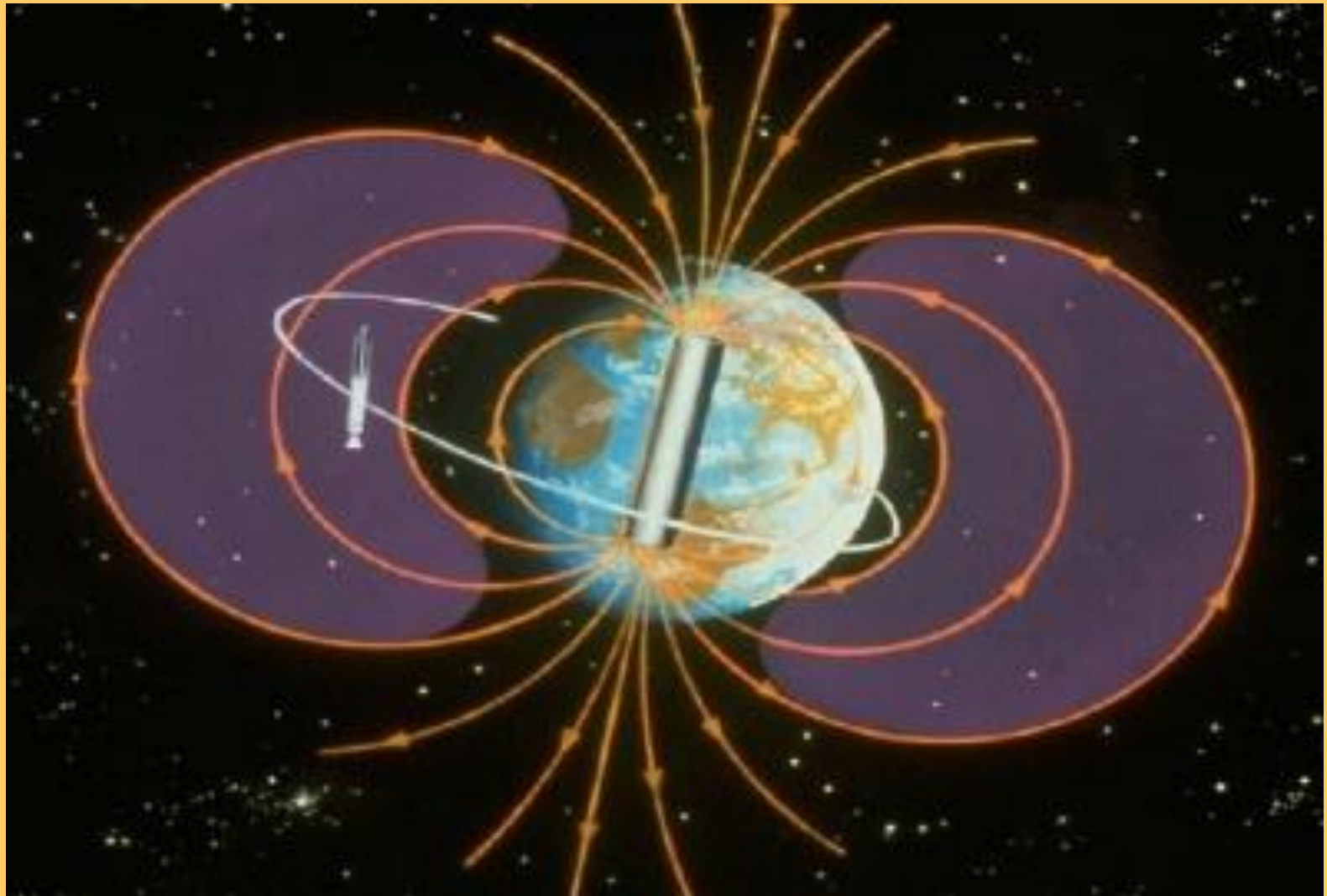


CAMPO GEOMAGNÉTICO

Campo magnético da Terra

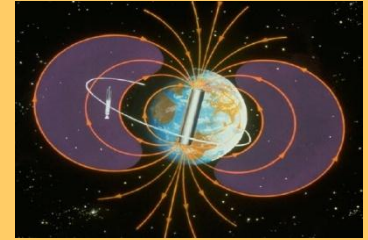
- Gilbert supôs que o campo geomagnético era predominantemente dipolar.
- Entretanto, verifica-se que o dipolo que melhor se ajusta ao campo dipolar da Terra não é axial.
- Ele depende do modelo utilizado, e da época considerada.

O campo dipolar da Terra pode ser representado por um dipolo centrado cujo eixo está inclinado aproximadamente $10,7^\circ$ em relação ao eixo de rotação da Terra.

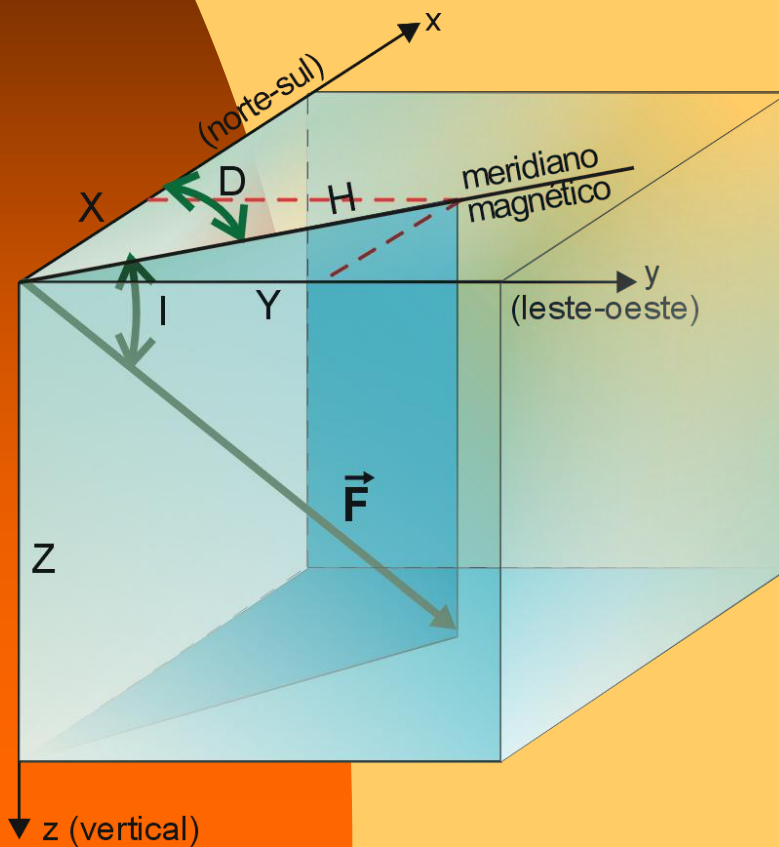


Campo magnético da Terra

- O campo magnético da Terra (B) é representado por um vetor: tem direção, sentido e magnitude:
- No SI – B é dado em Tesla – campo muito forte
- A Terra, por exemplo, apresenta uma intensidade máxima de $\sim 6 \times 10^{-5}$ T.
- Instrumentos modernos podem medir campos
 - de 10^{-9} T = 1 nT
- No cgs – B é dado em gauss
- 1 gauss = 10^{-4} T
- Outra unidade é o γ
- 1 γ = 10^{-5} gauss = 10^{-9} T
- 1 γ = 1 nT



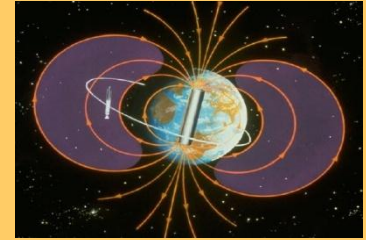
Representação Vetorial do Campo



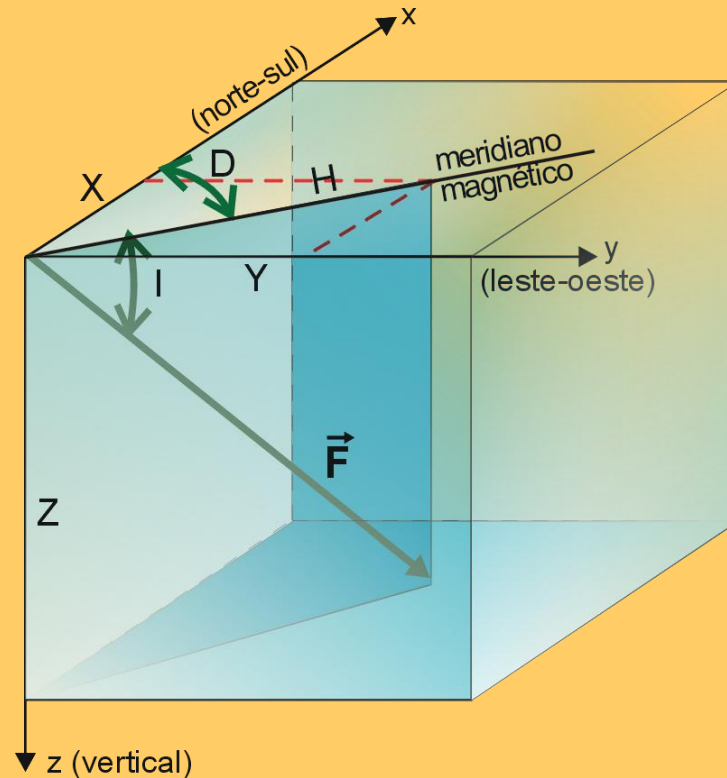
A agulha de uma bússola não aponta diretamente para o norte geográfico.

