



Física de Plasmas

Introdução

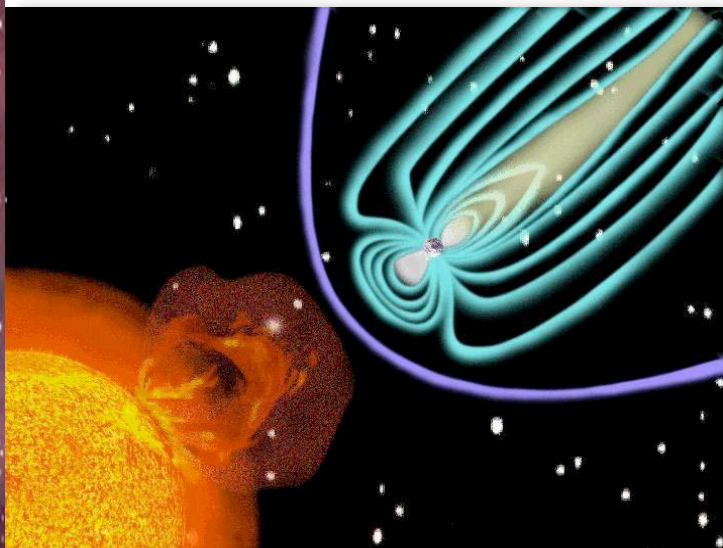
Carlos Alexandre Wuensche
Processos Radiativos I

Introdução

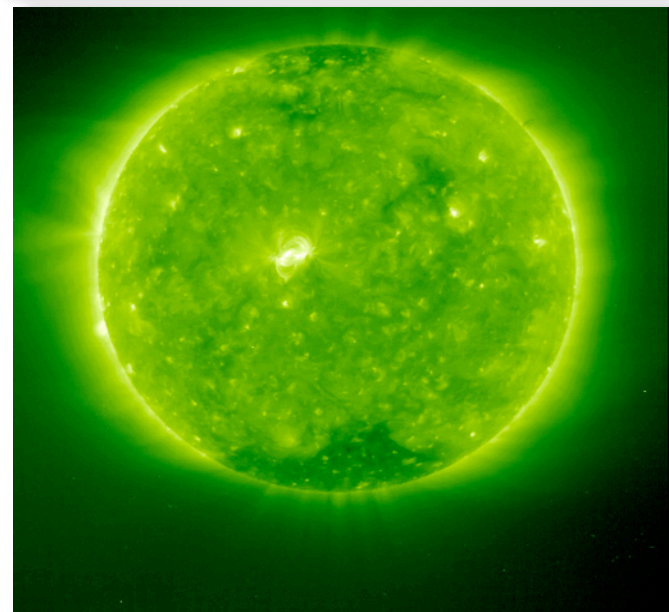
Onde Podemos Encontrar Plasmas ?

- No Planeta Terra: Ionosfera e Laboratórios de Pesquisa em Fusão Nuclear;
- Nas Vizinhanças do Planeta Terra: Magnetosfera Terrestre;
- Em Outros Planetas do Sistema Solar;
- No Espaço Interplanetário e no Meio Inter-estelar;
- No Sol e em outras Estrelas.

Esquema da Interação do Plasma Ejetado pelo Sol com o Campo Magnético da Terra



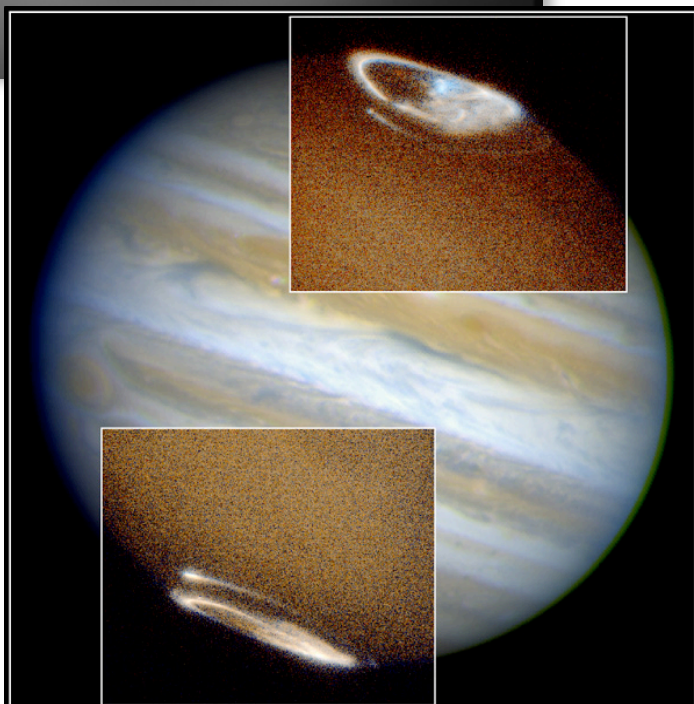
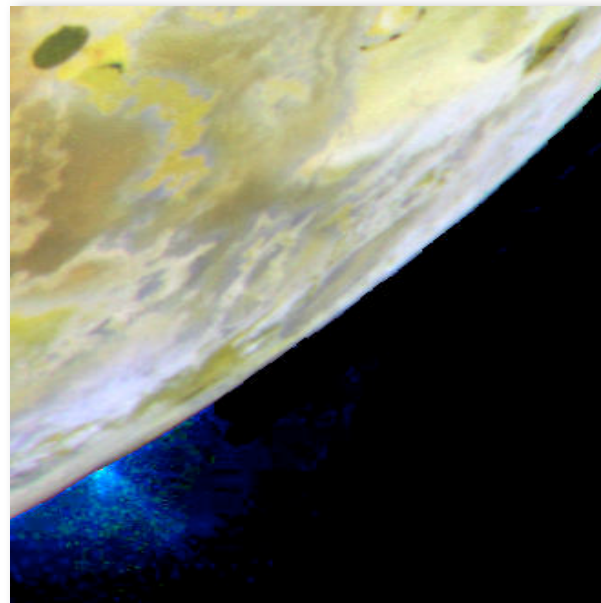
Plasma Superaquecido da Corona Solar



**Plasma Solar ou Vento Solar
Sendo Expelido pelo Sol**



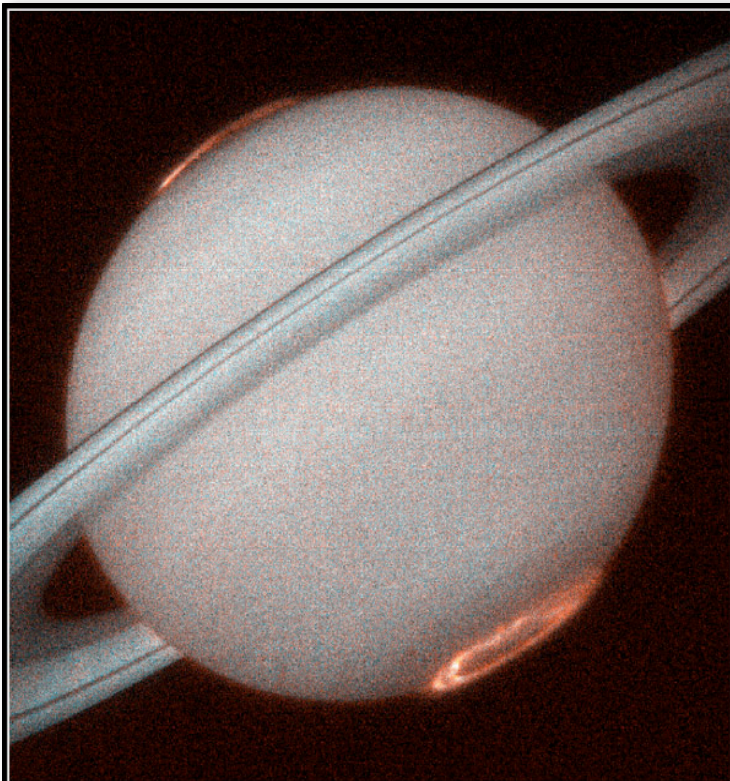
Lua de Júpiter, chamada IO, expele material vulcânico em direção ao espaço. Esse material contribui para o Plasma das vizinhanças do Planeta Júpiter.



Auroras Também Existem no Planeta Júpiter. As auroras são aspectos da interação entre o vento solar e as magnetosferas planetárias.

Jupiter Aurora HST • STIS • WFPC2
PRC98-04 • ST ScI OPO • January 7, 1998
J. Clarke (University of Michigan) and NASA

Auroras Também Existem no Planeta Saturno.



Saturn Aurora HST • STIS
PRC98-05 • ST Sci OPO • January 7, 1998 • J. Trauger (JPL) and NASA

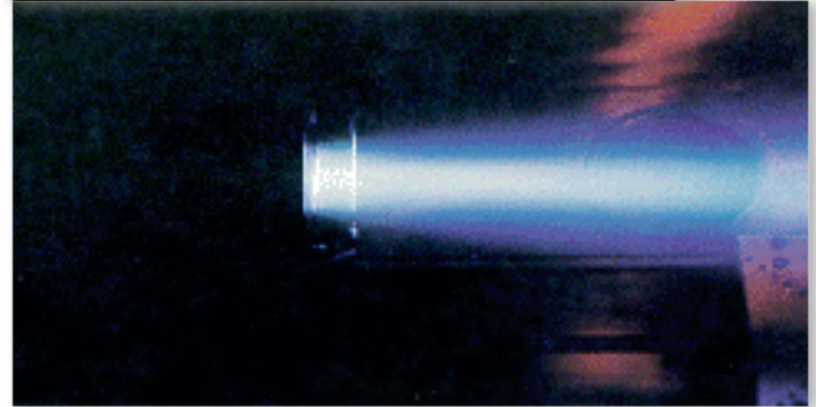
Explosão de uma Estrela Captada pelo **Telescópio Espacial Hubble**. Vejam os plasmas superaquecidos e incandescentes.



