

## O osciloscópio didático

### Objetivos:

- Estudar o funcionamento de um cinescópico para osciloscópios;
- Medir a razão carga-massa do elétron.

### Parte A

### O cinescópico

#### 3.1 O cinescópico, uma válvula termoiônica

Um dos poucos exemplos de válvulas eletrônicas ainda em uso, o cinescópico<sup>1</sup> é o elemento responsável pela imagem em dispositivos que devem apresentar imagens como uma das características de operação.

Num cinescópico (ver esquema na Fig. 3.1), os elétrons são produzidos pelo efeito termoiônico, quando aquecemos o catodo (b) por meio de um filamento (a) aquecido ao rubro. Uma grade controladora de potencial negativo limita a expansão da nuvem de elétrons e faz com que apenas os elétrons com divergência adequada consigam passar, sendo então acelerados por potenciais positivos aplicados aos anodos  $A_1$  e  $A_2$  que funcionam como lentes eletrostráticas focalizando o feixe. Essas lentes eletrostáticas nada mais são do que dois cilindros metálicos ocos, separados por uma certa distância e na mesma direção axial, aos quais se aplica uma diferença de potencial elétrico. O feixe acelerado passa pelo eixo desses cilindros e colide contra uma parede revestida de um fósforo que responde com luz à colisão do feixe de elétrons, fazendo com que apareça um ponto luminoso na tela. O filamento e os dispositivos de colimação e aceleração dos elétrons recebem o nome de *canhão de elétrons*. O feixe passa ainda entre dois pares de placas: *placas horizontais* ( $D_v$ ) que promovem um deslocamento *vertical* do feixe e *placas verticais* ( $D_h$ ), capazes de promover um deslocamento *horizontal* do feixe de elétrons. A aplicação combinada de tensões nestes pares de placas pode levar o ponto luminoso a deslocar-se para qualquer ponto da tela.

Os controles disponíveis sobre o feixe nos osciloscópios utilizados nesta experiência são:

**Intensidade do feixe** - obtido através de um potencial negativo aplicado à grade de controle com o qual se regula o fluxo de elétrons;

**Foco** - obtido através da aplicação de um potencial positivo no anodo  $A_1$  em relação ao catodo, regulando assim a concentração de elétrons num ponto da tela;

**Tensão de aceleração do feixe** - que é aplicada ao anodo  $A_2$ . Trata-se de uma tensão positiva em relação ao catodo, podendo ser variada entre 1000 V e 2000 V. Nos osciloscópios comerciais, essa tensão é fixa.

<sup>1</sup>O cinescópico é também denominado *tubo de raios catódicos* ou simplesmente TRC (CRT, em inglês) por razões históricas. O efeito foi descoberto antes que fosse conhecida a natureza granular da matéria. Prefira o termo *cinescópico* a CRT.

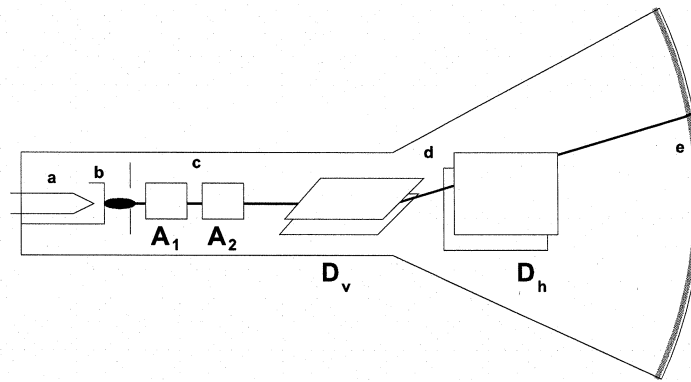


Figura 3.1: Num cinescópio, o filamento (a) aquece o catodo (b) que, por efeito termiônico, cria uma nuvem de elétrons. Elétrons com divergência adequada são colimados e acelerados (c), formando um feixe cuja trajetória é modificada por placas defletoras (d) e dirigida contra uma tela (e), uma superfície revestida de um fósforo, substância que reage com luz à excitação do feixe, fazendo surgir o ponto luminoso que observamos.

