

MICROFÍSICA DA PRECIPITAÇÃO

Capítulo 8 – Microfísica da carga e da eletricidade atmosférica

Prof. OSWALDO MASSAMBANI, Ph.D.
Professor Titular

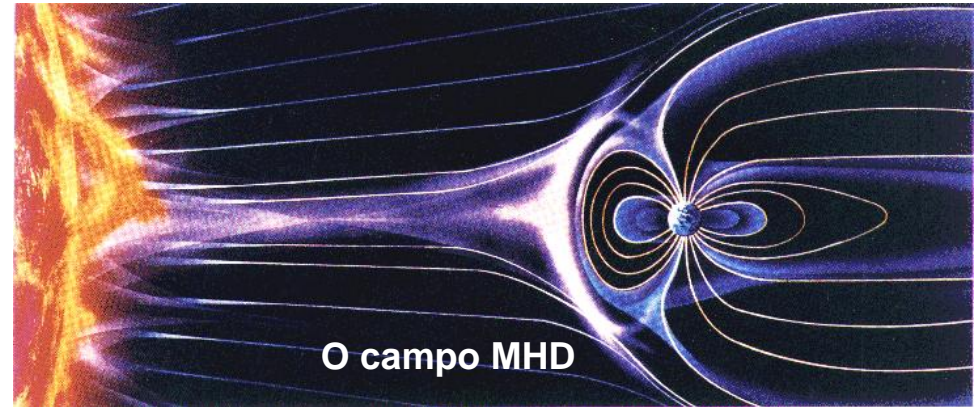
Departamento de Ciências Atmosféricas IAG-USP
massambani@usp.br
Maio - Junho de 2006

Conteúdo

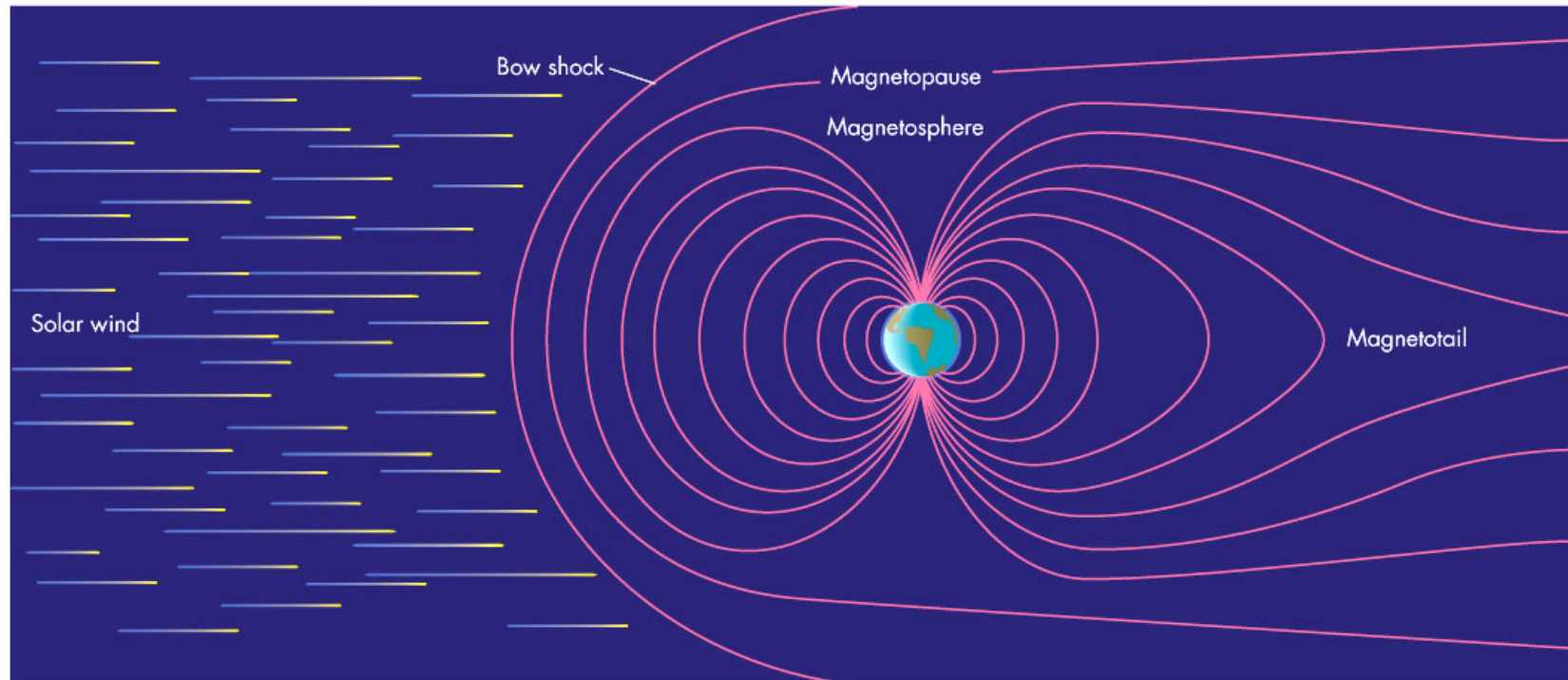
- ❑ Objetivos
- ❑ Introdução à microestrutura de nuvens e da precipitação
- ❑ Equilíbrio de fases
 - Potencial químico do vapor de água no ar úmido
 - Calor latente da mudança de fase
 - A equação de Clausius-Clapeyron
 - A variação da energia livre de Gibbs no processo de nucleação homogênea
- ❑ Aerossol atmosférico
 - A variação da energia livre de Helmholtz no processo de nucleação heterogênea
 - O equilíbrio entre gotas de solução aquosa e o ar úmido
 - A nucleação por íons
- ❑ O processo de difusão de vapor no crescimento e na evaporação de gotículas
 - O crescimento de uma população de gotículas em nuvens quentes
- ❑ A interação dinâmica entre as gotículas – O processo de colisão e coalescência
 - O crescimento de gotas na corrente ascendente
- ❑ A formação de gelo na atmosfera
 - O crescimento de cristais de gelo por difusão de vapor
 - O desenvolvimento da precipitação na fase gelo
- ❑ Composição química de hidrometeoros
- ❑ **Microfísica da carga e da eletricidade atmosférica**
- ❑ O sensoriamento remoto da precipitação
 - O espectro de tamanho de gotas
 - A taxa de precipitação e os parâmetros integrais e suas variabilidades

Capítulo 8 – Microfísica da carga e da eletricidade atmosférica

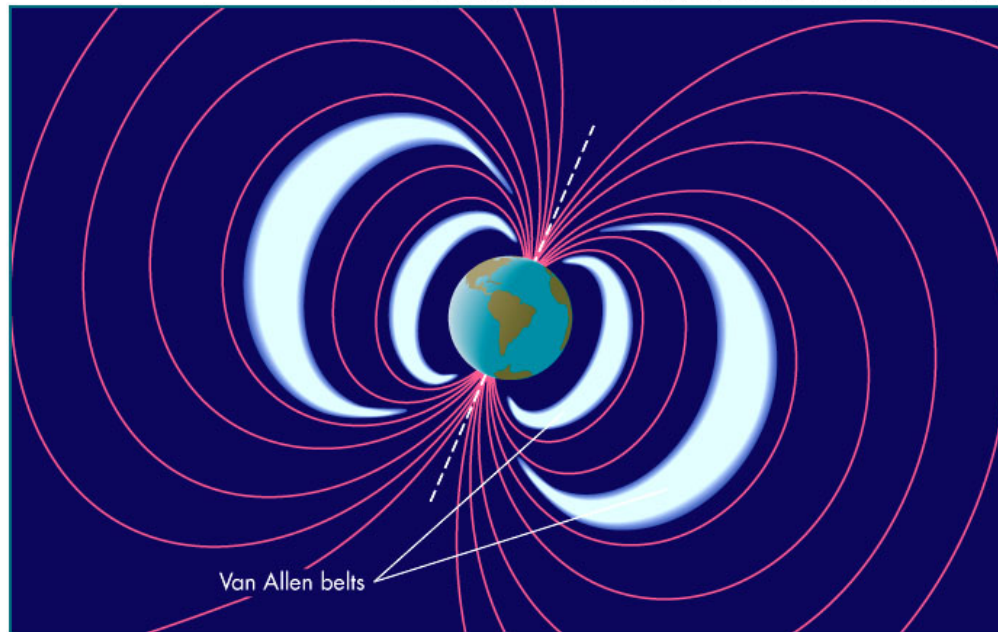
A Magnetosfera Terrestre



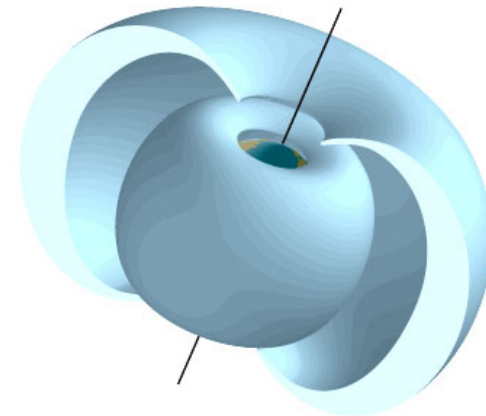
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

