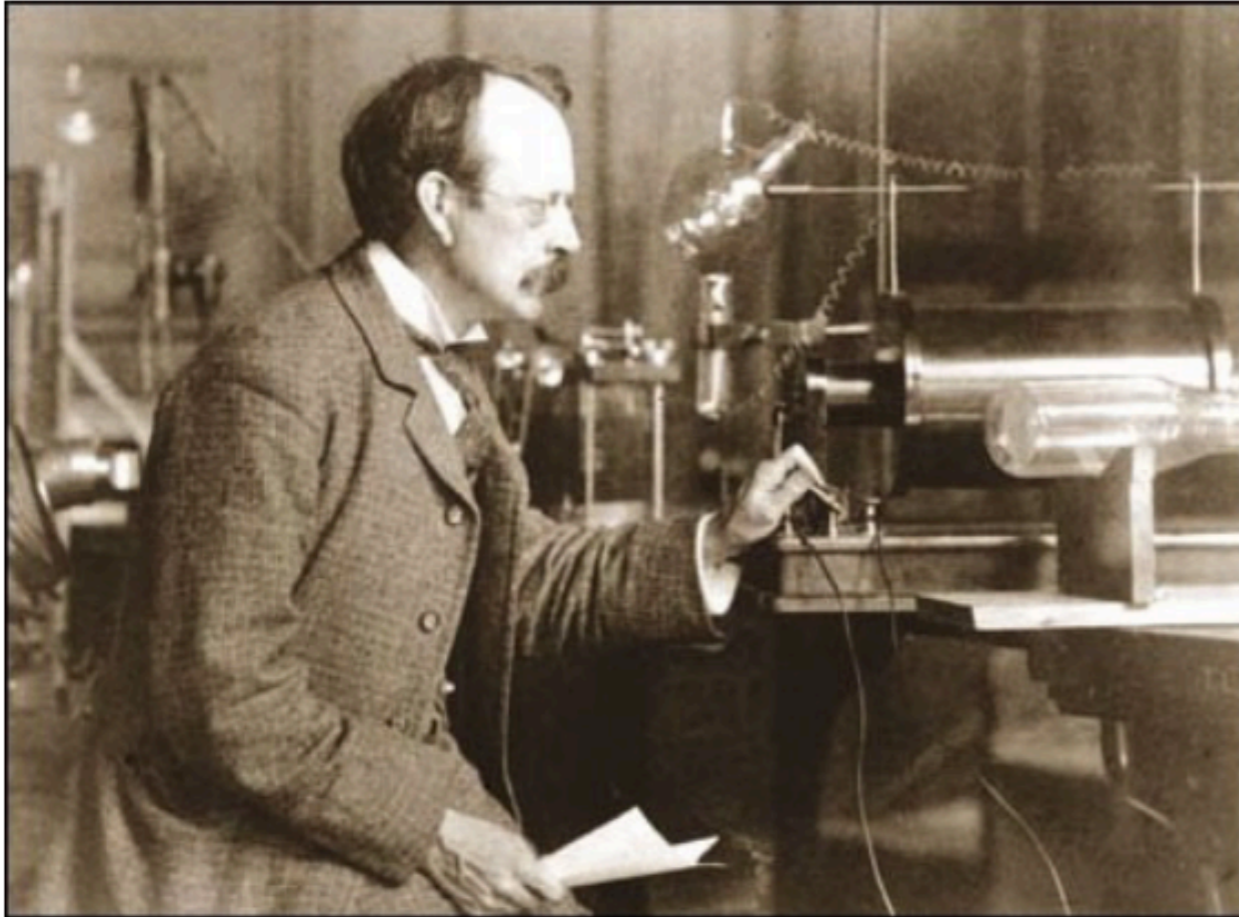




# Laboratório de Estrutura da Matéria I

## Experimento $e/m_e$

# Carga elétrica em átomos

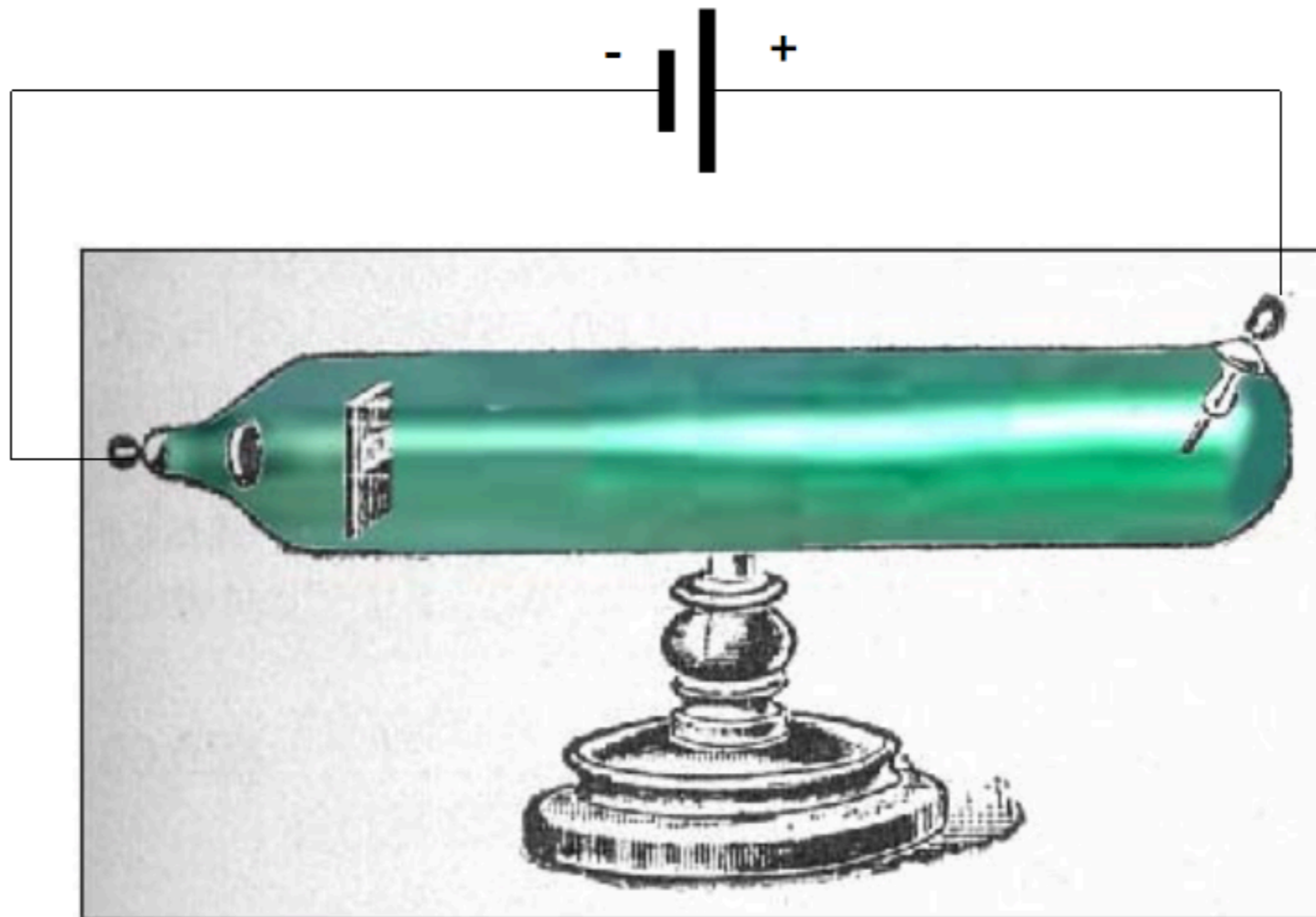


Joseph John Thomson (1856-1940)

- Elaborou experiências para o estudo dos raios catódicos.
- Mostrou que a corrente elétrica era constituída de partículas de massa  $m$  e carga elétrica  $e$ .

# Raios Catódicos

- Em 1838 Michael Faraday mostrou que quando aplica-se uma alta diferença de potencial em um tubo com ar rarefeito, um estranho arco de luz é gerado entre o cátodo e o ânodo.