### 3.2 Fundamentos Teóricos

**Deflexão do feixe de elétrons.** Modificamos o trajeto do feixe com as placas defletoras (figura 3.2). O campo elétrico entre as placas pode ser considerado constante e igual a  $E = V/d$ , onde  $d$  é a distância entre as placas. Um elétron passando no interior dessas placas ficará sujeito a uma força de módulo

$$F = \frac{eV}{d}. \quad (3.1)$$

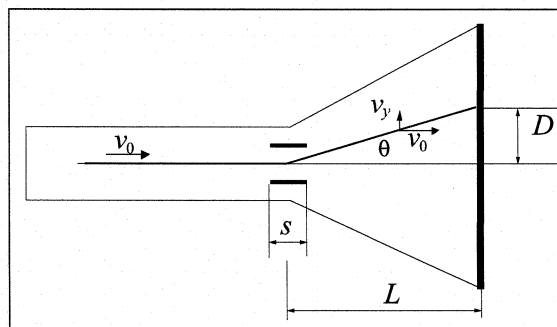


Figura 3.2: Esquema simplificado de um cinescópio utilizado em osciloscópios, no qual a deflexão ocorre pela interação do feixe de elétrons com o campo elétrico entre as placas defletoras.

O elétron do feixe que entra na placa pela esquerda, com velocidade  $v_0$ , sofre uma aceleração vertical devido à força  $F$ . Ao emergir das placas no lado direito, o elétron continua com velocidade  $v_0$  na direção horizontal e adquire uma velocidade vertical  $v_y$ . Se o comprimento das placas é  $s$ , esse elétron gasta um tempo  $\Delta t = s/v_0$  para percorrer esta distância. Nesse intervalo de tempo ele ganha uma quantidade de movimento no sentido vertical igual ao impulso elétrico que recebe ao atravessar a região do campo elétrico  $mv_y = F\Delta t$ , ou seja

$$mv_y = \frac{eV}{d} \Delta t = \frac{eVs}{v_0 d}, \quad (3.2)$$

e, portanto:

$$v_y = \frac{eVs}{mv_0 d}. \quad (3.3)$$

A tangente do ângulo de deflexão é a razão entre as componentes da velocidade do elétron

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_0} = \frac{eVs}{mv_0^2 d}. \quad (3.4)$$

Por outro lado, se a distância entre a tela e as placas defletoras for  $L$ , temos  $\tan \theta \approx D/L$  e, portanto:

$$D = \frac{eVsL}{mv_0^2 d}. \quad (3.5)$$

A velocidade inicial do elétron  $v_0$  pode ser determinada levando-se em conta que ele é acelerado com um potencial  $V_A$  (aplicado ao anodo  $A_2$ ), antes de penetrar nas placas defletoras. Supondo que o elétron parte do catodo praticamente em repouso, sua energia cinética ao atingir as placas defletoras deve ser igual a energia potencial adquirida durante a aceleração  $\frac{1}{2}mv_0^2 = eV_A$ , e, assim:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2eV_A}{m}}. \quad (3.6)$$

Substituindo (3.6) em (3.5), obtemos uma expressão para deflexão do feixe de elétrons

$$D = \frac{LVs}{2dV_A}. \quad (3.7)$$

A sensibilidade  $S$  de um osciloscópio é definida como a razão entre a deflexão do feixe e a tensão aplicada às placas defletoras  $S = D/V$ , por conseguinte

$$S = \frac{Ls}{2dV_A}, \quad (3.8)$$

onde  $s$  e  $d$  são a largura e a separação das placas defletoras,  $L$  é a distância entre as placas e a tela e  $V_A$  é a tensão de aceleração aplicada ao anodo  $A_2$ .