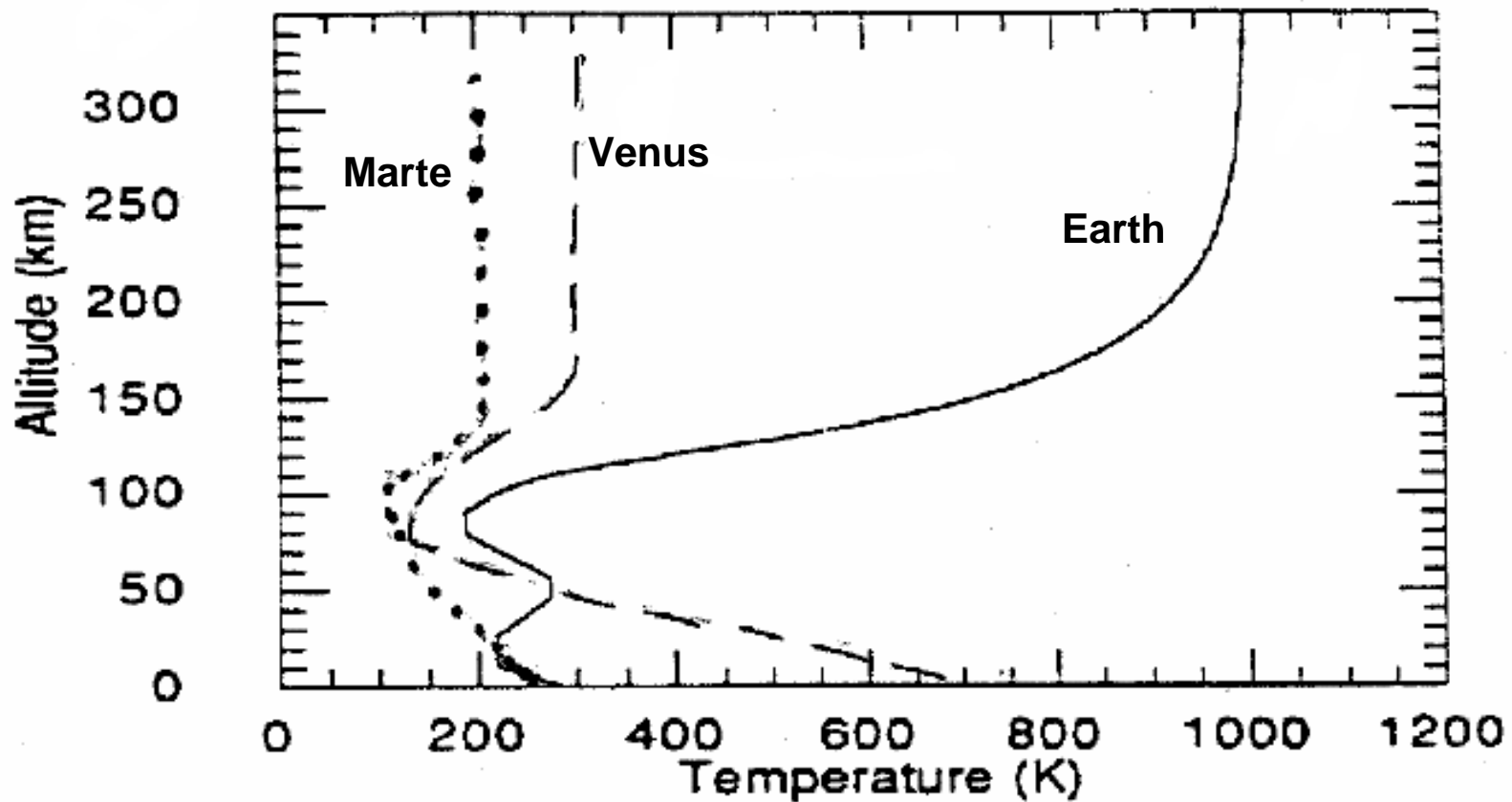


A Cross-sectional view of the Van Allen belts

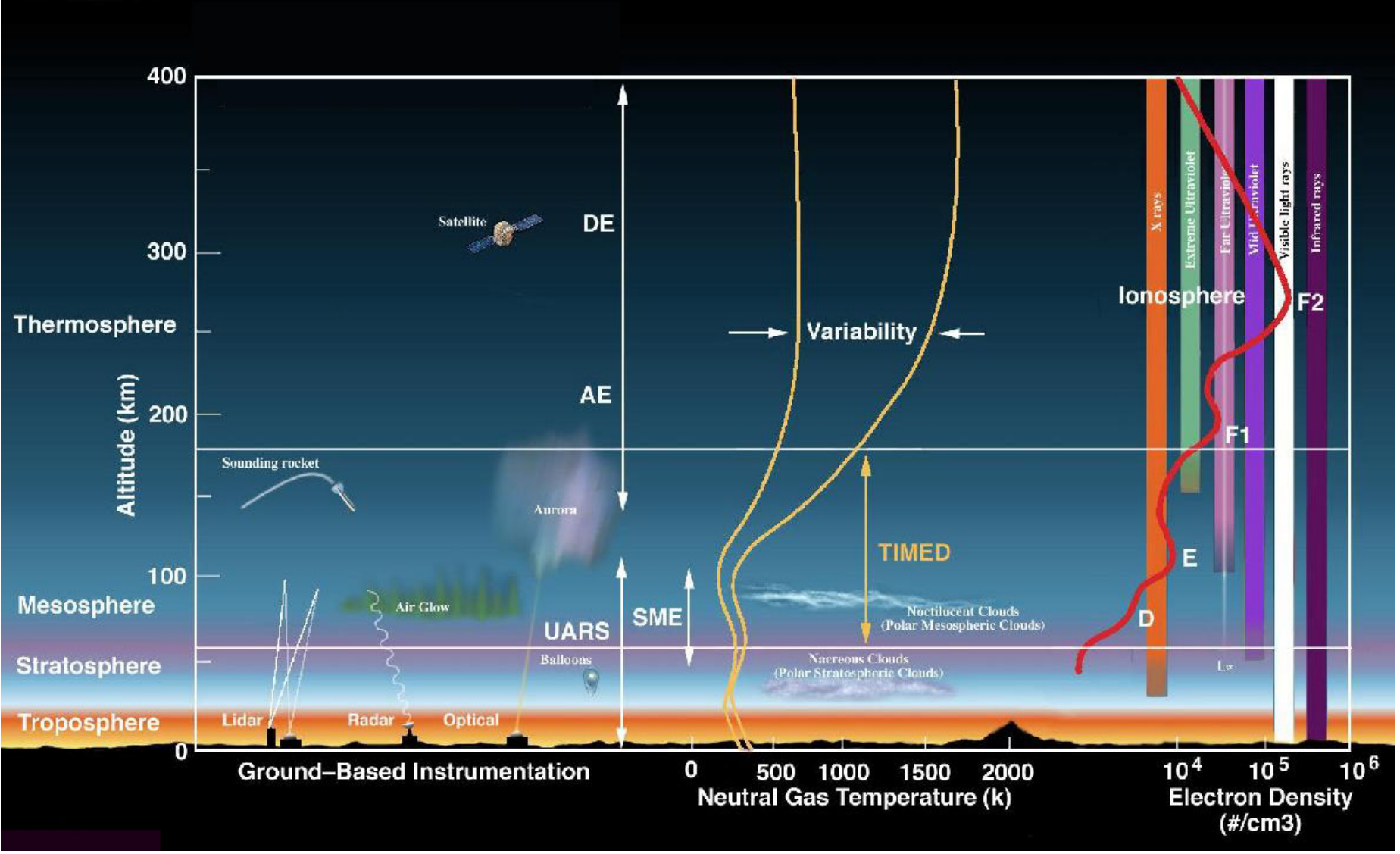


B Cut-away view showing that the belts are actually shells

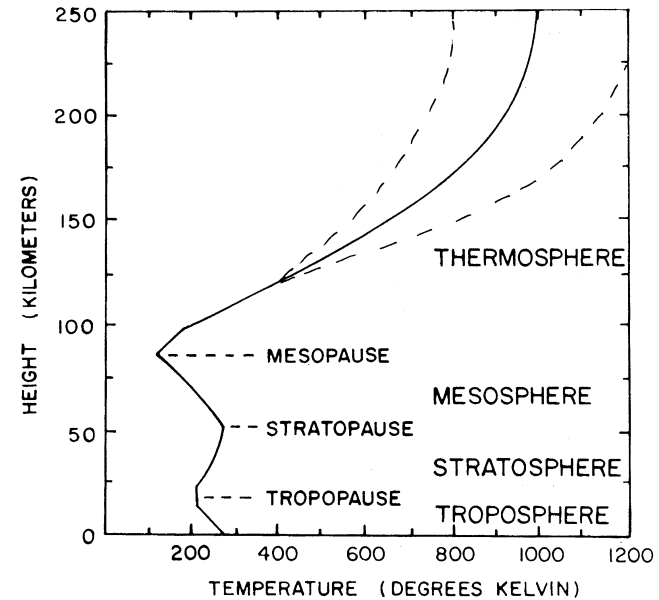
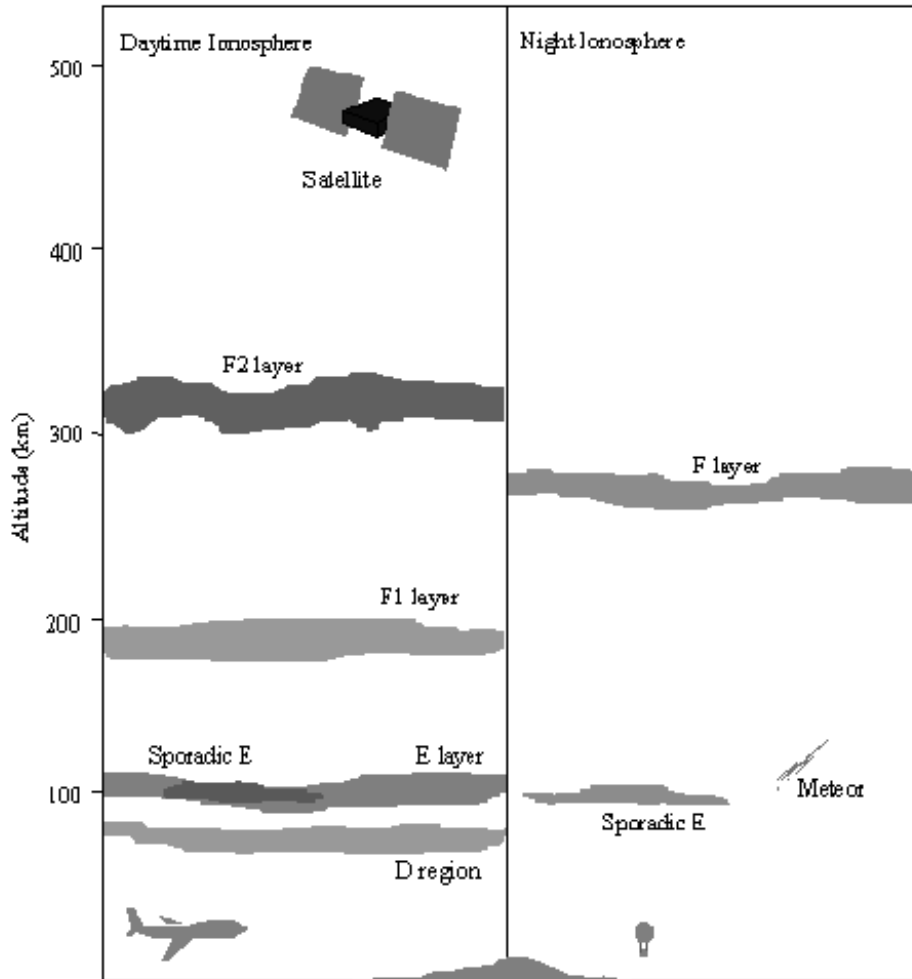
Perfil vertical típico da temperatura da Terra – Marte e Venus