Tokamak Esférico do INPE para a geração de Plasma.



Propulsor Iônico para ser usado em satélites, e sondas espaciais. Ejeção de um feixe de íons.



Dispositivo de propulsão baseado em Plasma chamado **Sistema Mini-Magnetosférico de Propulsão de Plasma**.



Plasma é um gás ionizado (por foto-ionização ou por descarga elétrica (colisões), por exemplo) que possui elétrons, íons positivos, prótons e partículas eletricamente neutras.

Critérios para a Definição de um Plasma

● Blindagem de Debye;

$$L \gg \lambda_D$$

● Parâmetro de Plasma;

$$n_e \lambda_D^3 \gg 1$$

● Neutralidade Macroscópica de Cargas Elétricas;

$$n_e \cong n_i$$

● Frequência de Plasma.

$$\nu_{pe} > \nu_{en}$$

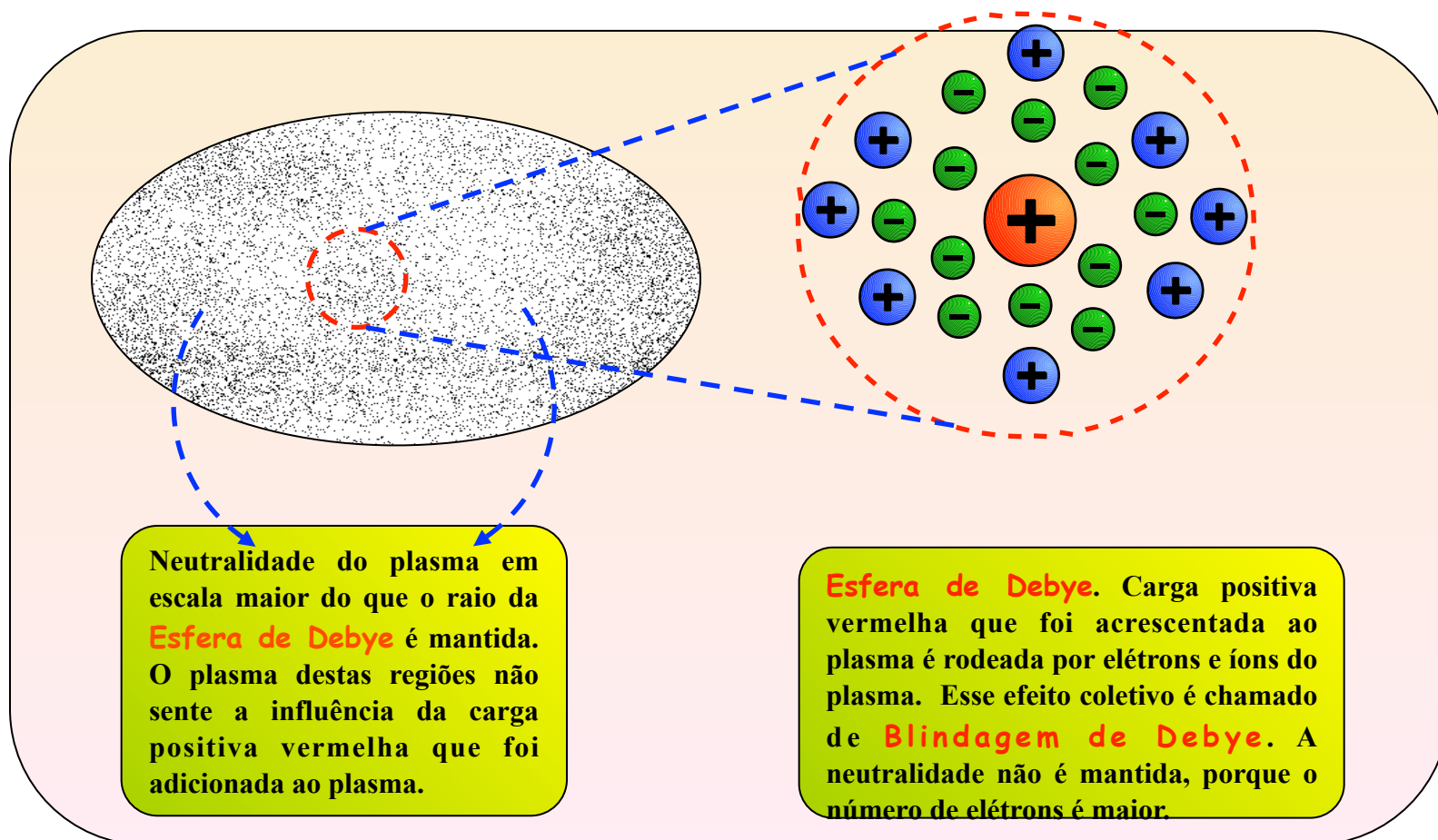
Blindagem de Debye

Comprimento de Debye

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 \kappa_B T}{n_e e^2} \right)$$

Potencial de Debye


$$\phi(r) = \frac{Q}{r} e^{(-r/\lambda_D)}$$



Processos de Produção de Plasmas

- Foto-ionização;
- Descargas elétricas;

Processo de Ionização
Interrompido

Recombinação


Grau de Ionização
Diminui

Tipos de Plasmas-Grau Ionização

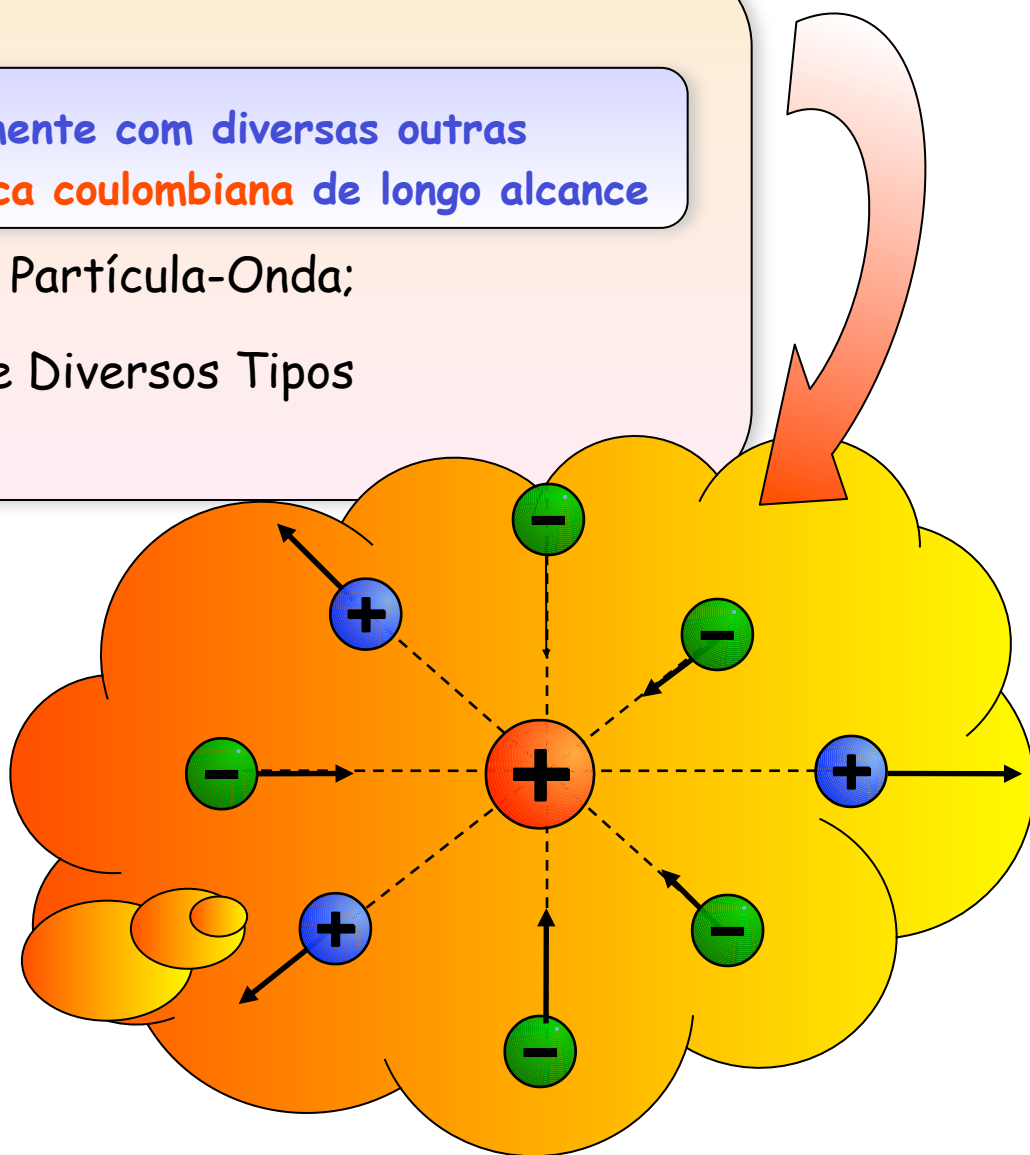
- Fracamente ionizados;
Predomina Interação Carga Elétrica-Partícula Neutra
- Fortemente ionizados;
Predomina Interações Coulombianas Múltiplas
- Totalmente ionizados;
Todas as Partículas Estão Sujeitas a Múltiplas Interações Coulombianas

