

# DETERMINAÇÃO DA RAZÃO CARGA/MASSA DO ELÉTRON COM ÊNFOQUE HISTÓRICO-EXPERIMENTAL PARA O ENSINO MÉDIO.

Luiz Cezar Mendes da Silva<sup>a\*</sup> [cezar.21rj@yahoo.com.br]

Wilma Machado Soares Santos<sup>a</sup> [wilma@if.ufrj.br]

Penha Maria Cardoso Dias<sup>a</sup> ([penha@if.ufrj.br](mailto:penha@if.ufrj.br))

Marcos Binderly Gaspar<sup>a</sup> (mgaspar@if.ufrj.br)

<sup>a</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

## RESUMO

A aprendizagem de física moderna ou contemporânea no ensino médio visa estabelecer o contato dos alunos com idéias que mudaram a ciência do século XX; visa atrair jovens para a carreira científica, para se tornarem futuros pesquisadores e professores. É importante para o estudante do ensino médio conhecer os fundamentos da tecnologia atual que atua em sua vida e certamente definirá o seu futuro profissional. O que justifica a importância de incluir conceitos básicos da física moderna e, em especial, de se fazer uma ponte entre a física da sala de aula e a física do cotidiano (computador, tubo de imagem CRT, leitores ópticos, impressora laser, portas e torneiras automáticas, controle remoto, laser em Medicina, etc). No entanto, a maioria dos livros de ensino médio não aborda esse tema e, quando o faz é de forma muito superficial.

Este trabalho visa servir de roteiro para outros professores que desejem ensinar para alunos do ensino médio como a razão carga/massa do elétron pode ser determinada. Inicialmente é feita uma abordagem histórica do experimento proposto pelo físico Joseph John Thomson (1856-1940), com o qual ele determinou a razão carga/massa do elétron. Esta abordagem baseia-se na tradução de trechos do livro “The Discovery of Subatomic Particles”, de Steven Weinberg. Os conceitos teóricos são introduzidos a partir dos textos históricos apresentados.

Em seguida o experimento é realizado em conjunto com os alunos, usa-se o tubo de Thomson, multímetros, bobinas, fonte de tensão elétrica e a fonte contínua de corrente elétrica. Devido ao alto custo deste experimento, ele está sendo aplicado no Colégio Santo Inácio, uma escola tradicional da rede particular de ensino do Rio de Janeiro, que possui tal equipamento. O material produzido e a aplicação do mesmo em sala de aula são descritos.

## INTRODUÇÃO

A aprendizagem de física moderna ou contemporânea no ensino médio visa despertar a curiosidade dos estudantes e estabelecer o contato dos alunos com idéias que mudaram a ciência do século XX; visa atrair jovens para a carreira científica, para se tornarem futuros pesquisadores e professores. É importante para o estudante do ensino médio conhecer os fundamentos da tecnologia atual que atua em sua vida e certamente definirá o seu futuro profissional. O que justifica a importância de incluir conceitos básicos da física moderna e, em especial, de se fazer uma ponte entre a física da sala de aula e a física do cotidiano (computador, tubo de imagem CRT, leitores ópticos, xérox, impressora laser, portas e torneiras automáticas, controle remoto, laser em Medicina, fibras ópticas, etc). No entanto, a maioria dos livros de ensino médio não aborda esse tema e, quando o faz é de forma muito superficial; além disso, a maior parte dos professores de física que

está no mercado de ensino médio nunca tomou contato com o conteúdo de física moderna. Dentro desse contexto, e do trabalho de produção de material instrucional para o ensino médio, que vem sendo desenvolvido [Magalhães, Dias, Mendes da Silva, Ferreira], propomos trabalhar o tema razão carga/massa do elétron, refazendo o experimento proposto pelo físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940); além do experimento de Thomson, a montagem é usada para exemplificar alguns pontos teóricos. Para contextualizar o experimento, é feita uma abordagem histórica. Esta abordagem é uma tradução de trechos isolados do livro “The Discovery of Subatomic Particles”, de Steven Weinberg [Weinberg].

## **OBJETIVOS**

1- Facilitar a compreensão do aluno do ensino médio acerca de temas tão complexos de serem abordados apenas teoricamente. Para tal, realiza-se um experimento que pretende elucidar os mecanismos de interação entre a corrente nas espiras, o campo magnético gerado, a energia cinética do elétron e a interação do elétron com os campos, na busca em determinar a razão carga/massa do elétron.

2- Despertar o interesse do aluno e motivá-lo à compreensão da Física Moderna através do uso da história da física, saindo do campo teórico e demonstrando, sua aplicabilidade em diversas áreas do seu cotidiano, como também no desenvolvimento tecnológico da sociedade.