A Ionosfera Terrestre



As camadas da Ionosfera Terrestre

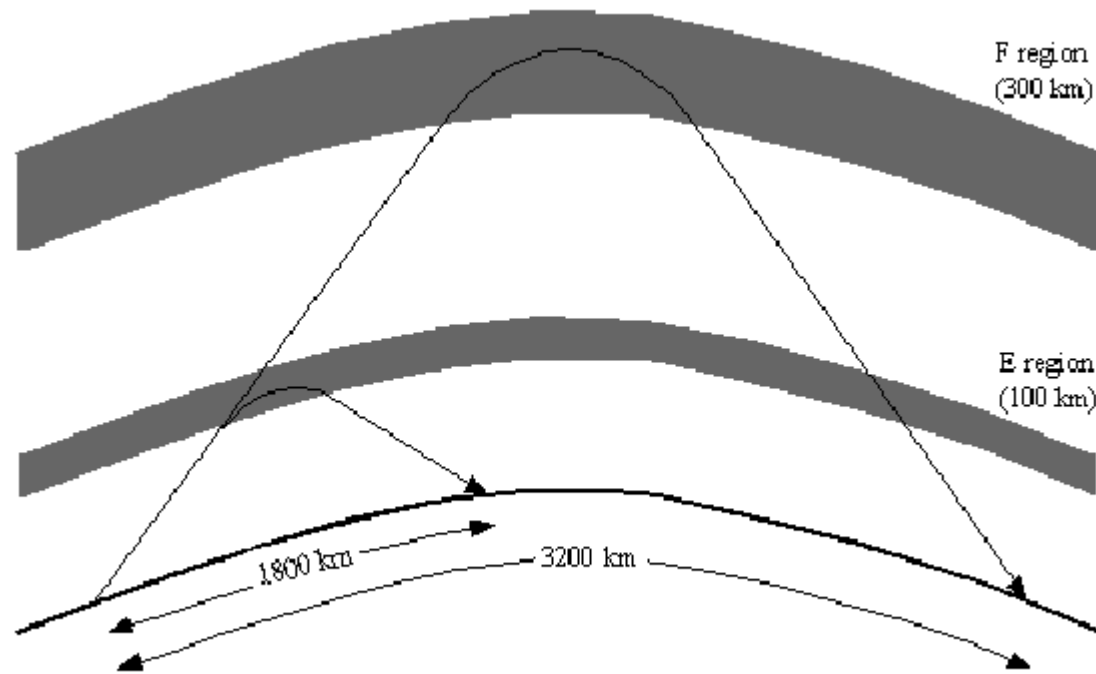


Reflexão de ondas de radio pela Ionosfera

Reflexão inicia a “Frequência Crítica”, que corresponde à frequência de plasma

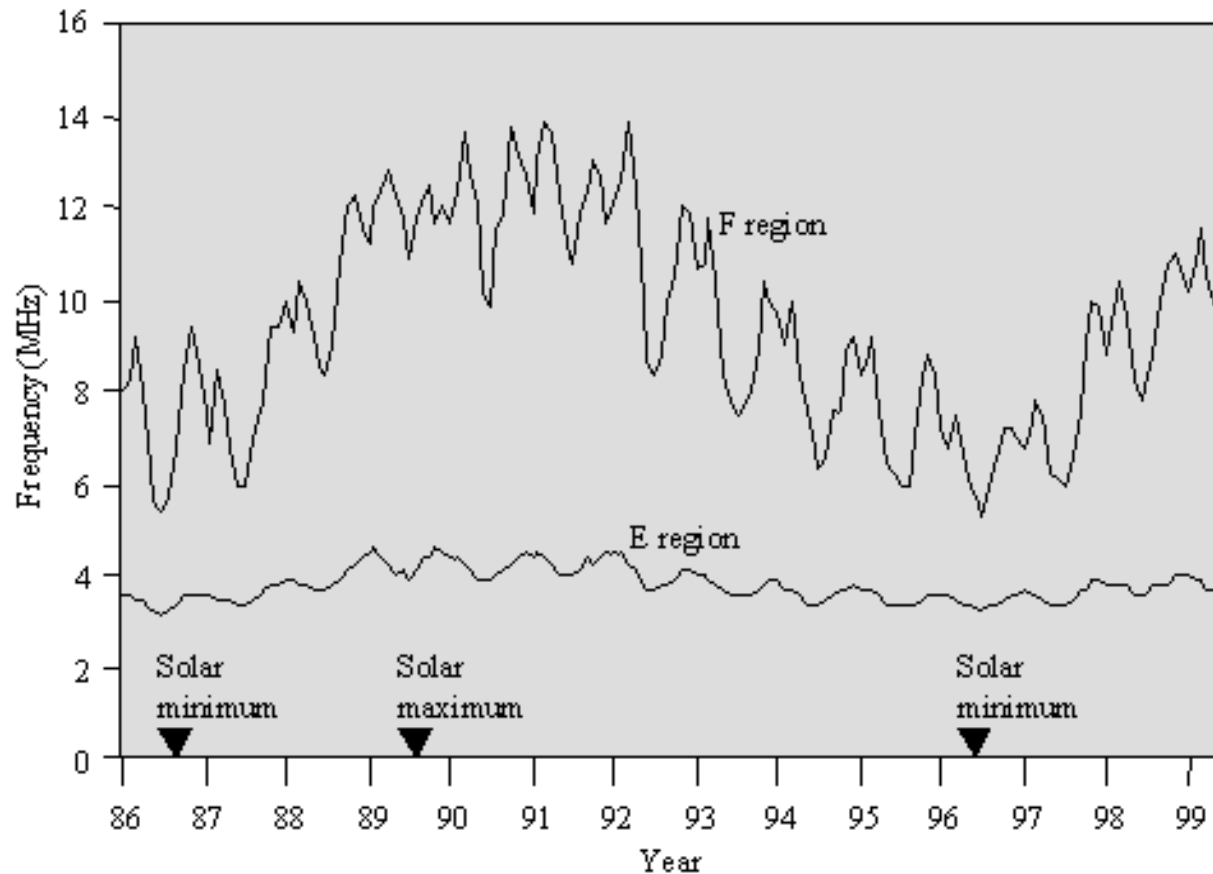
$$f_0 = 9\sqrt{10^{-6} n_e}$$

(f_0 em MHz, n_e in cm^{-3})

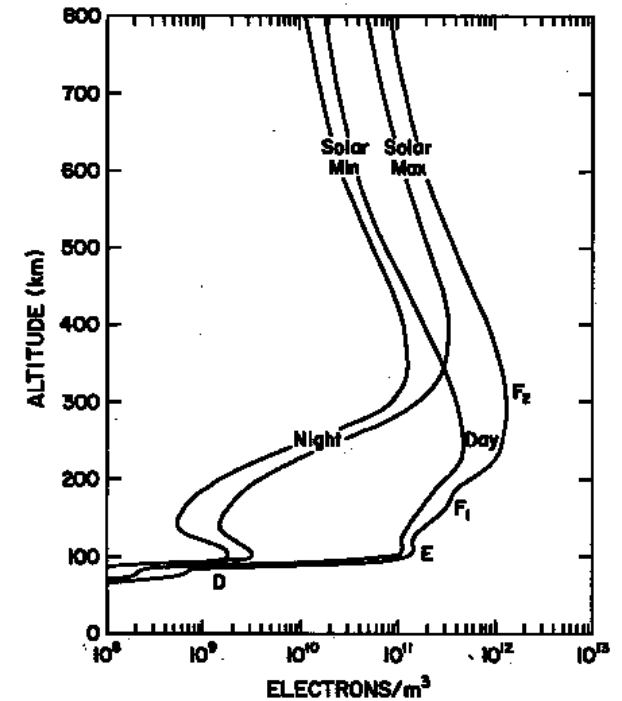
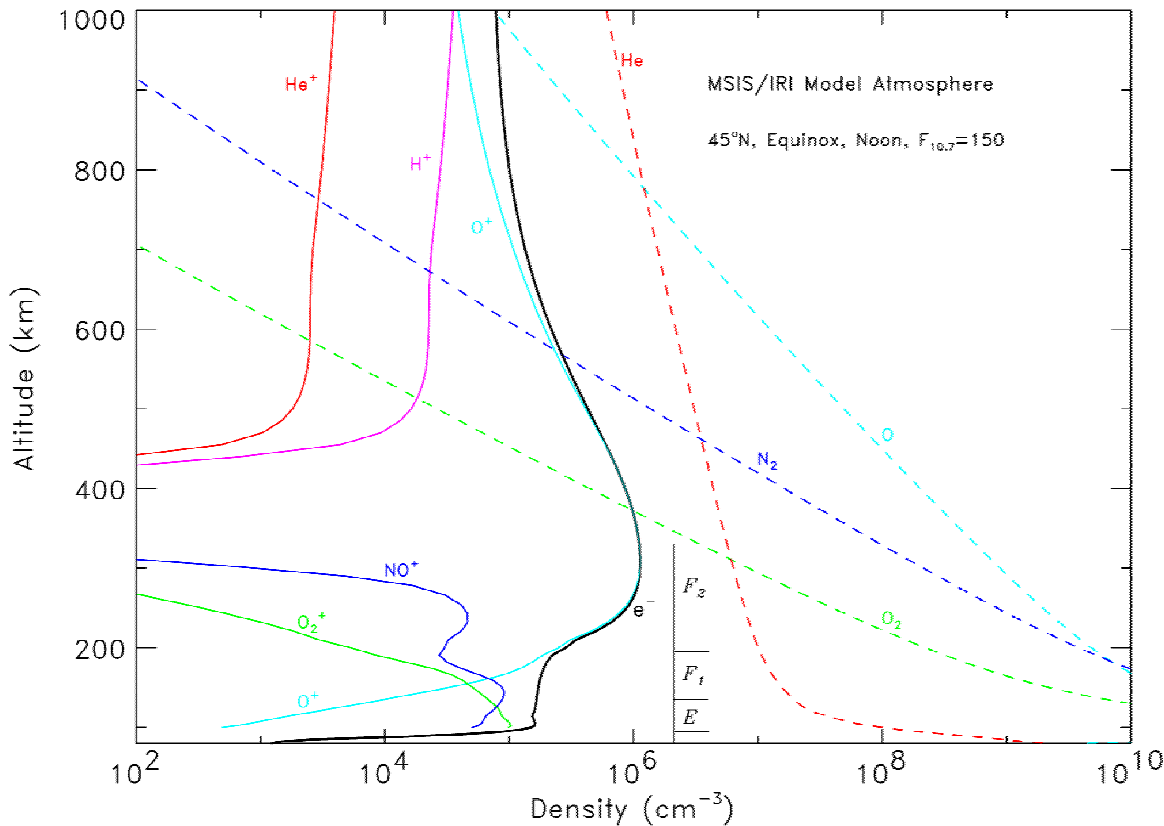


As técnicas VLF para monitorar descargas elétricas em grande escala utilizam-se da física dessa camada ionosférica

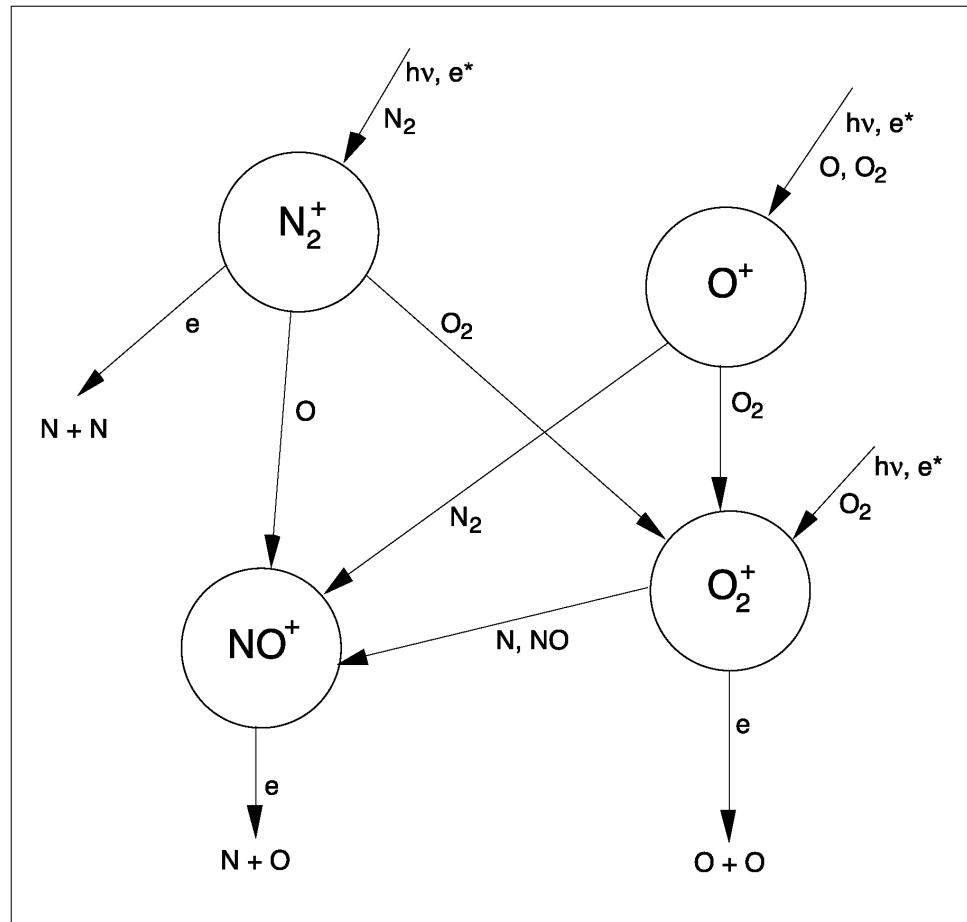
A frequência crítica varia com a estação do ano e o ciclo solar