Propriedades Exibidas pelos Plasmas

Efeitos Coletivos

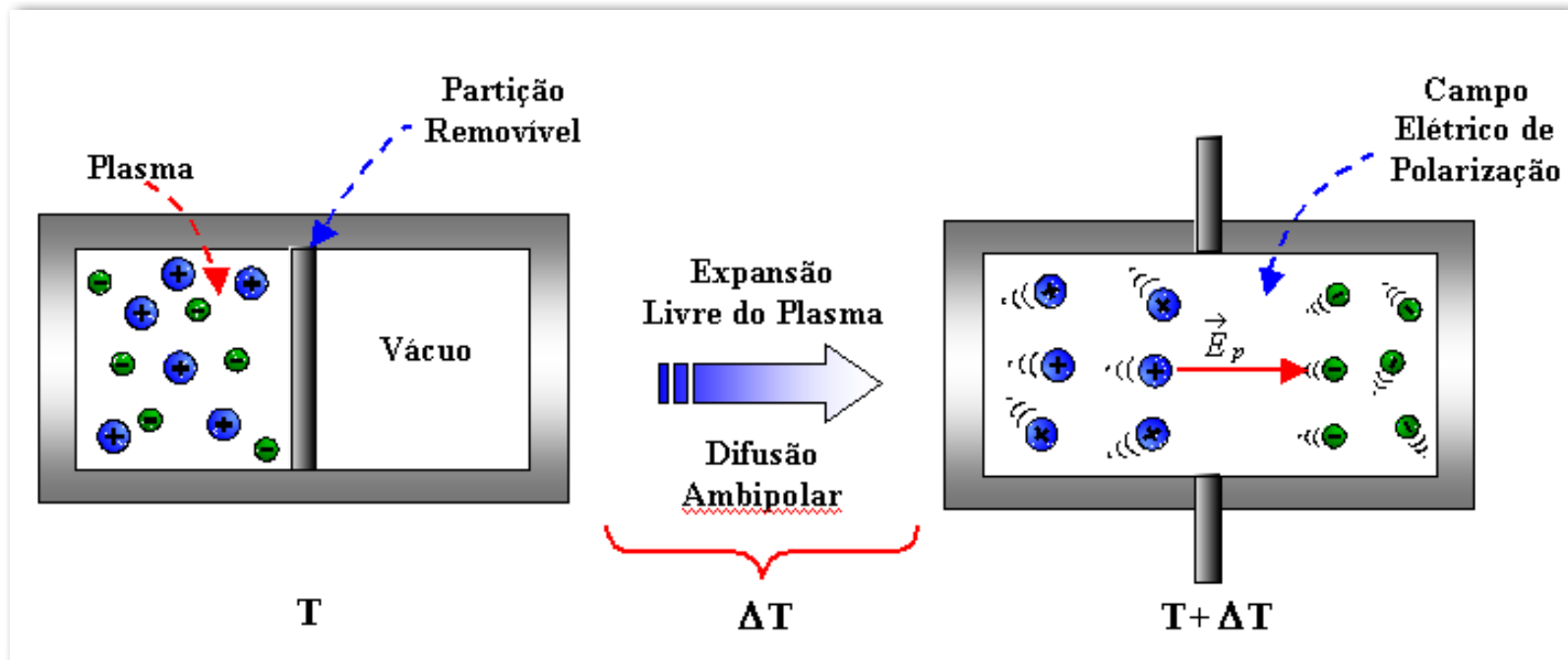
Uma partícula interage simultaneamente com diversas outras partículas por meio da **força elétrica coulombiana** de longo alcance

- Interações Partícula-Partícula e Partícula-Onda;
- Oscilações de Plasma e Ondas de Diversos Tipos



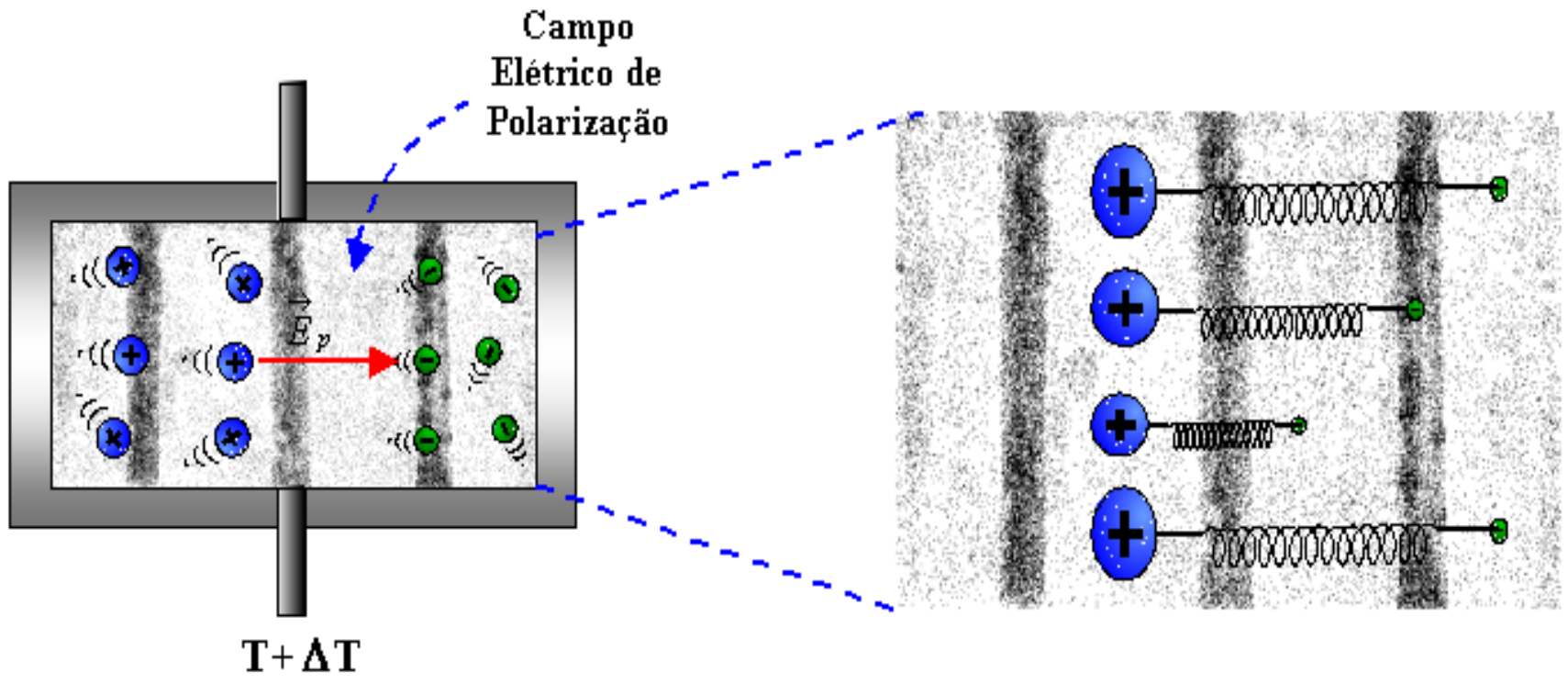
● Difusão Ambipolar

Não Havendo Campos Elétrico e Magnético Aplicados ao Plasma, os **Elétrons e Íons** que Estiverem em Grande Número Numa Região do Plasma Tenderão a **Difundirem-se**. Elétrons Difundem-se Mais Rapidamente que os Íons. Essa **Separação de Cargas** Gera um **Campo Elétrico de Polarização** Que **Aumenta a Taxa de Difusão dos Íons** E **Diminui a dos Elétrons** Até que Ocorra um Equilíbrio.



