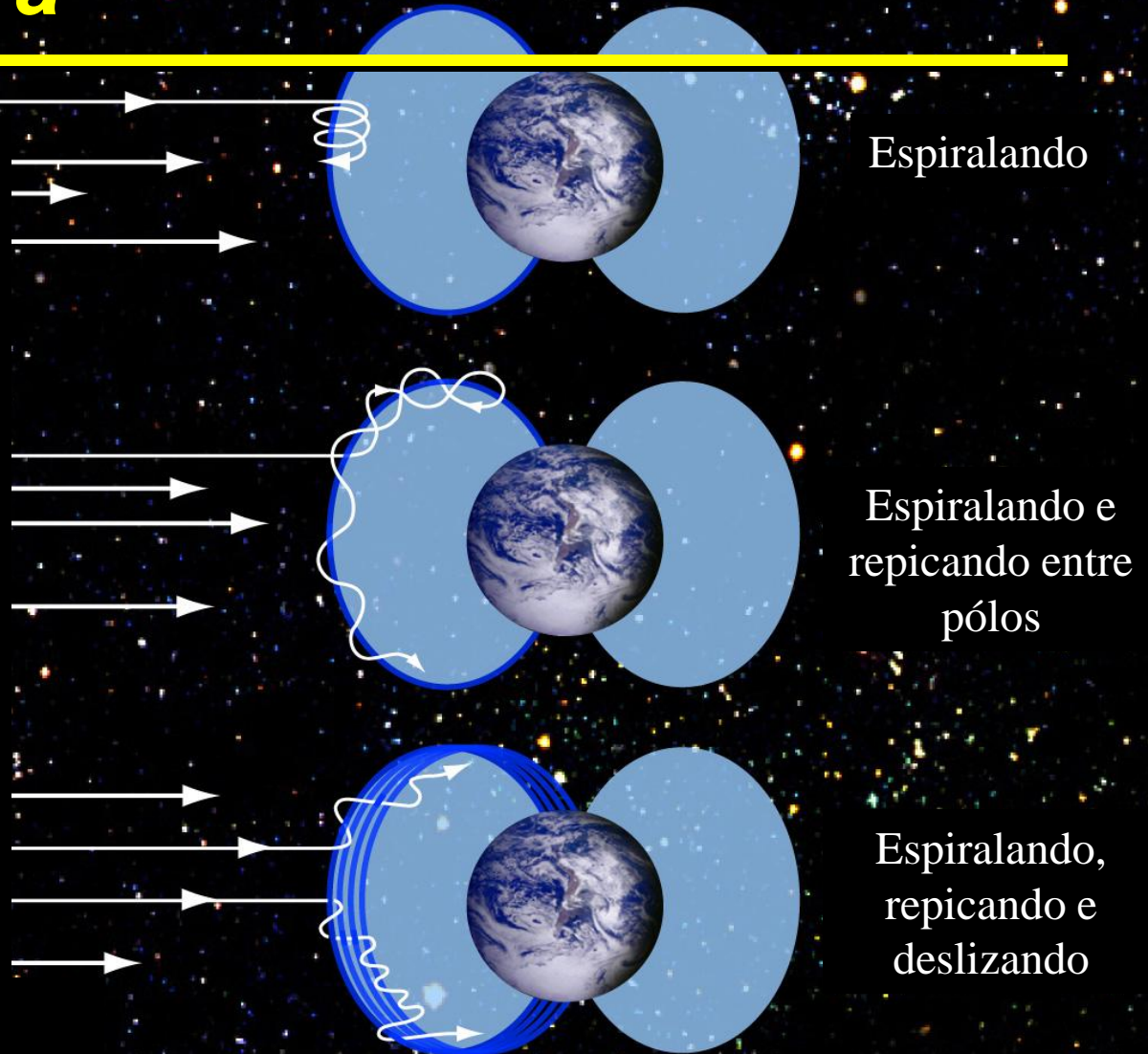
# A Magnetosfera

Partículas eletrizadas que penetram um campo magnético podem ser aprisionadas ao longo das linhas em 3 movimentos superpostos:

**espiral, repique e deriva.**

A trajetória espiral lembra uma mola centrada na linha de campo. Próximo aos pólos as linhas convergem e alteram as forças que atuam nas partículas, revertendo seus movimentos ao longo das linhas. As partículas repicam em direção ao pólo oposto, onde são refletidas novamente.

