

## O CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO

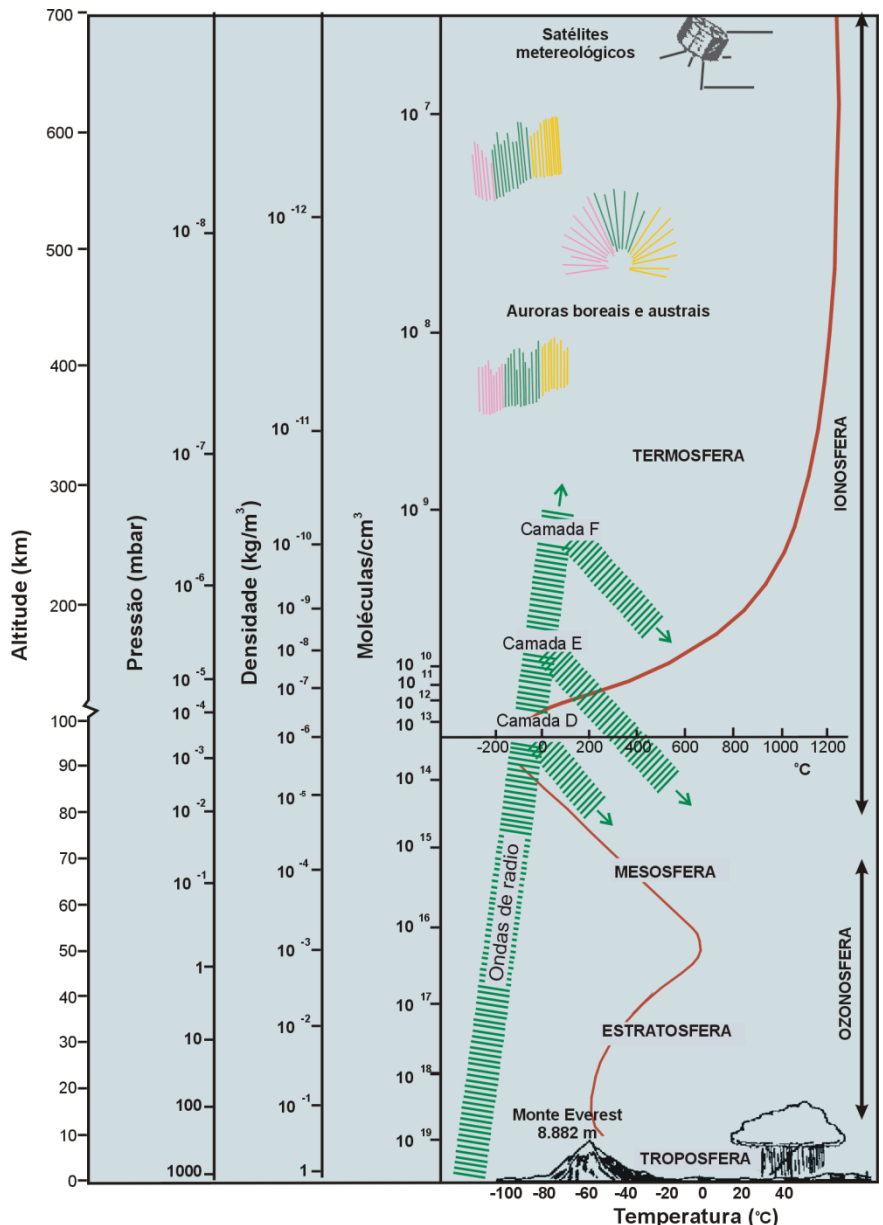
O campo geomagnético é gerado em uma região condutora da Terra, chamada ionosfera. As condições de geração e as variações temporais desse campo dependem de vários fatores, tais como, o grau de ionização da atmosfera, a atividade solar, o campo geomagnético interno e os movimentos da Terra.

