

A ampola de Wehnelt

A ampola de [raios catódicos](#) “*Cathode Ray Tube*”, CRT, Leybold 55557, foi criada nos anos 50 para efeitos didáticos, tendo sido usada no ensino de Eletrônica, no IST, até aos anos 80. A ampola visa ilustrar o efeito de campos elétricos e magnéticos sobre um feixe de elétrons. O feixe de elétrons pode ser visto, numa câmara escura, pois no interior da ampola existe um gás (árgon, hélio ou hidrogénio) com uma pressão muito baixa de modo a que os elétrons acelerados ao colidirem com os átomos do gás emitam energia luminosa (de fosforescência) sem, contudo, perderem energia significativa.

A ampola permite repetir a experiência de [J. J. Thomson](#), feita em 1897, através da qual Thomson concluiu que os raios catódicos eram constituídos por partículas carregadas de eletricidade e que a relação carga/massa destas partículas era muito elevada. Através de experiências realizadas com instrumentos de precisão, atualmente, o valor de q/m do eletrão considera-se ser $-1,75882 \times 10^{11} \text{ C.kg}^{-1}$.

Na Fig.1 pode ver-se a ampola original de CRT montada no seu suporte de madeira, no qual tem a possibilidade de ser rodada em torno do seu eixo horizontal. Neste suporte existem também duas [bobinas paralelas de Helmholtz](#) (1821-1894), destinadas a criar um campo magnético uniforme (quase) e perpendicular ao plano. Existe ainda uma caixa onde estão disponíveis conetores para os diferentes terminais da ampola de CRT.