- A origem destes *raios catódicos*, se são ondas ou partículas, permaneceu obscura até o final daquele século.



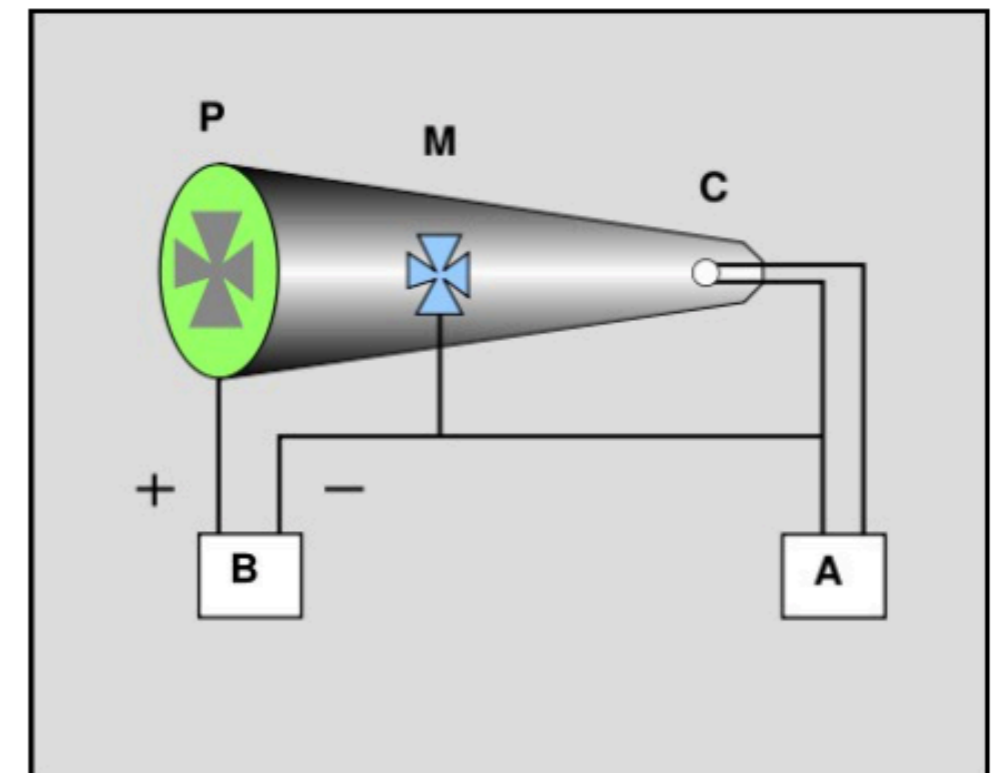


# Propriedades dos Raios Catódicos

Uma possibilidade era que estes raios fossem ondas viajando em um hipotético meio chamado éter. Naquela época, muitos físicos acreditavam que o éter era necessário para a propagação das ondas de luz no espaço aparentemente vazio.