## ATMOSFERA TERRESTRE

Na superfície da Terra, a pressão é de aproximadamente 1000 mb (76 cm Hg), a temperatura média é de  $\sim 300$  K e a densidade é de  $\sim 10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup>. O ar é constituído, na maior parte, por nitrogênio molecular (N<sub>2</sub> -  $\sim 78\%$ ) e oxigênio molecular (O<sub>2</sub> -  $\sim 21\%$ ). O restante, composto por aproximadamente 1%, é representado por outros gases, tais como, Ar, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, etc...

A pressão e a densidade decrescem rapidamente com a altitude, como pode ser visto na **Figura 1**. A pressão cai na razão de 1/10 a cada 15 km no início, passando a uma queda ainda mais rápida até a altitude de  $\sim 120$  km. Depois decai mais lentamente. O mesmo pode-se dizer da densidade e da quantidade de moléculas por centímetro cúbico.

A atmosfera é uma mistura de gases, onde o nitrogênio molecular é o mais abundante de todos. Depois vem o Oxigênio molecular. Até a altitude de 100 km (ou pouco mais), a mistura dos gases é praticamente constante, isto é, a cada altitude, a proporção da mistura de certo gás em relação ao todo, se mantém constante. Esta porção inferior da atmosfera é chamada de **HOMOSFERA (Figura 2)**. Nela predomina um processo de difusão turbulenta. Embora pouco abundantes, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> têm grande importância devido a suas capacidades de absorver diretamente a radiação solar, como será visto mais adiante. O ozônio tem a função importante de absorver radiação ultravioleta, a qual é letal para a vida animal.



**Figura 1.** Desenho esquemático das camadas que compõem a atmosfera, ilustrando a propagação e reflexão das ondas eletromagnéticas utilizadas na radiocomunicação. A linha vermelha representa a variação de temperatura na Ozonosfera e na Ionosfera (Fonte: Decifrando a Terra).

Por volta de 100 km, encontra-se uma região de transição, chamada de **TURBOPAUSA**, acima da qual predomina o processo de 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**.

A **Figura 2** mostra a variação de concentração de alguns componentes da atmosfera em função da altitude. A partir de ~200 km, o  $N_2$  e o  $O_2$  deixam de ser os elementos majoritários, passando a prevalecer, aos poucos, o oxigênio atômico, o hélio e o hidrogênio.

