

# Física Experimental III

Primeiro semestre de 2020

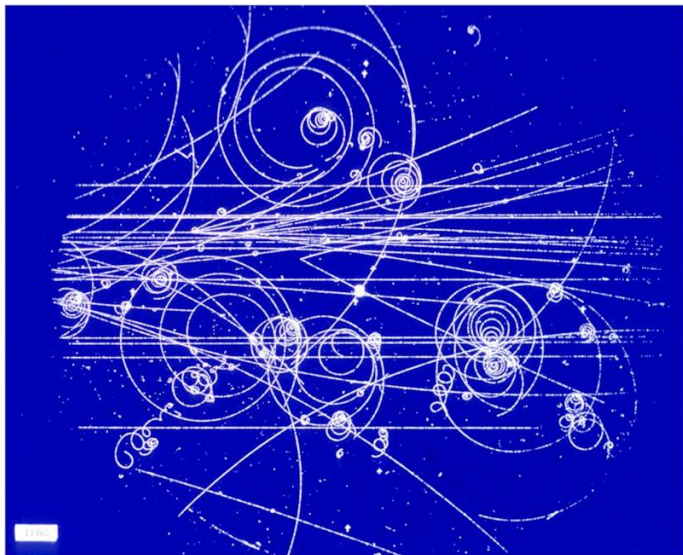
## Aula 2 - Experimento 3

Página da disciplina:

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=73158>

Outubro de 2020

# Experimento 3 - Estudo do movimento de partículas em campos eletromagnéticos



## 1 Experimento

- Experimento 3
- Partículas em campos eletromagnéticos
- O sistema que será estudado
- Modelo simplificado do movimento no campo magnético

## 1 Experimento

- Experimento 3
- Partículas em campos eletromagnéticos
- O sistema que será estudado
- Modelo simplificado do movimento no campo magnético

## 1 Experimento

- Experimento 3
  - Partículas em campos eletromagnéticos
  - O sistema que será estudado
  - Modelo simplificado do movimento no campo magnético

# Objetivos do experimento

- Estudar o movimento de uma partícula em um campo eletromagnético
- Caracterizar um seletor de velocidades do tipo filtro de Wien
  - ▶ Estudar uma configuração especial de campo EM
  - ▶ Estudar as propriedades e características deste filtro
  - ▶ Investigar as características experimentais que influenciam o funcionamento do filtro
  - ▶ Investigar as limitações experimentais e tratar um sistema não ideal do ponto de vista teórico

- 4 atividades

- ▶ Atividade 1

- ★ Estudo do movimento em um campo elétrico

- ▶ Atividade 2

- ★ Estudo do movimento em um campo magnético

- ▶ Atividade 3

- ★ Mapeamento dos campos elétrico e magnético e simulação do movimento das partículas

- ▶ Atividade 4

- ★ Calibração do filtro de velocidades

## 1 Experimento

- Experimento 3
- Partículas em campos eletromagnéticos
- O sistema que será estudado
- Modelo simplificado do movimento no campo magnético



- Qual é a força que atua em uma partícula que está imersa em um campo eletromagnético?

$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{Elétrica}} + \vec{F}_{\text{Magnética}}$$

- Se o campo elétrico e magnético são conhecidos

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} = q \left( \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

- A trajetória de uma partícula qualquer pode ser descrita resolvendo-se as equações de movimento

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

- No campo eletromagnético

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

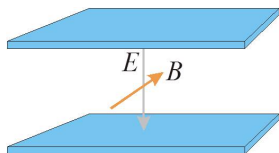
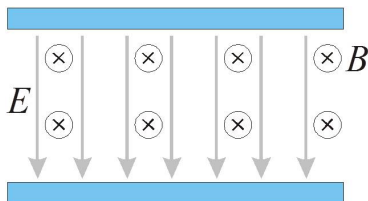
# O filtro de Wien