A Ionosfera – Composição e Variabilidade



Principais processos de ionização na Terra



Eletricidade básica

Benjamin Franklin: eletricidade estática, conservação da carga

Carga quantizada: $e = 1.6 \times 10^{-19}$ Coulombs (C)

Lei de Coulomb:
$$F = \frac{kq q'}{r^2}$$

Campo elétrico: $E = F / q$ E em N/C ou V/m

Trabalho = $F d$ = mudança na energia potencial

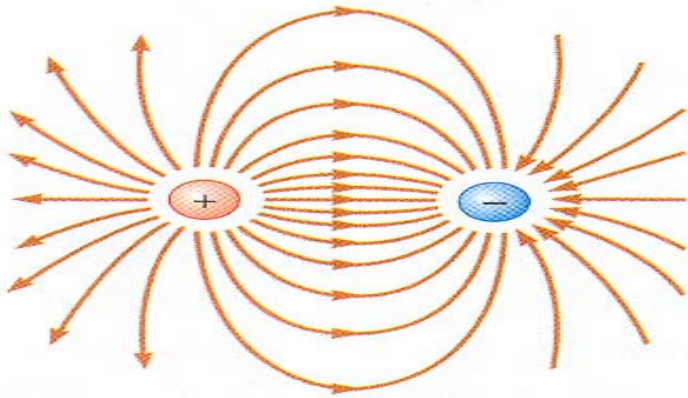
Diferença de potencial = é o trabalho para mover uma carga

1 Volt (V) = 1 J/C

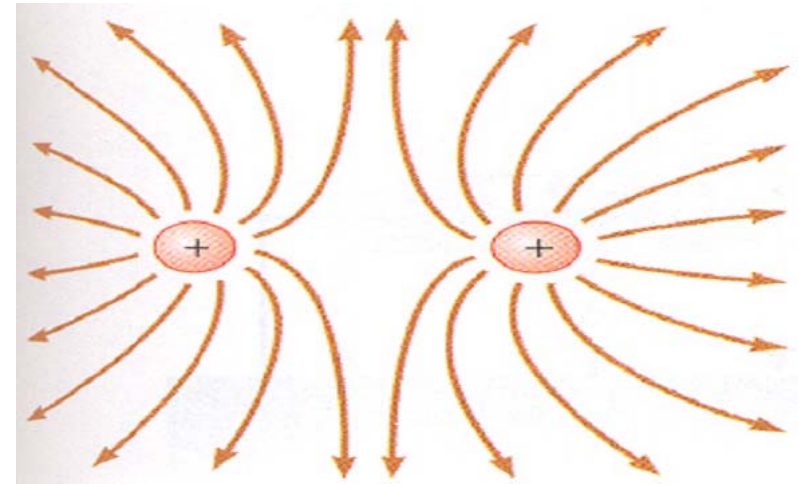
Eletrón volt = 1.6×10^{-19} J

Corrente (I) em Amperes (A) 1 A = 1 C/s

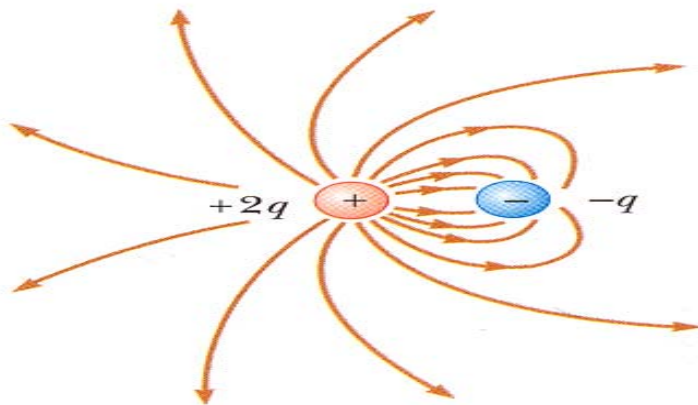
Potencia = $I V$ em watts (W)



Linhas de campo entre uma carga positiva e uma negativa de igual magnitude.



Linhas de campo entre duas cargas positivas



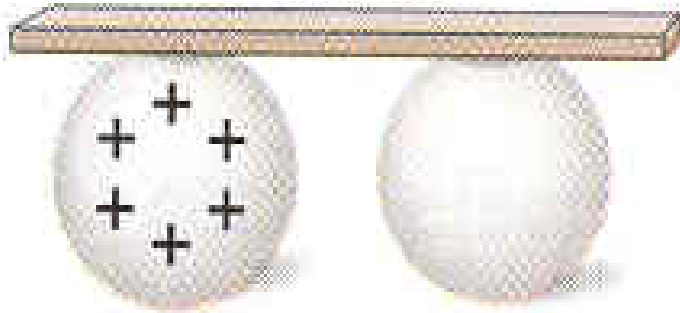
Linhas de campo entre cargas de diferentes magnitudes

A magnitude da força depende da distância e da natureza do material entre as cargas e da magnitude delas.

$$F = kQ_1Q_2/r^2$$

Princípios elementares

MADEIRA



Corrente não flui através de um isolante

METAL



Corrente flui através de um condutor

A CORRENTE – fluxo de carga a partir do polo positivo ao negativo ao longo ou através de um condutor

Mobilidade Elétrica

Pontos básicos:

- Existe um campo elétrico no espaço ao redor de objetos carregados
- Uma partícula carregada em um campo elétrico sofre a influência da força:

$$F_E = Eq = E(ne)$$

Intensidades de campo elétrico para geometrias simples:

1) Placas paralelas $E = \Delta V / \Delta x$

2) Tubos concêntricos $E = \frac{\Delta V}{r \ln(R_2 / R_1)}$

3) Carga pontual $E = K_E q / r^2$

A força do campo resulta na velocidade de migração de cargas.

$$F_E = F_D$$

para a velocidade terminal

$$(ne)E = \frac{3\pi\eta V_{TE} D_p}{C_c}$$

A partir da lei de Stokes

$$V_{TE} = neE \left[\frac{C_c}{3\pi\eta D_p} \right]$$

(hipótese $Re > 1$)

Mobilidade elétricas = Z = velocidade da partícula por intensidade unitária de campo elétrico

$$Z = \frac{V_{TE}}{E} = (ne)B \Rightarrow m^2 / V \text{ sec}$$

Armazenamento de Energia Elétrica

Energia elétrica pode ser armazenada em capacitores:

- A quantidade armazenada depende da:
 - Distância entre as “placas”
 - Propriedades do material entre as placas
 - Potencial (voltagem) aplicada entre as placas

- A superfície da Terra e a Atmosfera formam um capacitor:
 - A Ionosfera é a placa superior (+).
 - A superfície é a placa inferior (-).
 - Há ar úmido entre as placas.

- A tempestade forma um capacitor:
 - Topo da nuvem é a placa superior (+).
 - A base da nuvem é a placa inferior (-).
 - Há ar úmido e hidrometeoros entre as placas.

Eletricidade atmosférica

1. Campo elétrico de tempo bom e distribuição de cargas

- a. Densidade de carga positiva maior próximo ao chão
- b. Direção do campo elétrico para baixo e mais intenso junto ao solo.
- c. Potencial aumenta para cima com lenta taxa.