A agulha de uma bússola faz um ângulo com a horizontal, a qual varia de 0° no equador magnético até 90° nos polos.

Assim, podemos determinar a declinação, inclinação e intensidade total do campo:



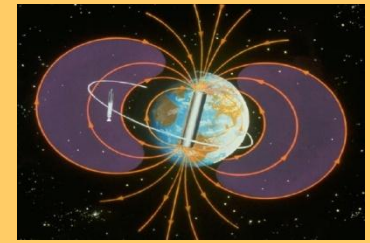
$$D = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$$
$$I = \arctan\left(\frac{Z}{H}\right)$$
$$H = \sqrt{X^2 + Y^2}$$
$$F = \sqrt{H^2 + Z^2}$$



- *Unidade do SI:*
 $F \rightarrow T$ (tesla) ou Wb/m^2 (weber/m²)

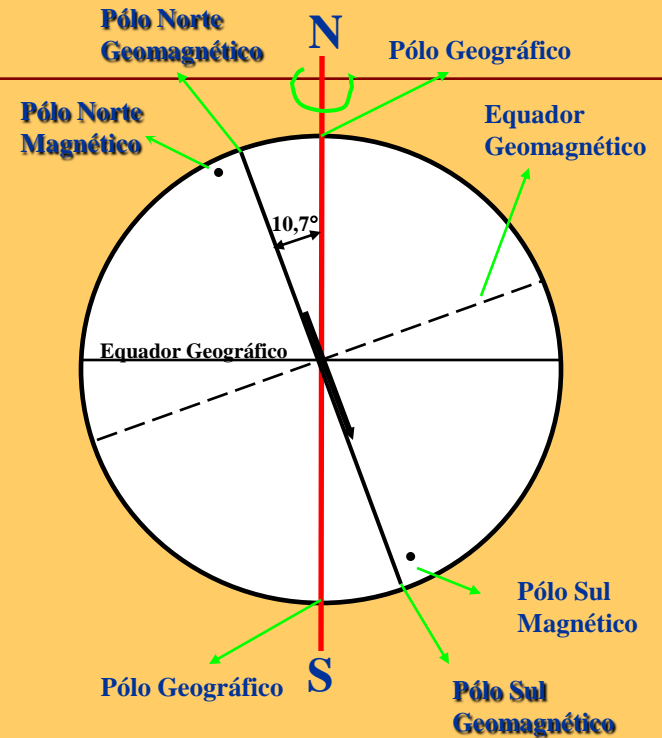
- **Pólos Geomagnéticos**

Linha que passa pelo centro da Terra, ao longo do eixo do dipolo, interceptando a superfície



- **Pólos Magnéticos**

Pontos da superfície da Terra onde o campo é vertical



As coordenadas dos polos geomagnéticos para o ano de 1980 são: $79,3^{\circ}\text{N}$; $288,6^{\circ}\text{E}$ e $79,3^{\circ}\text{S}$; $108,6^{\circ}\text{E}$. Eles são antipodais.

As coordenadas dos polos magnéticos para o ano de 1980 são: $77,3^{\circ}\text{N}$; $258,2^{\circ}\text{E}$ e $65,6^{\circ}\text{S}$; $139,4^{\circ}\text{E}$. Eles não são antipodais.

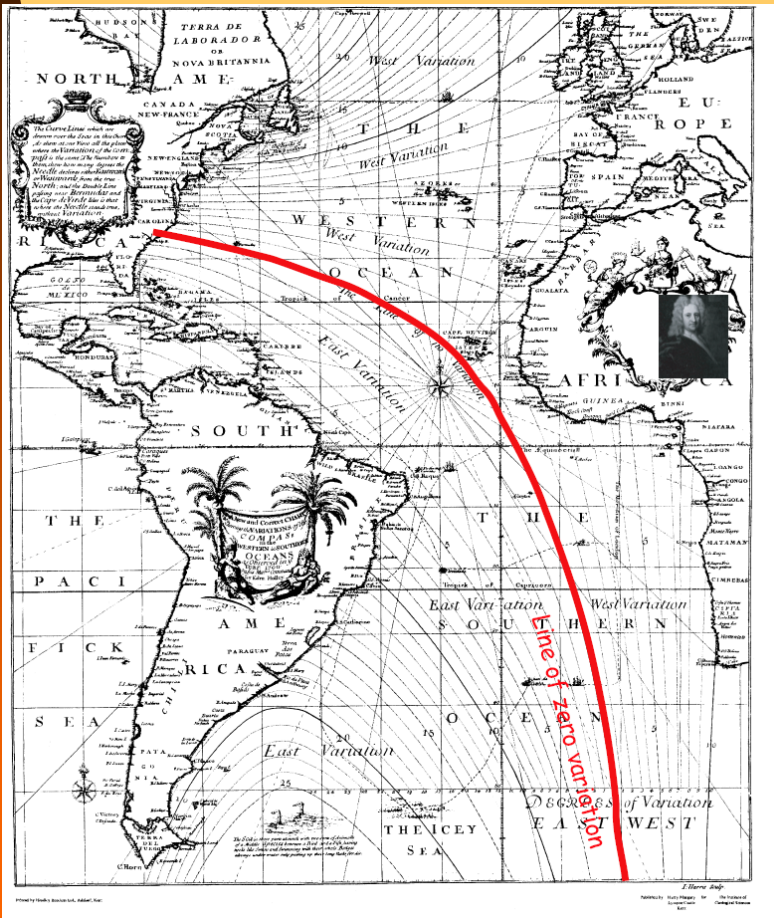
Isto decorre do fato que parte do campo magnético da Terra (5%) é representado por um campo não dipolar.

Campo geomagnético

- Desde as grandes navegações, quando se percebeu que o campo geomagnético variava no espaço e no tempo, foram estabelecidos observatórios geomagnéticos fixos e viagens foram realizadas com o objetivo de medir o campo e suas variações.

Campo geomagnético

- Podemos citar:
- Edmund Halley - 1698-1700 - Oceano Atlântico
- Primeira carta de declinação magnética
- Carl Gauss 1830
- Fundou um observatório geomagnético em Göttingen



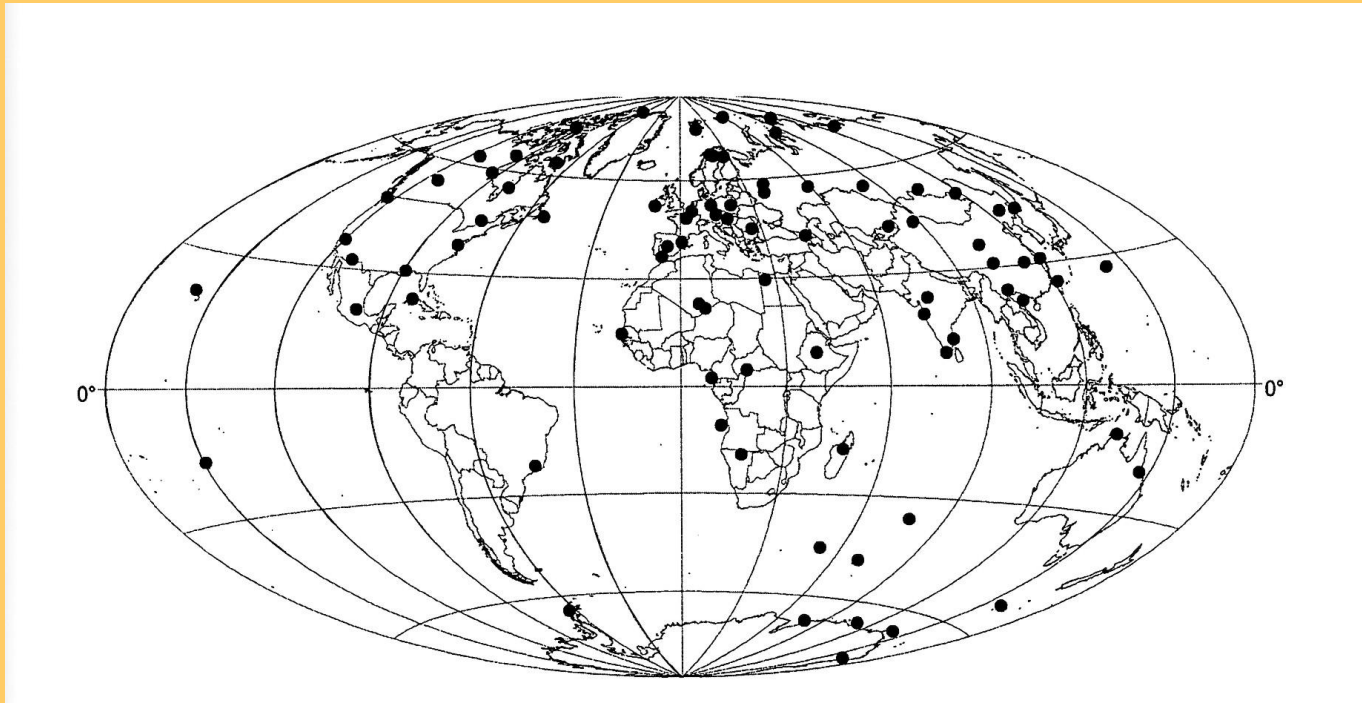
Campo geomagnético

- Hoje em dia, devido à grande aplicação dos dados geomagnéticos para a orientação em solo, mar e ar e também para os estudos dos fenômenos geofísicos relacionados ao campo, há um esforço internacional para a coleta e análise destes dados.