- O filtro de Wien consiste de uma configuração de campo elétrico e magnético cruzados (perpendiculares) e perpendiculares à velocidade inicial da partícula incidente

$$\vec{v}_0 = v_0 \hat{i}$$

$$\vec{B} = -B \hat{j}$$

$$\vec{E} = E \hat{k}$$



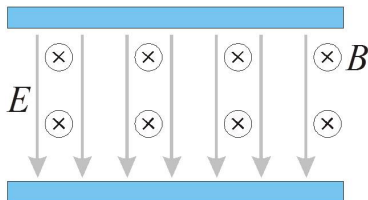
# O filtro de Wien

- O filtro de Wien consiste de uma configuração de campo elétrico e magnético cruzados (perpendiculares) e perpendiculares à velocidade inicial da partícula incidente

$$\vec{v}_0 = v_0 \hat{i}$$

$$\vec{B} = -B \hat{j}$$

$$\vec{E} = E \hat{k}$$



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

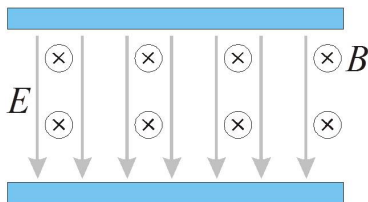
# O filtro de Wien

- O filtro de Wien consiste de uma configuração de campo elétrico e magnético cruzados (perpendiculares) e perpendiculares à velocidade inicial da partícula incidente

$$\vec{v}_0 = v_0 \hat{i}$$

$$\vec{B} = -B \hat{j}$$

$$\vec{E} = E \hat{k}$$



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

$$m \frac{d}{dt} \vec{v} = q (E - vB) \hat{k}$$

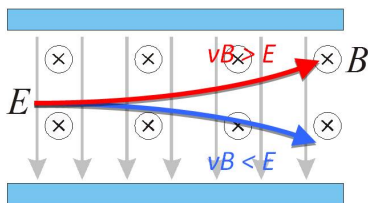
# O filtro de Wien

- O filtro de Wien consiste de uma configuração de campo elétrico e magnético cruzados (perpendiculares) e perpendiculares à velocidade inicial da partícula incidente

$$\vec{v}_0 = v_0 \hat{i}$$

$$\vec{B} = -B \hat{j}$$

$$\vec{E} = E \hat{k}$$



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

$$m \frac{d}{dt} \vec{v} = q (E - vB) \hat{k}$$

- Aceleração apenas na direção  $k$ . Sentido depende das intensidades de  $E$ ,  $v$  e  $B$

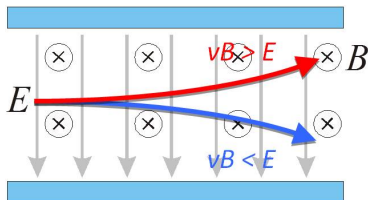
# O filtro de Wien

- O filtro de Wien consiste de uma configuração de campo elétrico e magnético cruzados (perpendiculares) e perpendiculares à velocidade inicial da partícula incidente

$$\vec{v}_0 = v_0 \hat{i}$$

$$\vec{B} = -B \hat{j}$$

$$\vec{E} = E \hat{k}$$



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

$$m \frac{d}{dt} \vec{v} = q (E - vB) \hat{k}$$

- Se  $v_0 = \frac{E}{B}$  a partícula não sofre desvio

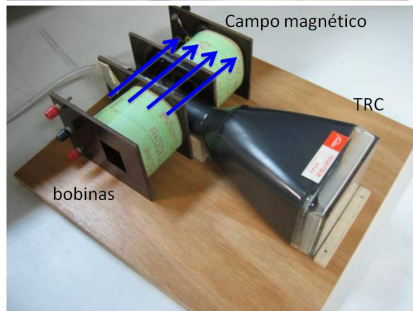
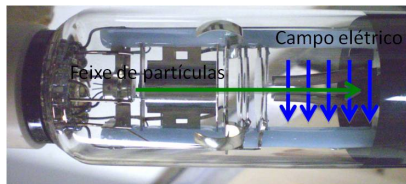
## 1 Experimento

- Experimento 3
- Partículas em campos eletromagnéticos
- **O sistema que será estudado**
- Modelo simplificado do movimento no campo magnético



# Nosso acelerador de partículas

- Tubo de raios catódicos (TRC)
  - ▶ Produz um feixe de elétrons acelerados e propicia a aplicação do campo elétrico
  - ▶ A tela é o detector de partículas
- Bobinas
  - ▶ Aplicação do campo magnético