● Oscilações de Plasma ou Oscilações de Langmuir

São **Ondas Longitudinais** de Natureza **eletrostática** e **independentes do Tempo** e **Estacionárias**. As Oscilações Ocorrem na **Freqüência de Plasma do Elétron**

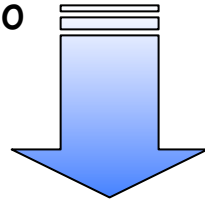


Movimento de Partículas Carregadas em Campos EM Estáticos Uniformes

1-Campo Eletrostático Uniforme

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q\vec{E}$$

Solução



$$\vec{p}(t) = \vec{p}(0) + (q\vec{E})t$$

$$\vec{r}(t) = \vec{r}(0) + \vec{v}(0)t + \frac{1}{2} \frac{q\vec{E}}{m} t^2$$

Movimento de Partículas Carregadas em Campos EM Estáticos Uniformes

2-Campo Magnetostático Uniforme

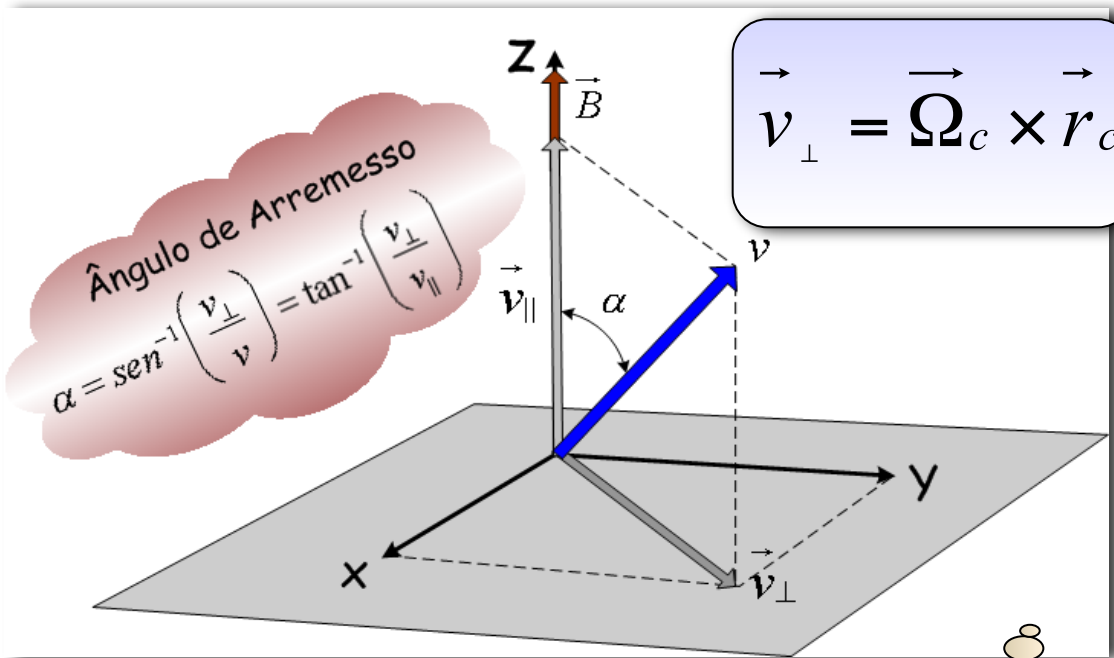
Solução

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

$$\vec{v} = \vec{v}_{\parallel} + \vec{v}_{\perp}$$

$$\frac{d\vec{v}_{\parallel}}{dt} = \vec{0}$$

$$\frac{d\vec{v}_{\perp}}{dt} = \vec{\Omega}_c \times \vec{v}_{\perp}$$



$$\vec{v}_{\perp} = \vec{\Omega}_c \times \vec{r}_c$$

$$\vec{\Omega}_c = -\frac{q\vec{B}}{m}$$

3-Campos Eletrostático e Magnetostático Uniformes

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$\vec{v} = \vec{v}_{\parallel} + \vec{v}_{\perp}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_{\parallel} + \vec{E}_{\perp}$$

$$\frac{d\vec{v}_{\parallel}}{dt} = \frac{q}{m} \vec{E}_{\parallel}$$

$$\vec{v}_{\parallel}(t) = \vec{v}_{\parallel}(0) + \left(\frac{q}{m} \vec{E}_{\parallel} \right) t$$

$$\vec{r}_{\parallel}(t) = \vec{r}_{\parallel}(0) + \vec{v}_{\parallel}(0) t + \left(\frac{q}{2m} \vec{E}_{\parallel} \right) t^2$$

$$\frac{d\vec{v}_{\perp}}{dt} = \frac{q}{m} (\vec{E}_{\perp} + \vec{v}_{\perp} \times \vec{B})$$

Solução
Adiante

$$\vec{v} = \vec{v}_{//} + \vec{v}_{\perp}$$

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$\vec{E} = \vec{E}_{//} + \vec{E}_{\perp}$$

$$\vec{v}_{\perp}(t) = \vec{v}'_{\perp}(t) + \vec{v}_E$$

Referencial
K' observa:

$$m \frac{d\vec{v}'_{\perp}}{dt} = q(\vec{v}'_{\perp} \times \vec{B})$$



$$\vec{v}'_{\perp} = \vec{\Omega}_c \times \vec{r}_c$$

Deriva Eletromagnética.
Velocidade constante do
Referencial K'

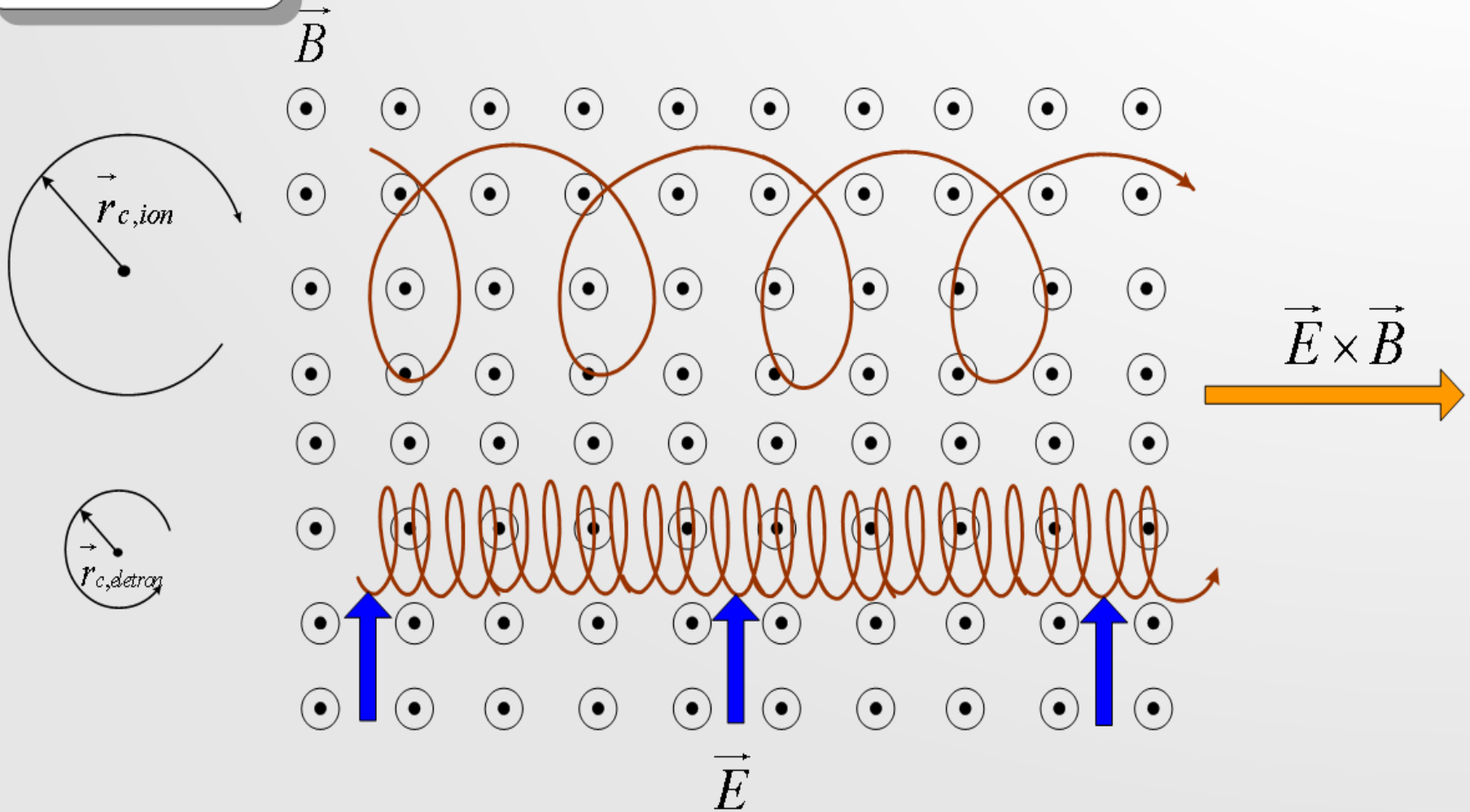
$$\vec{v}_E = \frac{\vec{E}_{\perp} \times \vec{B}}{B^2}$$

Solução

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_{//}(0) + \vec{\Omega}_c \times \vec{r}_c + \frac{\vec{E}_{\perp} \times \vec{B}}{B^2} + \left(\frac{q\vec{E}_{//}}{m} \right) \dot{t}$$

Órbita Helicoidal e Deriva Eletromagnética

$$r_{c,\alpha} = \frac{m_\alpha v_{\perp,\alpha}}{q_\alpha B} = \frac{v_{\perp,\alpha}}{\Omega_\alpha}$$