Campo geomagnético

- Cada país tem seu próprio serviço geomagnético.
- No caso do Brasil, este papel é exercido pelo Observatório Nacional – ON, situado no Rio de Janeiro, que se encarrega de obter dados em observatórios fixos e na ocupação de estações temporárias.

Campo geomagnético



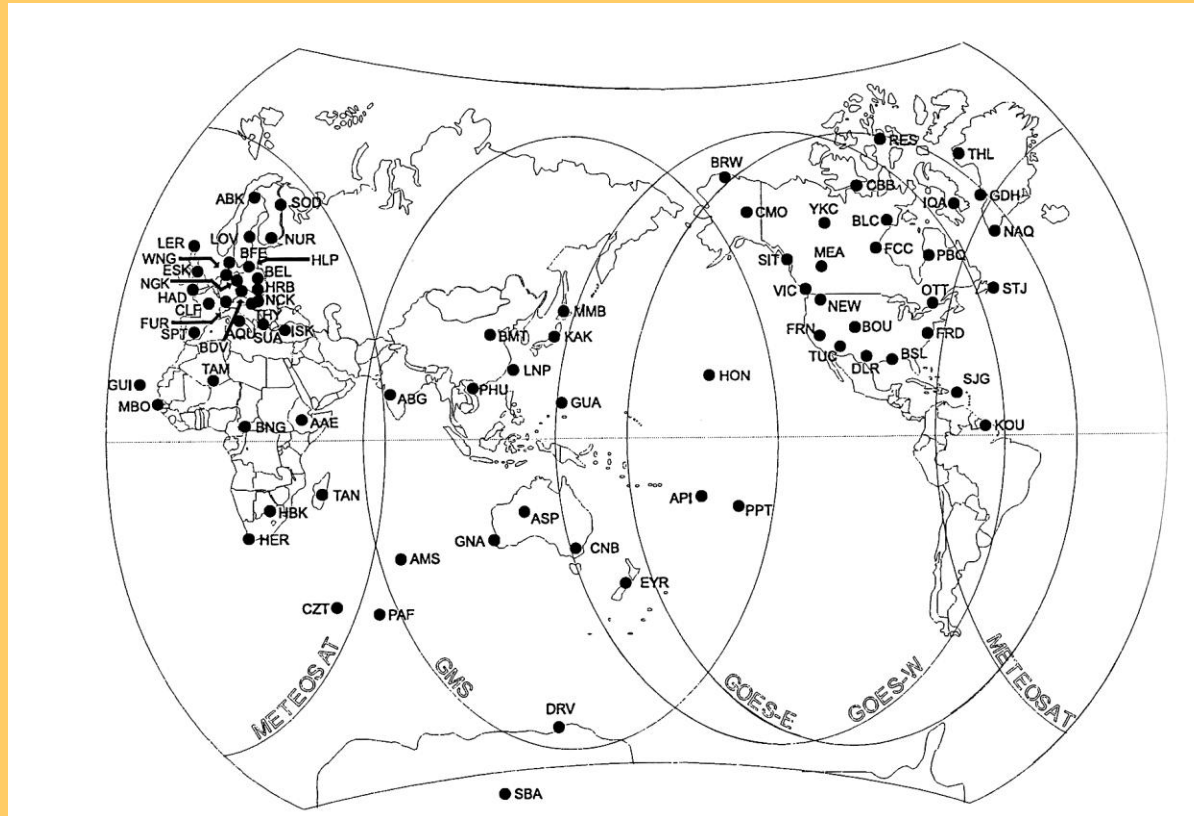
Localização de laboratórios existentes em 2001 (Campbell, 2003)

Para a análise do campo é importante uma rede uniforme de estações.

Entretanto, a maior parte está distribuída no hemisfério norte.

No Brasil – Vassouras (Rio de Janeiro) e Tatuoca (Ilha de Marajó)

Campo geomagnético



Observatórios operando em 2001 que estavam associados a INTERMAGNET
INTERMAGNET – International Real-time Magnetic observatory network
Acordo internacional entre líderes de observatórios – cerca de 80 observatórios.
Satélites são também usados para complementar as observações.

Campo geomagnético

- Os dados medidos a cada minuto são enviados a cada intervalo de 12 minutos ou uma hora, para satélites geoestacionários. Estes dados são coletados e re-enviados às agências governamentais.
- Uma análise imediata dos dados fornece uma avaliação do tempo magnético, os quais afetam satélites, meios de comunicação e linhas de transmissão elétrica.

Campo geomagnético

- Em uma segunda etapa, os dados são trabalhados e se preparam modelos globais do campo.
- IGRF – International Geomagnetic Reference Field.
- Os modelos são elaborados a cada 5 anos e são construídas cartas com as várias componentes do campo, as quais são usadas nos anos seguintes.
- A variação anual de cada componente é também determinada e indicada por linhas de igual variação anual – curvas isopóricas.

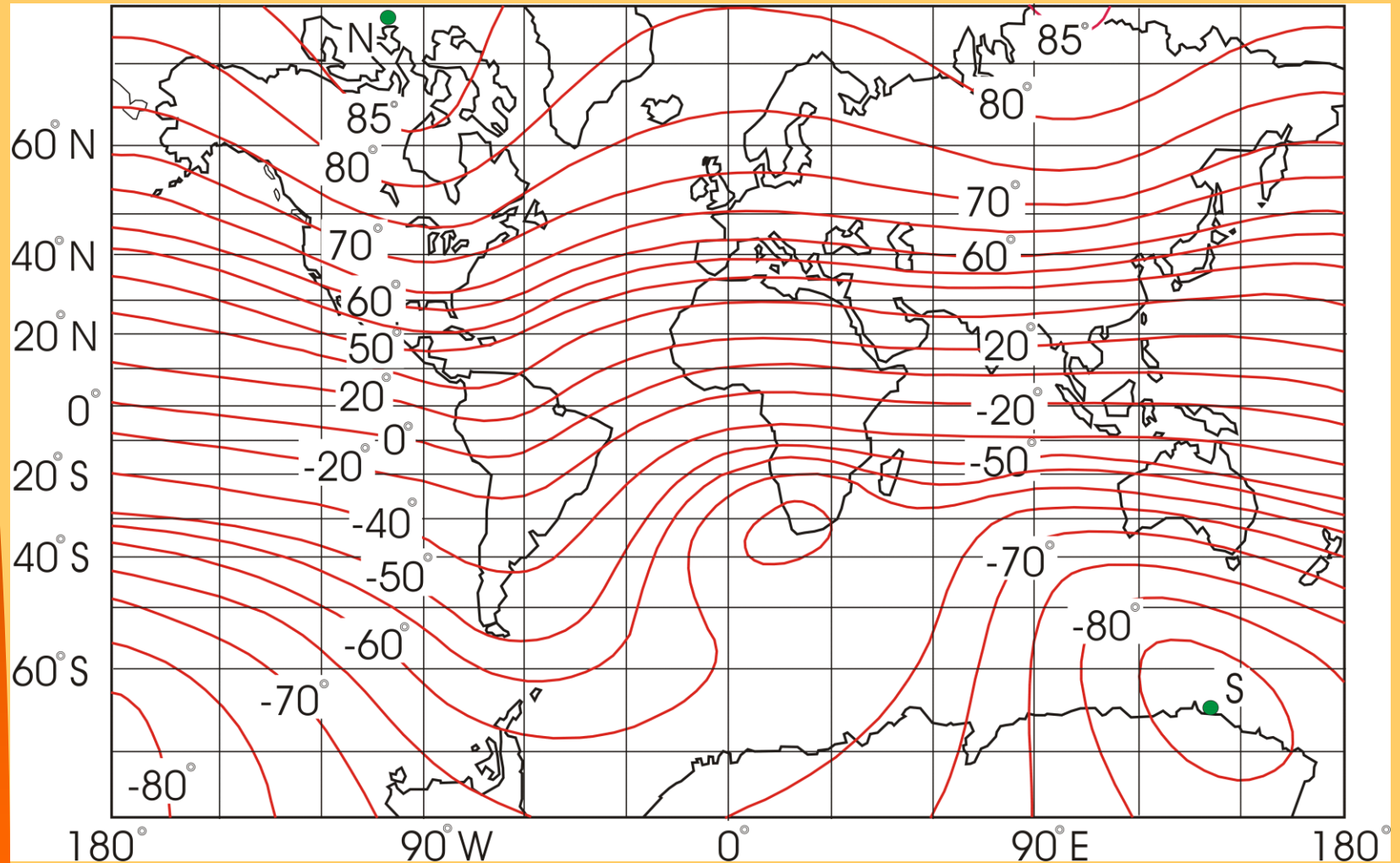
Mapa de declinação magnética indicando a posição dos pólos e a linha de declinação zero (Fonte, Lange et al., 1980).