# Como estudar um problema complexo?

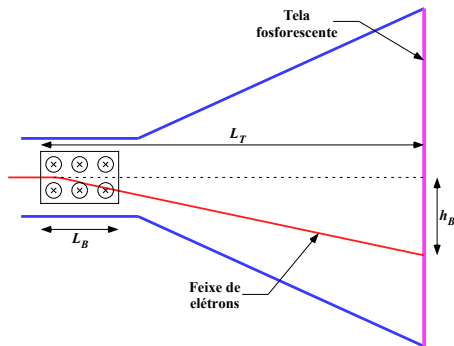
- O movimento de uma partícula no campo do filtro de Wien pode ser bastante complexo
  - ▶ Muitas forças envolvidas
  - ▶ Movimento não é unidimensional
- Como tornar o problema mais simples?
  - ▶ Tentar isolar contribuições dos diferentes fenômenos. A compreensão individual de cada um dos fenômenos torna o entendimento do todo mais fácil

- Isolar o campo elétrico e entender como é o movimento de partículas dentro desse campo
  - ▶ Podemos descrever o movimento dessas partículas teoricamente? Quais os compromissos adotados e as limitações teóricas e experimentais?
- Isolar o campo magnético e estudar como é o movimento dessas partículas dentro desse campo
  - ▶ Podemos descrever esse movimento teoricamente?
- Após entender cada fenômeno separadamente fica mais fácil entender o problema completo
  - ▶ Ligar, simultaneamente, os campos elétrico e magnético
  - ▶ Quais as grandezas que devemos observar para comparar com previsões teóricas?
  - ▶ Quais as limitações teóricas e experimentais?

## 1 Experimento

- Experimento 3
- Partículas em campos eletromagnéticos
- O sistema que será estudado
- Modelo simplificado do movimento no campo magnético

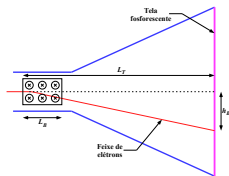
# Modelando o movimento dos elétrons no TRC



- Deslocamento vertical ( $z$ ):  $h_B \propto v_z \Delta t_T$
- Tempo:  $\Delta t_T \propto \frac{L_T}{v_x}$

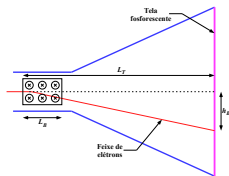
$$h_B \propto \frac{v_z}{v_x}$$

# Modelando o movimento dos elétrons no TRC



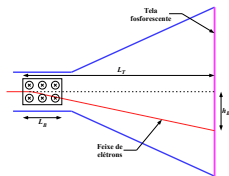
$$h_B \propto \frac{v_z}{v_x} = \frac{mv_z}{mv_x} = \frac{I_z}{mv_x} = \frac{F_B \Delta t_B}{mv_x}$$

# Modelando o movimento dos elétrons no TRC



$$h_B \propto \frac{v_z}{v_x} = \frac{mv_z}{mv_x} = \frac{I_z}{mv_x} = \frac{F_B \Delta t_B}{mv_x} = \frac{qv_x B \Delta t_B}{mv_x}$$

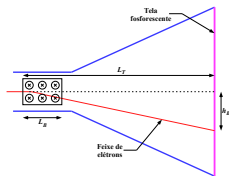
# Modelando o movimento dos elétrons no TRC



$$h_B \propto \frac{v_z}{v_x} = \frac{mv_z}{mv_x} = \frac{I_z}{mv_x} = \frac{F_B \Delta t_B}{mv_x} = \frac{qv_x B \Delta t_B}{mv_x} \propto \frac{qv_x i \frac{L_B}{v_x}}{mv_x}$$

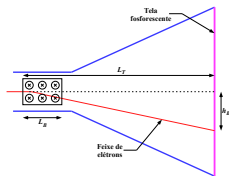


# Modelando o movimento dos elétrons no TRC



$$h_B \propto \frac{v_z}{v_x} = \frac{mv_z}{mv_x} = \frac{I_z}{mv_x} = \frac{F_B \Delta t_B}{mv_x} = \frac{qv_x B \Delta t_B}{mv_x} \propto \frac{qv_x i \frac{L_B}{v_x}}{mv_x} \propto \frac{qi}{mv_x}$$