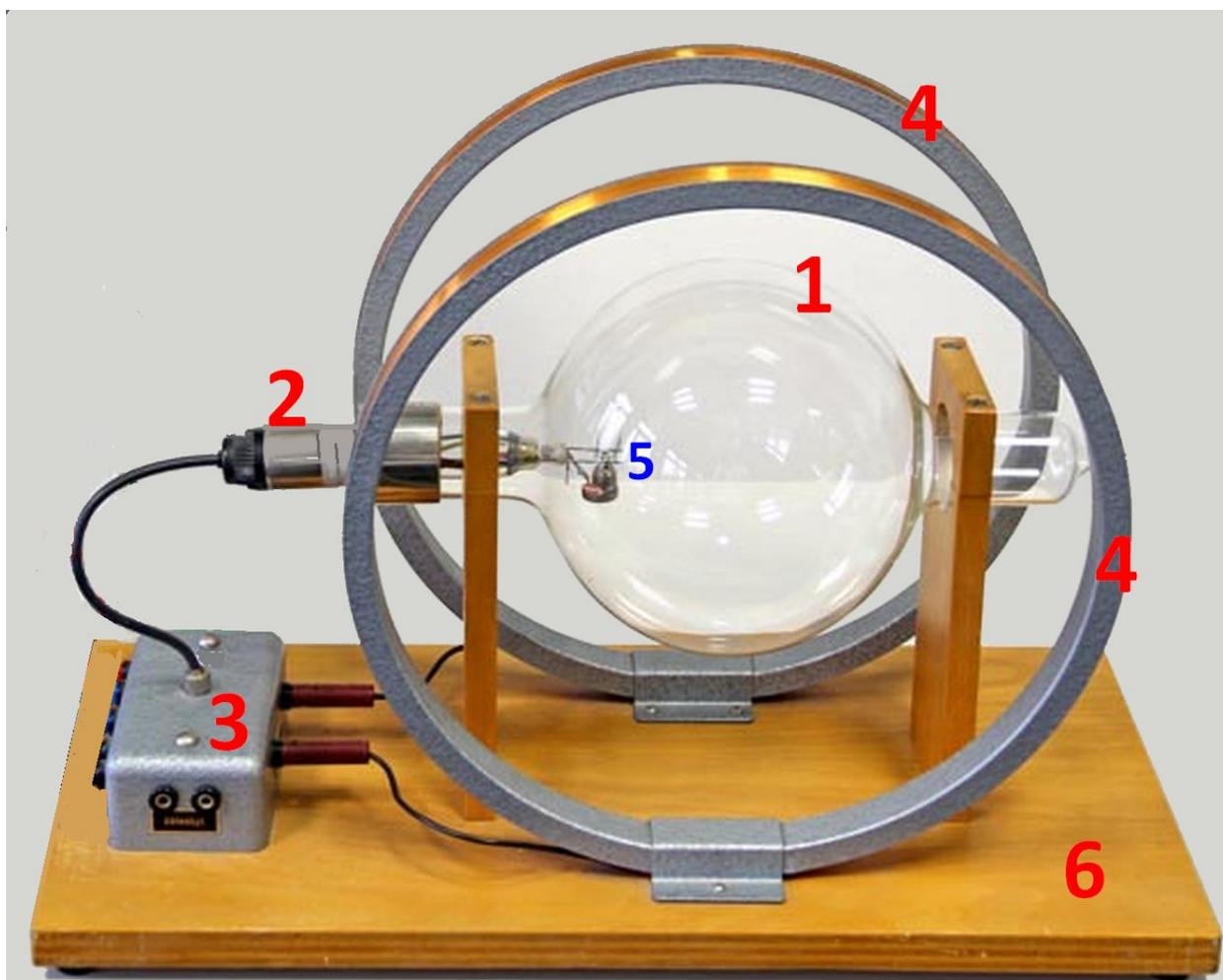


Fig. 1 – Ampola de CRT, Leybold 55557; 2 - conetor e cabo de alimentação; 3 - Caixa de interface com o exterior; 4 - Bobinas de Helmholtz; 5 - Canhão eletrónico da ampola; 6 - suporte de madeira.

O canhão eletrônico do CRT

É no canhão eletrônico da ampola, ver Fig.2, que os elétrons são gerados, acelerados e condicionados na forma de um feixe fino.

Os elétrons são emitidos por um cátodo aquecido por um filamento alimentado com uma tensão alternada ou contínua de 6,3 V. Os elétrons são acelerados por uma elevada diferença de potencial positiva, em relação ao cátodo, caminhando deste até ao elétrodo denominado por placa. Neste trajeto os elétrons são confinados por um elétrodo cilíndrico com potencial negativo em relação ao cátodo, denominado por cilindro de Wehnelt, saindo por uma pequena abertura. O cilindro de Wehnelt foi proposto em 1902 por [Arthur Wehnelt](#) (1871-1944), com o objetivo de focar e produzir feixe de elétrons muito finos¹. O efeito do cilindro de Wehnelt é de controlar o fluxo de elétrons e de os focar funcionando como uma lente eletrostática.

O canhão eletrônico

O canhão é constituído pelo filamento que indiretamente aquece o cátodo cilindro tem a face perpendicular à sua geratriz com um pequeno orifício por onde terá de passar o feixe de elétrons. Basicamente o cilindro é colocado junto ao cátodo com uma tensão negativa relativamente a este. A placa de aceleração com a tensão U_A , tem a forma de um cone com um orifício no vértice por onde sairão os elétrons. À saída desse orifício estão dois eléttodos destinados a produzir uma deflexão eletrostática do feixe de elétrons. A estes eléttodos deve ser aplicada uma tensão de modo comum contínua (normalmente é a tensão de ânodo) e uma tensão diferencial relativa a esta.



Fig. 2 – Canhão eletrônico do CRT.

1- Eletrodinâmica das partículas

No estudo da eletrodinâmica de partículas eletricamente carregadas é fundamental conhecer a relação carga/massa (q/m) das partículas. A relação m/q mede-se em unidades Thomson em honra do físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940). Em 1890, [Arthur Schuster](#) (1851-1934) fez experiências em que mediu a velocidade dos raios catódicos e a partir daí calculou uma relação q/m , usando o efeito de um campo magnético sobre estes raios. O valor obtido, devido a vários erros, era muito menor do que aquele que, em 1897, Thomson viria a obter.

Thomson chegou a conclusão de que os raios catódicos, cuja natureza era desconhecida, eram formados por partículas que ele designou por elétrons, muito mais pequenas do que a dimensão conhecida dos átomos, mas que tinham uma enorme relação carga / massa.

Thomson fez experiências com campos elétricos e com campos magnéticos para desviar os raios catódicos em válvulas que continham um gaz nobre (hélio ou hidrogénio) a uma pressão residual muito. As partículas muito aceleradas provocavam a fluorescência dos átomos do gaz, libertando luz, deixando o seu rasto visível. A partir da geometria do rasto dos elétrons Thomson calculou o tipo de movimento e a relação q/m das partículas.