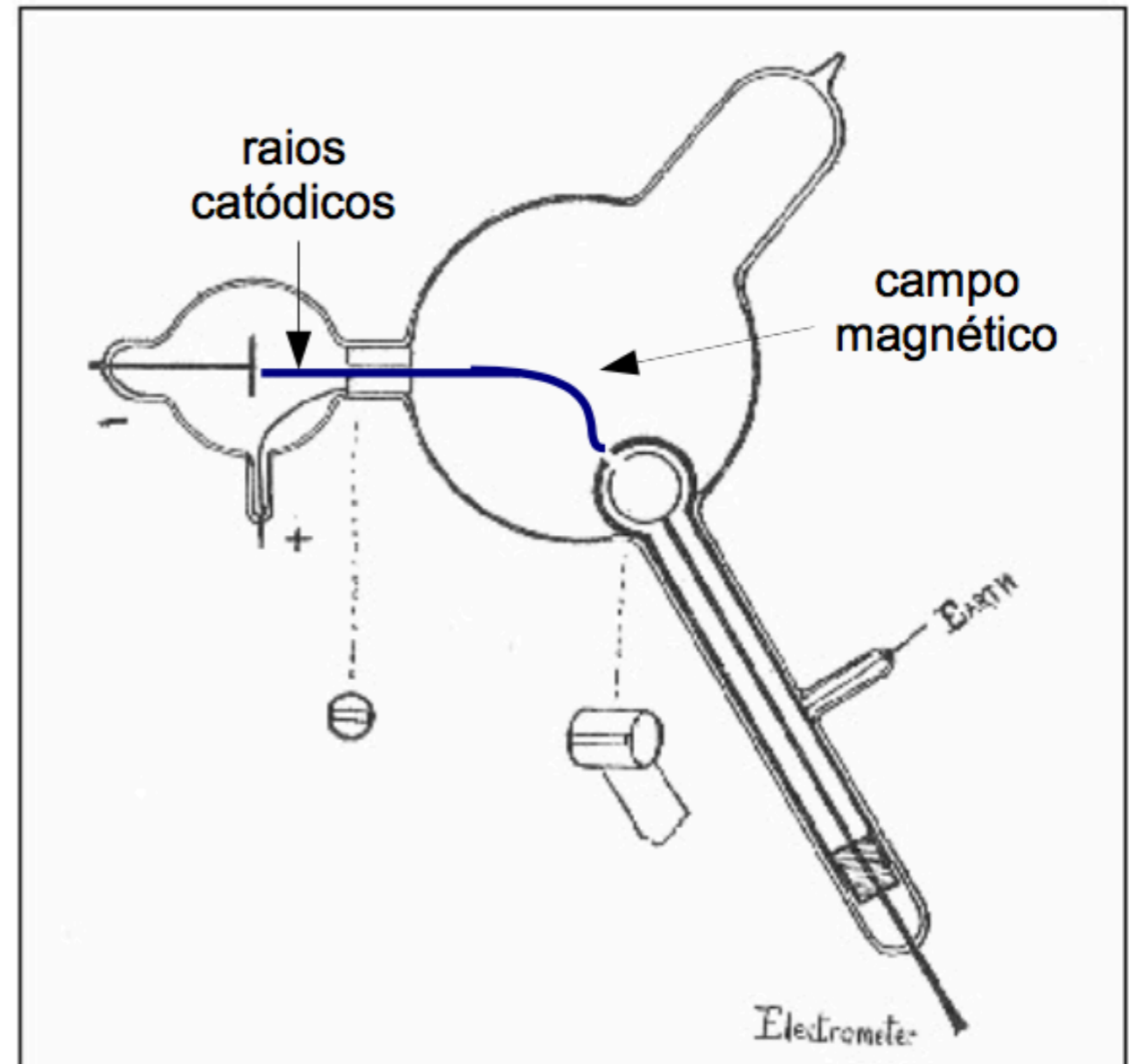
Outra possibilidade era que os raios catódicos fossem constituídos de partículas materiais. Porém, muitos físicos, incluindo J.J. Thomson, pensavam que as partículas da matéria poderiam ser algum tipo de estrutura vindas do éter. Isto fazia estas interpretações não muito diferentes.

- **Como partículas:** percorrem linhas retas – produzem uma sombra quando obstruídas por um objeto – podem passar por folhas finas sem perturbá-las.
- **Como ondas:** Deixam a superfície do cátodo em ângulos de 90 graus – são deflexionados por campos magnéticos - não eram deflexionados por campos elétricos.