## Parte B

### A razão carga-massa do elétron

Aproveita-se agora um dos pares de placas de deflexão de um tubo de raios catódicos (TRC) para aplicar uma tensão senoidal de amplitude  $V_m$ . Em consequência aparecerá uma linha luminosa na tela do TRC, correspondendo aos pontos entre  $V = -V_m$  e  $V = +V_m$ . Em seguida um campo magnético estacionário  $\vec{B}$  será aplicado ao longo do seu eixo, isto é, na direção do feixe eletrônico inicial, através de um solenóide. Para tanto, o TRC estará alojado no interior desse solenóide, como mostra a figura abaixo. Variando-se a corrente que passa por ele, varia-se o módulo do campo magnético. Para um certo valor do campo  $B$ , a linha luminosa na tela se reduzirá a um só ponto. É sob essas condições que se pode medir a razão carga-massa do elétron. A seguir, veremos como isso é possível.

A força exercida por campos magnéticos sobre as cargas elétricas é bastante distinta da força exercida por campos elétricos. **O campo magnético só exerce força sobre cargas em movimento.** A força magnética é proporcional ao produto da carga pelo campo magnético e pela componente da velocidade perpendicular ao campo. Isto pode ser visto decompondo-se a velocidade em duas componentes, uma paralela ao campo,  $\vec{v}_{\parallel}$  e outra perpendicular ao campo,  $\vec{v}_{\perp}$ :

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) = q[(\vec{v}_{\perp} + \vec{v}_{\parallel}) \times \vec{B}] = q(\vec{v}_{\perp} \times \vec{B}) \quad (3.9)$$

Portanto se uma partícula entrar num campo magnético com velocidade  $v$  numa direção arbitrária com relação ao campo  $\vec{B}$ , a componente paralela ao campo  $v_{\parallel}$  não se altera. Por outro lado, a componente perpendicular  $v_{\perp}$  dá origem a uma **força perpendicular ao campo magnético e à velocidade**. Essa força altera somente a direção da velocidade e não o seu módulo, ou seja, a força magnética age como uma **força centrípeta**. Ao entrar no campo, a carga passa a girar em movimento circular, além de se deslocar com velocidade constante  $v_{\parallel}$  ao longo das linhas de campo. O movimento resultante é uma órbita em forma de hélice, como ilustrado na figura 3.4.

Para determinarmos a frequência com que a partícula gira em torno do campo magnético, basta igualarmos a força magnética à força centrípeta

$$qv_{\perp}B = m\omega_c v_{\perp} \implies \omega_c = \frac{qB}{m}. \quad (3.10)$$

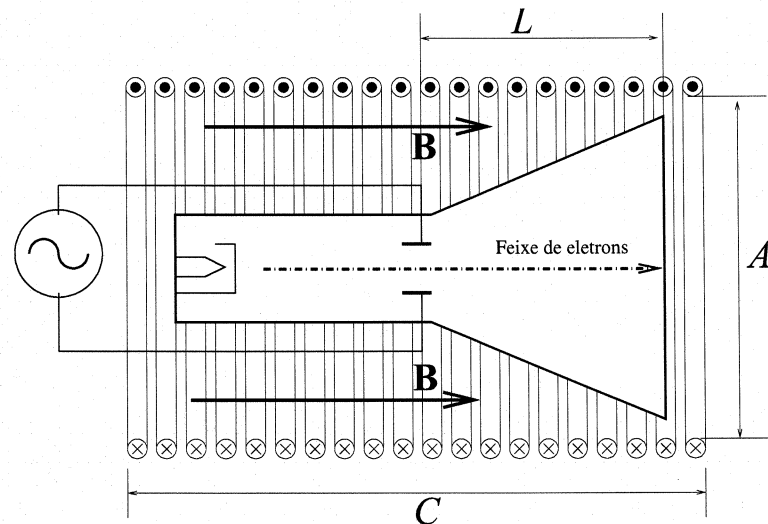


Figura 3.3: Arranjo experimental usado para determinação da razão carga-massa do elétron

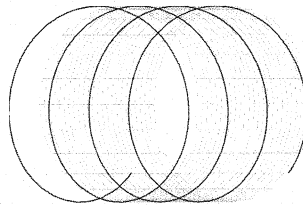


Figura 3.4: Um elétron, animado de velocidade, em presença de um campo magnético uniforme e constante  $\vec{B}$ , irá descrever uma trajetória helicoidal no espaço.

