

# Laboratório de Física Moderna

## DUALIDADE ONDA-PARTÍCULA

### MEDIDA DA RELAÇÃO CARGA/MASSA DO ELÉTRON (Experiência A.1)

#### PRINCÍPIOS E OBJETIVOS

A dualidade onda-partícula para o elétron é explorada em duas experiências distintas. Na primeira experiência (série A), feixes de elétrons são acelerados por um campo elétrico e penetram em uma região onde existe um campo magnético uniforme que pode ter direção tornada perpendicular à direção do seu movimento. A partir do raio de curvatura da trajetória descrita pelos elétrons é então possível a determinação da relação  $e/m_e$ , ou seja, da *carga específica* do elétron. O elétron, neste experimento, exibe o comportamento corpuscular. Na segunda experiência (série B), será observado o comportamento ondulatório de feixes eletrônicos.

#### TÓPICOS RELACIONADOS

Dualidade onda-partícula, ondas de matéria, raios catódicos, força de Lorentz, carga e massa do elétron, trajetória de uma partícula carregada submetida a campos elétricos e magnéticos, bobinas de Helmholtz.

#### EQUIPAMENTOS

Tubo de feixe colimado de elétrons, em vácuo, com pequena pressão de átomos de argônio, para acompanhar visualmente o feixe de elétrons por excitação dos átomos de Ar, com posterior emissão de luz visível e com postes fosforescentes para definição de raio de giro em quatro valores  $r = 2, 3, 4$  e  $5$  cm. Bobinas de Helmholtz de diâmetro 40 cm, cada bobina com 154 espiras para estabelecer o campo magnético que produzirá a força de Lorentz responsável pelo giro do elétron. Fonte de tensão com 3 saídas independentes: 0 a 300 Vdc (tensão de aceleração dos elétrons); 0 a -50 Vdc (tensão de colimação do feixe); 6,3 Vac (tensão de filamento). Fonte de tensão 0 a 30 Vdc @ 6 A (alimentação das bobinas). Multímetros 3½ dígitos (corrente e tensão). Cabos de conexão.

#### TAREFAS EXPERIMENTAIS PARA MEDIDA DA RAZÃO $e/m_e$

1. Observar a trajetória de um feixe eletrônico submetido a campos elétricos e magnéticos. Verificar trajetórias helicoidais e trajetórias perfeitamente circulares.
2. Variar a tensão de aceleração do feixe eletrônico (e portanto o campo elétrico) e a corrente através das bobinas de Helmholtz (e portanto o campo magnético), medindo-as, para que produzam os diferentes raios de curvatura das trajetórias registradas através de colisões dos elétrons com postes fosforescentes.
3. Obter a relação  $e/m_e$  para o elétron.

## PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

1. O arranjo experimental e as conexões elétricas encontram-se esquematizados nas Figs. 1 e 2, respectivamente. Verifique atentamente esses esquemas e procure entender a montagem em detalhe.
2. No arranjo de Helmholtz, as duas bobinas idênticas são posicionadas paralelamente de forma que a distância entre seus planos seja igual ao seu raio comum. Para garantir que as correntes elétricas atravessando as duas bobinas sejam exatamente as mesmas é conveniente conectá-las em série.
3. Antes de aplicar qualquer tensão ao filamento, verifique se os potenciômetros na fonte de tensão de 600V que regulam as saídas 0 a  $-50$  V e 0 a  $+300$  V estão ajustados no mínimo (zero). Isso evita a presença de qualquer tensão de aceleração ( $V_A$ ) entre o catodo e o anodo quando o filamento for conectado para aquecimento prévio.