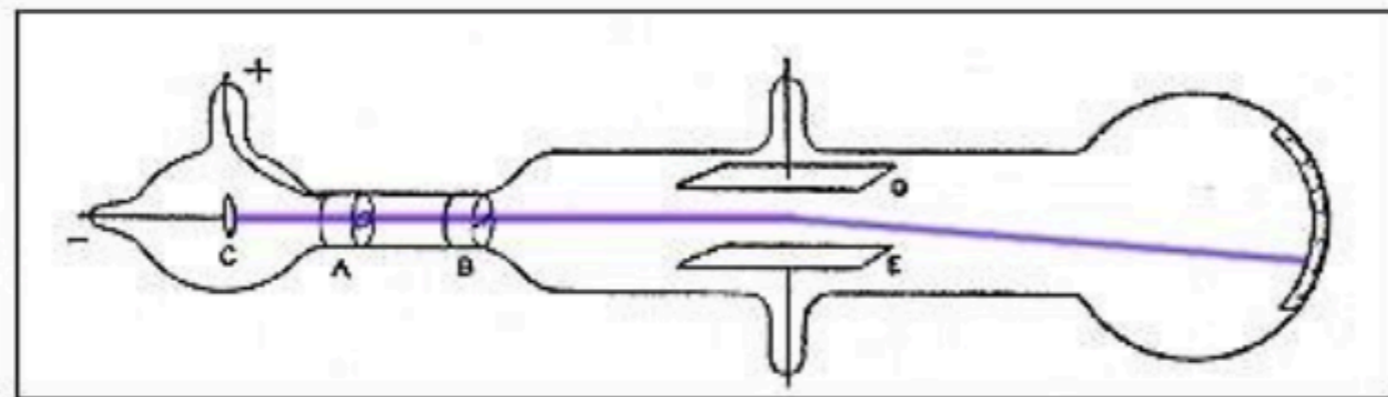
# Primeiro Experimento de Thomson

- Neste experimento, Thomson testou a possibilidade de separar a carga elétrica dos raios catódicos.
- Através da aplicação de um campo magnético aos raios catódicos mediu a carga elétrica através de um eletrômetro.
- Ele não encontrou nenhuma forma de dissociar a carga elétrica dos raios catódicos.



# Segundo Experimento de Thomson

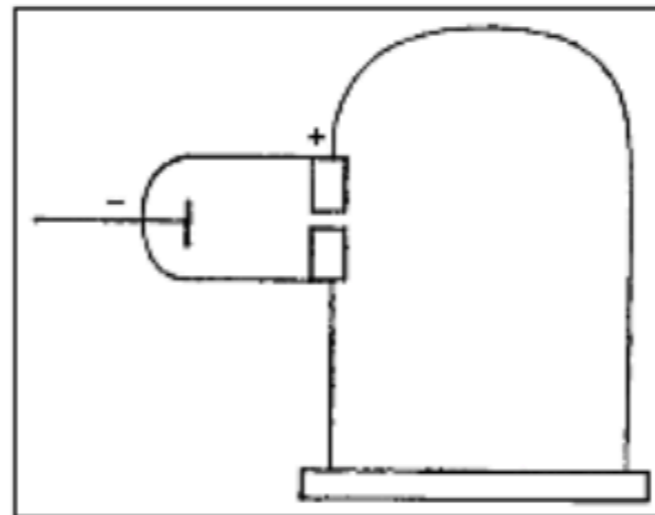
- Caso os raios catódicos fossem compostos por cargas negativas eles deveriam sofrer deflexão com a aplicação de um campo elétrico. Esta observação não havia sido verificada por outros experimentadores.
- Thomson imaginou, então, a situação em que os raios estivessem envoltos por um condutor. Neste caso, os raios não seriam deflexionados. Isto poderia estar acontecendo se os próprios raios produzissem esta “blindagem” através da interação com o gás dentro da câmara.
- Construindo um tubo com alto vácuo (que lhe rendeu grandes dores de cabeça), ele finalmente conseguiu observar a deflexão dos raios catódicos e concluiu que estes deveriam mesmo ser compostos por cargas negativas.



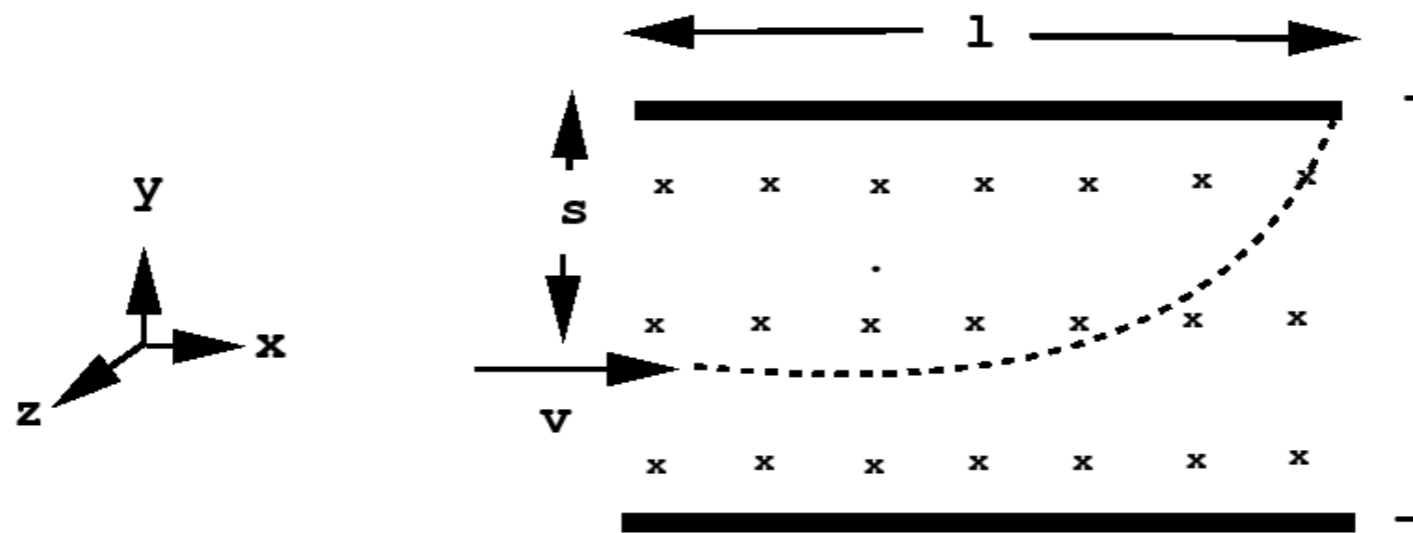


# Terceiro Experimento de Thomson

- A conclusão do segundo experimento levou a outra pergunta. Se são cargas negativas, o que seriam afinal? Moléculas, átomos ou algo ainda menor?
- O terceiro experimento foi projetado para verificar as propriedades básicas destas partículas e responder (ao menos parcialmente) a estas perguntas.
- Ele não tinha como medir a massa destas partículas, mas conseguia medir quanto o feixe de partículas se curvava com um campo magnético conhecido, além da energia que elas carregavam.
- Com os dados deste experimento ele pôde calcular a razão da massa das partículas pela sua carga elétrica, utilizando diversos tubos e diversos gases.
- A conclusão era espantosa. A relação carga-massa era milhares de vezes maior que a do hidrogênio carregado. Isto indicava uma carga elétrica extremamente alta ou uma massa muito pequena.