Finalmente, espilarando e repicando as partículas derivam transversalmente através do campo magnético, criando uma espécie de cinturão (como o de Van Allen)



Movimento individual das partículas eletrizadas nas linhas de campo

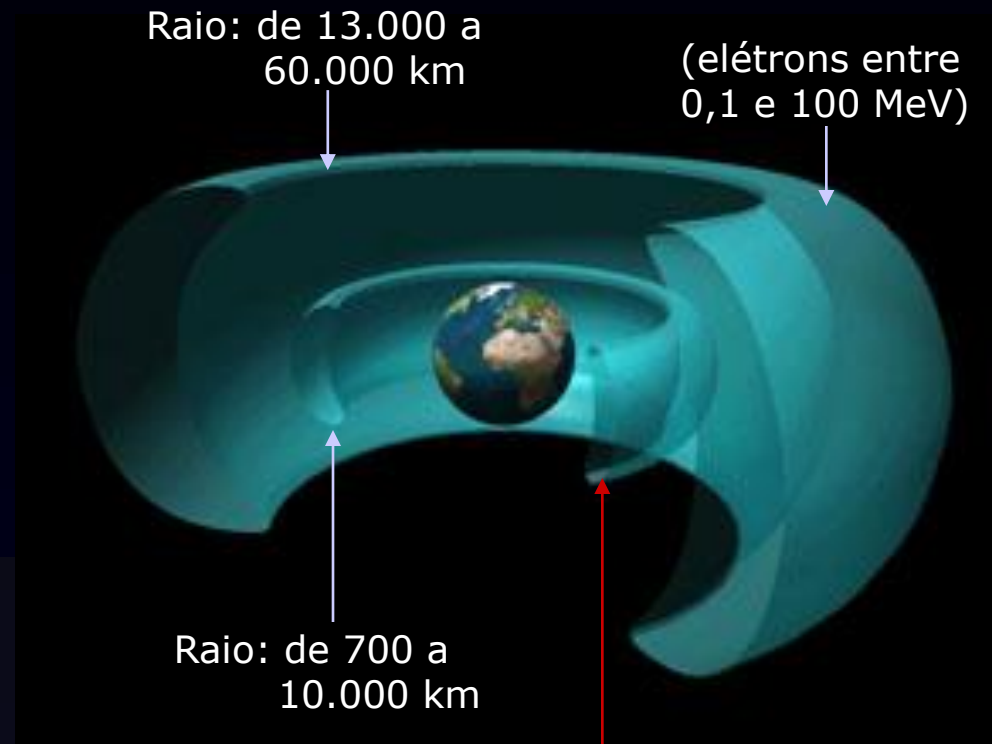
# Cinturões de Radiação

A Terra é circundada por dois cinturões de radiação - de Van Allen - de constituições diferentes:

- **Interno:** composto de prótons;
- **Externo:** elétrons.

Ambos aprisionam partículas de origem predominantemente solar.

Juntos, atuam como escudo contra radiações danosas à vida.

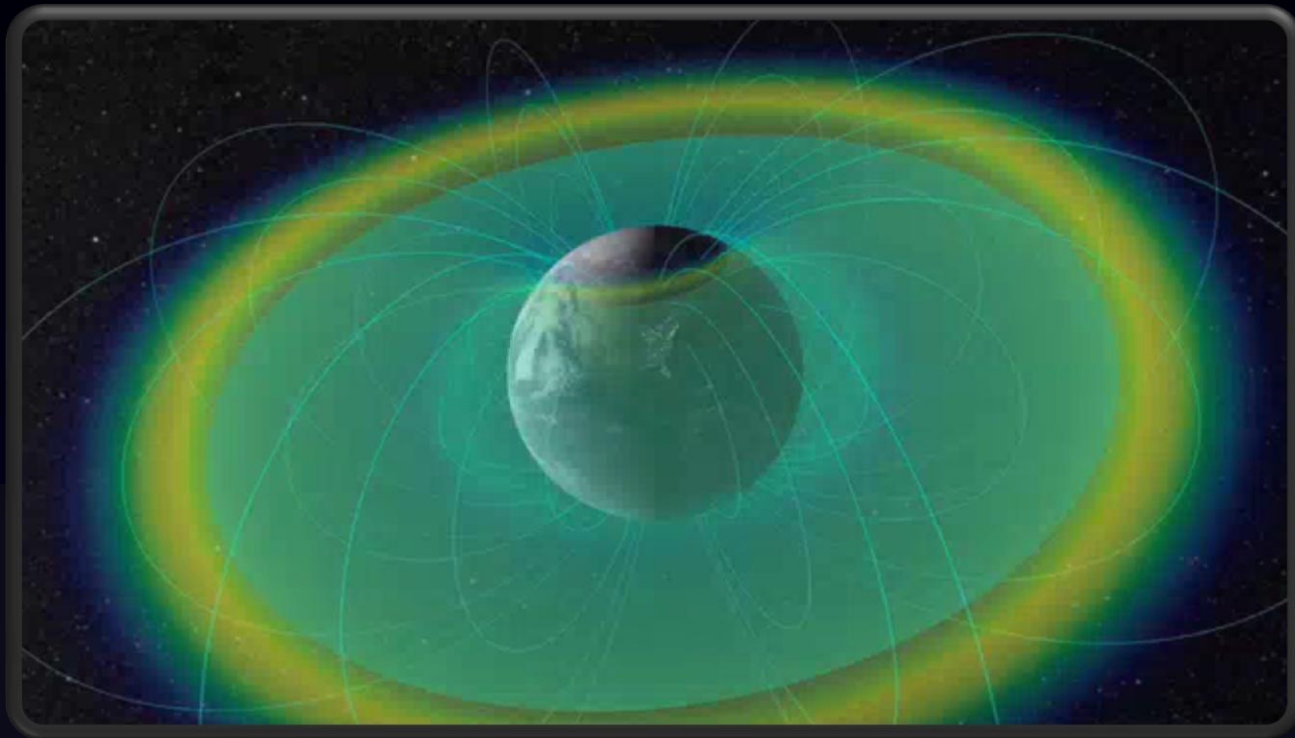


*Prótons com energia entre 10-100 MeV. Instrumentos e astronautas não resistiriam à exposição prolongada nesta região.*