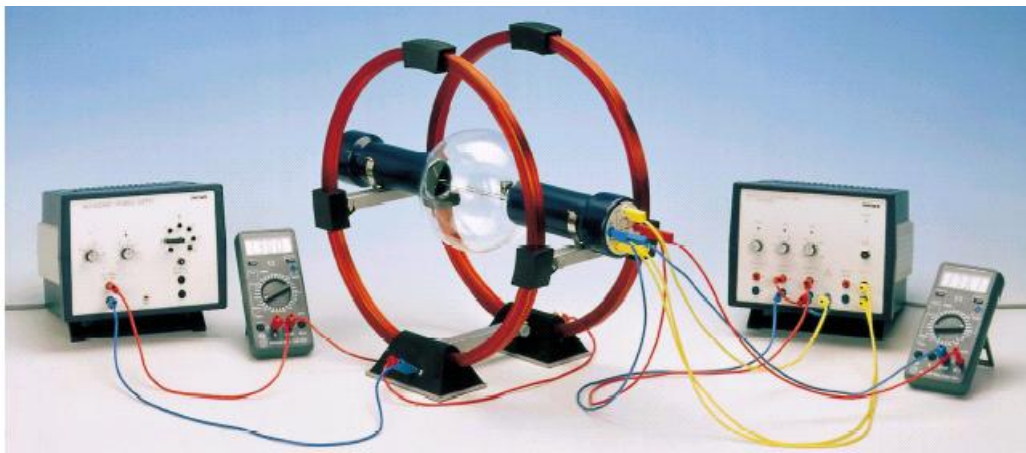


Fig. 1: Ilustração da montagem experimental.

4. Conecte a tensão de  $6,3$  Vac para alimentar o filamento emissor de elétrons. Para permitir o aquecimento desejado do filamento, espere pelo menos um minuto antes de acionar os potenciômetros 0 a  $-50$  V e 0 a  $+300$  V, que regulam as tensões de focalização e de aceleração, respectivamente.
5. A seguir, um feixe azul-violeta deverá ser visível, especialmente com a sala escurecida, graças à ionização de átomos de Ar presentes no gás em baixa pressão dentro do tubo. Ajuste as tensões de focalização e aceleração de maneira a obter um feixe estreito e bem definido. A intensidade do feixe não é em geral otimizada até que o aquecimento do filamento tenha se completado.

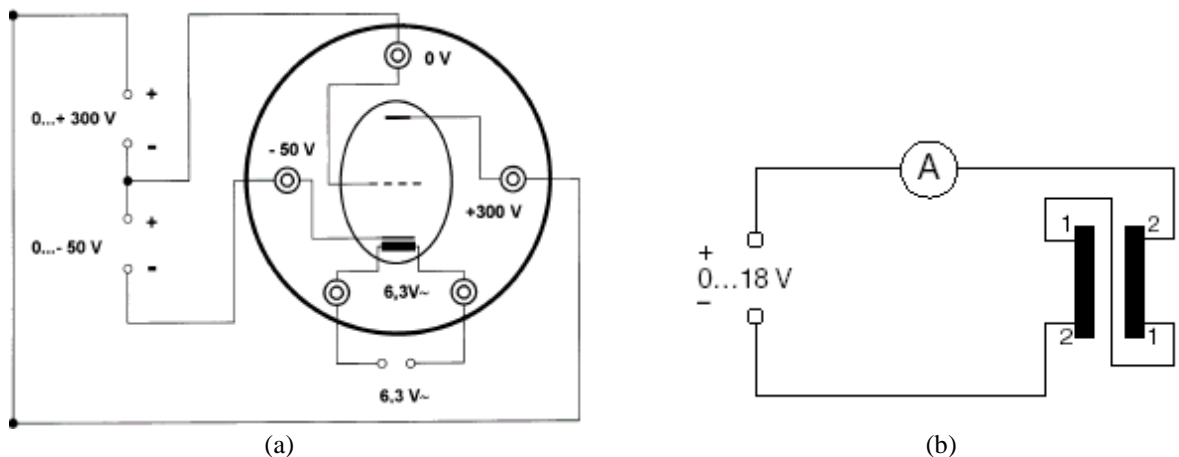


Fig. 2: Conexões elétricas para alimentação (a) do tubo de feixe de elétrons e (b) das bobinas de Helmholtz.