# Determinação da razão carga-massa do elétron



$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$F_m = -evB$$

A aceleração ao qual está submetida a partícula é portanto  $a = v^2/r$

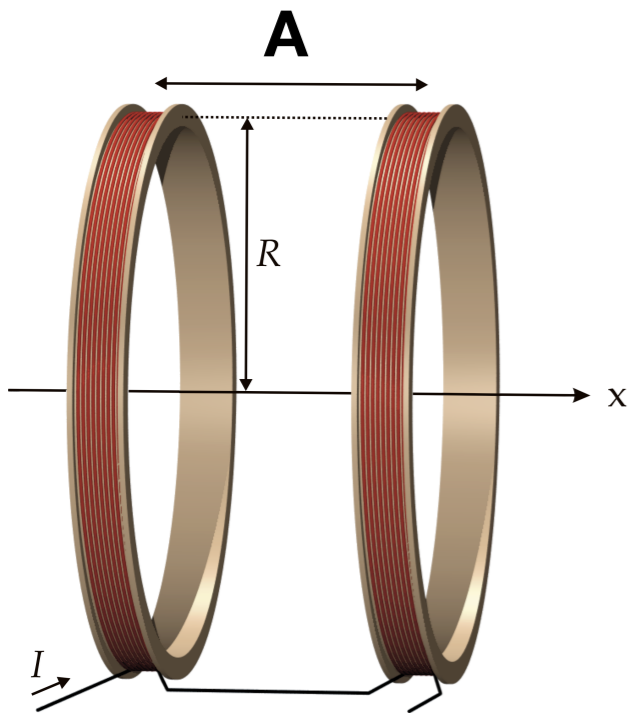
Logo temos que  $evB = mv^2/r$

ou

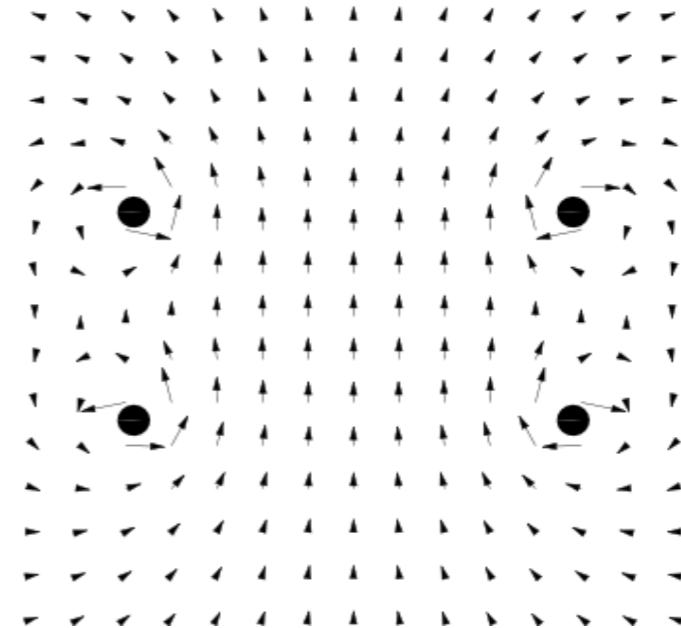
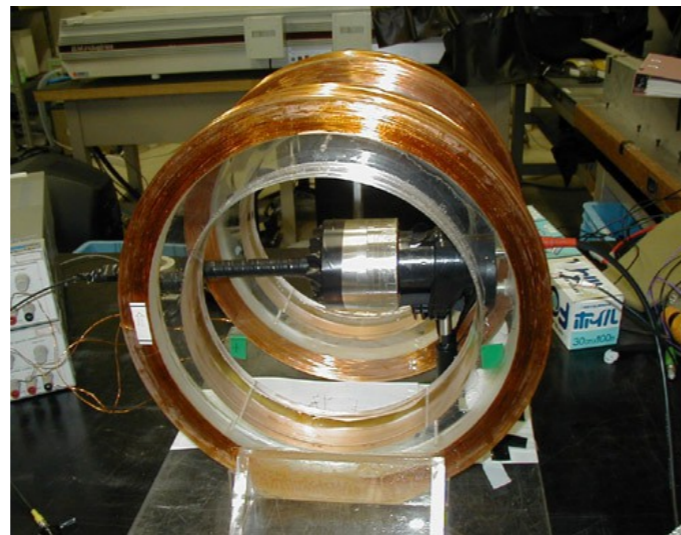
$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Br}$$