Linhas de igual declinação – Curvas Isogônicas



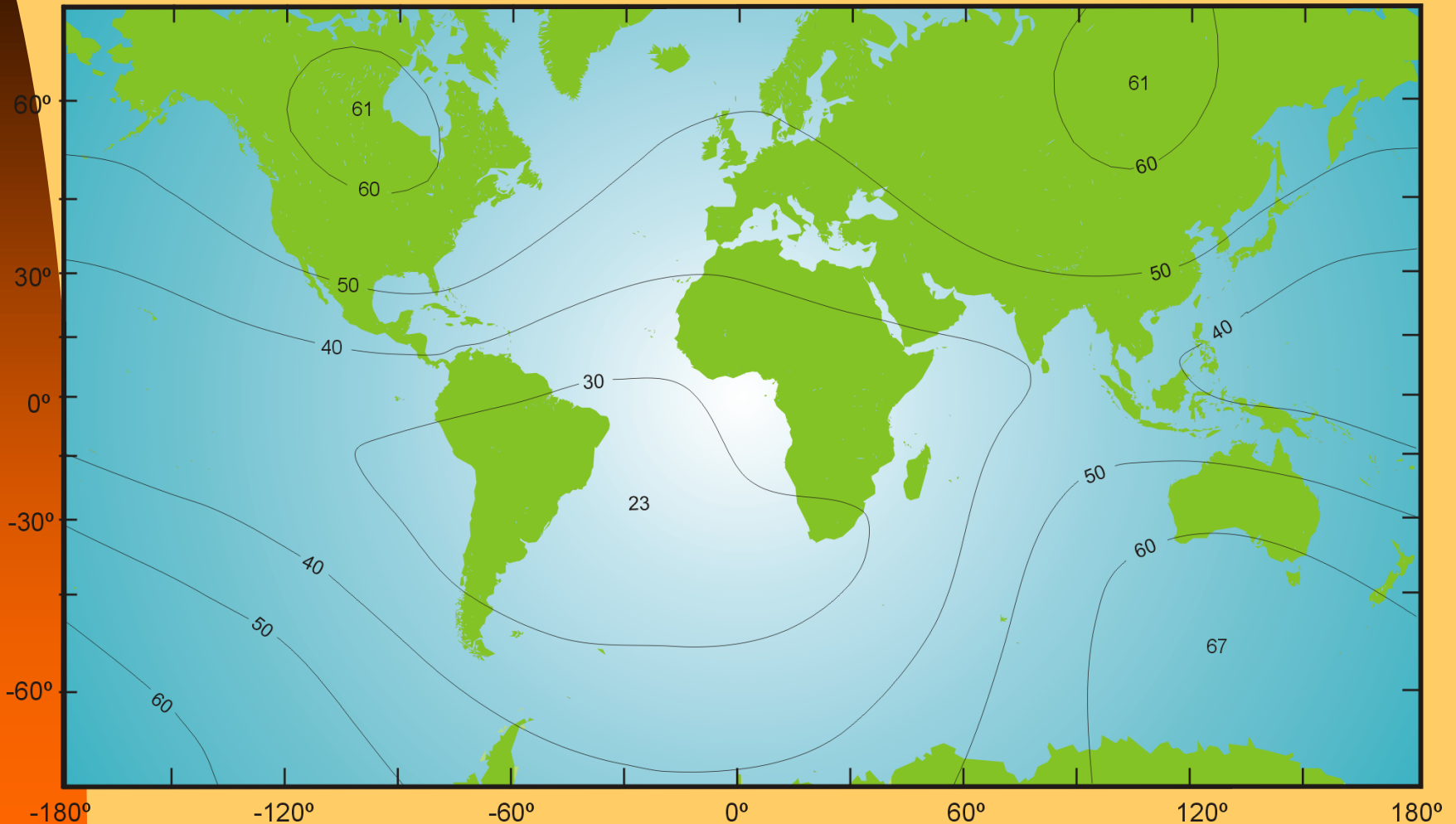
Mapa de inclinações magnéticas.

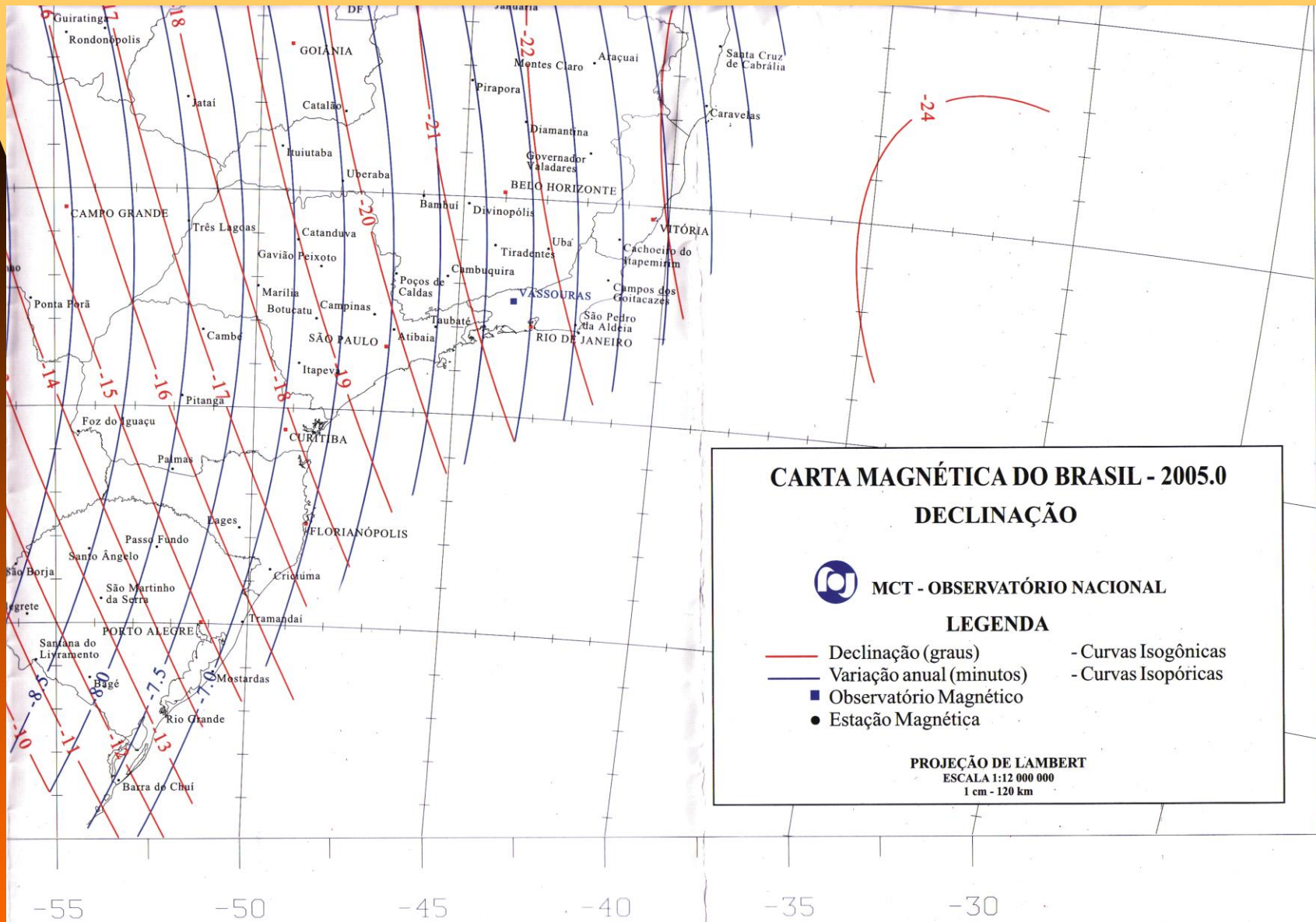
Curvas de igual inclinação – Curvas Isoclínicas



Mapa de intensidade total do campo geomagnético em milhares de nT (1980).

Linhas de igual intensidade – Curvas Isodinâmicas.





Componentes magnéticas

- <http://www.geomag.nrcan.gc.ca/calc/mdcal-en.php>

Origem do Campo

➤ *O vetor campo geomagnético total, F , que podemos medir num ponto da Terra, não tem uma única origem.*



- *Campo principal – de origem interna, com variações lentas;*
- *Campo externo – de origem externa, de magnitude muito inferior à do campo principal, com variações rápidas;*
- *Campos locais – causados por materiais crustais magnetizados, sem variação temporal mas com grande variação espacial.*