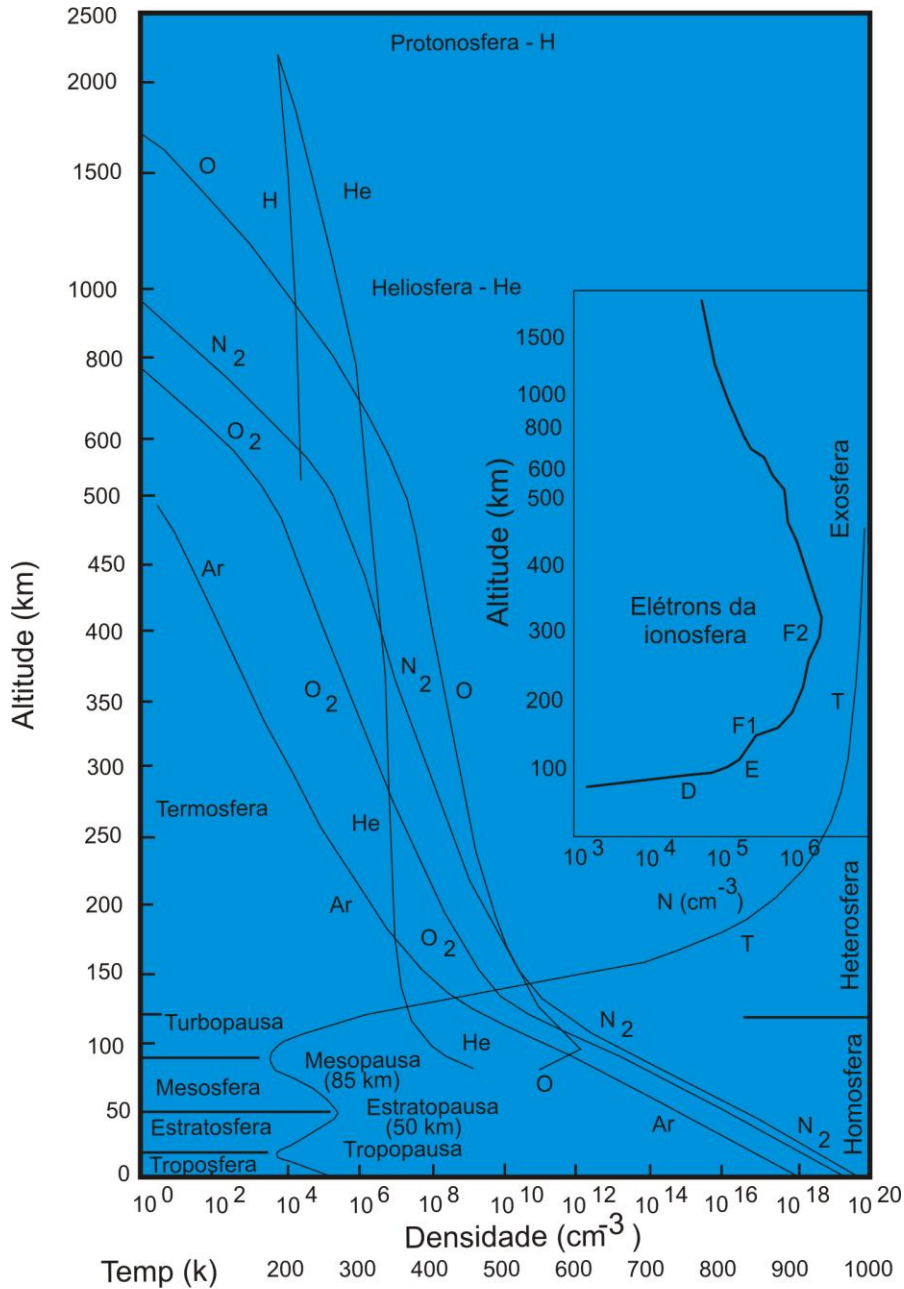


Figura 2

**Figura 2.** Distribuição com a altura da densidade de  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $O$ ,  $Ar$ ,  $He$  e  $H$ , da densidade de elétrons -  $N$  (gráfico interno, à direita) e da variação da temperatura na atmosfera da Terra (Fonte: Kirchhoff).

Na região mais externa da atmosfera (> 500 km) as colisões entre moléculas ou átomos são pouco frequentes, devido a diminuição na densidade. Há uma perda constante de partículas para o espaço; é a chamada **EXOSFERA**. Na Exosfera, vamos ter a **HELIOSFERA** em que predomina o hélio (He) e a **PROTONOSFERA**, em que predomina o hidrogênio (H).

## **DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA**

Vários processos físicos influenciam na variação real da temperatura com a altitude:

- (i) **Convecção** – Este processo 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.
  
- (ii) **Absorção** – Na atmosfera existem moléculas que absorvem a radiação solar diretamente, principalmente na frequência do ultravioleta (UV) e na do extremo ultravioleta (EUV). Uma região de absorção direta de energia solar está localizada em torno de 30-40 km, onde ozônio (O<sub>3</sub>) e vapor d'água (H<sub>2</sub>O) são os principais elementos absorventes. Quando subimos em uma 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<sub>3</sub> e H<sub>2</sub>O a 30-50 km de altura. Outra região de absorção direta da radiação solar ocorre na alta atmosfera. Sendo esta uma região de menor densidade, as colisões decrescem e a velocidade média das partículas aumenta, resultando em aumento da temperatura.
  
- (iii) **Radiação** – É importante nas camadas mais baixas da atmosfera, onde a densidade é mais elevada.

- (iv) **Condução** – Resulta das colisões diretas entre as moléculas. É um processo relativamente ineficiente nos gases.