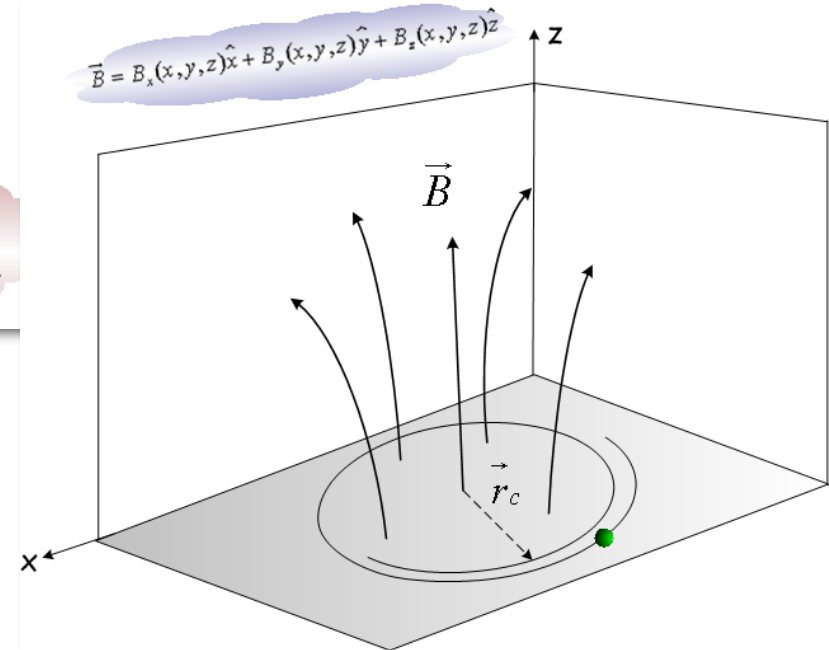
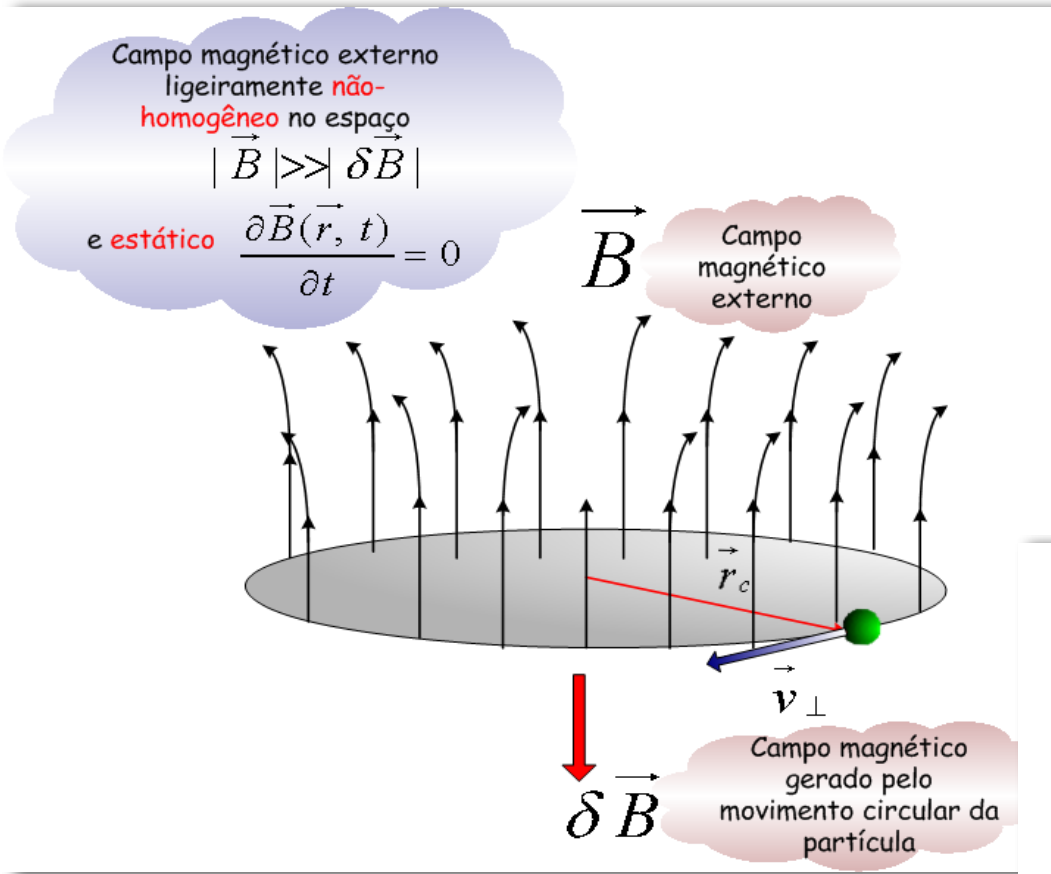




Movimento de Partículas Carregadas em Campos Magnéticos Estáticos e Não-Uniformes

- O estudo do campo magnético não-uniforme no espaço é extremamente difícil!
- Objetivo: investigar o movimento de uma partícula carregada em um campo magnético **Ligeiramente** não-homogêneo no espaço
- **Ligeiramente** = Variação Espacial do Campo Magnético dentro da Órbita da Partícula é Pequeno Comparado com a Magnitude de **B**.

Movimento de Partículas Carregadas em Campos Magnéticos Estáticos e Não-Uniformes

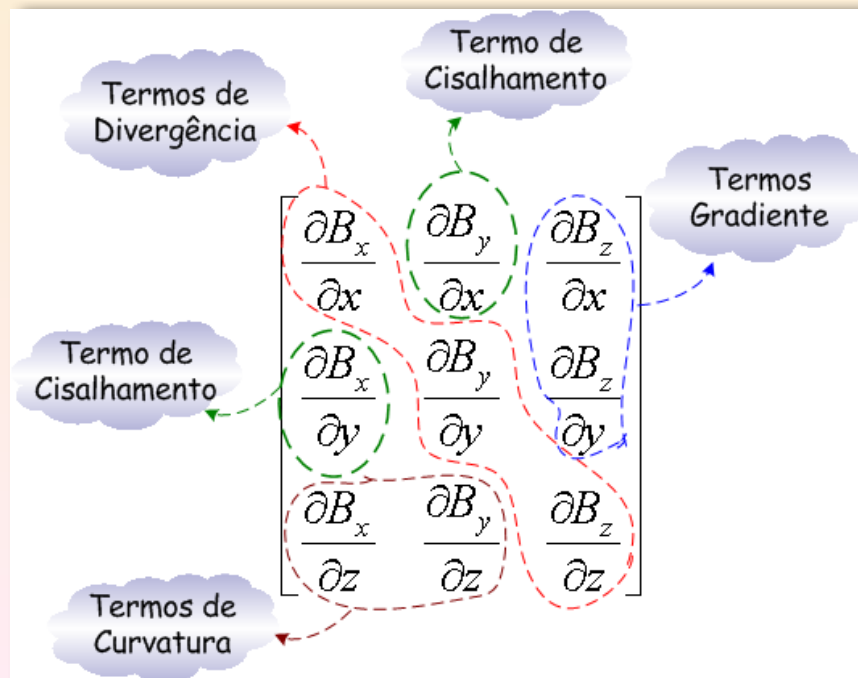


● Teoria da Órbita de 1ª Ordem ou Aproximação de Alfvén

Consiste em considerar $\delta B \ll B$ em uma distância da ordem de r_c . Analisar o Movimento do Centro de Guia. Os giros rápidos da partícula são de pouco interesse. Pequenas oscilações (amplitude $\ll r_c$) que ocorrem em um giro da partícula são submetidas à médias em um período de giro.

● Tensor $\nabla \vec{B}$ descreve a Variação Espacial de \vec{B}

$$\nabla \vec{B} =$$



● Invariantes Adiábaticos

1º-Invariante Adiábatico: Momento Magnético Orbital é Constante;

2º-Invariante Adiábatico: Invariante Longitudinal $J = \oint \vec{v} \cdot d\vec{l} = \oint v_{||} dl$