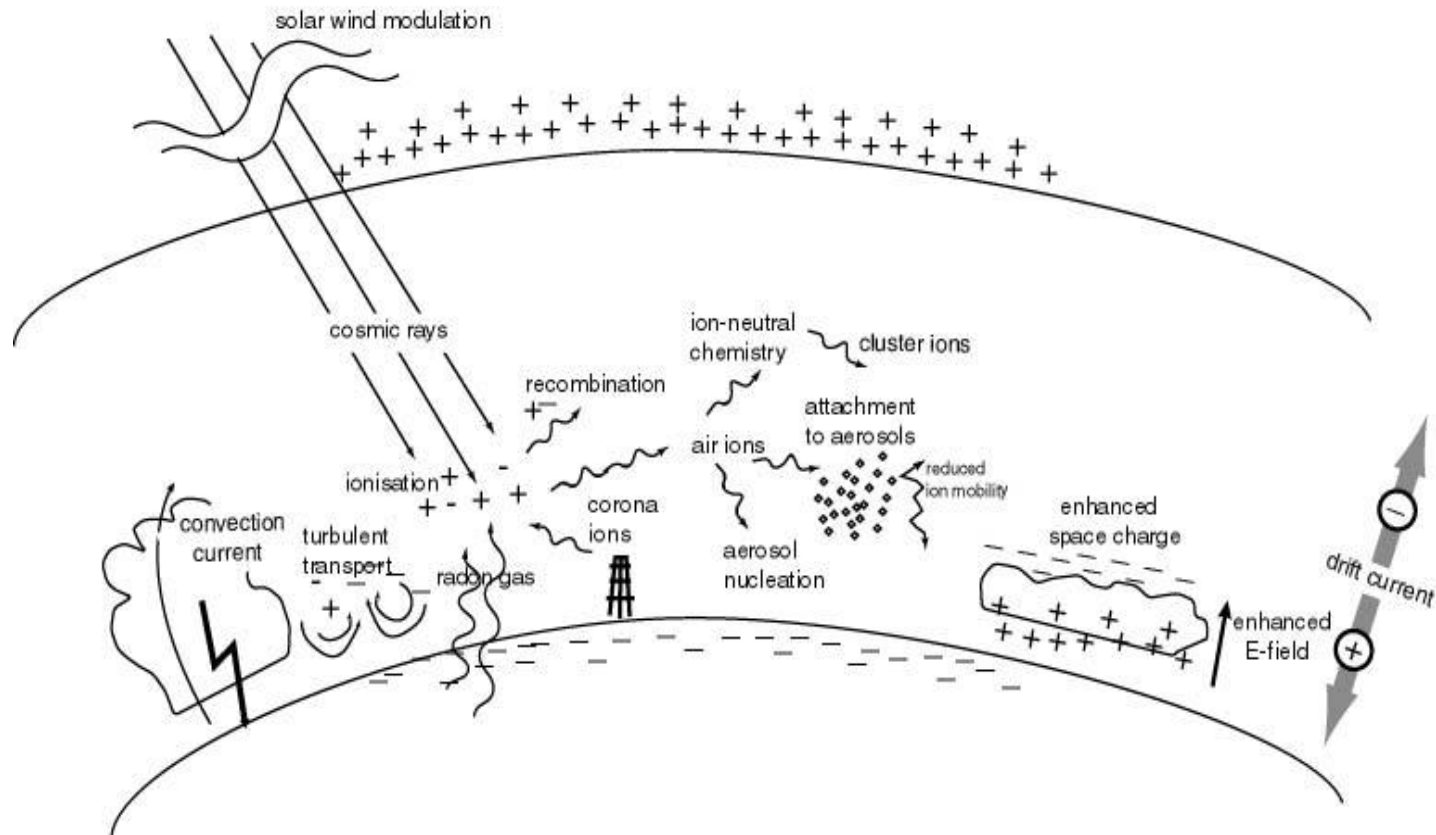
2. Fonte de íons atmosféricos

Gases radiativos (Radônio)
Substâncias radioativas no solo
Raios Cósmicos

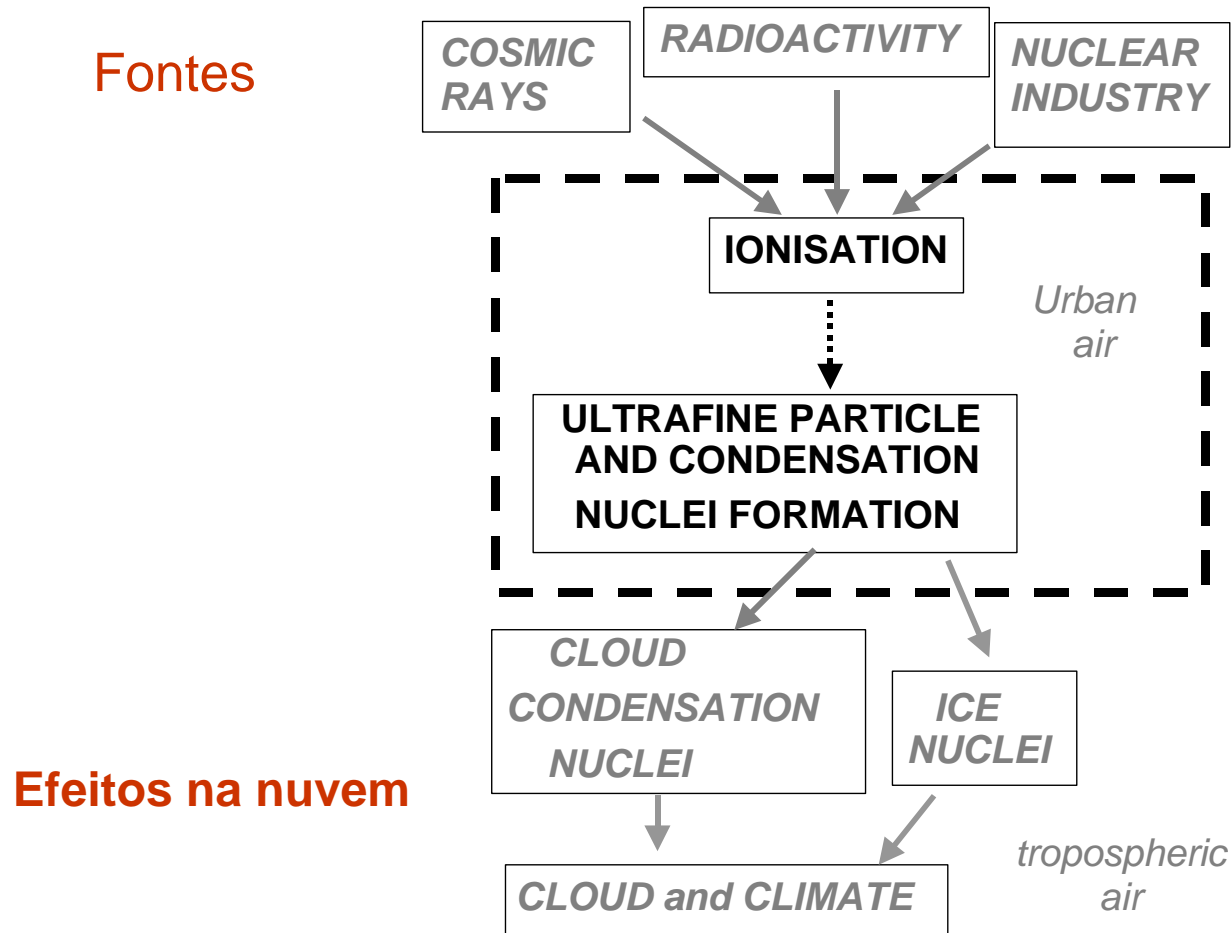
3. Campo elétrico global

Tempo bom – corrente segue para baixo
Tempestades – correntes segue para cima - mantendo a atmosfera carregada através do transporte de cargas positivas para cima.

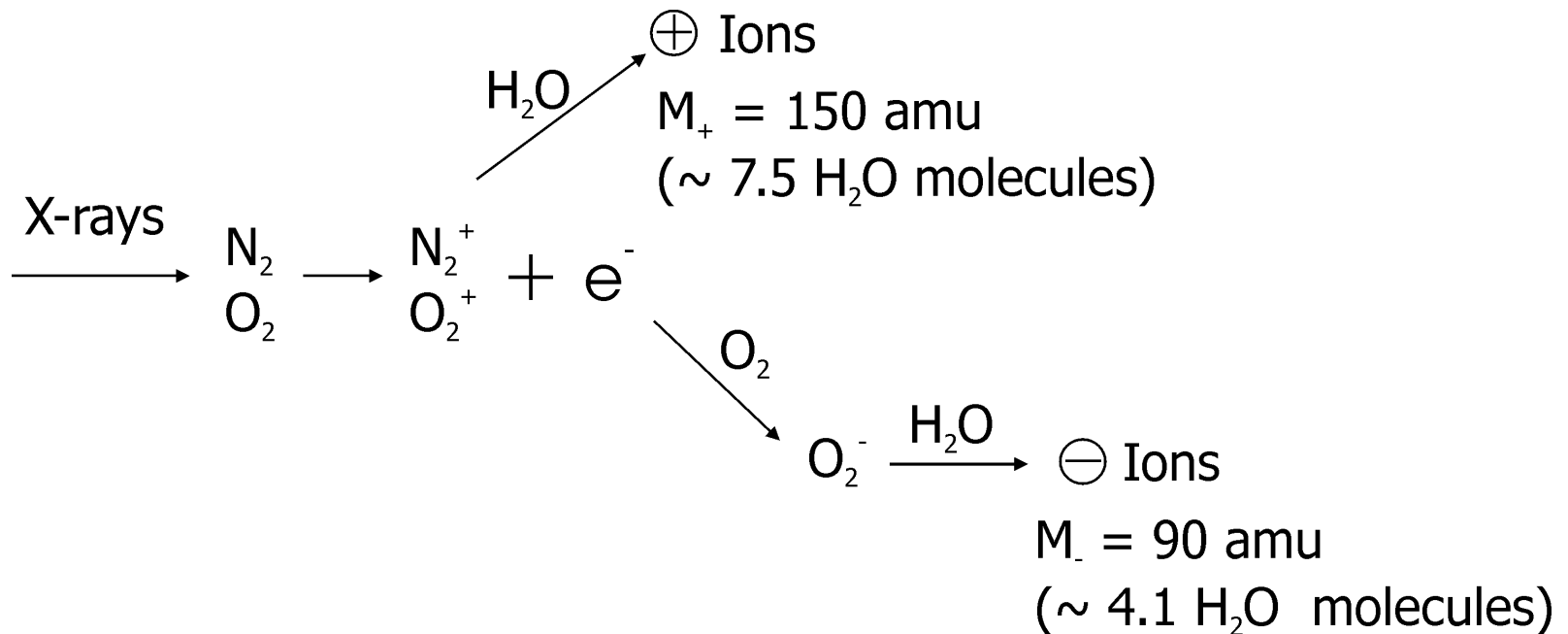
Processos atmosféricos relevantes ao problema íon-aerosol-nuvem



Produção do aerossol a partir da ionização

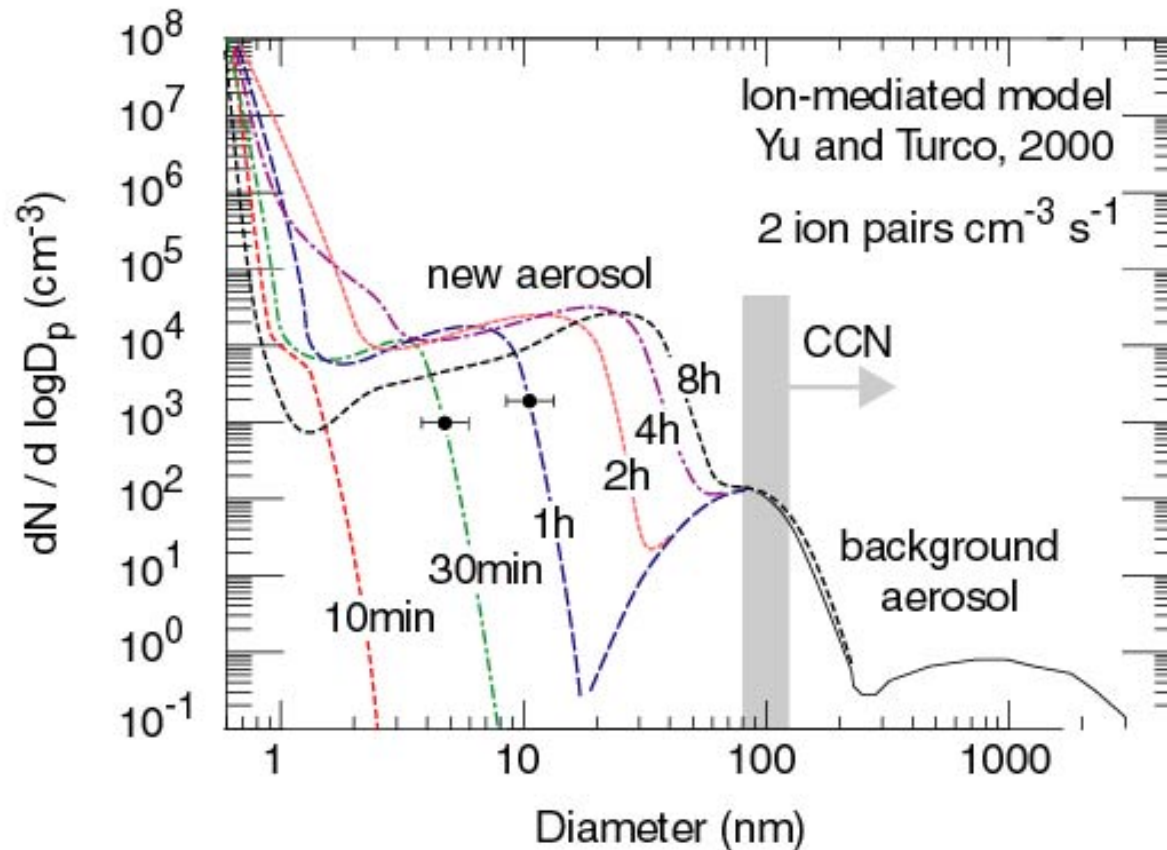


Descrição sucinta da formação de ions



- Ions são criados em pares
- Na média ions + são mais pesados que os ions -

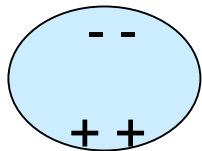
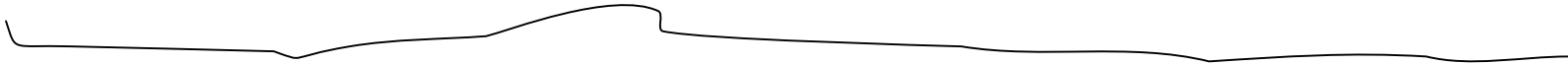
Crescimento de ion-induced CN



