

Experiência de Thomson

Este é um trabalho de casa que deve ser entregue por escrito. Você deve seguir a sequência de questões apresentadas abaixo, mas preocupe-se em apresentar um texto contínuo, explicando cada passo de seu raciocínio **com suas próprias palavras** e interpretando os resultados.

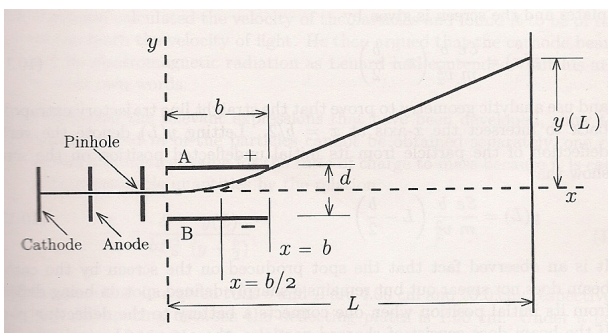
1. Descreva sucintamente o objetivo de Thomson em sua pesquisa sobre os raios catódicos.

2. Descreva sucintamente as observações feitas antes de Thomson que indicavam que os raios catódicos deveriam estar ligados de alguma maneira a cargas elétricas negativas. Qual foi o raciocínio que levou Thomson a montar seu experimento com o coletor de cargas colocado na parte lateral do tubo e não em sua extremidade diretamente oposta ao catodo?

Tentativas de observação da deflexão do feixe catódico feitas antes de Thomson tinham revelado que o feixe era defletido por um campo magnético mas haviam falhado em demonstrar sua deflexão por um campo eletrostático. Thomson conjecturou que isto podia se dever à presença de íons no tubo, formados por átomos carregados eletricamente ou moléculas formadas no gás residual no interior do tubo. Estes íons poderiam produzir condições na vizinhança do capacitor tais que o feixe, mesmo sendo constituído de partículas carregadas, não seria afetado pelo campo produzido por suas placas carregadas. Para testar esta conjectura, Thomson repetiu a experiência, agora com um vácuo muito aperfeiçoado no interior do tubo e verificou que, nestas condições, o feixe era de fato desviado pela ação do campo eletrostático entre as placas do capacitor.

3. Explique, inclusive com a ajuda de desenhos ou esquemas, como o comportamento de um número grande de íons criariam uma condição que faria com que o feixe catódico não fosse afetado pelas placas carregadas. O campo eletrostático *fora* das placas do capacitor seria ainda nulo? Explique seu raciocínio.

As questões que se seguem, que envolvem equações algébricas e relações numéricas, se referem ao esquema da figura ao lado. Use os símbolos nele definidos. Você pode redesenhar a figura ou simplesmente incluí-la em seu trabalho final. Todas as deduções a serem feitas se referem inicialmente ao comportamento de uma única partícula carregada de massa m e carga elétrica e .



Garanta que este aspecto esteja claramente exposto em seu trabalho. Depois de analisar o comportamento de uma única partícula, você vai considerar o que aconteceria se o feixe fosse constituído de um grande número delas.

Suponha que a partícula carregada hipotética, que parte do repouso de algum

ponto entre o catodo e o anodo, seja acelerada por uma diferença de potencial ΔV_{ac} até alcançar a velocidade v_x e entre na região entre as placas defletoras do capacitor (placas A e B) com esta velocidade. Vamos supor que o campo elétrico defletor esteja confinado à região entre as placas e que os efeitos de borda sejam desprezíveis.

4. Ignore temporariamente os efeitos gravitacionais e construa um raciocínio que mostre que a partícula estará sujeita a uma aceleração uniforme para cima enquanto estiver entre as placas defletoras A e B e que, por causa disso, percorrerá uma trajetória parabólica entre as posições de abscissas $x = 0$ e $x = b$. Note que a situação aqui é exatamente igual à que você estudou para o movimento de um projétil em Física I. Qual será o caráter da trajetória depois que a partícula sair da região entre as placas? Porque? Como este trecho da trajetória se conecta com a parte parabólica?

5. Agora deduza as equações das trajetórias descritas verbalmente na parte 4: Começando pelas definições de intensidade de campo e diferença de potencial elétrico, mostre que, se chamarmos a diferença de potencial entre as placas do capacitor defletor de ΔV_{def} e a distância entre as placas de d , a intensidade do campo elétrico entre as placas é dada por $E = \frac{\Delta V_{def}}{d}$.