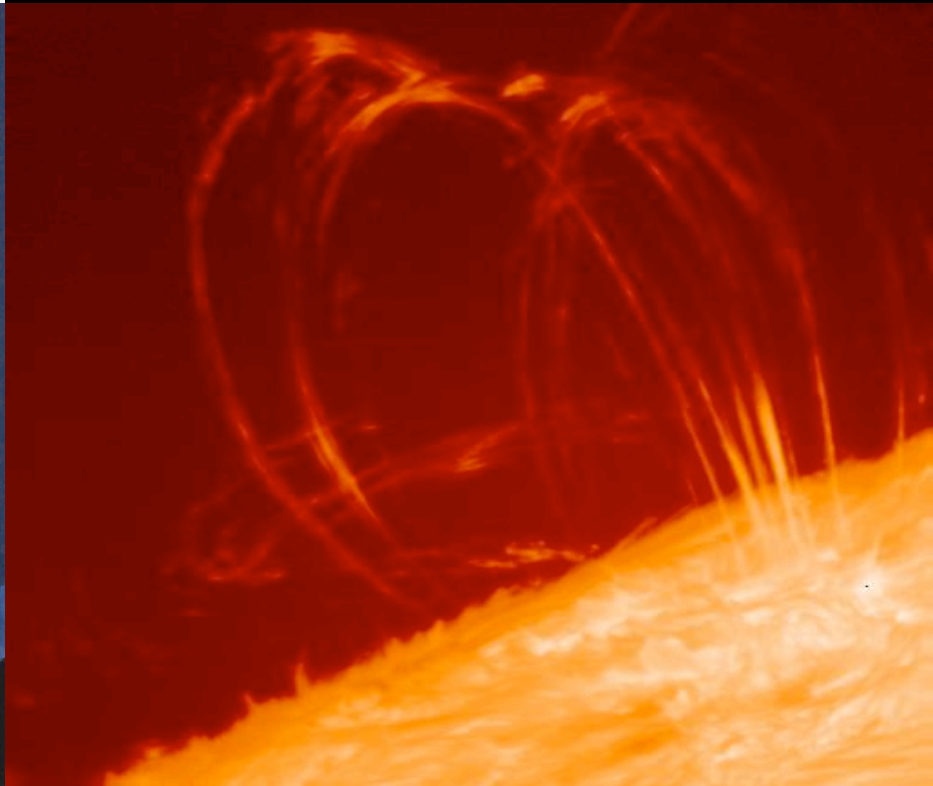
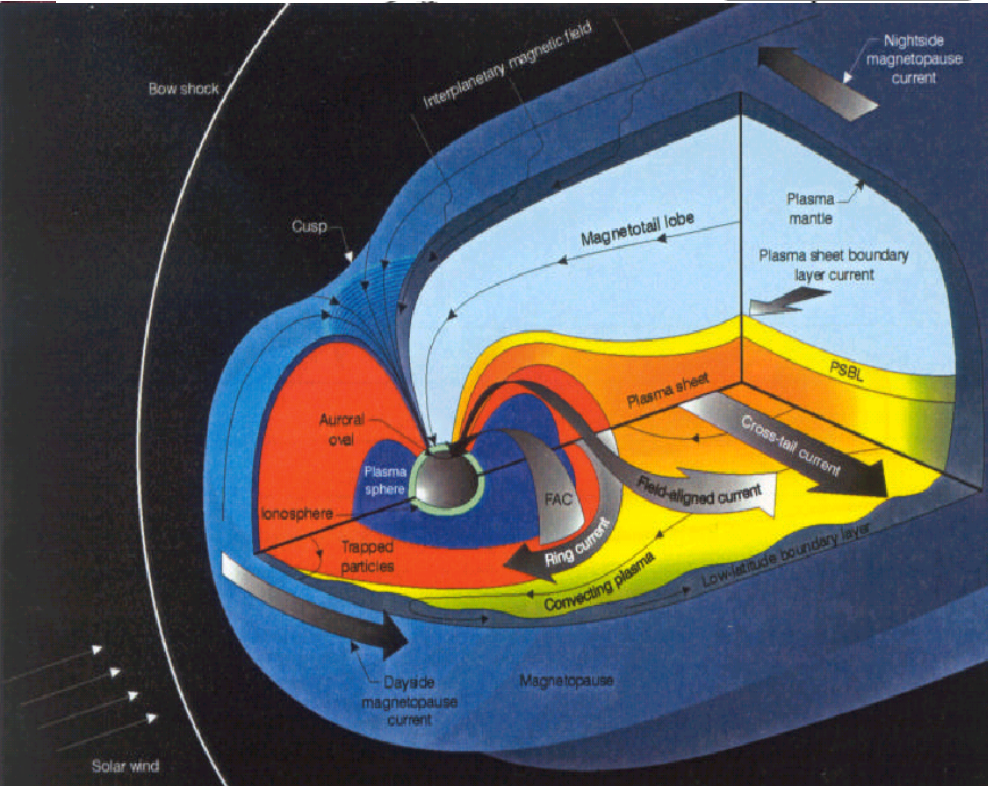
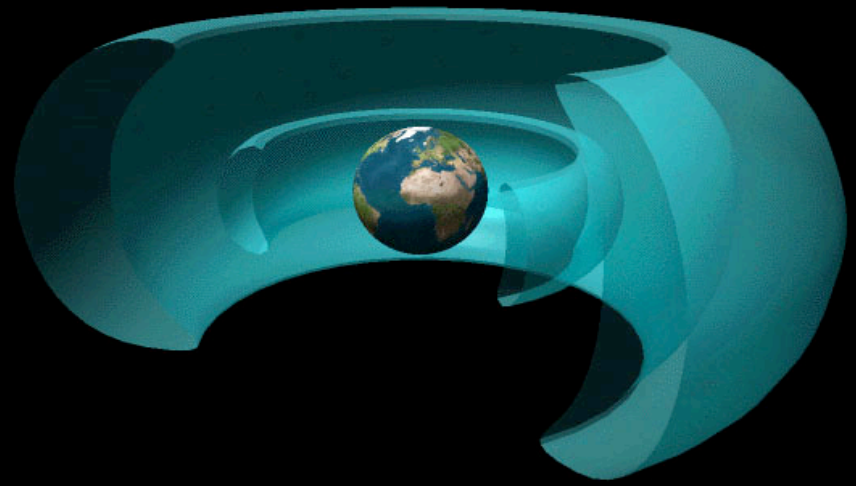
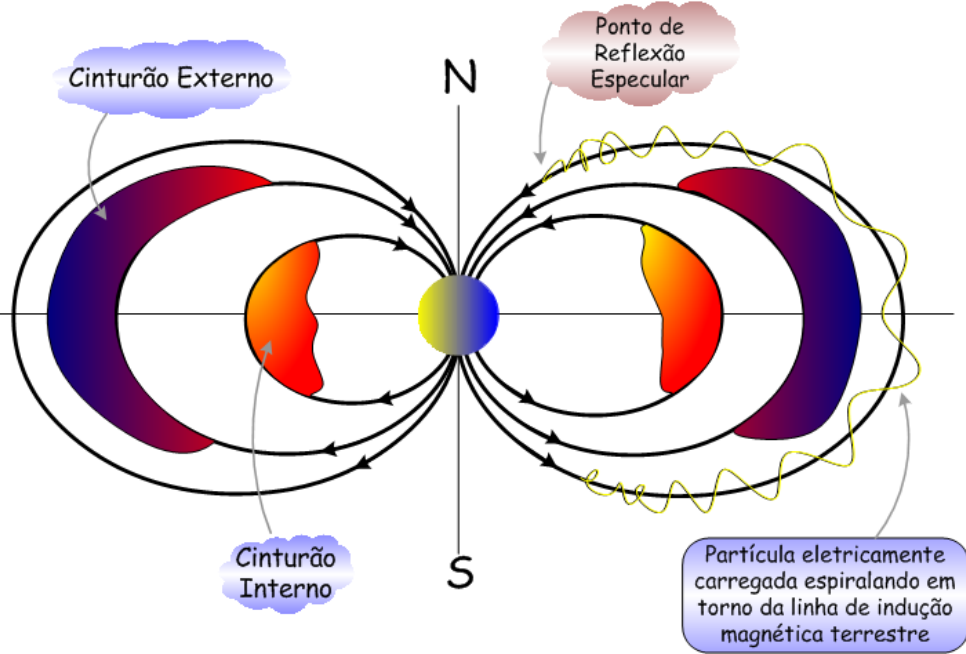
3º-Invariante Adiábatico: Fluxo Magnético Total Englobado Pela Superfície de Deriva

● Velocidades de Deriva de Gradiente e Curvatura

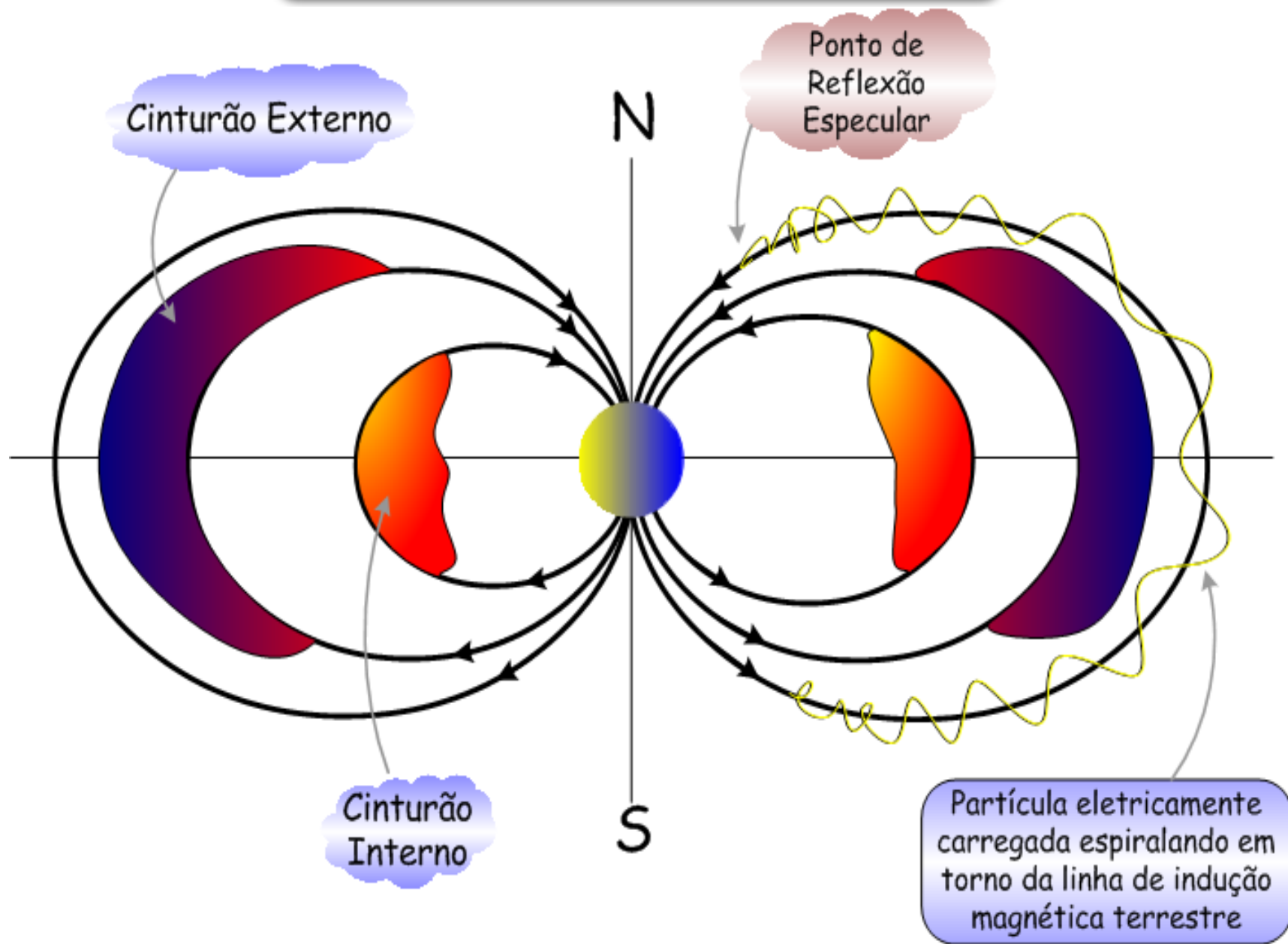
$$\vec{v}_{gc} = -\frac{mv_{\perp}^2}{2qB^3} (\nabla B \times \vec{B}) - \frac{mv_{||}^2}{qB^4} [(\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B}] \times \vec{B}$$