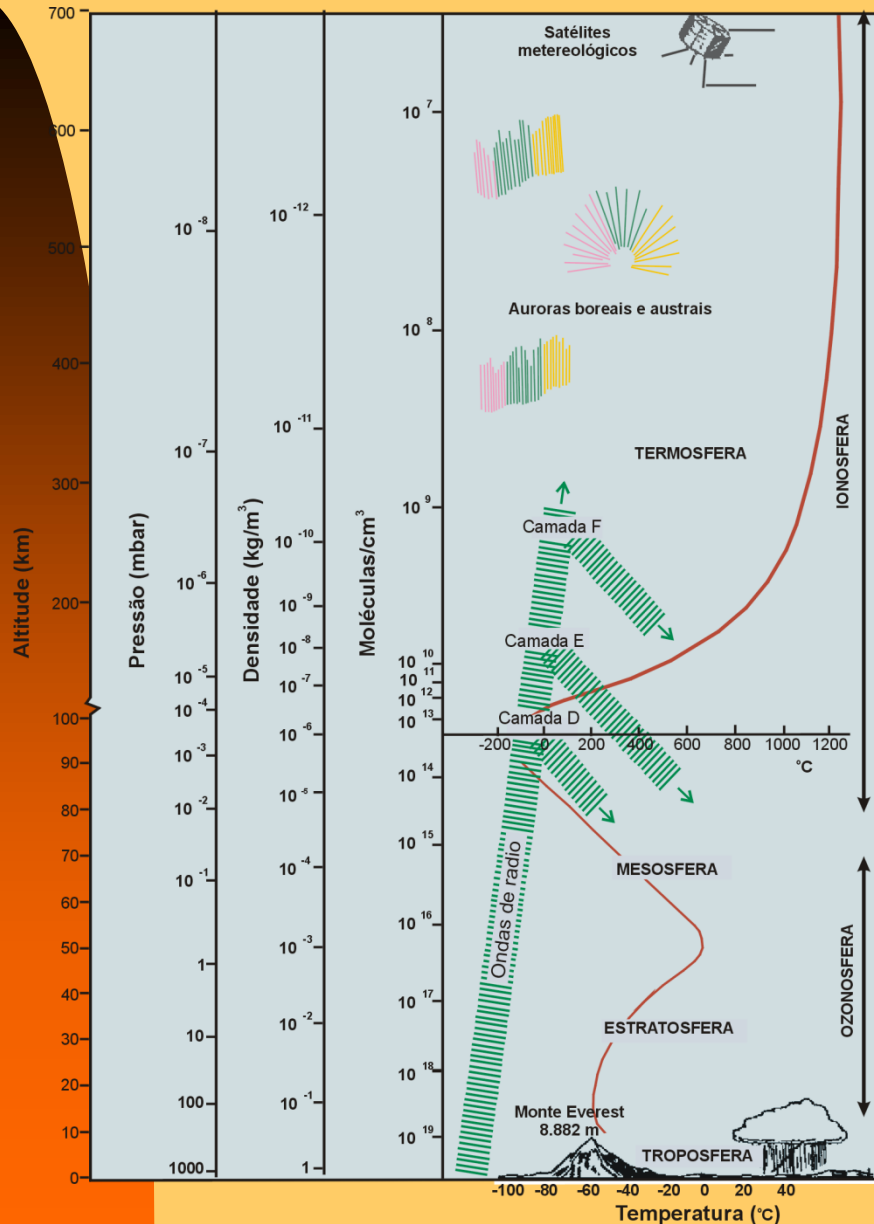
Campo Geomagnético Externo

- O campo geomagnético externo é gerado em uma região condutora da atmosfera da Terra, chamada Ionosfera.
- As condições de geração do campo externo e as variações temporais desse campo dependem de vários fatores, como a ionização da atmosfera neutra, a atividade solar, o campo geomagnético interno e os movimentos da Terra.

Atmosfera da Terra

- Próximo à superfície, a composição aproximada do ar é:
- N_2 – 78%
- O_2 – 21%
- Ar, CO_2 , H_2O , etc... - 1%
- Densidade do ar – $10^{-3} \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ Kg/m}^3$
- Pressão – $1000 \text{ mb} = 760 \text{ mmHg} = 10^5 \text{ N/m}^2$
- Temperatura média – 300 K

Atmosfera da Terra

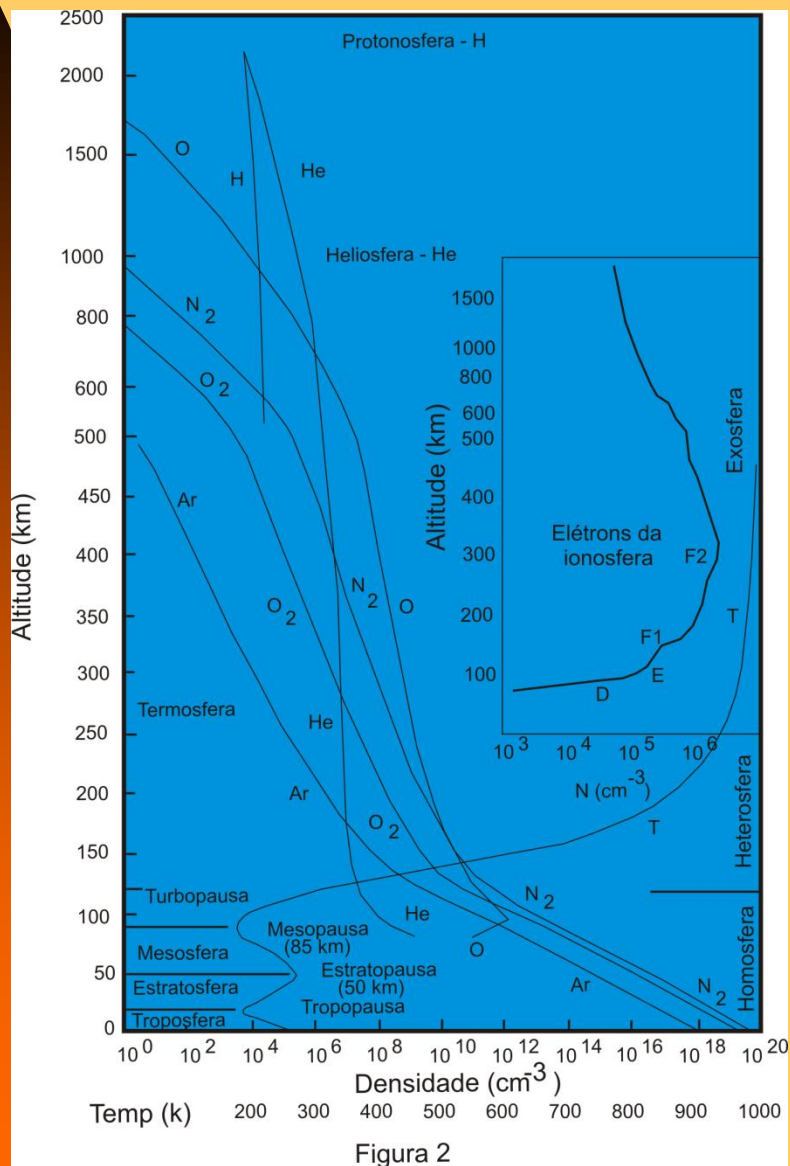


A pressão e a densidade decrescem rapidamente com a altitude:

A Pressão cai de 1/10 a cada 15 km no início, passando a uma queda ainda mais rápida até 120 km. Depois, decai mais lentamente.

O mesmo pode-se dizer da densidade e da quantidade de moléculas/cm³.

Atmosfera da Terra



COMPOSIÇÃO:

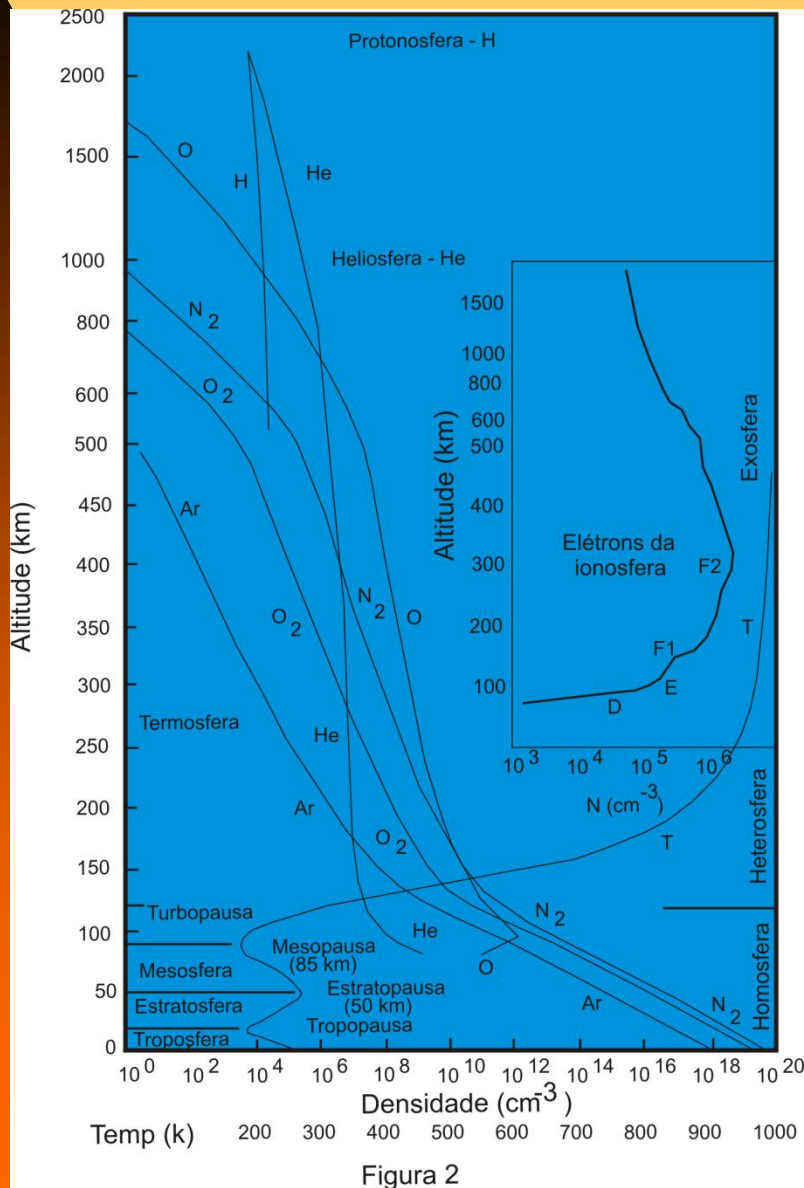
Até uma altura de aproximadamente 100 km (ou pouco mais), a mistura de gases é praticamente constante, isto é, a cada altitude, a proporção de certo gás em relação ao todo se mantém. Esta porção inferior da atmosfera é chamada de **HOMOSFERA**. Nela predomina um processo de difusão turbulenta.