Depois, com $y(x)$ designando a deflexão em função de x , mostre que, enquanto a partícula estiver na região entre as placas, a trajetória é dada por $y(x) = \frac{1}{2} \frac{Eex^2}{mv_x^2}$.

Em seguida, mostre que a inclinação da trajetória parabólica em $x = b$ é igual a $\frac{Ee}{m} \frac{b}{v_x^2}$.

Agora retorne à geometria analítica elementar da equação de uma reta e mostre que a equação da trajetória na região que vai do final do capacitor até a tela é dada por $y(x) = \frac{Ee}{m} \frac{b}{v_x^2} (x - \frac{b}{2})$ e use a geometria analítica para provar que esta linha reta, quando extrapolada, intercepta o eixo x em $x = b/2$. Use $y(L)$ para denotar a deflexão vertical da partícula medida a partir de sua posição inicial não defletida na tela, e mostre que $y(L) = \frac{Ee}{m} \frac{b}{v_x^2} (L - \frac{b}{2})$.

6. Observa-se que a mancha produzida pelo feixe catódico na tela não se espalha, mas permanece muito bem definida depois de defletida quando se conecta uma bateria às placas defletoras. Se o feixe consiste de partículas carregadas, estas devem ser em número muito grande. À luz dos fatos observados e da equação obtida para $y(L)$, o que podemos concluir sobre o que os suportes materiais das partículas carregadas têm em comum? Explique seu raciocínio.

7. Identifique as quantidades conhecidas (mensuráveis e observáveis) contidas na equação para $y(L)$ e identifique as quantidades desconhecidas. Note que existem três nesta última categoria e que todas elas são propriedades das partículas hipotéticas.

Thomson trabalhou em seguida com o objetivo de reduzir o número de quantidades desconhecidas e encontrou um meio engenhoso de medir v_x . Começando com a deflexão $y(L)$ medida sob a ação de um campo elétrico defletor E conhecido, ele introduziu um campo magnético B (numa direção perpendicular ao plano da figura) produzido por bobinas de Helmholtz e aumentou a corrente nas bobinas até que o traço do feixe catódico na tela voltasse à posição inicial. Chamemos a intensidade do campo magnético que produz este efeito de B_0 . Esta é uma quantidade mensurável.

8. Determine o sentido (para dentro ou para fora do plano do papel) que deve ter o campo magnético para que ele restaure o feixe para sua posição original no centro da tela sem deflexão. Relembre as equações básicas sobre forças que campos elétricos e magnéticos exercem sobre partículas carregadas e desenhe um diagrama de corpo livre (de forças) para uma partícula sob a ação simultânea de campos elétrico E e magnético B_0 cruzados. Depois, use conceitos básicos aprendidos em eletromagnetismo para mostrar que a velocidade da partícula no feixe com a deflexão corrigida pelo campo magnético deve ser $v_x = \frac{E}{B_0}$.

Já que é fato observado que o feixe permanece coerente (não é espalhado) sob a influência do campo magnético, o que se pode inferir a respeito das velocidades das partículas? Esboce um desenho do que você deveria ver na tela se as partículas não tivessem *todas* a mesma velocidade. Explique seu raciocínio. Qual o significado que tem o fato de que as bilhões de partículas do feixe têm *todas* a mesma velocidade? (Sugestão: Será que ela teriam todas a mesma velocidade se tivessem se originado em pontos diferentes entre as placas aceleradoras? Porque, ou porque não? Já que todas tem a mesma velocidade, qual o ponto mais provável de onde se originaram?)

9. Thomson calculou a velocidade das partículas e encontrou o valor de cerca de um décimo da velocidade da luz. Ele então usou esta evidência para argumentar que um feixe catódico não poderia ser radiação eletromagnética, como propunha Lenard. Use suas próprias palavras para expor o raciocínio de Thomson.

10. Combinando equações já demonstradas em seu trabalho, mostre que, apesar de não se poder obter separadamente e e m , podemos agora determinar um valor numérico para a *razão* entre a carga e a massa porque esta razão está ligada a quantidades mensuráveis pela relação $\frac{e}{m} = \frac{E}{bB_0^2} \frac{y(L)}{(L-\frac{b}{2})}$.