Deriva
Gradiente

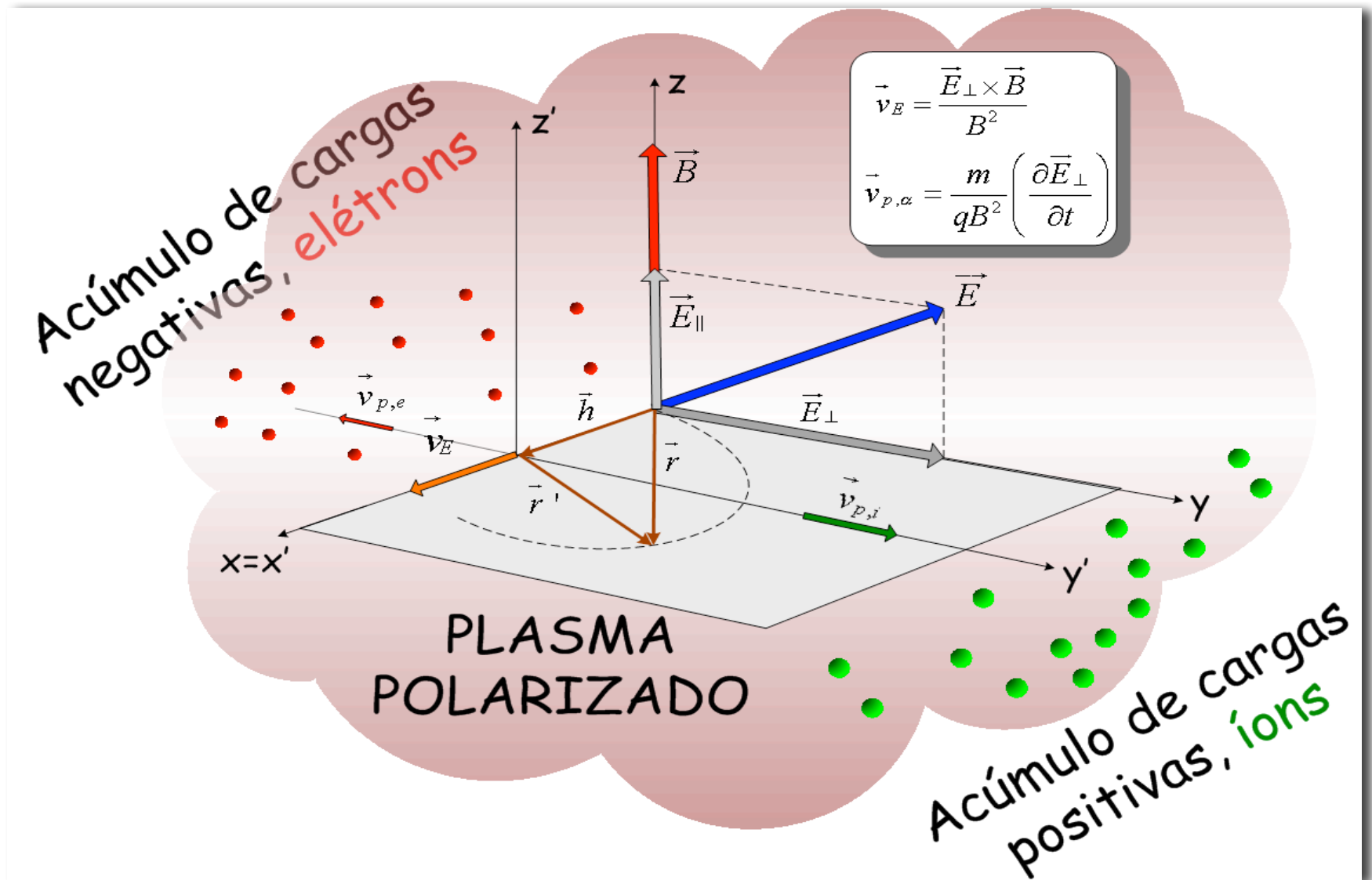
Deriva
Curvatura



Garrafa e Espelhos Magnéticos



Movimento de Partículas Carregadas em Campos Eletromagnéticos Variáveis No Tempo



Elementos da Teoria Cinética do Plasma

Equação de Boltzmann Não-Colisional

Plasma Homogêneo e
Não há Força
Externa

$$\frac{\partial f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\partial t} + \vec{v} \bullet \nabla_{\vec{r}} f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t) + \vec{a} \bullet \nabla_{\vec{r}} f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t) = 0$$

Equação de Boltzmann Colisional

$$\frac{\partial f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\partial t} + \vec{v} \bullet \nabla_{\vec{r}} f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t) + \vec{a} \bullet \nabla_{\vec{r}} f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t) = \left(\frac{\delta f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\delta t} \right)$$

Modelo da Relaxação para o Termo Colisional

$$\left(\frac{\delta f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\delta t} \right) = - \frac{f_{\alpha} - f_{\alpha,0}}{\tau} \quad f_{\alpha} = f_{\alpha,0} + (f_{\alpha}(\vec{v}, 0) - f_{\alpha,0}) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Valores Médios e Variáveis Macroscópicas

● Densidade Numérica e Velocidade

$$n_{\alpha}(\vec{r}, t) = \int_{\mathbf{v}} f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t) d^3v$$

$$\vec{u}_{\alpha}(\vec{r}, t) = \frac{\int_{\mathbf{v}} \vec{v} f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t) d^3v}{n_{\alpha}(\vec{r}, t)}$$

● Equações de Transporte Macroscópicas

As **equações diferenciais** que governam as variações temporais e espaciais das variáveis macroscópicas são derivadas diretamente da **Equação de Boltzmann** sem resolvê-la. Essas equações diferenciais são conhecidas como **Equações de Transporte Macroscópicas** cujas soluções são as **variáveis macroscópicas**

$$\chi(\vec{r}, \vec{v}, t)$$

$$\frac{\partial f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla_{\vec{r}} f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t) + \vec{a} \cdot \nabla_{\vec{v}} f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t) = \left(\frac{\delta f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\delta t} \right)_{col}$$

$$\int_{\vec{v}} \chi \frac{\partial f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\partial t} d^3 v + \int_{\vec{v}} \chi \vec{v} \cdot \nabla_{\vec{r}} f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t) d^3 v + \int_{\vec{v}} \chi \vec{a} \cdot \nabla_{\vec{v}} f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t) d^3 v = \int_{\vec{v}} \chi \left(\frac{\delta f_{\alpha}(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\delta t} \right)_{col} d^3 v$$

Equação de Transporte Geral

$$\frac{\partial}{\partial t} (n_{\alpha} \langle \chi \rangle_{\alpha}) + \nabla_{\vec{r}} \cdot (n_{\alpha} \langle \chi \vec{v} \rangle_{\alpha}) - n_{\alpha} \langle \vec{a} \cdot \nabla_{\vec{v}} \chi \rangle_{\alpha} = \left(\frac{\delta (n_{\alpha} \langle \chi \rangle_{\alpha})}{\delta t} \right)_{col}$$

O Estado de Equilíbrio

Função de Distribuição de Equilíbrio é a Solução Independente do Tempo da Equação de Boltzmann na Ausência de Forças Externas. É conhecida como Função de Distribuição de Velocidades de Maxwell-Boltzmann.

$$f(\mathbf{v})d^3v = n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} d^3v$$

$$g(v_i)dv_i = n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} e^{-\frac{mv_i^2}{2kT}} dv_i$$

- $\langle v_i \rangle = \frac{1}{n} \int_{-\infty}^{+\infty} g(v_i)v_i dv_i = 0$

- $\langle v_i^2 \rangle = \frac{1}{n} \int_{-\infty}^{+\infty} g(v_i)v_i^2 dv_i = \frac{kT}{m}$