# O campo magnético



Pode ser produzido por uma Bobina de Helmholtz



O campo magnético na região entre as bobinas é praticamente uniforme e dado por

$$B = \frac{[N\mu_0]IR^2}{[R^2 + (A/2)^2]^{3/2}}$$

Considerando  $A = R$  obtemos que

$$B = \frac{[N\mu_0]I}{(5/4)^{3/2}R}$$

**A:** distância entre as bobinas

$A = R$   
por construção do aparelho



# Energia do elétron e resultado da relação

Mas a energia de um elétron acelerado por uma diferença de potencial  $V$  é dada por

$$U = eV$$

E por conservação de energia, temos então que  $eV = \frac{1}{2}mv^2$

Logo  $v = \left(\frac{e}{m}2V\right)^{1/2}$

Ao substituir  $v$  e  $B$  na relação:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Br} = \frac{125VR^2}{32(N\mu_0Ir)^2} = \mathcal{K} \frac{V}{I^2r^2}$$

# Objetivo

- Obter a razão  $e/m_e$  a partir da medida de tensão dos eletrodos, corrente elétrica nas bobinas e raio da trajetória do feixe;
- Comparar com o valor de referência:

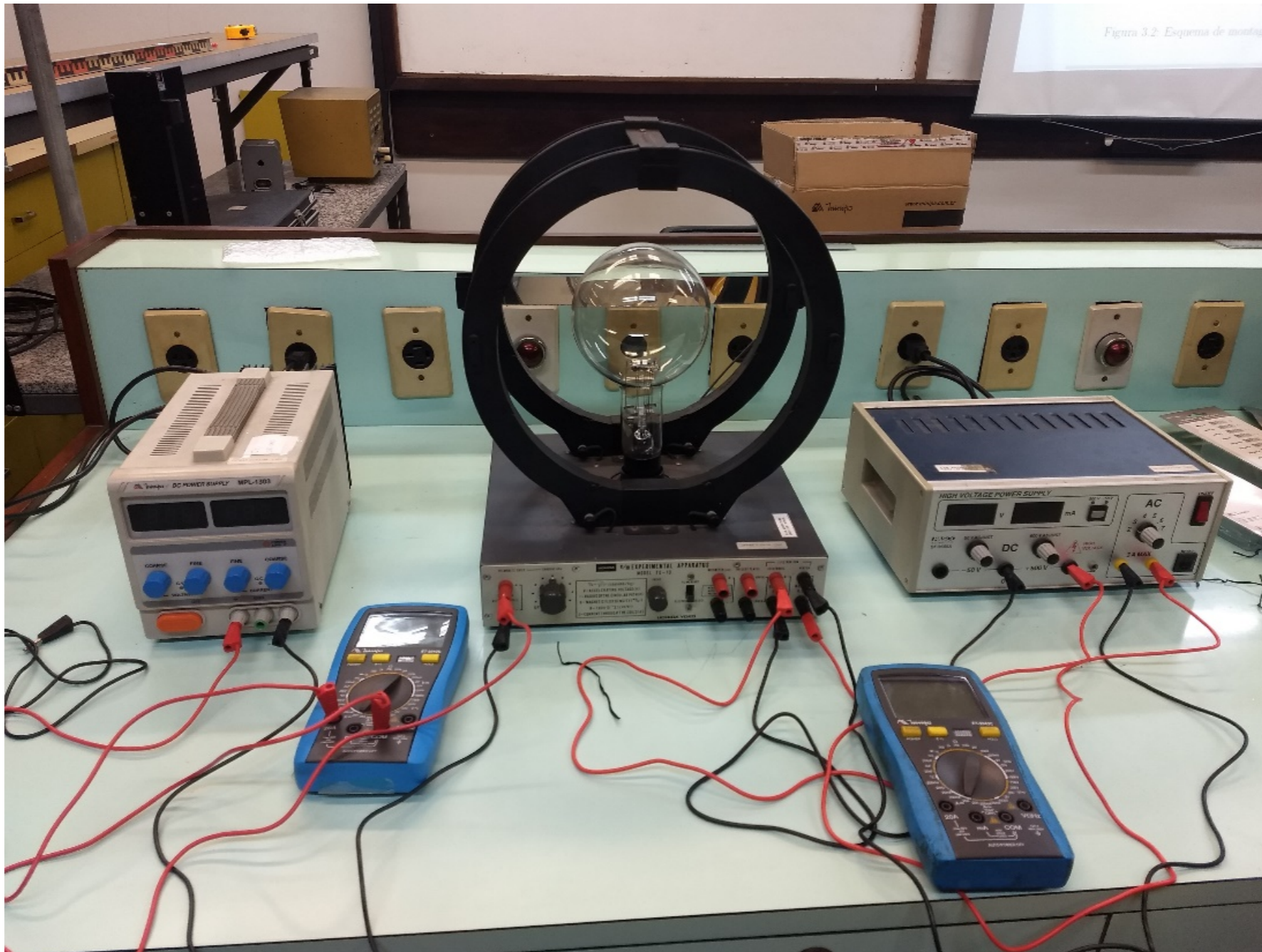
$$\frac{e}{m} = (1,75881962 \pm 0,000000053) \times 10^8 \text{ Coulomb/g}$$

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Br} = \frac{125VR^2}{32(N\mu_0Ir)^2} = \mathcal{K} \frac{V}{I^2r^2}$$