Campo Elétrico na Atmosfera

+++++ + + + + ++ + + + ++ ++ ++ + + + + +

IONOSFERA



Indução de cargas em gotículas



$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0$$

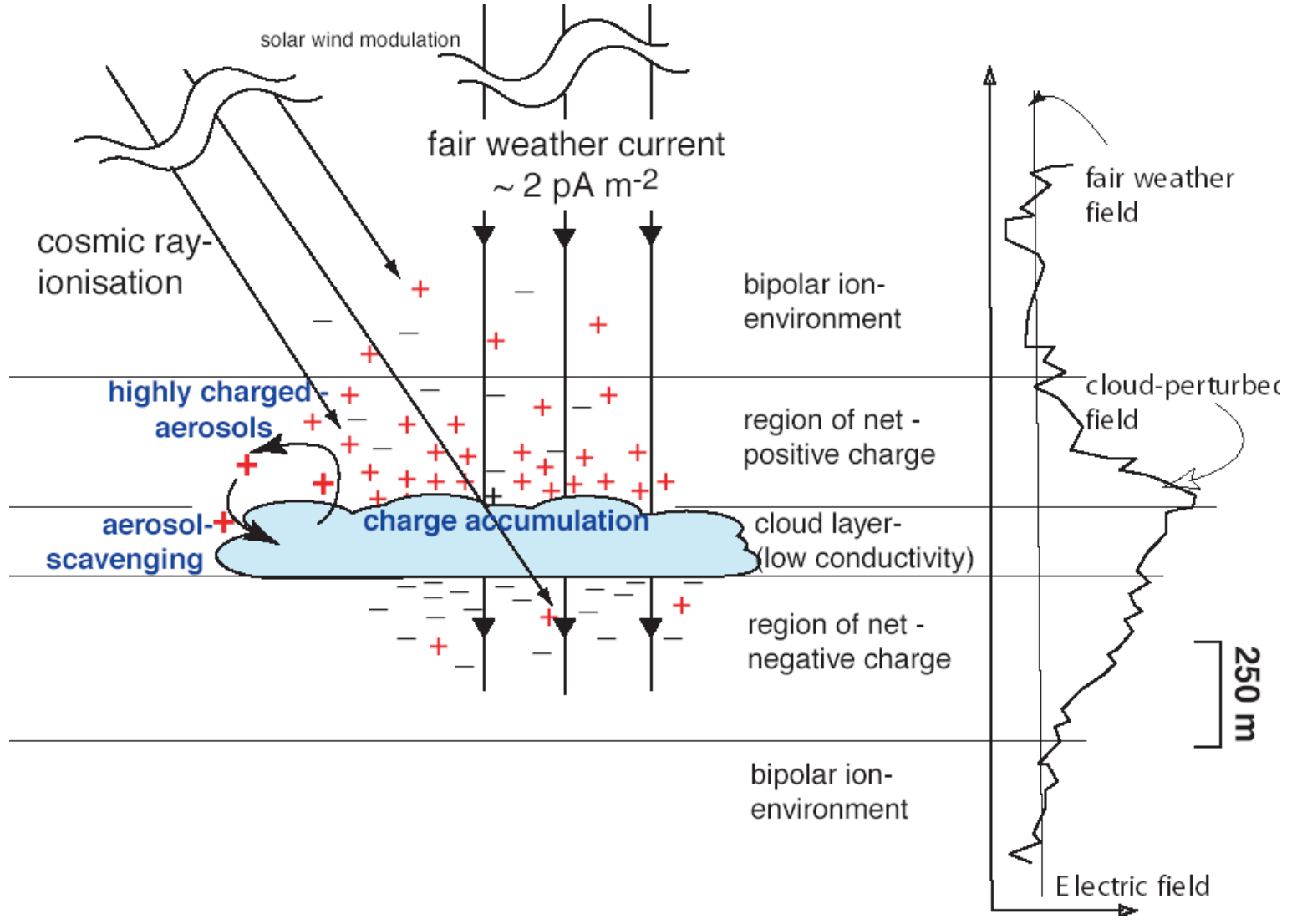
ρ é função da altura



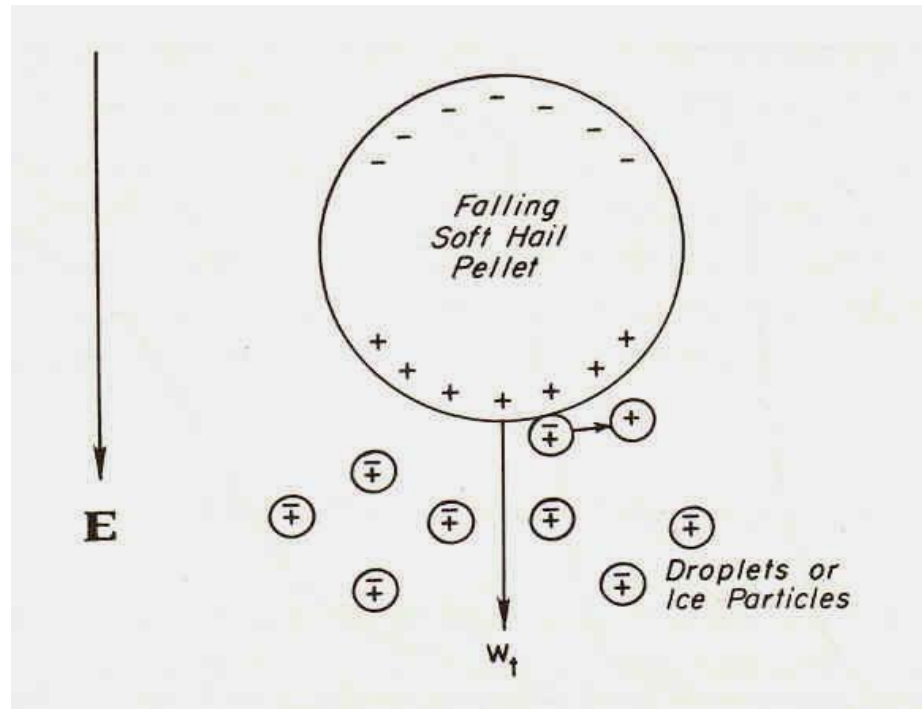
Superfície da Terra

Em condição de céu limpo, uma superfície plana da Terra possui uma densidade superficial negativa da ordem de $\sigma = -1 \times 10^{-9} \text{ C m}^{-2}$ tal que $E = 4 \pi \sigma$, assumindo uma área de $5 \times 10^{14} \text{ m}^2$ resulta da ordem de 130 V / m

Ion-aerosol-nuvem



Colisão entre gotas e gotículas e trocas de cargas elétricas



Processo de indução de polarização – Estudar as figuras 18.4 de a até n Pruppacher & Klett pags. 813-814