1 Megaelectron volt (MeV) =  $1,602 \times 10^{-13}$  joules

# *Cinturões de Radiação*

---



<https://svs.gsfc.nasa.gov/4048>

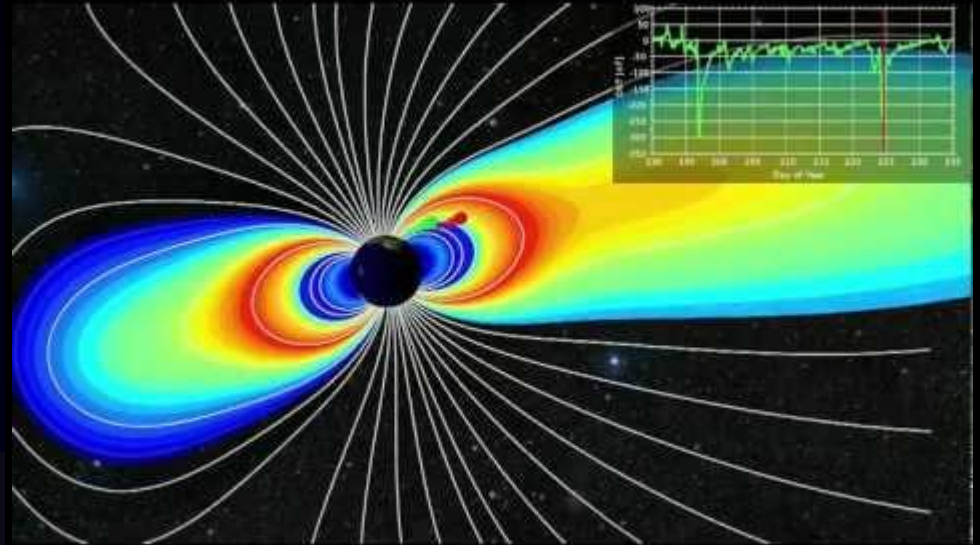
# Cinturões de Radiação

A Terra é circundada por dois cinturões de radiação - de Van Allen - de constituições diferentes:

- **Interno:** composto de prótons;
- **Externo:** elétrons.

Ambos aprisionam partículas de origem predominantemente solar.

Juntos, atuam como escudo contra radiações danosas à vida.



<http://www.universetoday.com/96998/what-are-the-radiation-belts/>

*Prótons com energia entre 10-100 MeV.  
Instrumentos e astronautas não  
resistiriam à exposição prolongada  
nesta região.*

1 Megaelectron volt (MeV) =  $1,602 \times 10^{-13}$  joules

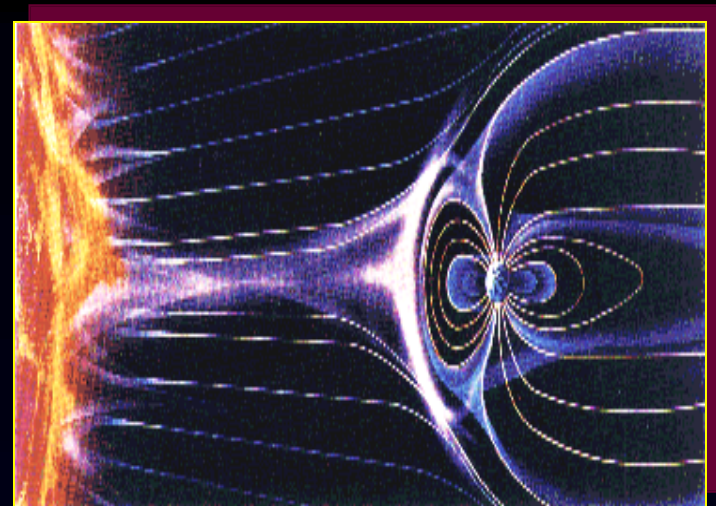


# A Magnetosfera\*

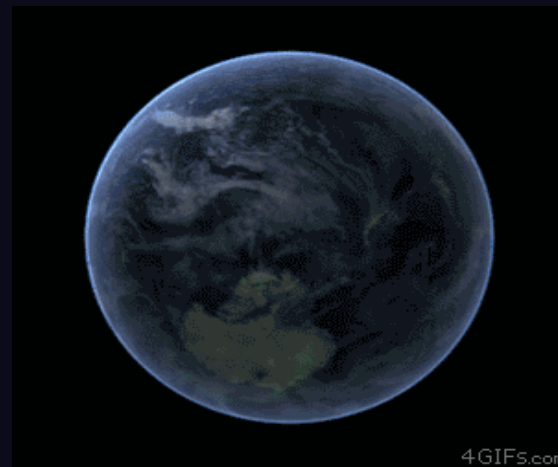
---

Região ao redor de um objeto onde a força dominante que atua sobre uma partícula carregada é a magnética, oriunda do campo magnético do objeto.