A variação da temperatura, em função da altitude, é mostrada na **Figura 2**. A atmosfera é dividida em camadas, de acordo com a variação da temperatura. A **Troposfera** é a camada mais próxima da superfície; estende-se até a altitude de 15 km, onde a temperatura decresce com a altitude. A **Estratosfera** é a camada entre 15 e 50 km, onde a temperatura aumenta com a altitude, em decorrência do processo de absorção das moléculas da atmosfera, descrito acima. A **Mesosfera** é a camada que se estende entre 50 e 90 km, em que a temperatura volta a decrescer com a altitude. Finalmente, a **Termosfera**, representa a camada mais externa da atmosfera, onde a temperatura aumenta novamente até que se estabiliza a 1300-1500°C.

A **Tropopausa**, a **Estratopausa** e a **Mesopausa** estão situadas nas inflexões de temperatura, nos limites das camadas.

## IONOSFERA

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 comprimento de onda curto que penetra na atmosfera, não atinge a superfície da Terra.

As radiações  $\gamma$ , 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 chamada 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, processo este que forma novamente moléculas a partir dos íons.

A **Figura 2** mostra a variação da ionização com a altitude. A ionosfera é dividida em camadas de acordo com o grau de ionização: D, E, F<sub>1</sub> e F<sub>2</sub>. A ionização depende de dois fatores: (i) da intensidade da radiação solar e (ii) da densidade de moléculas da atmosfera. A atmosfera é menos densa em altas altitudes, de modo que, a radiação solar, apesar de

intensa, encontra poucos átomos para ionizar. A ionização começa a aumentar até um valor de pico para altitudes onde a concentração de moléculas e a radiação solar são altas. Mais próximo da superfície da Terra, a densidade da atmosfera é alta, mas não há quase radiação solar, a qual foi quase totalmente absorvida em altitudes maiores, e o processo de ionização diminui. A **Figura 2** mostra a variação de elétrons (provenientes da ionização) em decorrência dos processos descritos acima.

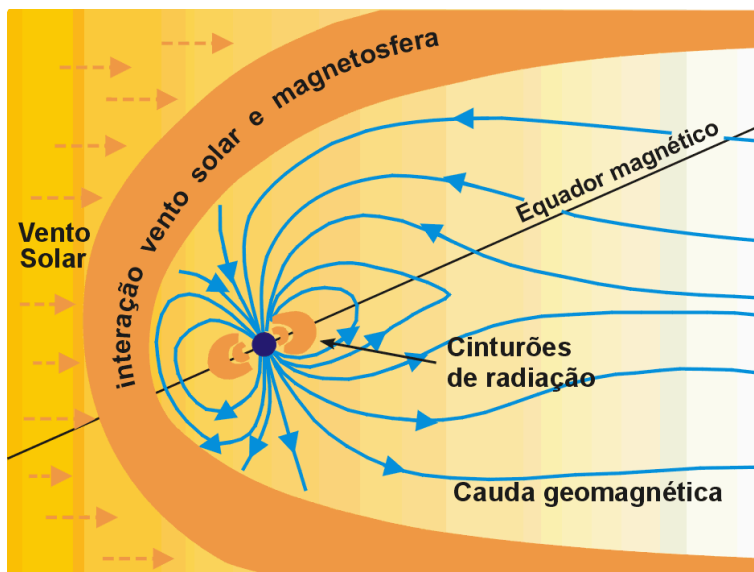
Como a Terra gira em torno do seu eixo de rotação, as espessuras (grau de ionização) das camadas ionizadas mudam durante a rotação; durante a noite, algumas camadas chegam a desaparecer, enquanto ficam mais espessas durante o dia. São nas camadas ionizadas onde ocorrem reflexões de ondas de rádio. Frequências mais altas penetram em camadas mais altas da ionosfera (**Figura 1**). Para uma frequência suficientemente alta, as ondas de rádio podem penetrar todas as camadas: o valor limite da frequência de onda de rádio, na qual as reflexões começam a desaparecer de uma determinada região é chamada de frequência de penetração crítica ( $f_o$ ) da região.