Esta frequência angular é denominada **frequência ciclotrônica**. Observe que ela só depende do campo e da razão carga/massa da partícula e é independente de  $v_{\perp}$ . Assim, o passo da hélice é determinado apenas por  $v_{\parallel}$ . A velocidade  $v_{\perp}$  determina apenas o raio da órbita, que é dado pela expressão usual do movimento circular:

$$v_{\perp} = \omega_c r \implies r = \frac{v_{\perp}}{\omega_c}. \quad (3.11)$$

Finalmente, notamos que a força magnética depende do sinal da carga. Isso implica que cargas positivas giram no sentido anti-horário, olhando-se na direção do campo  $\vec{B}$  e cargas negativas, no sentido horário (figura 3.5).

No osciloscópio sem a presença de campos magnéticos, o feixe de elétrons, após ter sido acelerado e passar pelas placas defletoras, segue uma trajetória retilínea até atingir a tela, iluminando

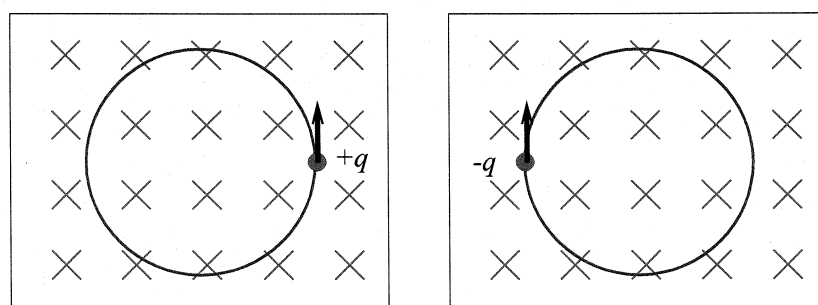


Figura 3.5: Movimento circular de cargas num campo magnético.

um único ponto. Se aplicarmos uma tensão constante às placas defletoras, acrescentamos uma pequena componente perpendicular de velocidade  $v_{\perp}$  ao feixe, que é desviado de sua trajetória original. Se a tensão nas placas defletoras for uma tensão oscilante, porções sucessivas do feixe adquirem velocidades perpendiculares diferentes e, portanto, sofrem desvios diferentes. O resultado é que o feixe atinge a tela numa sucessão de pontos que ilumina um segmento de reta na tela.

Se agora aplicarmos um campo magnético externo  $\vec{B}$  paralelo ao eixo do cinescópio, a componente perpendicular da velocidade gerada pelas placas defletoras, faz com que os elétrons do feixe passem a se mover em trajetórias helicoidais, como as da Fig. 3.4, que tangenciam o eixo do cinescópio a partir do ponto de saída das placas defletoras. Como todos os elétrons têm a mesma velocidade paralela,  $v_{\parallel} = v_0$ , todas as hélices têm o mesmo passo  $\lambda = v_0 2\pi / \omega_c$ , só diferindo no raio  $r = v_{\perp} / \omega_c$ . Assim, todos os elétrons atingem a tela com a mesma fase do movimento circular iluminando, novamente, um segmento de reta.

Se a distância placa-tela,  $L$ , comportar exatamente um passo de hélice, todos os elétrons do feixe atingem a tela depois de executar uma volta completa, quando estão de volta ao eixo do cinescópio, iluminando um único ponto na tela. Nestas condições temos:

$$L = \frac{2\pi}{\omega_c} v_0, \quad (3.12)$$

que com  $v_0$  dado pela eq. 3.6, resulta para a razão carga-massa do elétron:

$$\boxed{\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 V_A}{B^2 L^2}} \quad (3.13)$$

O campo magnético gerado pelo solenóide é dado aproximadamente por

$$B = \frac{\mu_0 N I}{C} \quad (3.14)$$

onde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m,  $N$  é o número de espiras do solenóide,  $C$  é o seu comprimento e  $I$  é a corrente que circula no mesmo.

### ATENÇÃO!!!

A tensão de aceleração dos elétrons é da ordem de alguns quilovolts, num cinescópio utilizado em osciloscópios (pode chegar a dezenas de quilovolts, num cinescópio para televisão colorida). Proceda com cautela, portanto, para não provocar acidentes. Você receberá o arranjo experimental com a ligação de alta tensão já montada.