À aproximadamente 100-120 km encontra-se uma região de transição, chamada de **TURBOPAUSA**, acima da qual predomina a difusão molecular, isto é, a partir desta altura, os gases se distribuem de acordo com suas próprias escalas de altura e não há mais a mistura proporcional. Esta região é chamada de **HETEROSFERA**.

Atmosfera da Terra

- Como já disse, na **homosfera**, a proporção volumétrica é de 78% N_2 e 21% de O_2 .
- Embora pouco abundantes, o CO_2 , H_2O e O_3 têm grande importância devido a capacidade destes gases em absorver diretamente a radiação solar. O ozônio tem a função importante de absorver a radiação ultravioleta vinda do Sol, letal para a vida animal.

Atmosfera da Terra



A figura mostra a variação de concentração de alguns componentes da atmosfera em função da altitude.

À partir de ~ 200 km o N₂ e o O₂ deixam de ser os elementos majoritários, passando a prevalecer, aos poucos, o oxigênio atômico, o hélio e o hidrogênio.

Na região mais externa da atmosfera, > 500 km, as colisões entre moléculas ou átomos são pouco frequentes, devido a diminuição da densidade. Há uma perda constante de partículas para o espaço. Esta parte da atmosfera é chamada de **EXOSFERA**.

Na exosfera vamos ter a **HELIOSFERA**, em que predomina o hélio (He) e a **PROTONOSFERA**, em que predomina o hidrogênio (H)

Atmosfera da Terra

- **Distribuição de temperatura**
- Vários processos influenciam na distribuição de temperatura:
- **Convecção** – é importante na baixa atmosfera – uma parcela de ar aquecida expande-se e sua densidade diminui. Sua tendência é subir na atmosfera. O ar mais frio ocupa o seu lugar, formando o ciclo de convecção.
- **Absorção** – na atmosfera existem moléculas que absorvem a radiação solar diretamente, principalmente no ultra-violeta (UV) e no extremo ultravioleta (EUV).
- Uma região de absorção direta da energia solar está localizada em torno de 30-40 km, onde ozônio (O_3) e vapor de água (H_2O) são os principais elementos absorventes.
- Quando subimos em montanha, nós percebemos que a temperatura diminui. Isto é realmente o que acontece e continuaria, não fosse o fenômeno físico da absorção das moléculas de O_3 e H_2O a 30-40 km de altitude.

Atmosfera da Terra

- Outra região de absorção direta da radiação solar ocorre na alta atmosfera. Sendo esta região de menor densidade, as colisões decrescem e a velocidade média das partículas aumenta, resultando em aumento de temperatura.
- **Radiação** – é importante nas camadas mais baixas da atmosfera, onde a densidade é mais elevada.
- **Condução** – resulta das colisões diretas entre as moléculas – é um processo relativamente ineficiente nos gases.

Variação da Temperatura

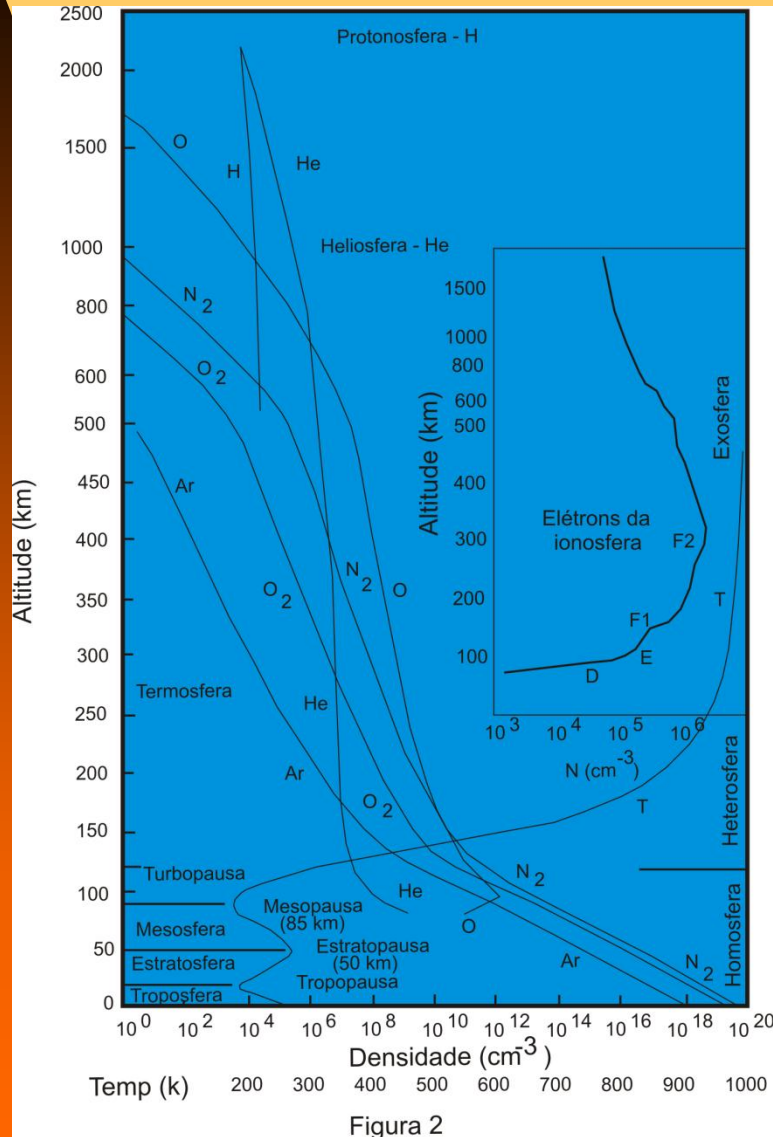


Figura 2

De acordo com a variação da temperatura, a atmosfera é dividida em camadas:

TROPOSFERA – Camada mais próxima da superfície – estende-se até a altitude aproximada de 15 km – temperatura decresce com a altitude.

ESTRATOSFERA – A temperatura aumenta com a altitude, em decorrência do processo de absorção pelas moléculas da atmosfera – estende-se de ~15 e ~50 km.

MESOSFERA – A temperatura volta a decrescer com a altitude. Estende-se entre ~50 e ~90 km.

TERMOSFERA – A temperatura aumenta novamente até se estabilizar a 1300-1500°C, próximo de 600 km.

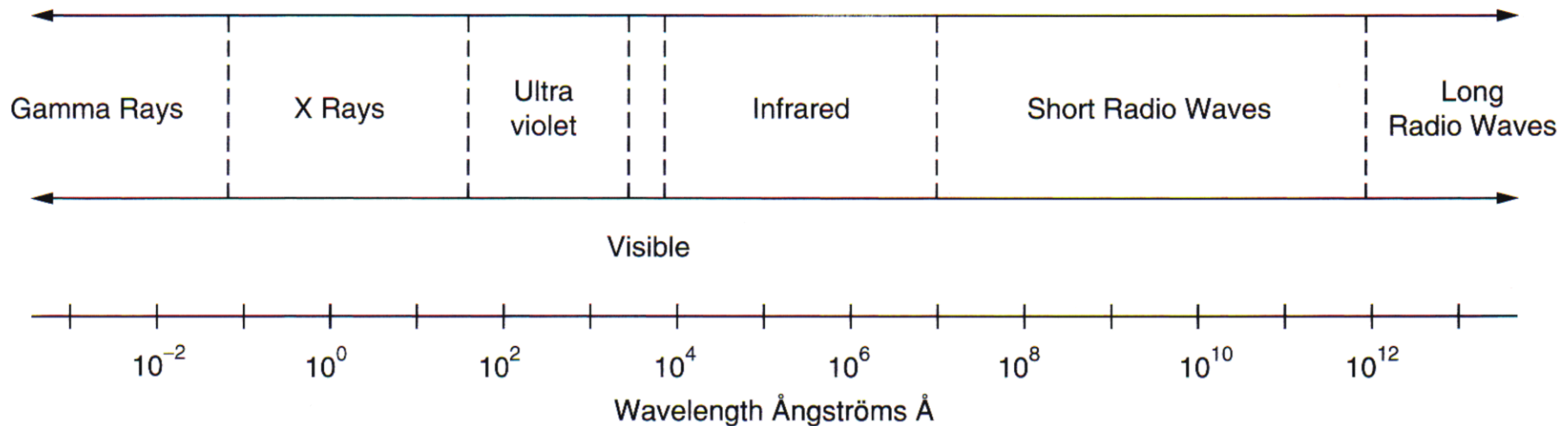
A TROPOPAUSA, ESTRATOPAUSA e a MESOPAUSA estão situadas nas inflexões de temperatura – limites das camadas.

Questão

Sendo as temperaturas da alta atmosfera tão altas na termosfera, porque um veículo espacial ou um astronauta não queimam ao se deslocar pela atmosfera?

Radiação solar

- Como veremos mais adiante, o campo geomagnético da Terra age como um escudo em relação à maior parte da radiação solar e a atmosfera age como uma manta protetora em relação à radiação restante.
- A maior parte da radiação de comprimentos de onda muito curto que penetra na atmosfera não atinge a superfície da Terra: raios γ , raios X e ultra violeta.