Verificou-se que a frequência refletida varia com a raiz quadrada da densidade de elétrons da camada. Portanto, determinando-se o tempo de percurso da onda de rádio de determinada frequência é possível determinar a densidade de elétrons: o instrumento sonda a ionosfera e, por este motivo, recebe o nome de iono-sonda. 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 da superfície e fica a uma altitude de 80-100 km. Ela foi descoberta em 1902, antes que a natureza da ionosfera fosse conhecida, por causa da sua habilidade de refletir ondas de rádio de longo comprimento de onda e é chamada de camada Kennelly-Heaviside em homenagem aos seus descobridores. A camada E é utilizada por entusiastas do rádio amador (comprimentos de ondas curtos).

## VENTO SOLAR E SUA INTERAÇÃO COM O 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 considerado um plasma, termo físico para designar um gás ionizado com baixa densidade de partículas. Na distância da Terra em relação ao Sol (1 AU – Unidade Astronômica) a densidade do vento solar é de  $7 \text{ íons/cm}^3$  e produz um campo de 6 nT. O vento solar interage com o campo magnético da Terra, formado por uma região chamada magnetosfera. Próximo da Terra, o vento solar exerce pressão sobre o campo geomagnético comprimindo-o (**Figura 3**). A distância superior a alguns raios terrestres, a interação altera fortemente a forma do campo de origem dipolar. A velocidade do vento solar é de 450 km/s quando atinge o campo geomagnético. A uma distância de cerca de 15 raios terrestres (~ 90.000-100.000 km), do lado dia, o vento solar supersônico colide com a atmosfera superior. Isto produz um efeito igual a de uma onda de choque quando um avião supersônico está voando acima da velocidade do som. A frente do choque é chamada de choque em arco (bow-shock); esta frente determina o limite da magnetosfera. Na região do choque em arco, o vento solar é freado e aquecido. Após passar através desta frente de choque o vento solar é desviado em torno da Terra.



**Figura 3.** Representação esquemática da magnetosfera e ação do vento solar sobre as linhas de força do campo geomagnético (Fonte: Decifrando a Terra).

As partículas carregadas do vento solar produzem correntes elétricas que, por outro lado, geram um campo magnético que reforça o campo geomagnético do lado dia da Terra e o enfraquece e o alonga no lado noite da Terra, formando uma cauda que se estende por grandes distâncias, além da órbita da Lua que é de 60 raios terrestres.

## **VARIAÇÕES DIURNAS DO CAMPO GEOMAGNÉTICO**

As moléculas ionizadas da atmosfera liberam feixes de elétrons que formam fortes correntes elétricas horizontais em forma de anel. Estas correntes agem como fontes de campos externos que são detectados na superfície da Terra. A ionização é mais forte no lado dia da Terra, onde camadas extras se desenvolvem. A intensidade deste efeito depende do grau de ionização da ionosfera, a qual é determinada pela atividade solar. De modo geral, o campo para os dias calmos da atividade solar, varia de forma lenta tanto em fase quanto em amplitude, esta podendo atingir um máximo de 30 nT ou pouco maiores (chamada de variação Sq; q de quiet). Entretanto, durante as tempestades solares (a qual varia periodicamente em um ciclo de 11 anos – manchas solares), a variação do campo pode atingir até 1.000 nT (**Figura 4**).

Como já dissemos, a ionização da atmosfera é afetada pela rotação da Terra em torno de seu eixo de rotação. A ionização também é afetada pela posição da Terra em relação ao Sol, durante o ano, produzindo uma variação sazonal.