O vento solar (fluxo de partículas carregadas expelido pelo Sol) deforma a magnetosfera criando uma cauda alongada na direção anti-solar.

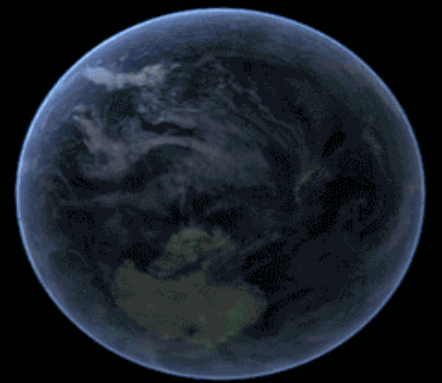


<https://vimeo.com/25811412>



\* O termo "magnetosfera" foi proposto em 1959 por Thomas Gold (EUA).

# Auroras Borealis

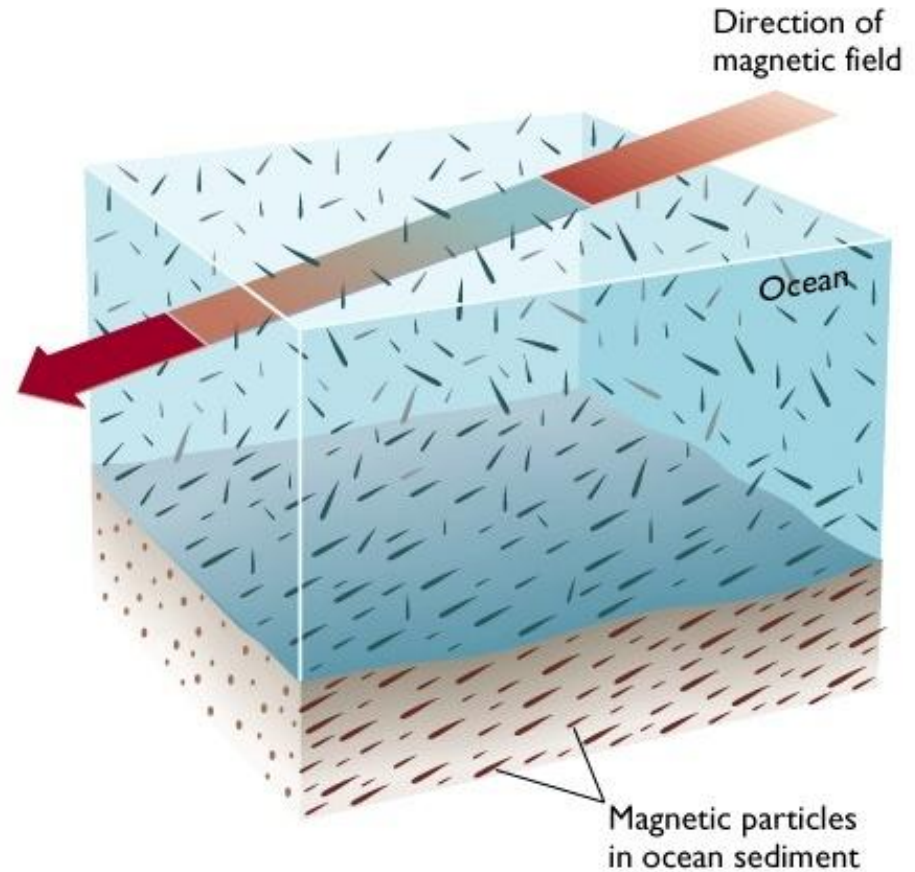


<https://www.tumblr.com/search/aurora%20borealis%20gif>

# Reversão Magnética

Daniel F. Stockli ([www.people.ku.edu/~stockli/311%20structure%20of%20core%20and%20mantle%20lecture.ppt](http://www.people.ku.edu/~stockli/311%20structure%20of%20core%20and%20mantle%20lecture.ppt))