Ionosfera

- As radiações γ , X e ultravioleta causam a ionização das moléculas de oxigênio e nitrogênio da camada da atmosfera superior em altitudes de cerca de 50 km até 1000-1500 km, formando uma região ionizada, a qual chamamos de ionosfera – camada eletricamente condutora, constituída por íons e outras partículas carregadas (elétrons e prótons).
- Outro processo que ocorre na ionosfera é a recombinação iônica.

Ionosfera

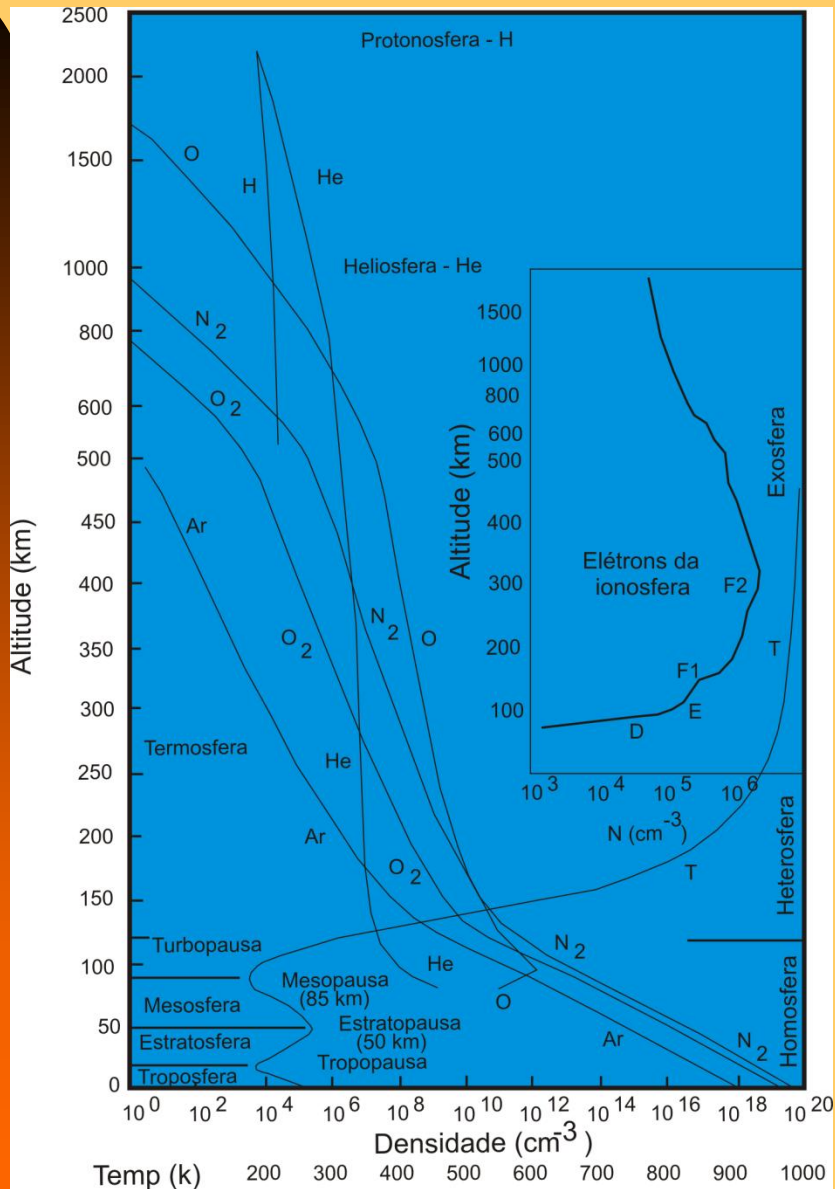


Figura 2

A ionização é dividida em camadas de acordo com o grau de ionização D, E, F1, F2.

A ionização depende da intensidade da radiação e da densidade da atmosfera. A atmosfera é menos densa à altas altitudes, de modo que, a radiação solar encontra poucos átomos para ionizar. Mais próximo da superfície, a densidade da atmosfera é alta, mas não há quase radiação solar, a qual foi absorvida em altitudes maiores e a ionização é baixa.

Ionização

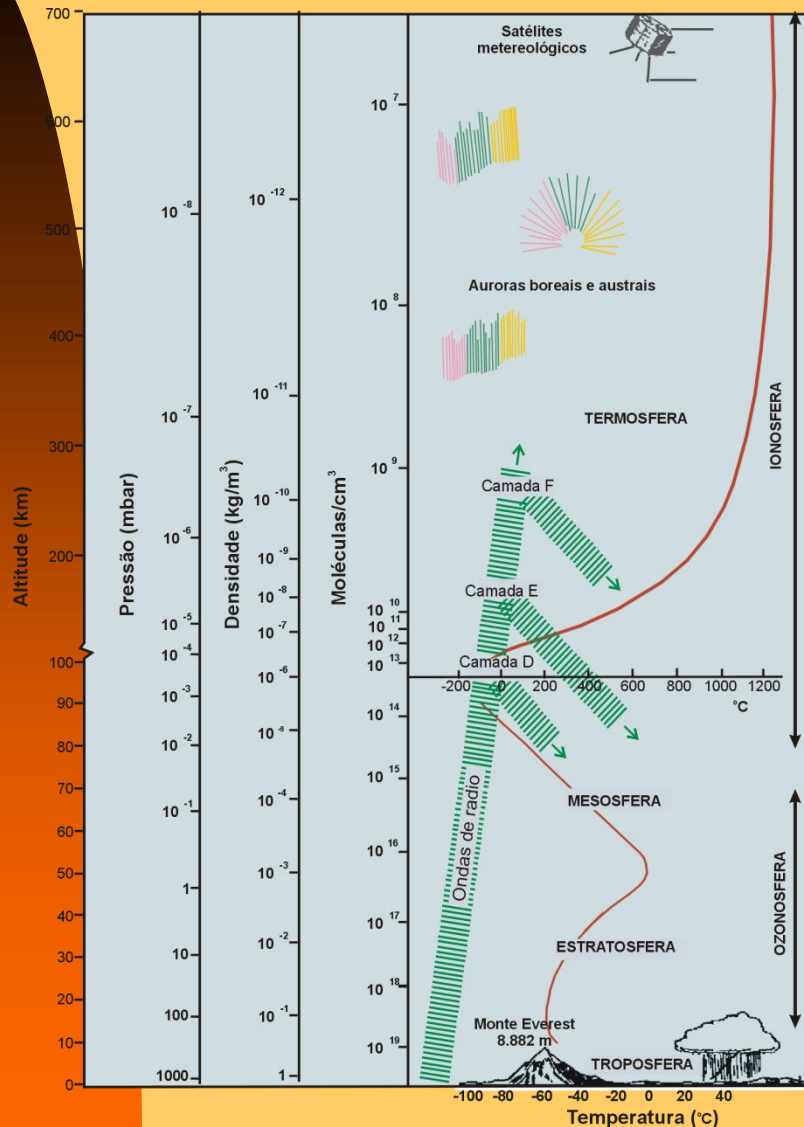
Como a Terra gira, a espessura e as ionizações das camadas mudam durante o dia; durante a noite, algumas camadas chegam a desaparecer, enquanto ficam mais espessas e intensas durante o dia.

São nestas camadas que ocorrem as reflexões de ondas de rádio. Frequências mais altas penetram em camadas mais altas da ionosfera.

A ionosfera é importante, pois é nela que surgem as correntes que dão origem às variações externas do campo geomagnético.

A camada D é a mais próxima e fica a uma altitude de 80-100 km. Ela foi descoberta em 1902, antes de se conhecer a natureza da ionosfera, por causa de sua habilidade de refletir ondas de rádio de longo comprimento de onda.

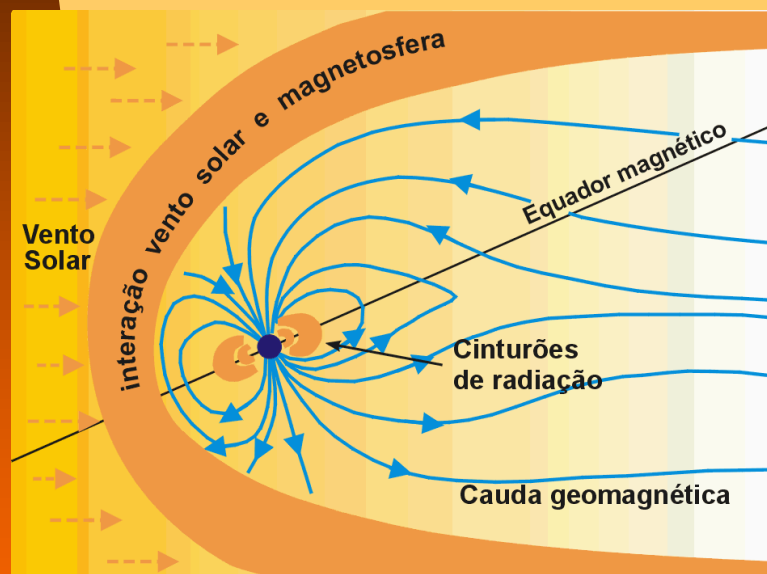
-Chamada de Kennely-Heaviside em homenagem aos seus descobridores.



Variações externas do campo geomagnético.

- O campo geomagnético é fortemente afetado pelos ventos solares, que correspondem a fluxos de partículas carregadas eletricamente (elétrons, prótons e núcleos de hélio).
- O vento solar é um plasma, termo físico para designar um gás ionizado de baixa densidade de partículas. O vento solar, nas proximidades da Terra, tem densidade de ~ 7 ions/cm³ e gera um campo de 6 nT.