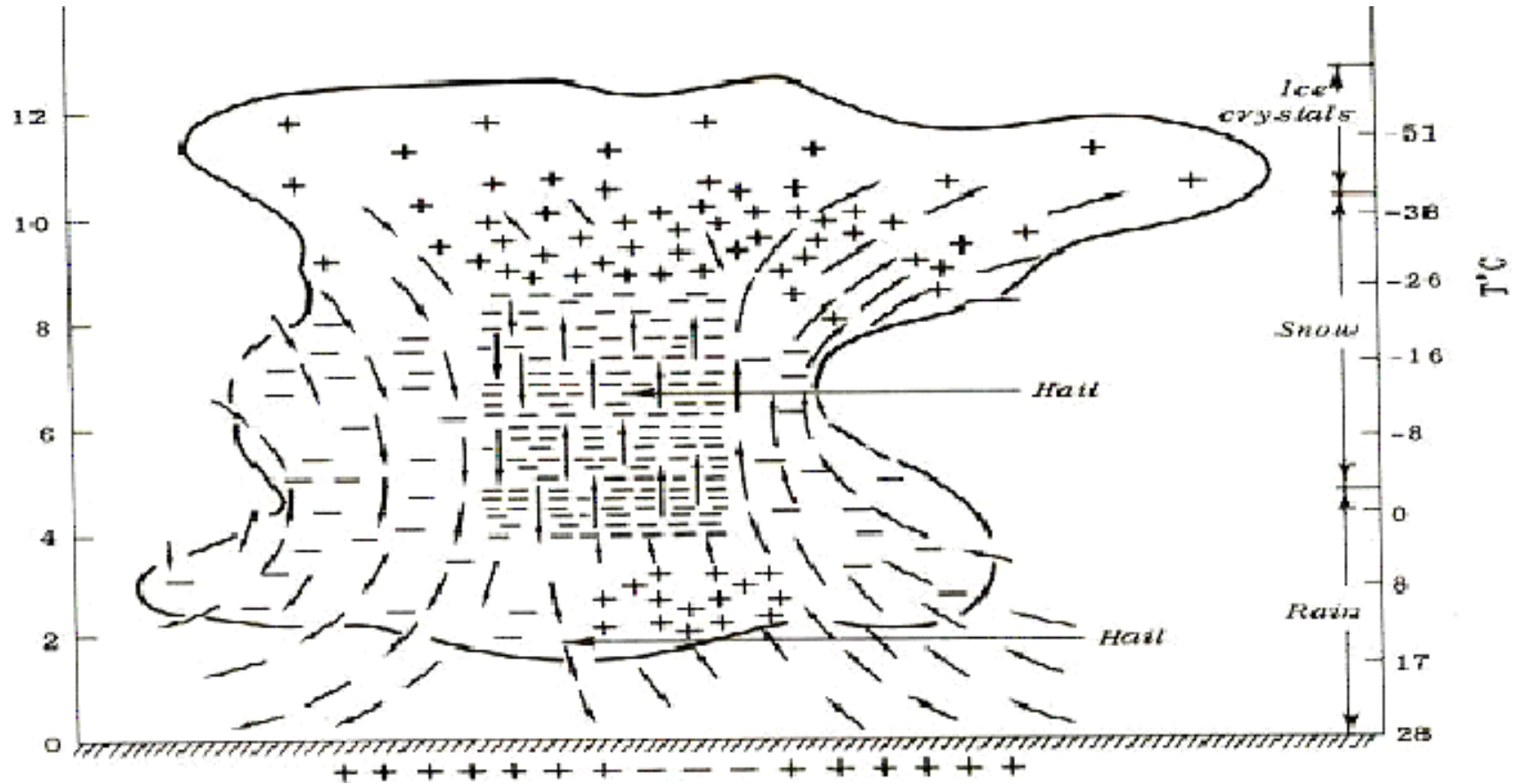
Cumulonimbus e o Lightning

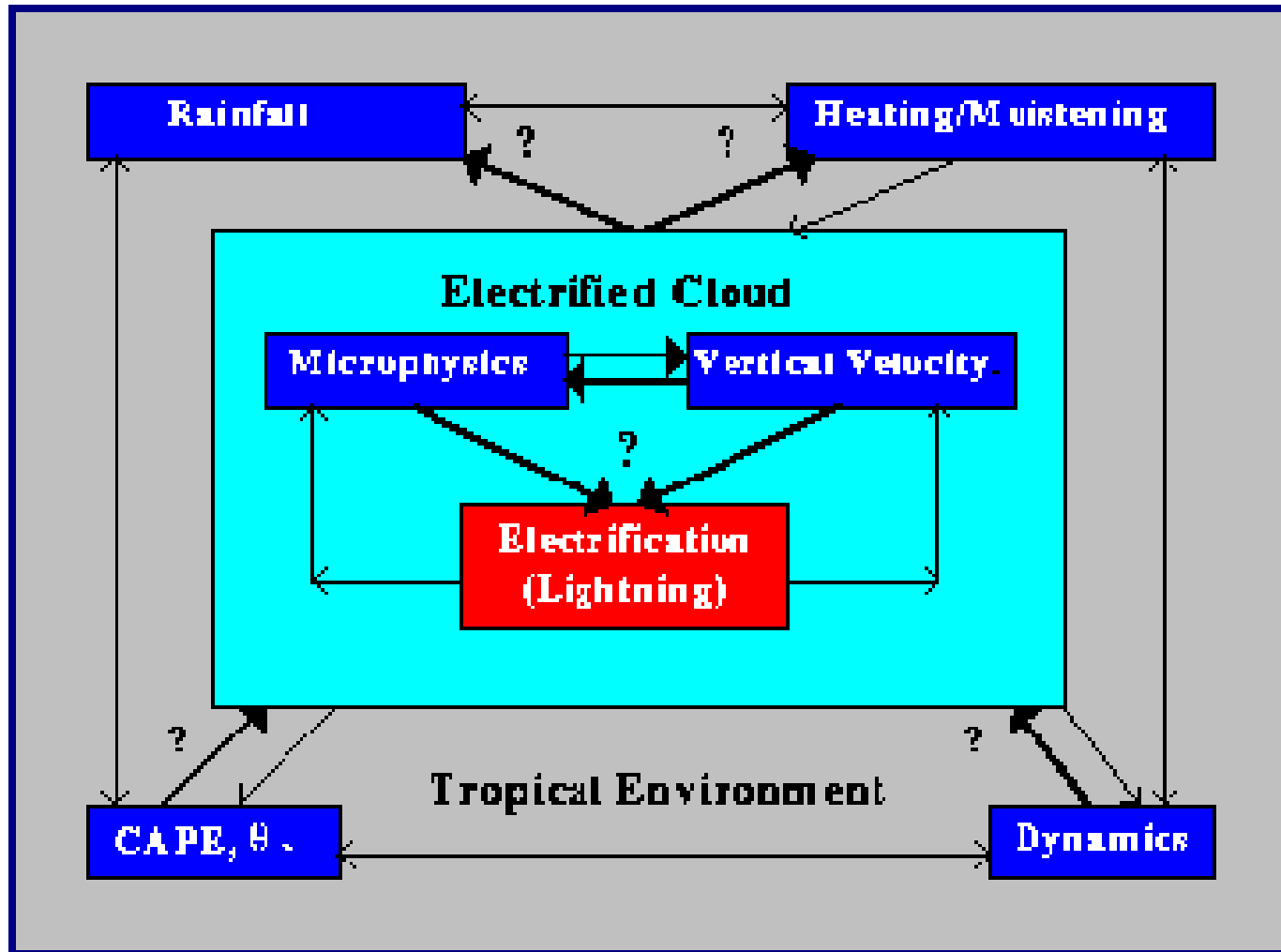
LIGHTNING: Descarga Elétrica Atmosférica ou Relâmpago - É o rápido fluxo de elétrons a partir de um centro carregado negativamente para um outro centro carregado positivamente.

Receita para que uma nuvem produza lightning:

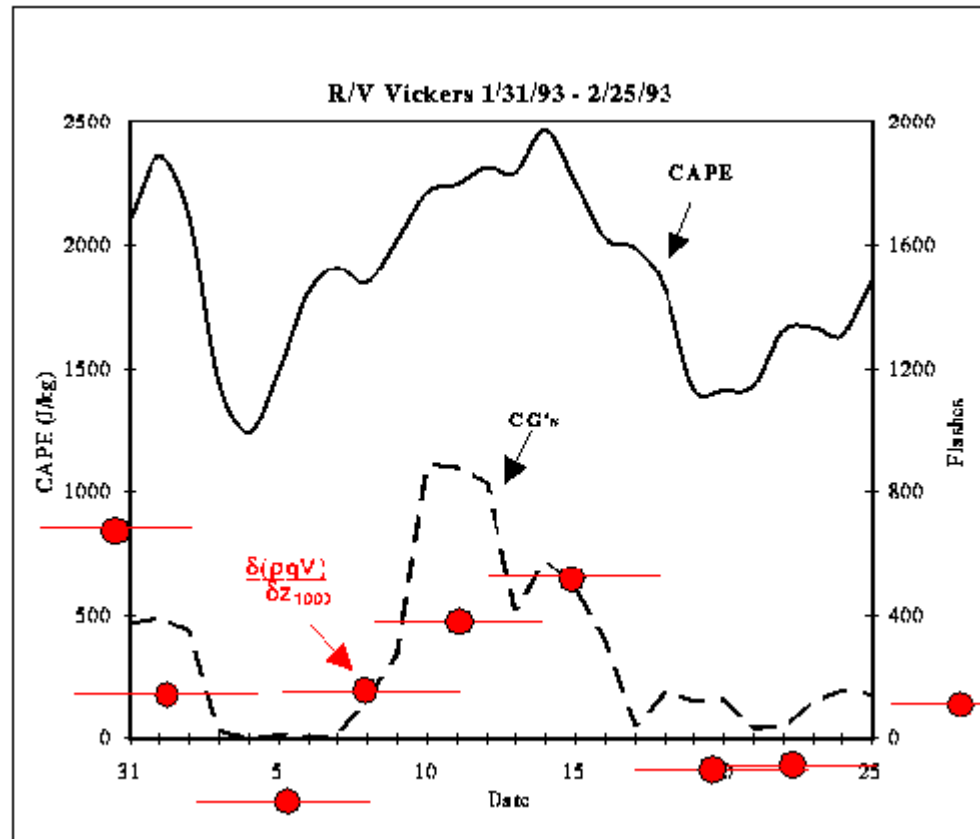
- Ter uma forte corrente ascendente através de uma profunda camada.
- Ter um adequado fornecimento de ar úmido.
- Ser uma nuvem fria
- Ser uma nuvem Cumulonimbus

Distribuição de cargas dentro e fora da tempestade





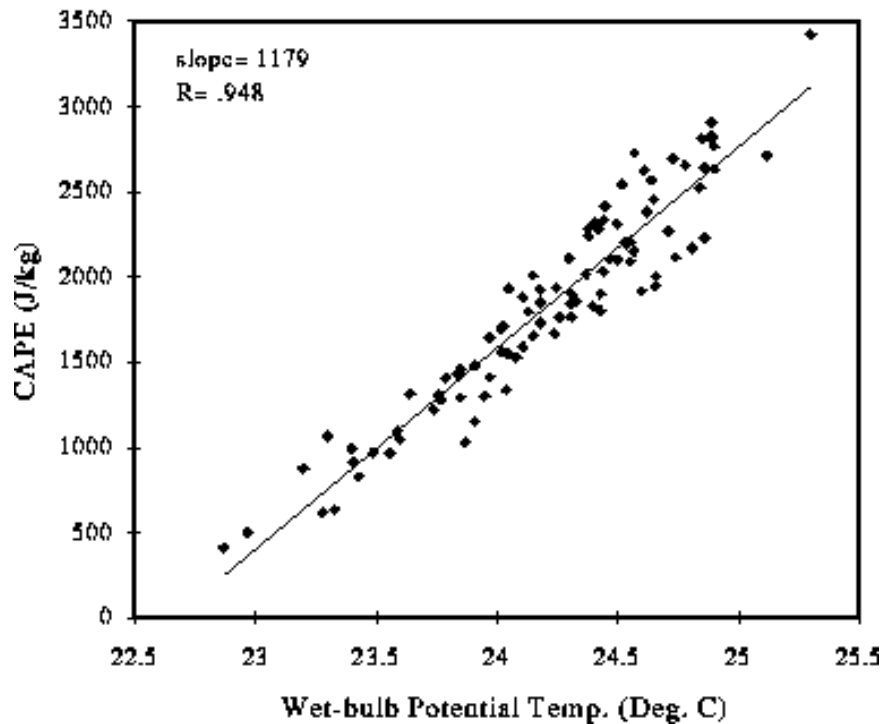
Cortesia: Dr. Walt Petersen - CSU



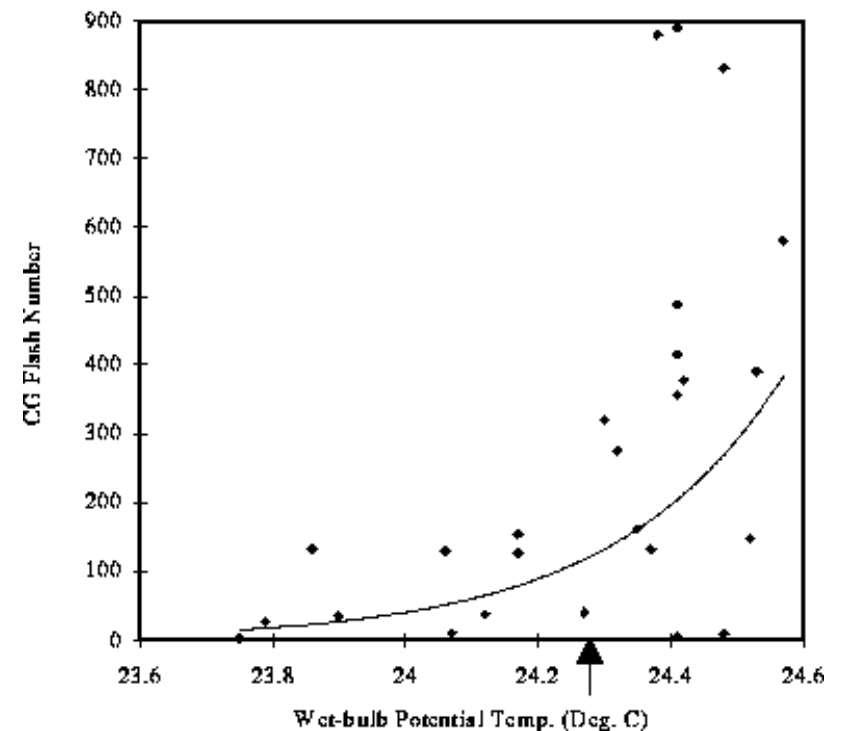
Smoothed time-series of 24 hour mean CAPE and CG lightning in the vicinity (300 km radius for lightning) of the R/V Vickers, February 1993. The red circles indicate relative values of mean moisture flux convergence at 1000 mb (weekly mean) near the nominal position of the R/V Vickers (values > 0 = convergence, < 0 = divergence), the attached red lines bracket the time period used for the averages. (Similar figure also shown in Petersen, Rutledge and Orville, 1996, *Mon. Wea. Rev.*)