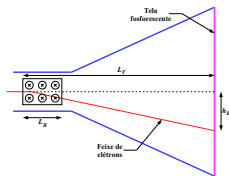
# Modelando o movimento dos elétrons no TRC



$$h_B \propto \frac{v_z}{v_x} = \frac{mv_z}{mv_x} = \frac{I_z}{mv_x} = \frac{F_B \Delta t_B}{mv_x} = \frac{qv_x B \Delta t_B}{mv_x} \propto \frac{qv_x i \frac{L_B}{v_x}}{mv_x} \propto \frac{qi}{mv_x}$$

$$qV_{AC} = \frac{1}{2}mv_x^2 \Rightarrow mv_x = \sqrt{2mqV_{AC}}$$

# Modelando o movimento dos elétrons no TRC

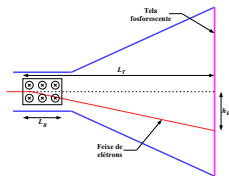


$$h_B \propto \frac{v_z}{v_x} = \frac{mv_z}{mv_x} = \frac{I_z}{mv_x} = \frac{F_B \Delta t_B}{mv_x} = \frac{qv_x B \Delta t_B}{mv_x} \propto \frac{qv_x i \frac{L_B}{v_x}}{mv_x} \propto \frac{qi}{mv_x}$$

$$qV_{AC} = \frac{1}{2}mv_x^2 \Rightarrow mv_x = \sqrt{2mqV_{AC}}$$

$$h_B \propto \frac{qi}{mv_x} = \frac{qi}{\sqrt{2mqV_{AC}}}$$

# Modelando o movimento dos elétrons no TRC

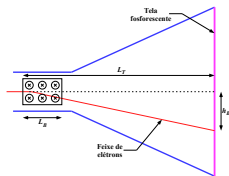


$$h_B \propto \frac{v_z}{v_x} = \frac{mv_z}{mv_x} = \frac{I_z}{mv_x} = \frac{F_B \Delta t_B}{mv_x} = \frac{qv_x B \Delta t_B}{mv_x} \propto \frac{qv_x i \frac{L_B}{v_x}}{mv_x} \propto \frac{qi}{mv_x}$$

$$qV_{AC} = \frac{1}{2}mv_x^2 \Rightarrow mv_x = \sqrt{2mqV_{AC}}$$

$$h_B \propto \frac{qi}{mv_x} = \frac{qi}{\sqrt{2mqV_{AC}}} = \sqrt{\frac{q}{2m}} \frac{i}{\sqrt{V_{AC}}}$$

# Modelando o movimento dos elétrons no TRC

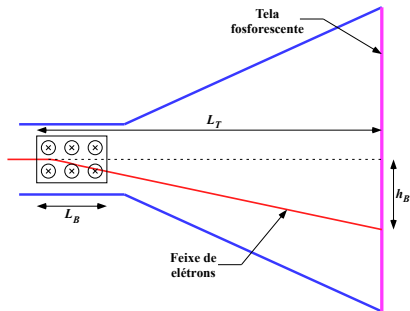


$$h_B \propto \frac{v_z}{v_x} = \frac{mv_z}{mv_x} = \frac{I_z}{mv_x} = \frac{F_B \Delta t_B}{mv_x} = \frac{qv_x B \Delta t_B}{mv_x} \propto \frac{qv_x i \frac{L_B}{v_x}}{mv_x} \propto \frac{qi}{mv_x}$$

$$qV_{AC} = \frac{1}{2}mv_x^2 \Rightarrow mv_x = \sqrt{2mqV_{AC}}$$

$$h_B \propto \frac{qi}{mv_x} = \frac{qi}{\sqrt{2mqV_{AC}}} = \sqrt{\frac{q}{2m}} \frac{i}{\sqrt{V_{AC}}} \propto \frac{i}{\sqrt{V_{AC}}}$$

# Modelando o movimento dos elétrons no TRC



$$h_B \propto \frac{i}{\sqrt{V_{AC}}}$$

$$h_B = C \frac{i}{\sqrt{V_{AC}}}$$

- $C$  depende da geometria do sistema (razão carga/massa)

# Medidas que podemos efetuar

- Quais as grandezas que temos controle e que podemos medir?
  - ▶ Tensão de aceleração dos elétrons
    - ★ Ou velocidade, facilmente calculada
  - ▶ Corrente nas bobinas
    - ★ Proporcional ao campo magnético aplicado
- Quais as grandezas que podemos apenas medir?
  - ▶ Posição do feixe de elétrons na tela do TRC