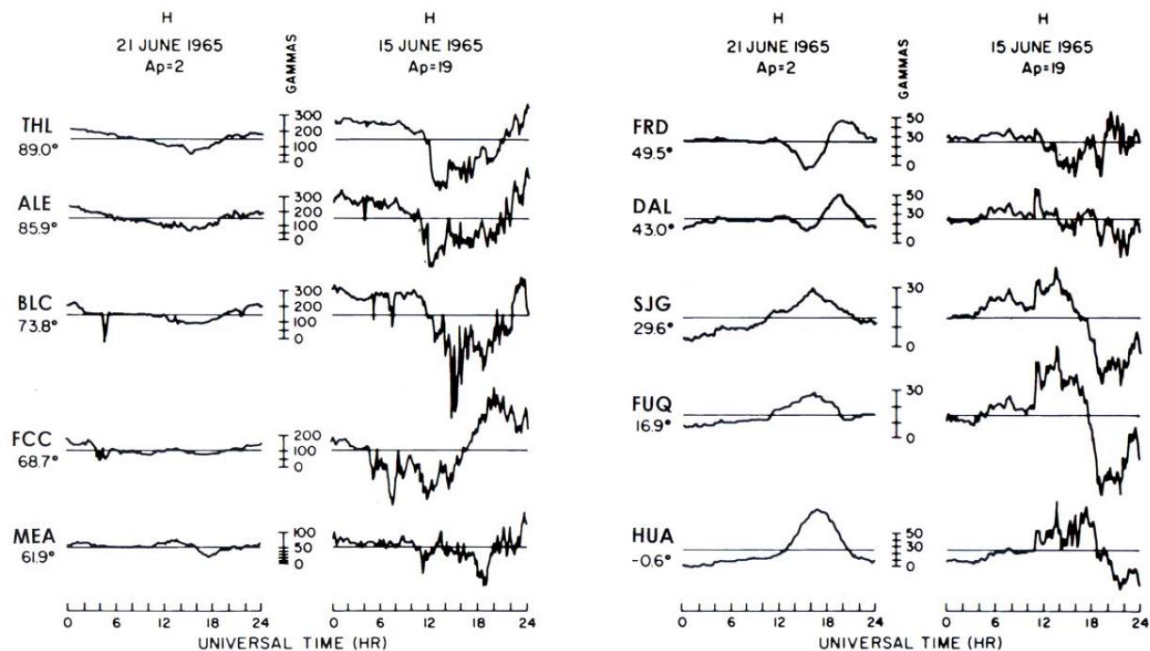
## **MOVIMENTOS ATMOSFÉRICOS**

Os movimentos das marés-térmicas, as quais são responsáveis pelas principais correntes dos dias calmos, dependem da expansão diária da atmosfera aquecida da Terra.

São as diferenças de temperatura que fazem com que ocorram ventos e movimentos de marés-térmicas diárias que movimentam correntes na ionosfera, as quais produzem as variações diárias do campo geomagnético, evidenciadas por:



- 1- Registros diários dos observatórios, os quais mostram que as variações do campo que exibem um comportamento coerente com a variação do azimute do Sol.
- 2- Modelos que indicam as mudanças na variação do campo ao longo do ano, coerentes com as variações na ionização, em decorrência das variações na incidência de radiação solar (Variações sazonais).
- 3- A presença de correntes na ionosfera é detectada por sensores de campo magnético que são enviados para a ionosfera, a bordo dos satélites espaciais.
- 4- Um aumento do campo na camada E do lado dia demonstra a presença de uma forte corrente neste local, a qual está associada à origem do campo Sq.



**Figura 4.** Comparação de magnetogramas para um dia calmo (21/06/1965) e um dia ativo (15/06/1965) da componente H do campo externo registrada em dez observatórios localizados em várias latitudes (indicada abaixo do código de cada laboratório). Note a variação maior da componente H para os laboratórios localizados mais próximos ao equador (relacionada ao eletrojoato equatorial) (Fonte: Campbell).

A densidade de corrente ionosférica com a altitude observada por um satélite espacial próximo ao equinócio e ao equador mostra que a corrente máxima está à aproximadamente 106 km de altitude, associada à camada E.