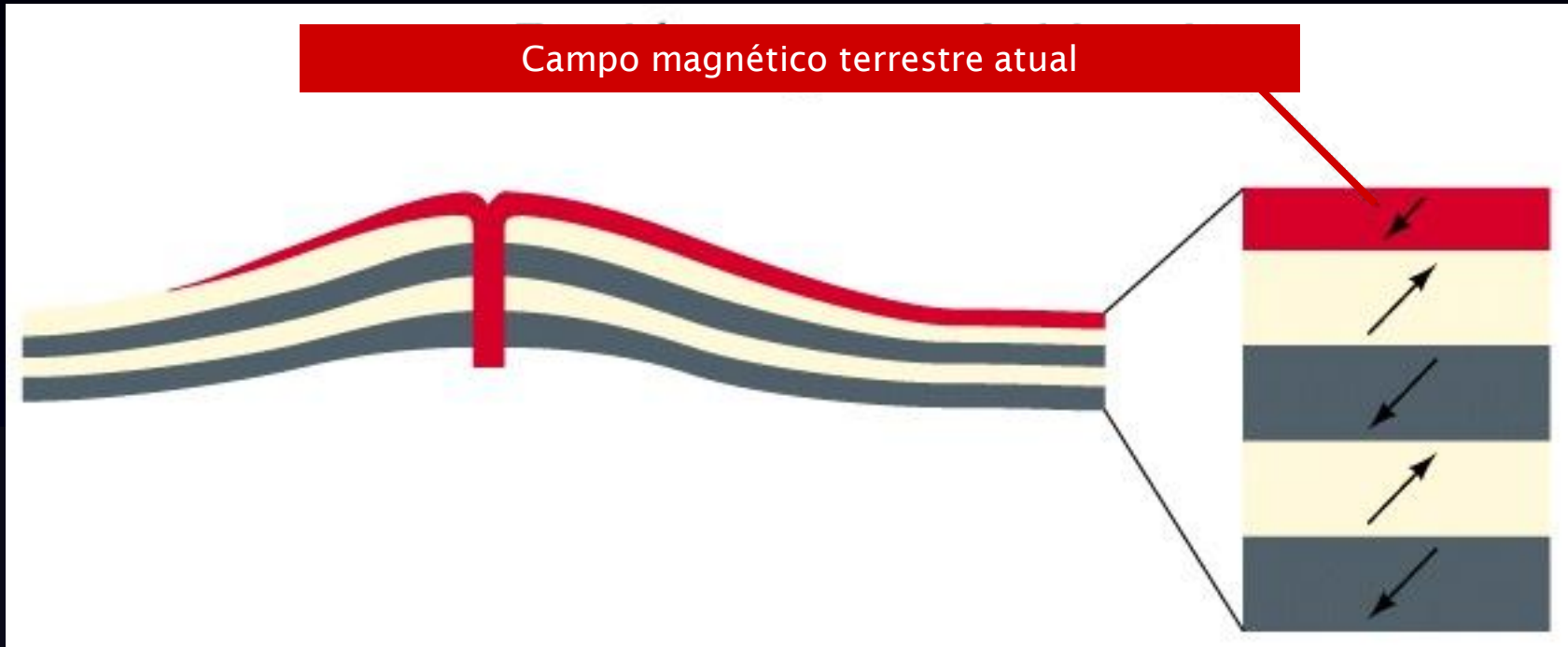
- A polaridade do campo magnético da Terra tem mudado milhares de vezes na época Fanerozóica\* (última reversão ocorreu há cerca de 700.000 anos).
- As reversões parecem ocorrer durante intervalo relativamente curto, da ordem de 1000 anos.



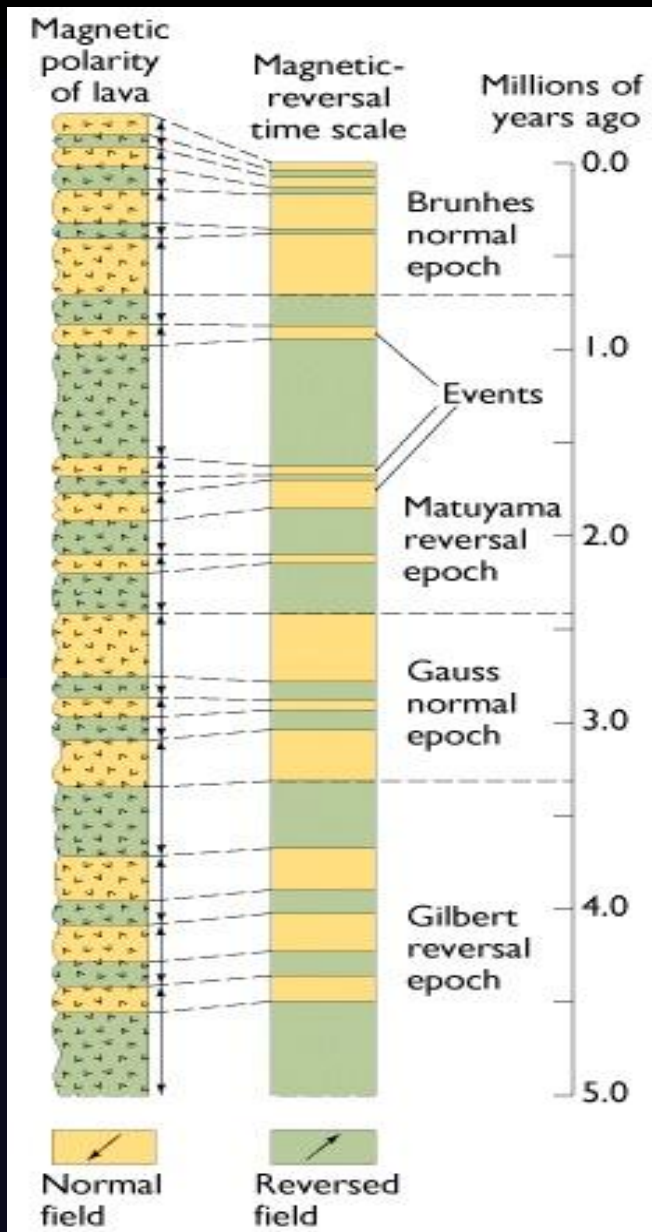
**Registro do campo magnético em depósitos recentes de sedimentos.**