¹- O cilindro de Wehnelt é muito importante como lente eletrostática, mas Wehnelt ficou mais conhecido com os seus trabalhos sobre a emissão termiônica, nomeadamente pela descoberta de que cobrindo os cátodos dos emissores termiônicos com metais alcalinos a energia de extração de elétrons era muito reduzida e, como consequência, a eficiência termiônica era muito aumentada. Foi um trabalho fundamental para o desenvolvimento de todas as válvulas eletrônicas.

2- O cociente da carga sobre a massa do eletrão

Sempre que uma carga elétrica q se move com velocidade vetorial \vec{v} num campo elétrico vetorial \vec{E} e num campo magnético vetorial \vec{B} sobre ela atua a força vetorial de [Hendrik Lorentz](#) (1853-1928)²

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

A força terá uma componente na direção do campo elétrico e outra componente que é perpendicular ao plano definido pelas direções de \vec{v} e de \vec{B} .

A ampola de CRT Leybold do Museu Faraday permite fazer experiências que ajudam a confirmar a força de Lorentz e, em particular a determinar a relação existente entre a carga de um eletrão e a sua massa (e/m) para estudar as trajetórias de eletrões sujeitos quer a forças elétricas quer a forças magnéticas.

2.1 – Excitação dos eletrões com campo magnético.

Os eletrões, com $q = e$, em movimento, originam uma corrente elétrica I com a direção da velocidade.

Não havendo campo elétrico aplicado sobre a trajetória dos eletrões e apenas existir campo magnético e se a velocidade v do eletrão for perpendicular à direção do campo magnético B a trajetória do eletrão será necessariamente uma circunferência, pois a força, F , dirige-se sempre para o seu centro e o movimento dos eletrões acabará por ser circular uniforme. Para determinar a direção da Força F , o Prof. [Ambrose Fleming](#) (1849-1945), sugeriu usar a regra da mão esquerda para cargas positivas, mas para cargas negativas deve usar-se a regra da mão direita (versão invertida na horizontal).

Como os eletrões têm massa, estará associado a cada um uma energia cinética que originará uma, força centrífuga devida ao campo magnético B .

Thomson calculou o raio r desta circunferência a partir da igualdade da força cinética centrífuga, F_c , com a força centrípeta magnética, F_m , e é esta igualdade que estabelece as condições de estabilidade da trajetória circular.

$$F_c = \frac{mv^2}{r}; F_m = evB \Rightarrow r = \frac{m}{e} \times \frac{v}{B}$$

Na expressão do raio r aparece a relação m/e do eletrão e basta medir este raio pois tanto a velocidade v como o campo magnético B podem ser facilmente calculados.

A velocidade dos eletrões resulta da tensão de aceleração U_a em relação ao cátodo donde partiram, pois sobre eles atua a força $F_e = e \times E$, ou seja, adquirem a energia cinética E_c ,

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2; E_e = eU_a \Rightarrow v^2 = 2 \times \frac{m}{e} \times U_a$$

Destas equações obtém-se a relação e/m

$$\frac{e}{m} = \frac{2 U_a}{B^2 r^2}$$

A distância r pode ser medida com uma régua, U_a é medido com um voltímetro e B pode ser medido com um gaussímetro ou pode ser calculado a partir das expressões suficientemente rigorosas do campo produzido pelas [bobinas de Helmholtz](#).

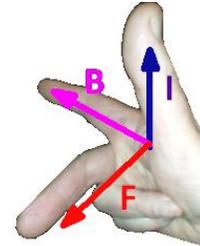


Fig. 3 – Relação vetorial de v e B e F , para cargas elétricas

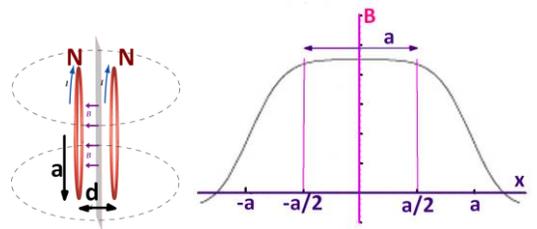


Fig. 4 – Bobinas de Helmholtz e B em função da distância $d = a$.

² - James Maxwell em 1865 já tinha sugerido a existência desta força, mas foi Heaviside que identificou o efeito da força magnética e, em 1895, Lorentz juntou estas contribuições.