6. Acione a tensão de alimentação das bobinas de Helmholtz, sempre observando que a corrente nelas não deve ultrapassar o valor máximo de 5 A.
7. Observe atentamente como a trajetória do feixe eletrônico dentro do tubo é modificada pela atuação do campo magnético. Gire cuidadosamente o tubo no seu suporte e observe o que acontece. Faça o mesmo invertendo agora a direção do campo magnético.
8. Posicione o tubo de forma que o campo magnético gerado pelas bobinas seja exatamente perpendicular à direção de emissão do feixe dentro do tubo. Nessas condições a trajetória descrita pelo feixe deverá ser circular, formando uma circunferência fechada quando a intensidade do campo magnético for suficientemente alta.
9. Ajuste a corrente elétrica  $i$  através das bobinas de forma que o feixe passe exatamente por um dos marcos luminosos (postes fosforescentes) posicionados dentro do tubo. Em tal situação apenas metade do traço circular fica visível e então o raio da circunferência descrita ( $r$ ) assumirá um valor igual a 2, 3, 4 ou 5 cm (valores previamente determinados com acurácia da ordem de 1 %).
10. Varie a tensão de aceleração  $V_A$  entre 100 e 300 V, ajustando e medindo a corrente  $i$  necessária para manter o feixe sobre cada um dos marcos correspondentes aos quatro valores de  $r$  acima. Registre em torno de 12 pontos para cada marco.
11. Utilize um gaussímetro para avaliar o campo magnético gerado pelas bobinas de Helmholtz na região entre as bobinas, sem a presença do tubo, para efeitos de comparação entre o valor previsto teoricamente, o qual será usado por você. Com as dimensões das bobinas utilizadas deve-se obter um campo em torno de 2,75 mT no ponto médio entre as bobinas para uma corrente de 4 A. Faça essa medida. Verifique a seguir a homogeneidade do campo, movimentando e girando a ponta de prova do gaussímetro ao longo das três direções perpendiculares na região de interesse, procurando varrer os oito vértices de um cubo imaginário de aresta  $a = 10$  cm.

## CUIDADOS QUE DEVEM SER TOMADOS EM LABORATÓRIO

1. Procure compreender as conexões elétricas no sistema e verificar (e prevenir) a ocorrência de qualquer erro de montagem, conferindo sempre com os esquemas apresentados neste roteiro.  **Tome muito cuidado para não conectar aparelhos de 127 Vac em tomadas de 220 Vac!**
2. Mantenha os potenciômetros 0...-50 V e 0...+300 V sempre na posição de mínimo, exceto quando as medidas estiverem sendo coletadas, o que prolonga consideravelmente a vida útil do tubo.
3. Observe atentamente o período de aquecimento do filamento antes de acionar os potenciômetros 0...-50 V e 0...+300 V, como descrito na seção “Procedimentos em Laboratório”.
4. Não permita jamais que a corrente através das bobinas de Helmholtz ultrapasse o valor máximo previsto de 5 A (atualmente nossas fontes permitem chegar a 6 A).

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. Um elétron com massa  $m_e$  e carga elétrica  $e$ , acelerado por uma diferença de potencial igual a  $V_A$ , adquire uma velocidade de magnitude  $v$  e correspondente energia cinética dada por

$$e V_A = \frac{1}{2} m_e v^2. \quad (1)$$

2. A aplicação de um campo magnético  $\vec{B}$  leva ao surgimento da força de Lorentz

$$\vec{F} = -e \vec{v} \times \vec{B}. \quad (2)$$

3. Se  $\vec{B}$  for uniforme e  $\vec{v}$  for perpendicular a  $\vec{B}$ , o feixe descreverá uma trajetória circular cujo raio  $r$  será dado por

$$r = \frac{m_e v}{e B}. \quad (3)$$

4. A partir das Eqs. 1 e 3 obtém-se a relação  $e/m_e$ :

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2V_A}{B^2 r^2}. \quad (4)$$

5. Sendo, em cada bobina,  $N$  é o número de espiras e  $i$  a corrente que flui (suposta igual), e  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo e  $R$  é o raio médio comum das bobinas, o campo magnético gerado pelas bobinas de Helmholtz no ponto médio sobre o eixo comum das bobinas pode ser obtido pela expressão abaixo:

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 N i}{R}. \quad (5)$$

6. No arranjo de Helmholtz, as duas bobinas idênticas são posicionadas paralelamente de forma que a distância entre seus planos seja igual ao seu raio comum. Para a montagem empregada nessa experiência temos  $R = 20$  cm (confira!!).
7. A montagem em suspensão das bobinas permite a contagem do número de espiras, tendo-se em conta que as camadas paralelas de fios de cobre estão ligeiramente deslocadas lateralmente entre si (ver Fig. 3). Cada bobina é constituída de 14 camadas de fios de cobre, com cada camada contendo 11 espiras, o que dá um total de  $N = 154$  espiras (confira!!).