CAPE e atividade elétrica

R/V Vickers CAPE vs. Wet-bulb Potential Temperature

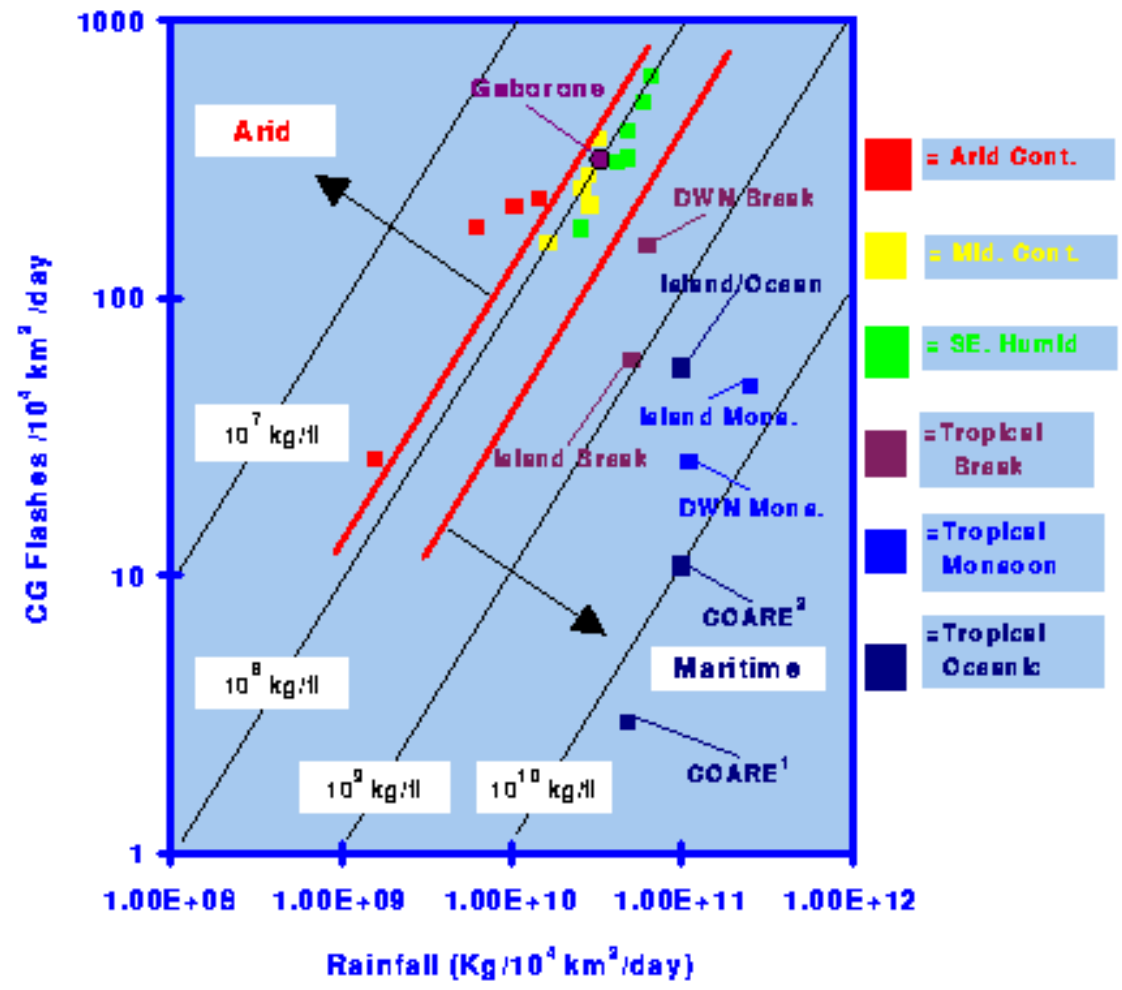


Wet-bulb Potential Temperature Vs. CG Flash Number



Atividade Elétrica Nuvem-Solo
 X
 Precipitação

Warm-Season Normalized Rain-Yields



*GOARE¹ = $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (Radar Est. Rainfall)
 *GOARE² = $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ (GPI Est. Rainfall; ocean only)

Distribuição de cargas em tempestades (Thunderstorms)

Distribuição Tripolar de cargas

Teorias da separação de cargas

Convectivas

Gravitacionais (Precipitação)

Lightning

Lider piloto e líderes em sequência

Descarga de retorno – é o pulso de corrente que transfere cargas ao longo do canal altamente luminoso entre a nuvem e o solo.

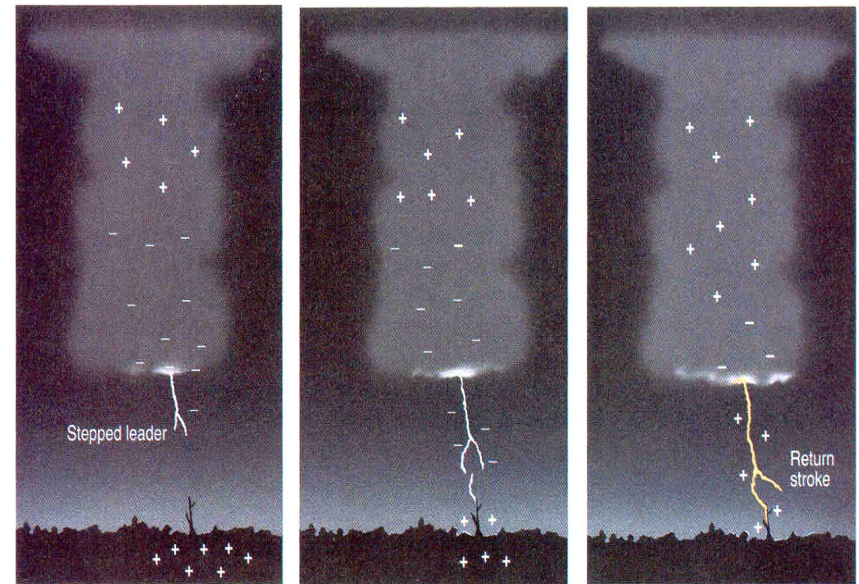
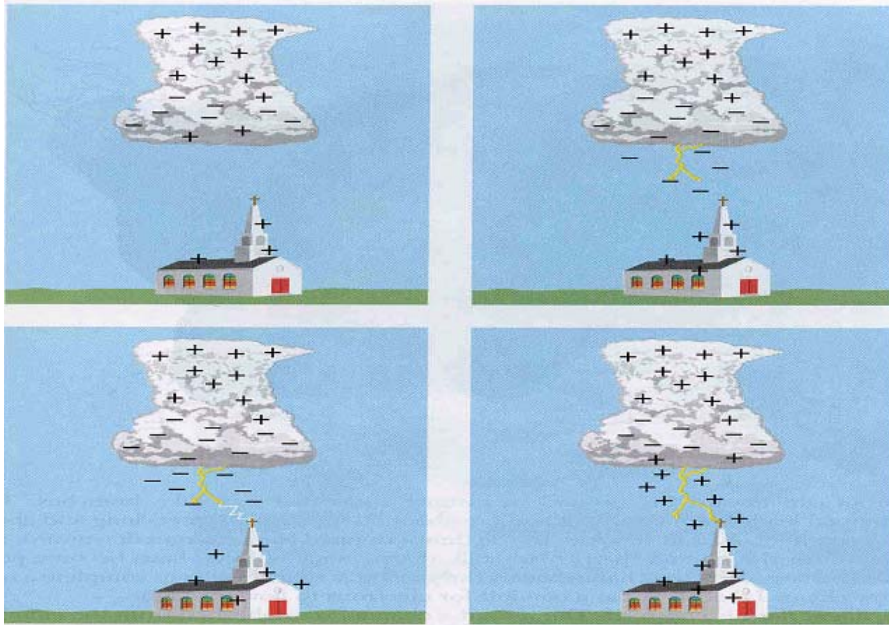
Corrente contínua

Dart Leader

Trovão - Thunder

Temperatura de 25.000K

Expansão do ar



- Ar é um bom isolante, a água aumenta a condutividade.
- Somente quando alcança o “potencial de quebra” no ar, a corrente flui. O campo elétrico necessário é da ordem de 1.400 kV/m. (há observações em nuvem de que esse campo é da ordem de 100 a 400 kV/m – provável causa: ionizações e efeitos elétricos na coalescência)
- O potencial entre os centros positivos e negativos torna-se elevado o suficiente para ionizar o ar, que passa atuar como um condutor.
- Cria-se um canal condutor de cerca de 10 cm em diâmetro crescendo para fora variando em largura com o enfraquecimento do potencial e com sua recuperação, gerando os novos "stepped leader". O ar é aquecido a mais de 30.000 graus – o ar se expande explosivamente resultando no trovão.

Evolução de uma descarga elétrica atmosférica

Uma descarga de eletricidade de curta duração, que acompanha o lightning nuvem-solo. O flash luminoso que é visível a olho humano é composto por uma descarga elétrica rápida denominada stroke. As cargas fluem a uma taxa da ordem de 20.000 amperes.

O stroke de retorno segue o líder em sua descida através da trajetória condutora do ar ionizado. Os elétrons na nuvem fluem para baixo através desse caminho até o solo.

Com a migração contínua de elétrons para baixo, os elétrons que se localizam em alturas maiores na trajetória começam consecutivamente a se moverem para baixo ao longo do canal.

Assim conectados, os elétrons da nuvem fluem para o solo, e as cargas positivas podem fluir do solo para a nuvem, o denominado **return stroke**.

Após a primeira descarga ele possui alguns centímetros em diâmetro. A partir daí é possível que outros líderes se propaguem através do canal criado, o denominado **dart leader**. Uma sucessão de return strokes passam a se propagar a partir do solo para a nuvem.



Descargas em forma de garfo e os Stepped Leaders









Blue Jet e Sprite

O "Blue Jet" e o "Sprite" são fenômenos luminosos que manifestam-se no topo das nuvens. Ao contrário dos relâmpagos e raios, vão em direção ao espaço. Ocupam aproximadamente 1/4 do campo visual no horizonte e ocorrem só durante tempestades



Sprite: ondas de um flash de cor vermelho alaranjado observado a 40 Km de altura



Blue Jet: é um jato cônico de luz azulada observado a 90 Km de altura

Atmospheric Electricity and Charge Microphysics Bibliography

<http://ae.atmos.uah.edu/AE/refs.html>