Em 1902, pelo processo aqui descrito, [Arthur Wehnelt](#) calculou o valor de $e/m = 0,176 \cdot 10^{12} \text{ C/kg}$. A massa do elétron viria a ser calculada por [Robert Millikan](#) (1868-1953) em 1909 com um erro inferior a 1% inferior ao valor atualmente considerado de $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

A intensidade do campo magnético das bobinas de Helmholtz

A intensidade do campo magnético produzido por um par de bobinas paralelas com o diâmetro $2a$ e com N espiras cada, separadas de $d = a$ (em m) pode ser aproximado por

$$B = \frac{32\pi NI}{5\sqrt{5}a} \times 10^{-7} \text{ Tesla}$$

Quando os elétrons entram no campo magnético com uma trajetória que não é perpendicular ao campo magnético aparece uma força na direção do campo magnético que faz com que as trajetórias dos elétrons seja uma hélice, Fig. 5, cujo passo depende desse ângulo. Se o ângulo for de 0° a trajetória é uma linha reta.

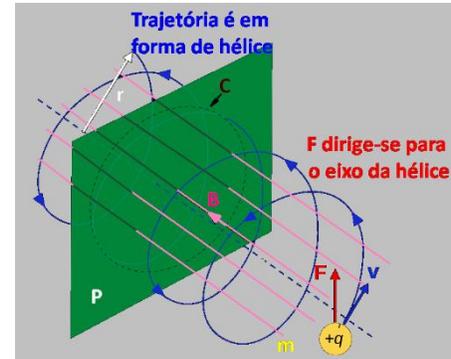


Fig. 5 Elétron descrevendo uma espiral.

A relação q/m do elétron

Vários cientistas repetiram a experiência de Thomson e chegaram a resultados parecidos para a relação e/m , que atualmente se considera ser $-1,75882 \cdot 10^{11} \text{ Ckg}^{-1}$

Em 1904, Wehnelt calculou valores de $-1,3$ a $-1,7 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$.

Em 1904, Wehnelt declarou: "*Já usei, com sucesso, este método no curso de verão para professores de física, em julho de 1903, para demonstrar a determinação de e/m e v dos raios catódicos.*"

Nas experiências Wehnelt usou tensões de ânodo de cerca de 342 V e pressões do gaz menores do que 0,02 mmHg (2,7 Pa).

Diagrama interno da ampola Leybold 55557 e dos acessórios

Na Fig. 6 pode ver-se o diagrama simplificado da válvula antiga e os seus terminais vistos por trás do tubo ou através o conector de ligação ao módulo de interface.

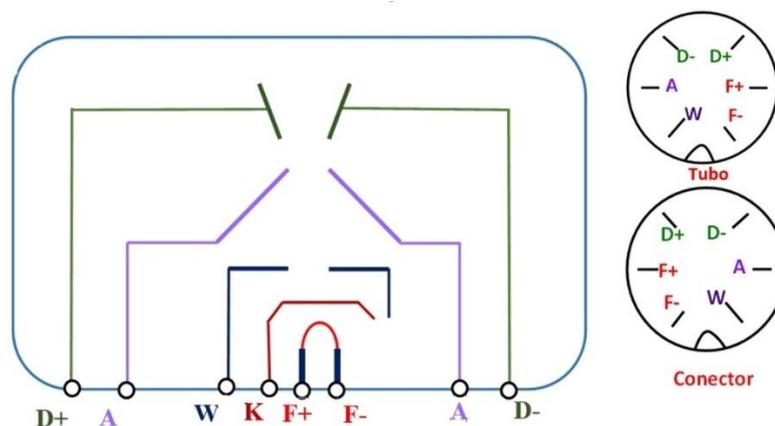


Fig. 6 – Eléttodos e contactos da ampola CRT.

Outras ampolas alternativas para determinar e/m

Existem [várias ampolas alternativas, mais modernas](#), que permitem fazer experiências conducentes à determinação da carga específica do eletrão (carga / massa), repetindo a experiência de J.J. Thomson feita em 1897, assim como fazer experiências com o desvio de feixes de eletrões por campos magnéticos externamente aplicados. Algumas destas ampolas existem no Museu Faraday.

A experiência “Brinca com Eletrões”



Fig. 7 – Módulo PWE de controlo alternativos da ampola Leybold 55557.

No Museu Faraday do IST criámos um módulo eletrónico, *Play With Electrons*, PWE, Fig. 7, que permite controlar a corrente contínua nas bobinas de Helmholtz do sistema Leybold 55557, bem como a tensão de aceleração dos eletrões no canhão eletrónico.