Magnetosfera



. A velocidade do vento solar é de ~ 450 km/s.

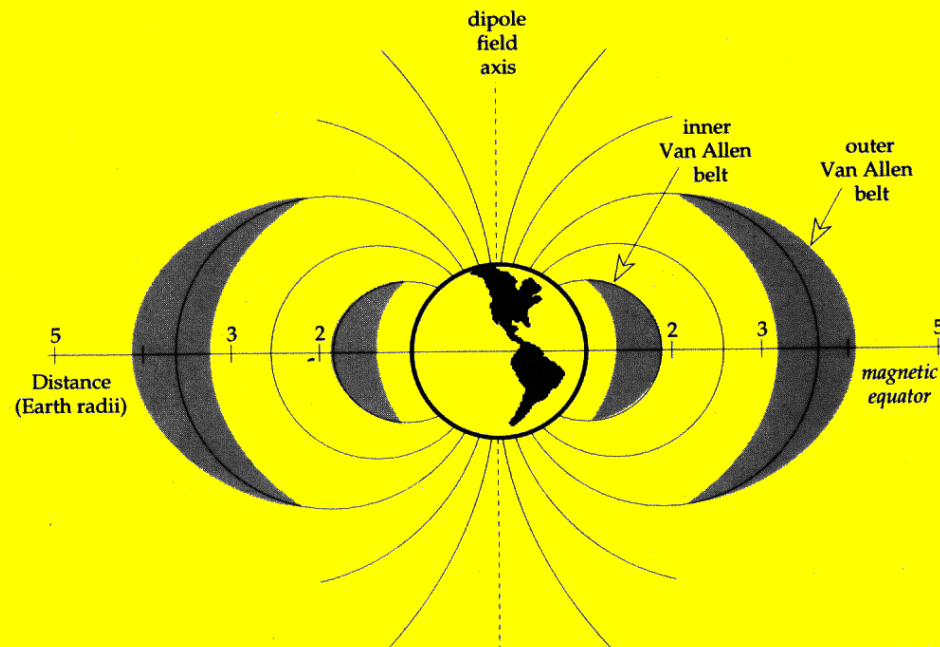
. Quando o vento solar colide com a atmosfera superior, ele produz um efeito similar a uma onda de choque. Nesta zona, ele é freado, aquecido e desviado pelo campo geomagnético.

. O vento solar comprime o campo geomagnético em forma de arco, no lado voltado para o Sol. No lado em que não está sendo iluminado pelo Sol, as linhas de força do campo não sofrem esta pressão e estendem-se a distancias de 2.000 vezes o raio da Terra, chegando a ultrapassar a órbita da Lua.

Cinturão de Van Allen

- . Cargas elétricas que penetram na magnetosfera, são “aprisionadas” pelas linhas de força do campo geomagnético e formam os cinturões de radiação de Van Allen.
- . Os cinturões de Van Allen formam regiões anelares coaxiais com o eixo geomagnético.
- . O cinturão interno (1.000 a 3.000 km) contém principalmente prótons e o cinturão externo (20.000 a 30.000 km) contém elétrons energéticos.

Fig. 5.28 Schematic representation of the inner and outer Van Allen belts of charged particles trapped by the magnetic field of the Earth.



Movimento das partículas carregadas no campo magnético

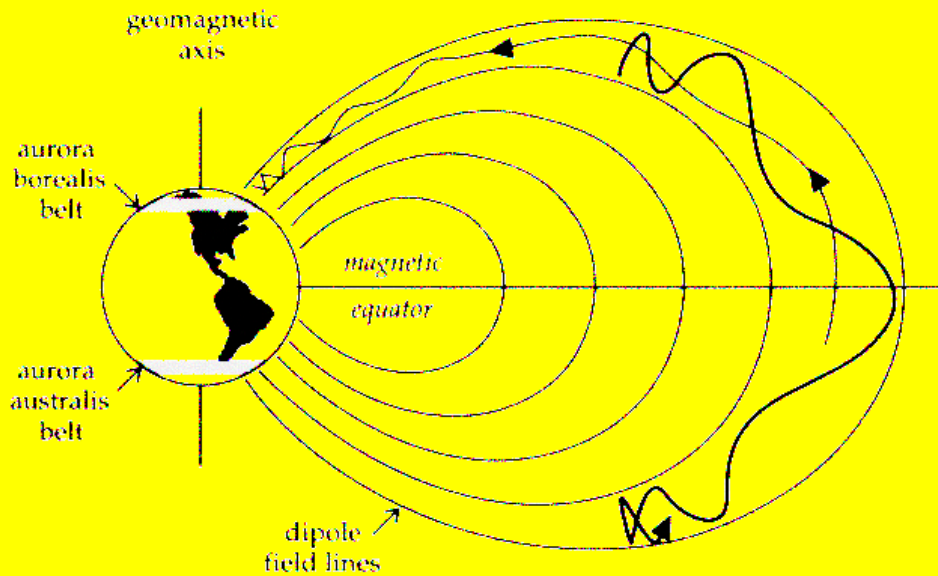
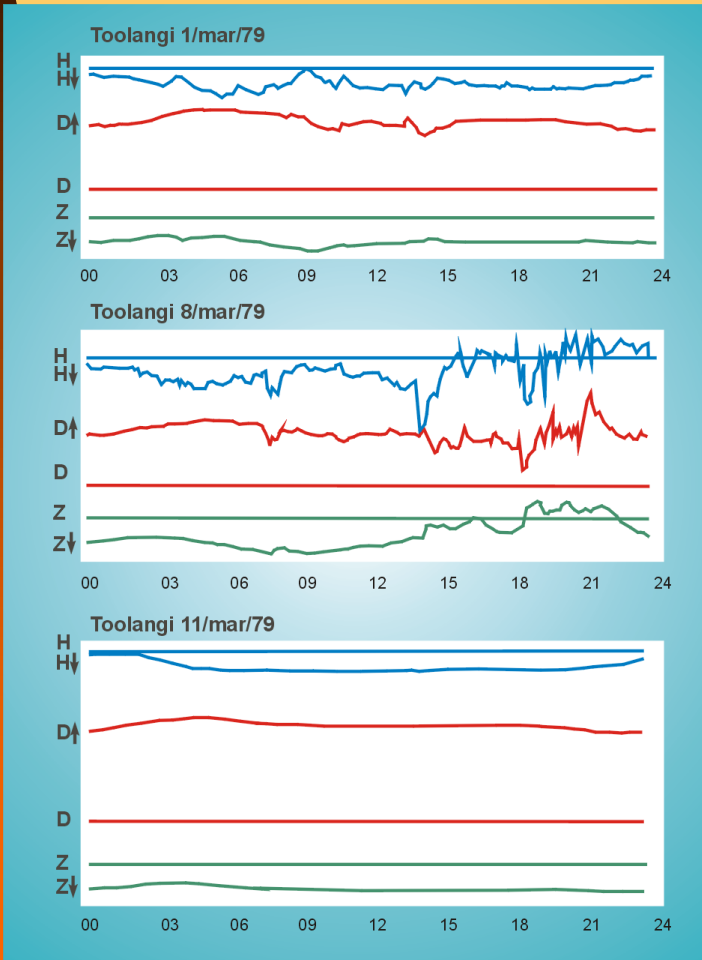


Fig. 5.29 Charged particles from the solar wind are constrained to move in a helical fashion about the geomagnetic field lines (after Vestine, 1962).

. Devido à forças de Lorentz, os movimentos das partículas são helicoidais e elas se aproximam da Terra nas regiões polares; eventualmente, elas atingem velocidade zero e reverterem o sentido de movimento.

. Isto faz com que as partículas vão de uma região polar a outra, rapidamente.

Variações de dias calmos (S_Q) e perturbados (S_D).



. A ionização da ionosfera libera feixes de elétrons que formam grandes correntes elétricas em forma de anel. Estas correntes agem como fontes de campo magnético externo, as quais são detectadas na superfície da Terra. Estes campos são mais intensos durante o dia.

. Como a Terra gira abaixo da ionosfera, a intensidade do campo flutua com uma amplitude entre 10 e 30 nT durante o dia (variação diurna).

. Durante os dias em que a atividade solar é baixa, dizemos que temos um dia calmo (S_Q).

. Quando a atividade solar é alta, dizemos que temos um dia perturbado (S_D).

. Durante as tempestades solares, as amplitudes chegam a 1.000 nT.

Auroras Boreais Fig. 4.19



Fotografia de uma aurora boreal.

Energia das partículas;
Composição e densidade da atmosfera;
Níveis de emissão permitidas pelas
partículas;
Meia vida do estado excitado.

- . Uma tempestade pode ser acompanhada pelo aparecimento de um dos fenômenos mais intensos e fascinantes no céu, que são as auroras boreais e austrais nas regiões polares norte e sul, respectivamente.
- . A aurora é causada por emissão de luz da atmosfera superior numa forma parecida com uma descarga elétrica.
- . Cor verde (60-100 km) – emissões de energia por átomos de oxigênio – comprimento de onda de 5577 \AA (meia-vida de $\frac{1}{4} \text{ s}$).
- . Cor azul-violeta (100-200 km) – emissões de energia por nitrogênio molecular – comprimentos de onda de 3914 \AA e 4278 \AA (meia-vida – instantâneo).
- . Cor vermelha (altitudes maiores) – emissões de energia por oxigênio atômico – Comprimentos de onda 6300 \AA (meia-vida – 130 s)



FIM