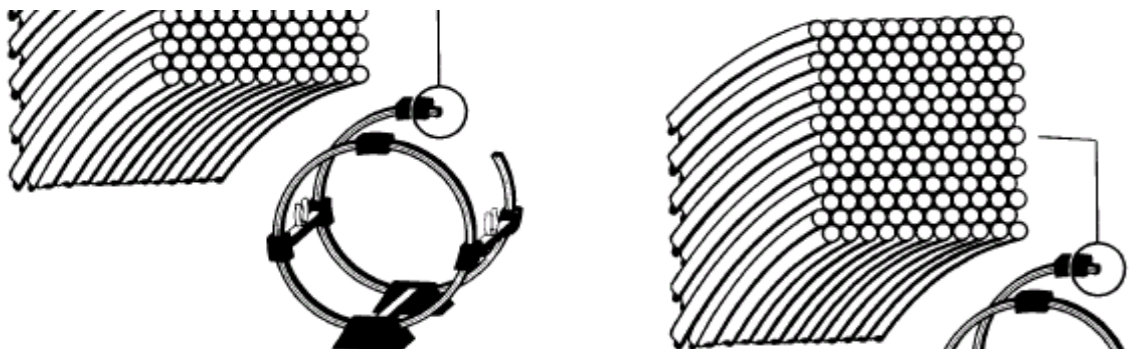


Fig. 3: Bobinas de Helmholtz com sua seção transversal em destaque.

## QUESTÕES E CONCEITOS A SEREM PREVIAMENTE COMPREENDIDOS

1. Explique como se dá o processo de emissão de elétrons no catodo e como é possível a visualização do feixe eletrônico dentro do tubo utilizado na experiência de medida da relação  $e/m_e$ .
2. Qual a vantagem de serem usadas duas bobinas no arranjo de Helmholtz? Por que não usar uma só bobina? Explique com base em um desenho esquemático como deve ser a orientação das correntes elétricas em cada uma das bobinas, para se obter o efeito desejado na parte central do conjunto.
3. Obtenha as Eqs. 3 e 4.
4. Demonstre a Eq. 5, partindo da lei de Biot-Savart.
5. Discuta em detalhe o movimento geral de uma partícula carregada penetrando numa região onde existe um campo magnético uniforme. Escreva as equações de movimento da partícula (ou equações paramétricas da curva por ela descrita) e esquematize a forma de sua trajetória.
6. Quais as condições para que essa trajetória seja circular? Para que seja uma hélice?

## PROCEDIMENTOS E CÁLCULOS A SEREM EFETUADOS NO RELATÓRIO

1. Monte uma tabela com os valores de  $V_A$ ,  $i$ ,  $r$  e  $B$ .
2. Para cada valor de  $r$  encontrado faça um gráfico de  $V_A$  em função de  $i^2$  (ou de  $B^2$ ) e obtenha, por ajuste linear em cada gráfico, o coeficiente angular respectivo. Use, então, as Eqs. 4 e 5, para obter o valor da razão carga/massa do elétron ( $e/m_e$ ).
3. A partir dos valores de  $e/m_e$  obtidos para cada gráfico, calcule a média e o desvio da média dessa grandeza. Compare com o valor esperado, calculado a partir dos valores conhecidos de  $e$  e de  $m_e$ .
4. Apresente o resultado das medidas diretas de campo magnético efetuadas no item 11 dos *Procedimentos em Laboratório*. Discuta a homogeneidade do campo magnético produzido pelas bobinas de Helmholtz, com base em tais valores. Compare o valor medido para o campo no ponto médio entre as bobinas com o valor previsto na Eq. 5.
5. Faça um gráfico *teórico* do campo magnético gerado pelas bobinas de Helmholtz ao longo do seu eixo comum na região entre as bobinas. Adotando este eixo como eixo  $z$ , assumo  $z = 0$  no ponto médio entre as bobinas e faça o gráfico desde  $z = -R$  até  $z = +R$ . Tome os valores numéricos de  $R$  e  $N$  reais usados nessa experiência e um valor típico de 3,5 A ou 4,0 A para a corrente elétrica. Discuta o gráfico obtido, especialmente no que diz respeito à uniformidade do campo magnético em torno do ponto médio entre as bobinas.