Num dos modos de funcionamento do módulo PWE é possível ver simultaneamente várias trajetórias de eletrões, para uma dada tensão de aceleração dos eletrões e para várias correntes diferentes nas bobinas de Helmholtz, isto é, para vários valores da intensidade do campo magnético que atua sobre os eletrões e que condiciona as suas trajetórias.

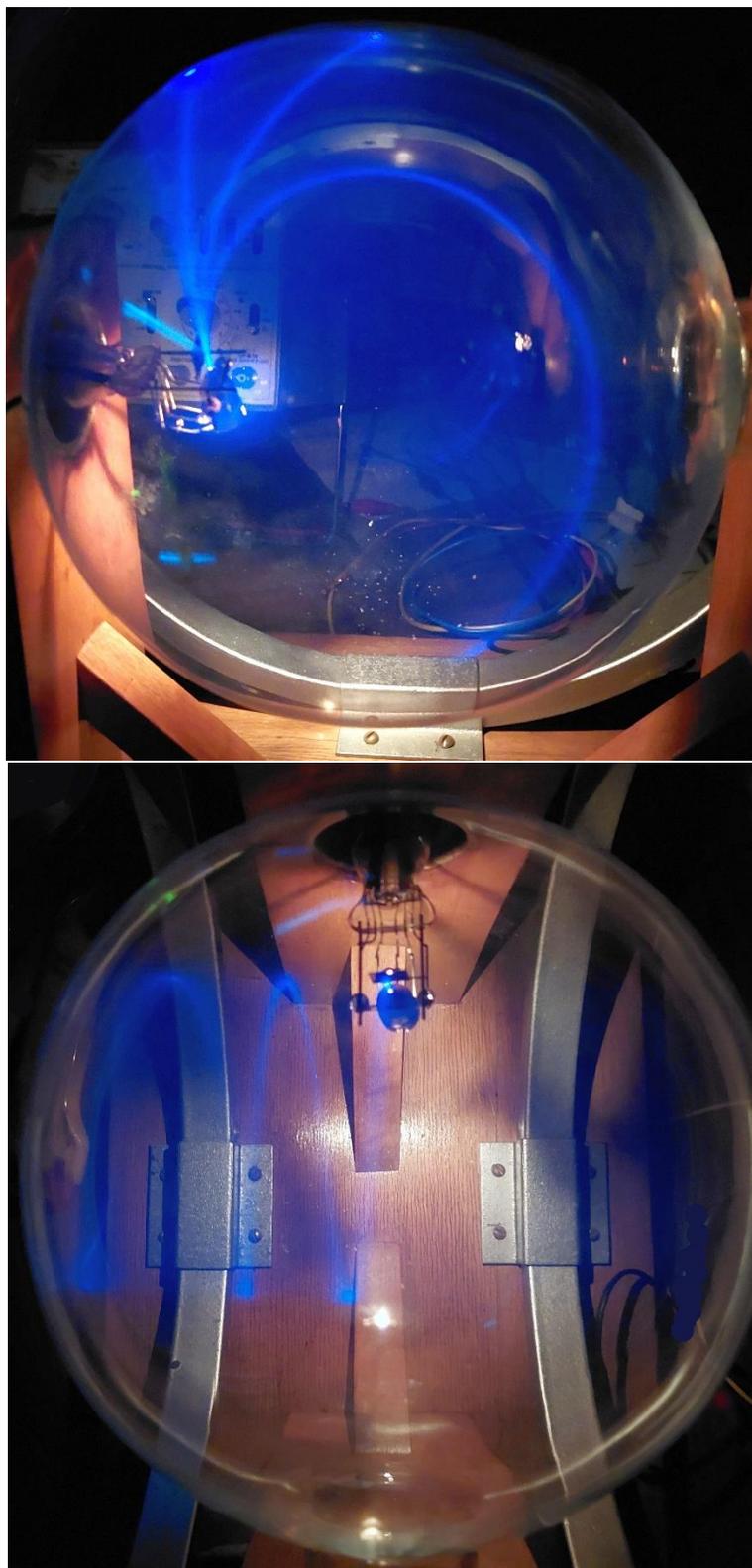


Fig. 8 – Algumas trajetórias de elétrons obtidas com o módulo PWE.

[Pode ver aqui alguns detalhes do módulo PWE](#)