A **Figura 4** mostra também que a variação diária da componente horizontal (H) do campo em diferentes latitudes indica um significativo aumento do campo no equador magnético, o qual deve corresponder também a um considerável aumento na corrente ionosférica. Medidas na superfície da Terra mostram que este efeito se estende por 450 a 550 km de largura (cerca de 4 a 5° em latitude) e é denominado de eletrojato equatorial.

## OS CINTURÕES DE RADIAÇÃO VAN ALLEN

Partículas carregadas que penetram na magnetosfera são aprisionadas pelas linhas de campo geomagnético e formam os chamados cinturões de radiação Van Allen. Estes cinturões formam duas regiões anelares coaxiais com o eixo geomagnético. O cinturão interno contém principalmente prótons e o externo, elétrons energéticos.

Dentro de cada cinturão, as partículas carregadas se movem de maneira helicoidal em torno das linhas de campo geomagnético, em decorrência de forças de Lorentz. A velocidade da partícula torna-se menor quando ela se aproxima da Terra, onde a intensidade do campo aumenta. Eventualmente, a velocidade da partícula chega a zero e reverte de sentido. Isto faz com que as partículas caminhem de uma região polar a outra rapidamente ao longo das linhas de campo.

O cinturão de Van Allen interno começa na altitude de cerca de 1.000 km e se estende até uma altura de 3.000 km (**Figura 5**). O cinturão externo é formado à distâncias de 3 a 4 raios terrestres (20.000 a 30.000 km), em relação ao centro da Terra.