## DISCUSSÕES ADICIONAIS

1. Discuta detalhadamente como os resultados dessa experiência servem para ilustrar a dualidade onda-partícula.
2. Dê exemplos de outras experiências históricas onde a dualidade onda-partícula é evidenciada, tanto para a radiação quanto para a matéria.
3. Para evitar pequenos efeitos devidos ao campo magnético da Terra, é muitas vezes recomendável posicionar as bobinas de Helmholtz num plano paralelo ao plano vertical que contém o campo terrestre (localizado com uma bússola). Explique detalhadamente a justificativa para esse procedimento.
4. Faça uma estimativa da contribuição máxima do campo magnético terrestre na sua experiência, comparando as magnitudes deste e do campo produzido pelas bobinas de Helmholtz na posição do feixe eletrônico.
5. Analise as principais fontes de erro na experiência de medida da relação  $e/m_e$ , levando em conta as aproximações feitas, os parâmetros medidos direta ( $V_A$ ,  $i$  e  $r$ ), ou indiretamente ( $B$ ) e a forma como eles contribuem para o cálculo de  $e/m_e$  (Eq. 4).
6. Para um dado conjunto de valores medidos para esses parâmetros, propague as incertezas na Eq. 4 e calcule a incerteza em  $e/m_e$ , discutindo o resultado encontrado.
7. A Eq. 1 é claramente não-relativística. É correto usar tal aproximação na experiência de medida da relação  $e/m_e$ ? Utilize as Eqs. 1 ou 3 para determinar alguns valores de velocidade do feixe eletrônico e justifique com base nesses valores a utilização da aproximação não-relativística.
8. Descreva a experiência de Thomson e discuta sua importância histórica.

## BIBLIOGRAFIA

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Fundamentos de Física, Vols. 3 e 4, LTC, 4<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro, 1993.
2. J. R. Reitz, F. J. Milford, R. W. Christy, Fundamentos da Teoria Eletromagnética, Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1982.
3. R. Eisberg, R. Resnick, Física Quântica, Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1979.
4. Laboratory Experiments in Physics, 5.1.02 e 5.1.13, Phywe Systeme GmbH, Göttingen, 1999.
5. P. A. Tipler, Física, Vol. 2, LTC, 4<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro, 1999.
6. M. Ferenç Jr., H. B. Lemon, R. J. Stephenson, Curso de Física – Eletrônica e Física Moderna, Edgrad Blücher Ltda.
7. P. H. Beeforth, H. J. Goldsmid, Physics of solid state devices, Pion Limited, London, 1970.

Redação: Prof. Jair C. C. Freitas e Prof. Rogério N. Suave

### FOLHA DE DADOS

Medida da relação  $e/m_e$

#	$V_A$ (V)	$r = 2$ cm	$r = 3$ cm	$r = 4$ cm	$r = 5$ cm
		$i$ (A)	$i$ (A)	$i$ (A)	$i$ (A)
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					
11.					
12.					

Medidas do campo magnético  $B$  com gaussímetro:

Corrente elétrica: \_\_\_\_\_ (A)

Magnitude de  $B$  no ponto médio entre as bobinas (centro  $O$  do cubo): \_\_\_\_\_ (mT)

Outras medidas (indicar no relatório orientação da sonda Hall, etc.):

Posição (vértices do cubo)	$B$ (mT)
$A$	
$B$	
$C$	
$D$	
$E$	
$F$	
$G$	
$H$	