- Teorema da Equipartição de Energia

(Para $i = x, y$ e z)

$$\frac{1}{2}m \langle v_i^2 \rangle = \frac{1}{2}kT$$



Equação da Continuidade

$$\chi = m_\alpha$$

$$\nabla \cdot (\vec{\rho}_{m_\alpha} \vec{u}_\alpha) + \frac{\partial \rho_{m_\alpha}}{\partial t} = S_\alpha$$

Equação do Momento Linear- Equação do Movimento

$$\chi = m_\alpha \vec{v}, \quad \vec{v} = \vec{c}_\alpha + \vec{u}_\alpha$$

$$\rho_{m_\alpha} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{u}_\alpha \cdot \nabla \right) \vec{u}_\alpha = \rho_{m_\alpha} \frac{D\vec{u}_\alpha}{Dt}$$

$$\rho_{m_\alpha} \frac{D\vec{u}_\alpha}{Dt} = n_\alpha q_\alpha (\vec{E} + \vec{u}_\alpha \times \vec{B}) + \rho_{m_\alpha} \vec{g} - \nabla \cdot \phi_\alpha + \vec{A}_\alpha - \vec{u}_\alpha S_\alpha$$

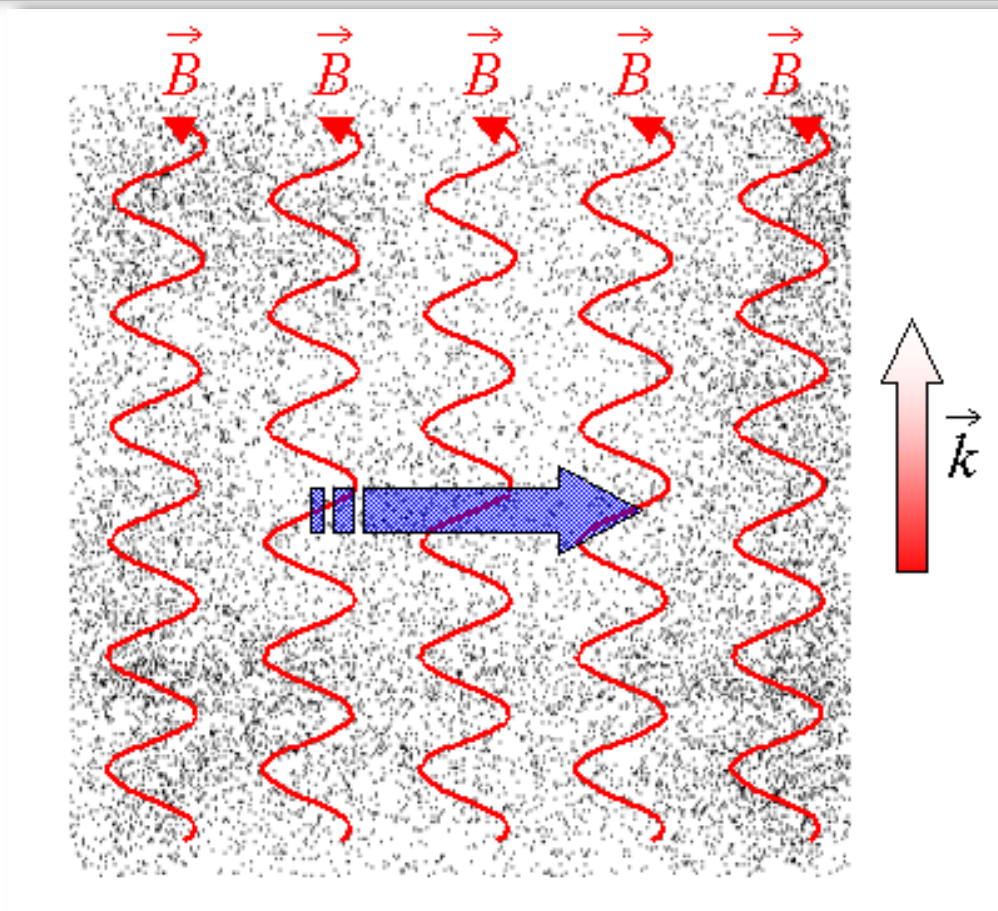
Equação da Energia

$$\chi = \frac{m_\alpha v^2}{2}$$

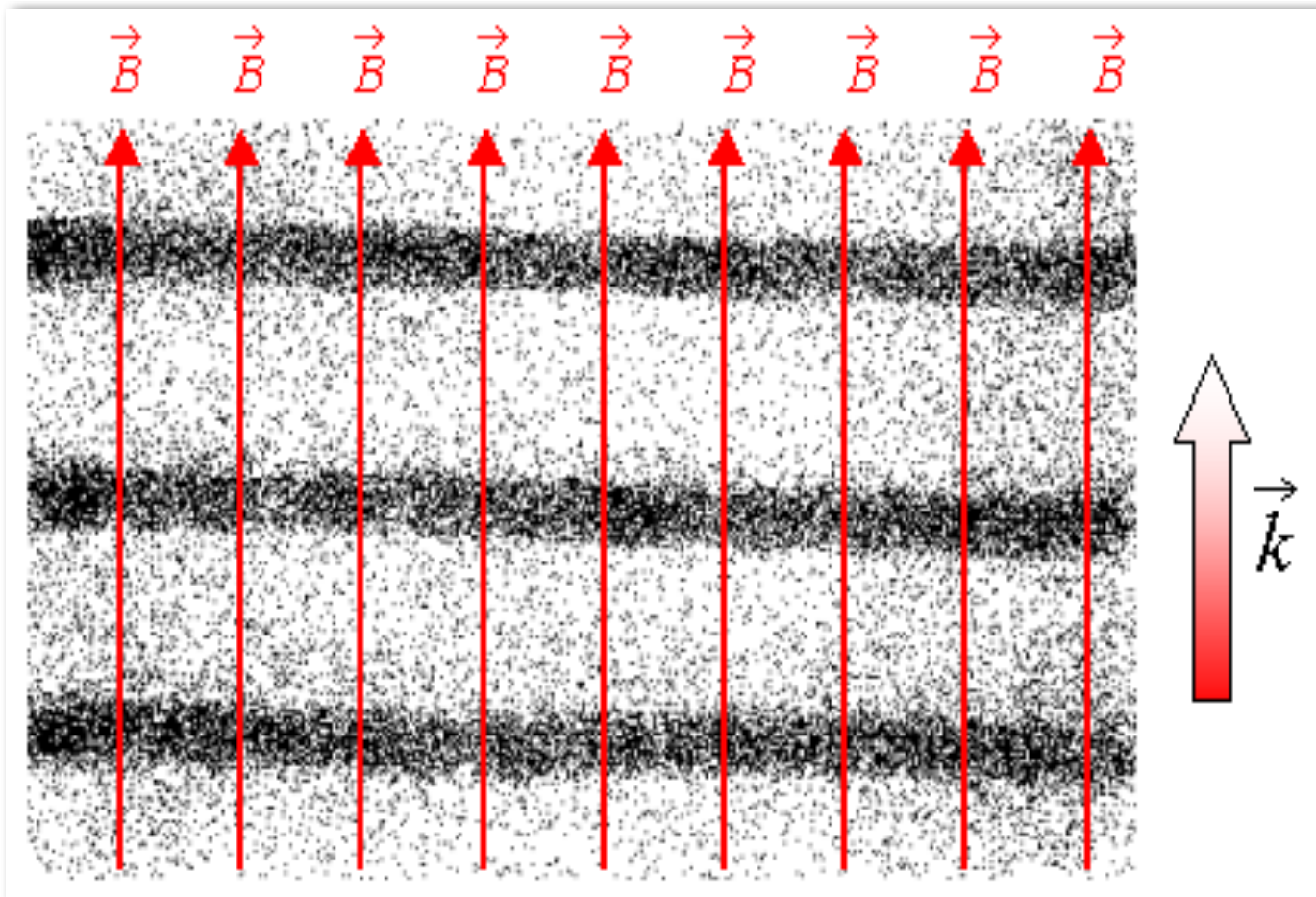
$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{3p}{2} \right) + \frac{3p}{2} \nabla \cdot \vec{u}_\alpha + (\phi_\alpha \cdot \nabla) \cdot \vec{u}_\alpha + \nabla \cdot \vec{q}_\alpha = M_\alpha - \vec{u}_\alpha \cdot \vec{A}_\alpha + \frac{1}{2} u_\alpha^2 S_\alpha$$

Ondas Magneto-Hidrodinâmicas

Ondas de Alfvén: Perturbação no plasma condutor e imerso num campo magnético faz com que as linhas de campo magnético oscilem perpendicularmente, como se fossem cordas elásticas. As ondas de Alfvén propagam-se ao longo do campo magnético, e o fluxo de plasma é perpendicular às linhas de indução magnética.



Ondas Sonoras: São ondas Sonoras em um plasma condutor e imerso num campo magnético. São ondas longitudinais que geram regiões de compressão e rarefação no plasma.



Ondas Magneto-Sônicas: São ondas longitudinais que se propagam perpendicularmente às linhas de campo magnético, provocando compressões e rarefações tanto do plasma quanto das linhas de campo magnético. As ondas rápida e lenta são compressivas e geram choques.