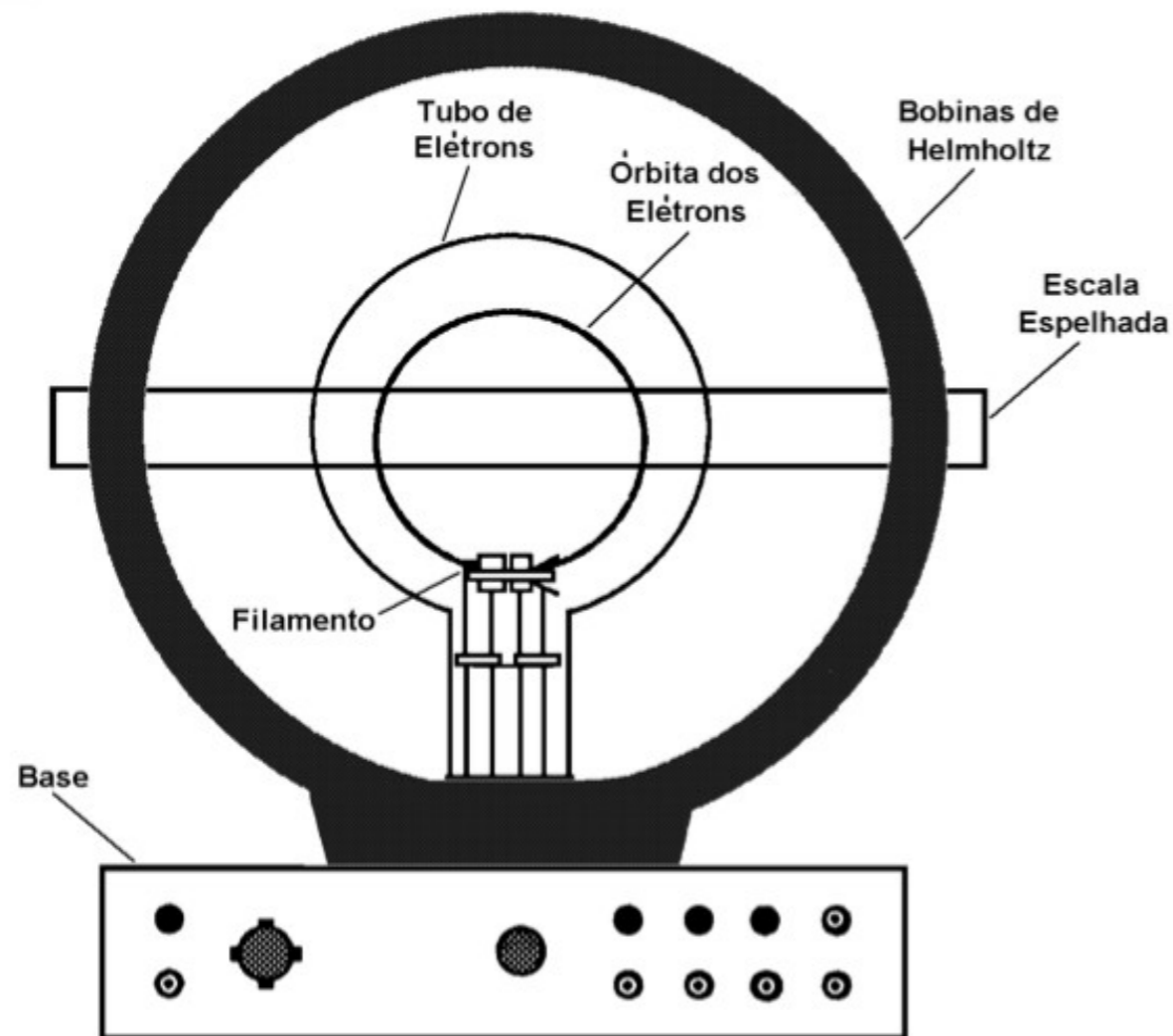
$$\frac{e}{m} = \mathcal{K} \frac{V}{I^2r^2} \Rightarrow \mathcal{K}V = \frac{e}{m} I^2r^2$$