**\* Começa com o início do período Cambriano, há 544 milhões de anos**

# Registros de reversão através de Lavas



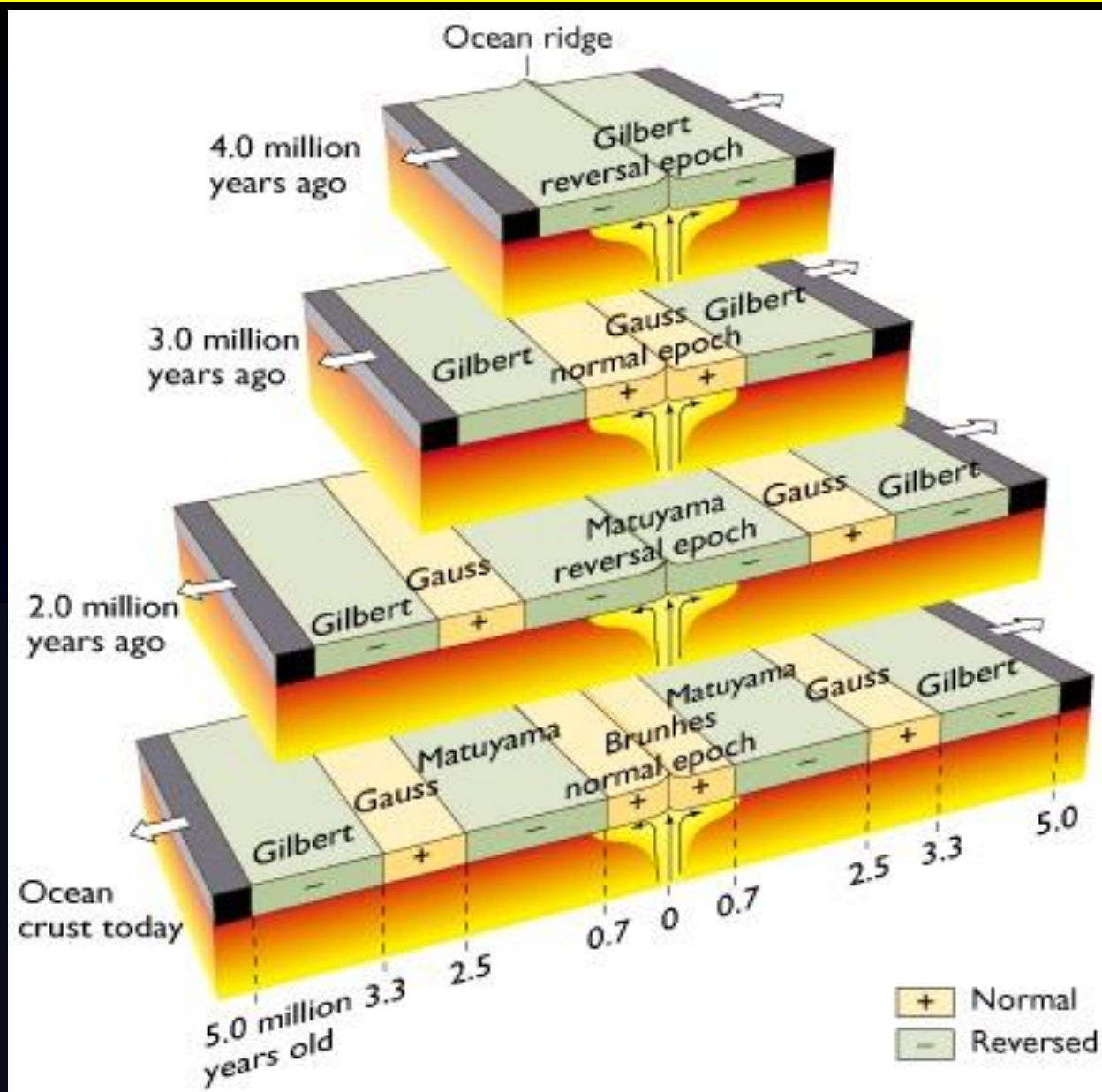
# Escala de tempo geomagnético



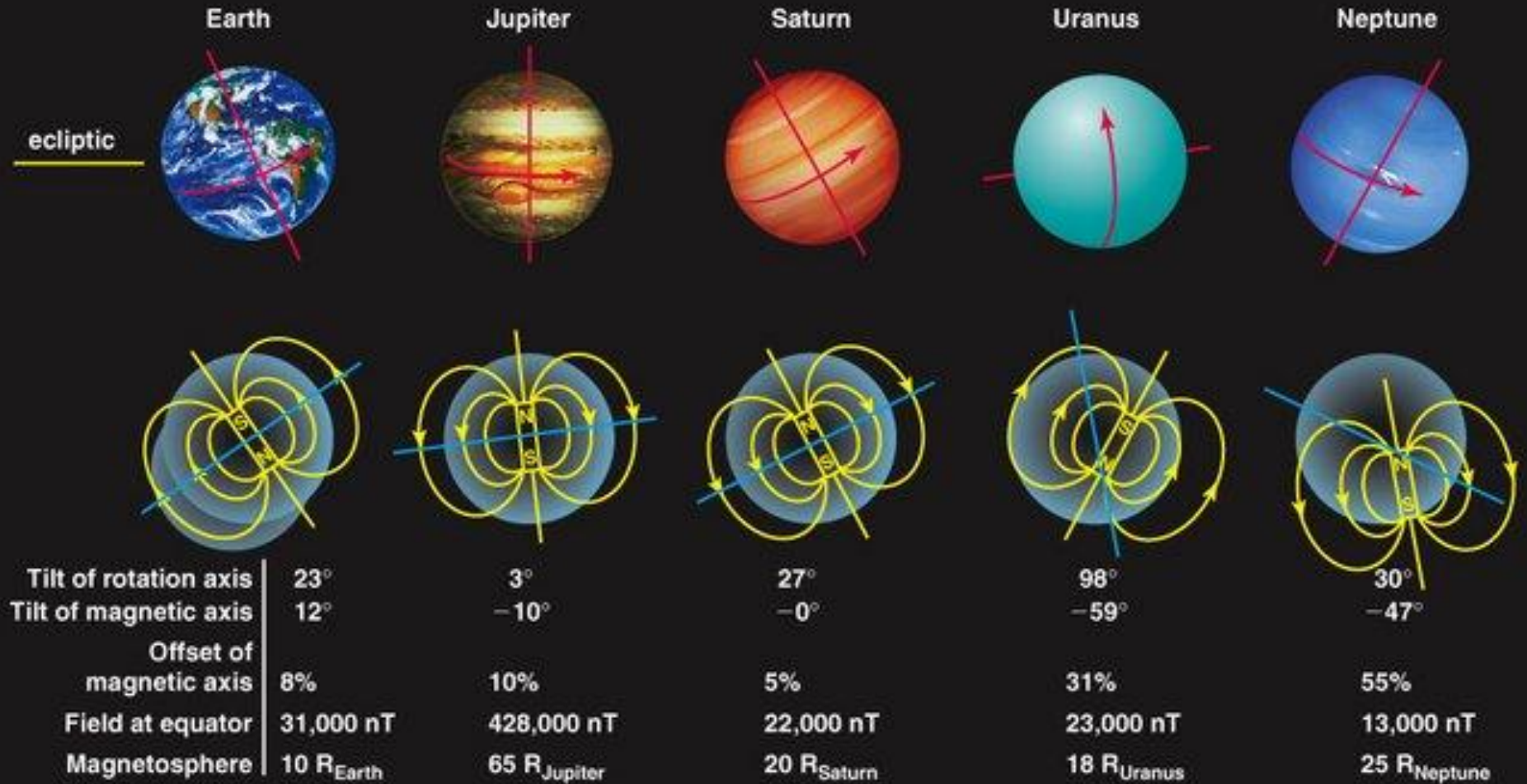
Baseada na determinação das características magnéticas de rochas de idades conhecidas, tanto nos oceanos como nos continentes.

Os registros de reversão geomagnética chegam até 60 milhões de anos.