11. Suponha que num certo tubo b e L medem 4,00 cm e 20,0 cm respectivamente, e que a distância entre as placas defletoras é de 1,50 cm. Quando uma diferença de potencial de 150 V é imposta às placas defletoras, a deflexão observada do feixe na tela é de 2,6 cm. O campo magnético que restaura o feixe a sua posição central na tela tem intensidade $4,5 \times 10^{-4}$ Tesla. Calcule a razão carga-massa e a velocidade das partículas do feixe. (Cuidado com o número de algarismos significativos de sua resposta!)

12. Observe a velocidade das partículas calculada no item 11. Calcule a deflexão vertical que estas partículas sofrem sob a ação da gravidade ao atravessarem o tubo. Esta deflexão seria observável? (Ao responder a esta pergunta, compare a deflexão gravitacional esperada com a ordem de grandeza do comprimento de onda da luz visível e com a ordem de grandeza do tamanho de átomos e moléculas. Agora explique com suas próprias palavras porque a deflexão gravitacional é tão pequena e porque é justificável ignorá-la em todos os cálculos feitos em conexão com esta experiência. (Não inclua nos seus resultados mais algarismos significativos do que aqueles justificáveis pelos dados experimentais))

13. Chamando o potencial acelerador entre o catodo e o anodo de ΔV_{ac} , mostre que, se a partícula negativa se originou a partir do repouso, essencialmente, nas vizinhanças do catodo, sua velocidade v_x ao passar através do catodo será dada por $v_x^2 = \frac{2e\Delta V_{ac}}{m}$.

Por causa de complicações relacionadas com campos nas bordas do capacitor, com as configurações do catodo e do anodo, e dificuldades na medida do potencial

acelerador, que era da ordem de dezenas de kilovolts, Thomson não conseguiu usar esta relação para obter um valor confiável para v_x , mesmo depois de já dispor de evidência clara a respeito de onde as partículas se originavam - veja item 8. Esta equação indica, no entanto, de uma forma geral, o que acontece com v_x quando o potencial acelerador muda.

14. Suponha que o potencial acelerador seja aumentado enquanto o potencial defletor permanece inalterado. O que aconteceria com $y(L)$, isto é, a deflexão do feixe na tela iria aumentar, diminuir, ou permanecer a mesma? O que aconteceria com o valor de B_0 , o campo necessário para fazer o feixe retornar ao centro da tela em sua posição não defletida? Explique seus raciocínios com clareza.

Thomson fez várias determinações de e/m em várias condições diferentes do tubo. Ele experimentou vários metais diferentes na composição do catodo (alumínio, platina, ferro). Além de ar atmosférico, ele fez observações com outros gases residuais no tubo (hidrogênio, dióxido de carbono). (Note que apesar do vácuo ser bastante pronunciado, ainda havia quantidade significativa de gás presente no tubo).

15. Porque Thomson fez medidas com todas estas diferentes condições experimentais? Que inferências podem ser tiradas do fato de que em todas elas o valor obtido para a razão e/m era essencialmente o mesmo (dentro de uma faixa relativamente larga de valores).

Quando água é decomposta por eletrólise, sabe-se que a passagem de 96.500 C de carga liberam 1,0 g de hidrogênio no catodo e 8,0 g de oxigênio no anodo. É também fato conhecido que a molécula de água é composta de dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio.

16. Calcule a razão carga-massa dos íons de hidrogênio e oxigênio na eletrólise, explicando seu raciocínio com clareza. Compare estes valores com o obtido para a partícula no feixe catódico.

Em conexão com os valores que você examinou no item 16, Thomson escreveu: "Portanto, o valor da razão carga-massa para os portadores de eletricidade nos raios catódicos é muito grande comparado com seu valor na eletrólise. O tamanho de e/m pode se dever ao pequeno valor de m ou ao grande valor de e , ou a uma combinação destes dois efeitos."

17. Enuncie em suas próprias palavras as considerações que tornam plausível que o pequeno valor de m seja o melhor candidato para explicar o grande valor da razão carga-massa da partícula catódica ao invés das outras duas possibilidades apontadas por Thomson. (As observações principais envolvidas são a aparente neutralidade elétrica perfeita da matéria ordinária e a grande penetração que o feixe catódico consegue no ar, conforme observado por Lenard.)

18. À luz da história inteira que você acaba de relatar, defina o termo "eletron"; isto é: o que significa esta palavra e a que ela se aplica?