# Montagem



# Aparelho: Pasco Model SE-9638

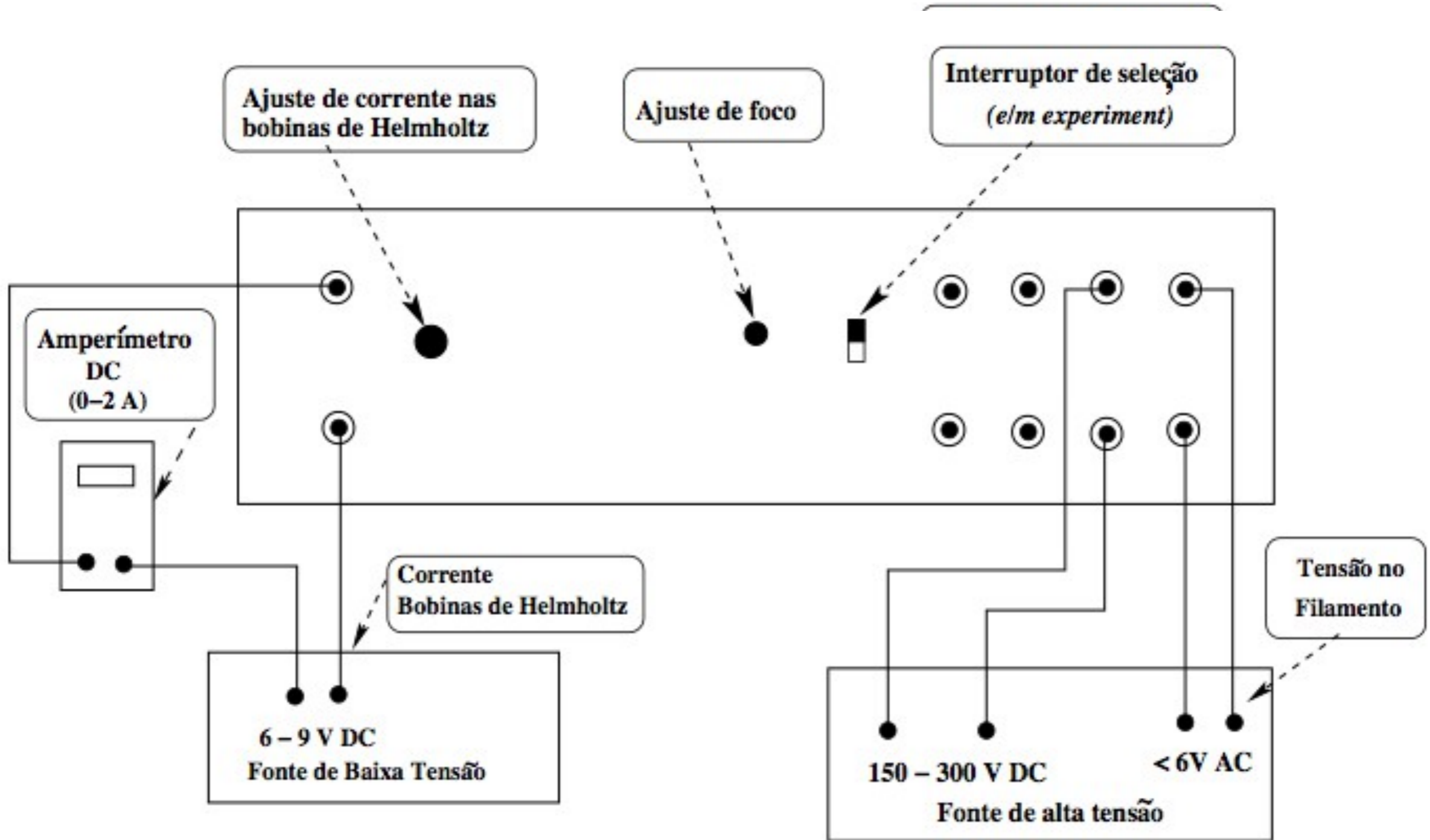


- Tubo com gás Hélio a baixa pressão  $P = 10^{-2}$  mm Hg
- Bobinas de Helmholtz com  $R = A = 15$  cm e  $N = 130$  espiras:  
 $\Rightarrow B$  (Tesla) =  $7.80 \times 10^{-4} I$  (Ampère)
- Escala espelhada para medir o raio da trajetória circular

$$\mathcal{K} = \frac{125R^2}{32N^2\mu_0^2}$$

$$\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

# Conexões





# Medição

- Tabela com corrente  $I$ , tensão  $V$  e raio medido a esquerda e direita  $r_e$  e  $r_d$ ;
- Fazer 5 medidas;

- | Medida | Corrente (A) | Tensão (V) | raio à esquerda (cm) | raio à direita (cm) |
|--------|--------------|------------|----------------------|---------------------|
| 1      | 1,28         | 193        | 4,5                  | 4,4                 |
| 2      | 1,40         | 252        | 4,3                  | 4,2                 |
| 3      | 1,63         | 285        | 4,4                  | 4,2                 |

# Gráficos e Análise

- Se deixaram o raio  $r$  constante:

$$\mathcal{K} = \frac{125R^2}{32N^2\mu_0^2}$$

- Graficar  $\mathcal{K}V \times I^2$
- Fazer MMQ e identificar  $e/m$  como o coeficiente angular
- Se não conseguiram deixar  $r$  fixo, pode ser feito o gráfico

$$\mathcal{K}V \times I^2 r^2. \quad \mathcal{K}V = \frac{e}{m} I^2 r^2$$

# Propagação de erro

Para simplificar a análise da propagação de erro podemos expressar a razão carga-massa como uma função da tensão, a corrente ao quadrado e o raio ao quadrado.

$$\frac{e}{m_e} = \frac{125VR^2}{32(N\mu_0Ir)^2}$$

$$\frac{e}{m_e} = f(V, I^2, r^2) = \mathcal{K} \frac{V}{I^2 r^2}$$

As incertezas instrumentais das três medidas diretas não estão correlacionadas !

$$\frac{\sigma_f^2}{f^2} = \frac{\sigma_V^2}{V^2} + \frac{\sigma_{I^2}^2}{(I^2)^2} + \frac{\sigma_{r^2}^2}{(r^2)^2}$$

Usando

$$g(x) = x^2 \Rightarrow \sigma_g = \sigma_{x^2} = 2x\sigma_x$$

$$\frac{\sigma_f^2}{f^2} = \frac{\sigma_V^2}{V^2} + \frac{4\sigma_I^2}{I^2} + \frac{4\sigma_r^2}{r^2}$$

usar para obter a incerteza da relação  $e/m_e$



# Organizando os dados

- Tabela com corrente  $I$ , tensão  $V$  e raio medido  $r$ .
- Adicionar colunas com a incerteza instrumental de cada medida:  
Erro segundo o manual do multímetro Minipa ET-2042C
  - Corrente: Escala 20 A com resolução 10 mA (ou 0,01 A)
  - $\sigma_I = 2\% (\text{medida}) + 5 * (\text{digito}) = 2\% * I + 0,05 \text{ A}$
  - Tensão: Escala 1000V com resolução 1Volt
  - $\sigma_V = 1\% (\text{medida}) + 5 * (\text{digito}) = 1\% * V + 5 \text{ Volt}$
- Incerteza do raio: para sermos conservadores vamos considerar uma incerteza de aproximadamente a largura do feixe,  $\sigma_r = 2\text{mm}$  (em vez de meio milímetro que é  $1/2$  da resolução da régua espelhada)