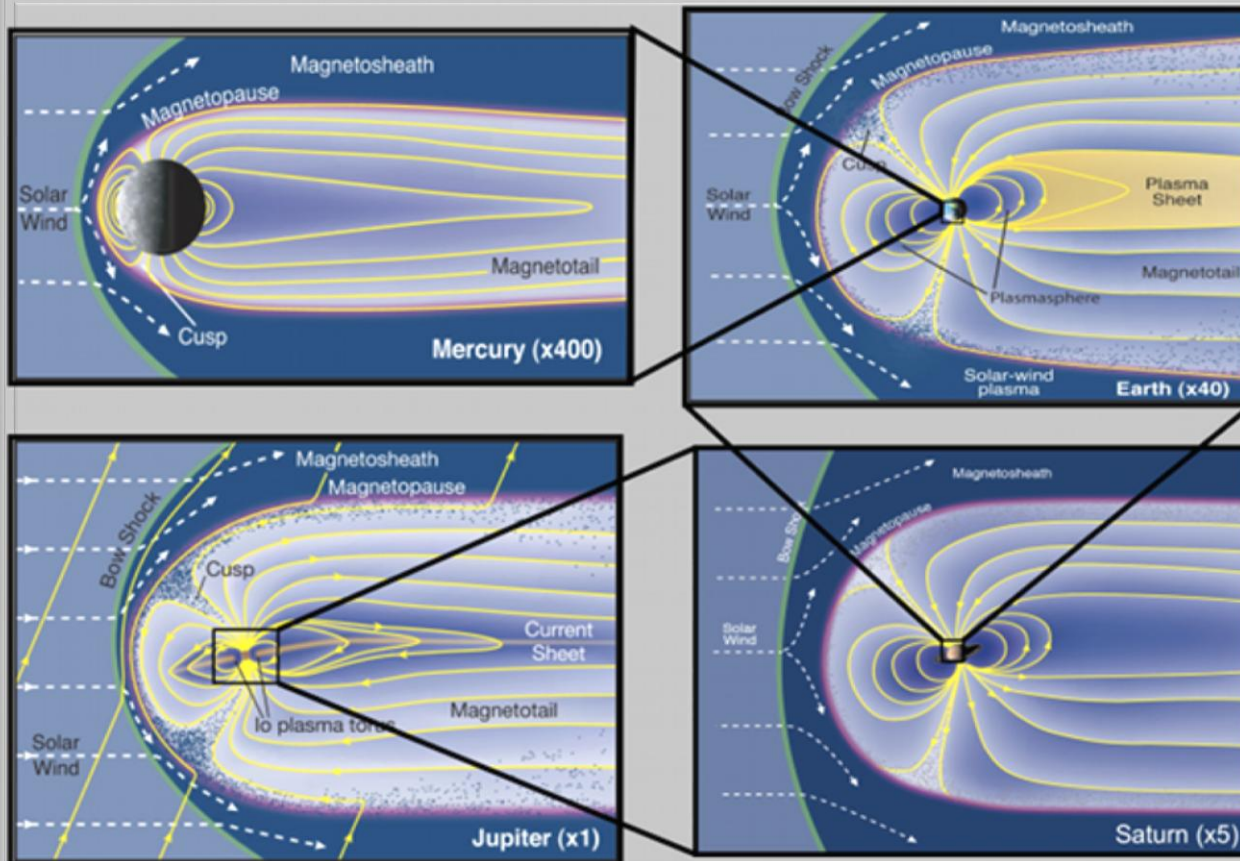
# Formação de anomalias magnéticas



# Campos Magnéticos dos demais planetas



# Comparativo

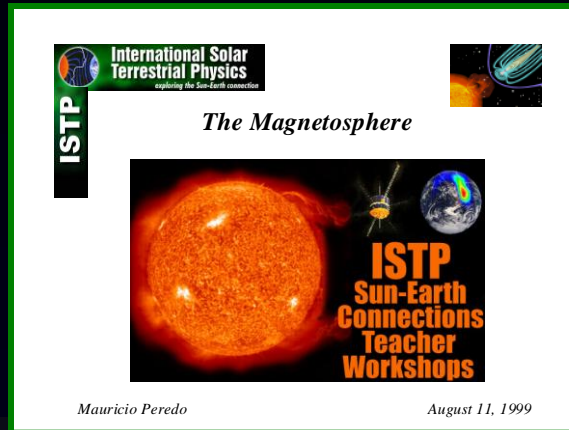


## Appendix 1: Table of magnetospheric properties

Parameter	Saturn	Jupiter	Earth	Mercury
Equatorial planetary radius (km)	60268	71492	6371	2440
Surface field strength (nT)	21084	420000	32000	340
Dipole moment ( $A m^2$ )	$4.6 \times 10^{25}$	$1.5 \times 10^{27}$	$8.3 \times 10^{22}$	$4.9 \times 10^{19}$
Sidereal rotation rate (hh:mm)	~10:48?	09:55	23:56	1407:30
Average solar wind $D_p$ (nPa)	0.03	0.08	2	20
IMF field strength (nT)	0.6	1	8	30
Average IMF parker angle	83	80	45	20
Tail radius ( $R_p$ )	60	150	30	2-3
Tail lobe flux content (GWb)	~15-50	100s	0.2-1	0.003
Average MP standoff distance ( $R_p$ )	23	84	10	1.4
SW transit time to tail (min)	120	360	5.3	2.8



## Referência:



### **Ondas elásticas no interior da Terra:**

[www.eaulas.usp.br/portal/video.action?idItem=377](http://www.eaulas.usp.br/portal/video.action?idItem=377)

### **Estrutura da Terra determinada pela sismologia:**

[www.eaulas.usp.br/portal/video.action?idItem=376](http://www.eaulas.usp.br/portal/video.action?idItem=376)

### **Gravimetria:**

<http://eaulas.usp.br/portal/video.action?idItem=8209>