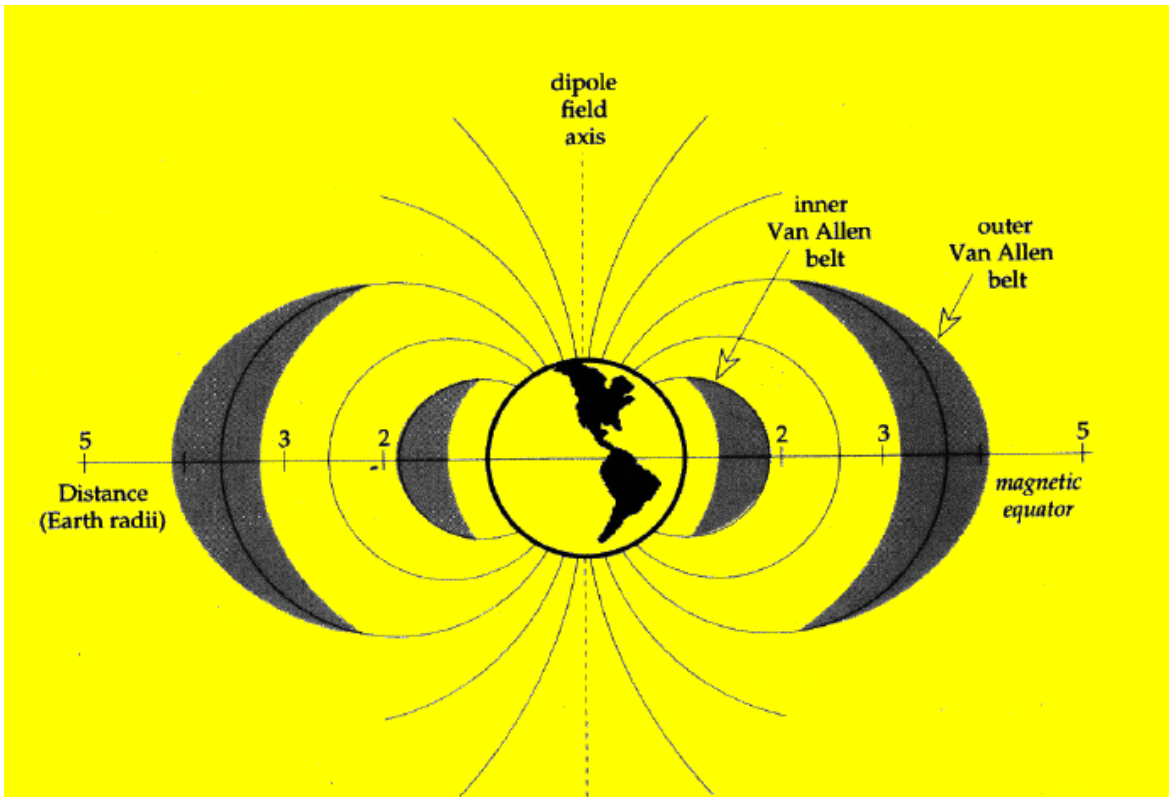


Figura 5. Representação esquemática dos cinturões de Van Allen constituídos por partículas carregadas aprisionadas pelo campo magnético da Terra. O cinturão interno (1.000 a 3.000 km) contém principalmente prótons e o cinturão externo (20.000 a 30.000 km) contém elétrons energéticos (Fonte: Lowrie)

## AURORAS

Uma tempestade magnética pode ser acompanhada pelo aparecimento de um dos fenômenos mais intensos e fascinantes que é observado no céu, denominado de aurora (**Figura 5**). Este fenômeno da natureza aparece em altas latitudes, em ambos os hemisférios e formam 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.

Quando os elétrons atingem a alta atmosfera, no seu movimento espiral em torno das linhas de campo geomagnético, dois processos ocorrem:

- 1- Partículas de alta energia, em colisão com as moléculas, vão retirar um elétron e ionizar as moléculas; com isto, dobra a quantidade de elétrons e aumenta a condutividade do meio.
- 2- Para partículas de baixa energia, mas acima de certo valor limite, as moléculas da atmosfera recebem energia, tornam-se excitadas, dissipam energia através de emissão de luz – chamados fótons.



Fotografia de uma aurora boreal.

**Figura 5.** Fotografia de uma aurora boreal (Fonte: Decifrando a Terra).

Sabemos que para átomos e moléculas, a excitação e emissão só podem ocorrer em determinados níveis de energia (níveis quantizados) e somente determinados comprimentos de onda de luz podem ser emitidos depois de um certo tempo após a sua excitação. As auroras ocorrem de forma similar às lâmpadas de néon; um tubo contendo gás é

bombardeado por uma corrente elétrica. Assim, as partículas (elétrons) liberam a energia correta para que o gás brilhe com uma cor característica.

As altitudes em que se formam as auroras são determinadas por:

- 1- a energia das partículas que chegam na atmosfera;
- 2- a composição e densidade da atmosfera;
- 3- os níveis de emissão permitidos das partículas da atmosfera;
- 4- a meia vida do estado de excitação para a emissão característica

Entre 60 e 100 km de altitude predominam moléculas de nitrogênio e oxigênio. Já entre 100 e 200 km, encontramos principalmente átomos de oxigênio e moléculas de nitrogênio. Acima de 200 km dominam os átomos de oxigênio.

Acima de 150 km, a densidade atmosférica é muito baixa de modo que teremos poucas colisões para excitar átomos e moléculas. Na atmosfera onde predominam hidrogênio e hélio, as colisões produzem somente níveis de pouca visão.

Embora, as emissões de moléculas de nitrogênio (cor rosa) sejam quase tão intensas quanto às de oxigênio (cor verde), para altitudes menores que 200 km, nossos olhos favorecem a visão da emissão do oxigênio (cor verde). Isto decorre do fato que a meia vida do oxigênio é de  $\frac{3}{4}$  de segundos, enquanto a meia vida do nitrogênio é quase instantânea.

## **BIBLIOGRAFIA:**

Teixeira, W., Toledo, M.C.M., Fairchild, T.R., Taioli, F., Decifrando a Terra”, 2000

Lowrie, W., Fundamentals of Geophysics”, 1997, Cambridge University Press.

Kirchhoff, V.W.J.H, Introdução à Geofísica Espacial”, 1991, Edusp

Campbell, W. H., Introduction to Geomagnetic Fields, Second edition, 2003, Cambridge University Press.