## **ABORDAGEM HISTÓRICA**

### **Descargas elétricas e raios catódicos.**

A primeira descarga elétrica a ser conhecida e a mais espetacular foi o relâmpago. É conhecido o experimento de Benjamin Franklin com pipas; foi ele a propor que eletricidade fosse constituída de um único tipo de fluido. Mas o relâmpago é tão esporádico e incontrolável que seu estudo pouco poderia revelar a respeito da eletricidade. Mas já no século XVIII, uma espécie mais controlada de descarga elétrica foi se tornando acessível para o estudo científico.

Em 1709 Hauksbee observou que, quando o ar dentro de um tubo de vidro era bombeado, até que sua pressão se tornasse cerca de  $1/60$  da pressão atmosférica, e o tubo fosse conectado a uma fonte de eletricidade estática obtida por fricção, uma luz estranha era vista dentro do tubo. Feixes de luz similar já haviam sido observados em barômetros de mercúrio com vácuo parcial. Em 1748 Watson descreveu a luz em um tubo de 32 polegadas no vácuo como uma centelha.

A natureza dessa luz não foi compreendida inicialmente, mas hoje sabemos que é um fenômeno secundário. Quando uma corrente elétrica flui através de um gás, os elétrons se chocam com os átomos do gás e transferem parte de sua energia, a qual é, então, re-emitida como luz. Hoje as lâmpadas fluorescentes e de letreiros de néon são baseados no mesmo princípio, com suas cores determinadas pela cor da luz que é preferencialmente emitida pelos átomos dos respectivos elementos: laranja para o néon, rosa claro para o hélio, verde azulado para o mercúrio, etc. A importância do fenômeno para a história da ciência elétrica está, entretanto, não na luz das descargas elétricas, mas na corrente elétrica em si. O estudo das descargas elétricas em gases foi um salto na direção correta, mas mesmo com  $1/60$  da pressão atmosférica o ar interfere muito com o fluxo de elétrons para permitir que sua natureza fosse descoberta. O progresso real tornou-se possível, somente quando o gás pôde ser removido e os cientistas puderam estudar o fluxo de eletricidade pura através do espaço quase vazio.

Johann H. Geissler inventou uma bomba que usava colunas de mercúrio como pistões. Esta bomba possibilitou fazer vácuo em um tubo de vidro até que a pressão se tornasse 1/10000 da pressão do ar no nível do mar. Esta bomba foi usada entre 1858-59 em uma série de experimentos sobre a condução da eletricidade em gases a baixa pressão, por Julius Plücker. Ele usou placas de metais em um tubo de vidro, conectado por fios a uma poderosa fonte de eletricidade. (Seguindo a terminologia de Faraday, a placa ligada à fonte positiva de eletricidade é chamada anodo e a placa ligada à fonte negativa de eletricidade é chamada catodo). Plücker observou que, quando quase todo ar era evacuado do tubo, a luz desaparecia, mas uma luminosidade esverdeada aparecia perto do catodo. A posição da luminosidade parecia não depender da posição do anodo. Parecia que algo saía do catodo, atravessava o espaço quase vazio no tubo, batendo no vidro sendo, então, coletado no anodo. Poucos anos mais tarde, Eugen Goldstein introduziu um nome para esse fenômeno misterioso “Cathodenstrahlen” ou, em Português, raios catódicos. Hoje se sabe que esses raios são elétrons projetados do catodo, por repulsão elétrica; eles batem no vidro, depositando energia nos seus átomos. Estes átomos excitados pela energia recebida se desexcitam emitindo luz visível. Mas isso estava longe de ser óbvio para os cientistas do século XIX.

Plücker também observou que a posição da luminosidade na parede do tubo podia ser deslocada por um magneto perto do tubo. Como veremos, era um sinal que os raios eram formados por partículas carregadas de alguma espécie. J.W. Hittor, estudante de Plücker, observou que corpos sólidos, colocados próximos ao pequeno catodo, produziam sombra nas paredes do tubo. A partir daí, ele deduziu que os raios trafegam a partir do catodo em linhas retas. O mesmo fenômeno foi observado em 1878-79 pelo físico inglês Sir Willam Crookes, que concluiu que os raios eram moléculas de gás dentro do tubo, as quais pegavam cargas negativas do catodo e eram violentamente repelidas pelo catodo. No entanto, a teoria de Plücker foi efetivamente refutada por Goldstein, que notou que, em um tubo de raios catódicos, evacuado em um 1/100.000 da pressão normal, os raios trafegam pelo menos 90cm, enquanto o caminho livre de uma molécula ordinária no ar, nessa pressão, é de cerca de 0,6 cm.

Uma teoria bem diferente foi desenvolvida na Alemanha, com base nas observações do físico experimental Heinrich Hertz. Em 1883, como um assistente no Laboratório de Física de Berlin, Hertz mostrou que os raios catódicos não eram apreciavelmente defletidos por placas de metal eletrificadas. Isso pareceu descartar a possibilidade que os raios catódicos fossem partículas carregadas eletricamente, pois, nesse caso, as partículas dos raios deveriam ser repelidas pela placa carregada por uma mesma carga e atraída pela placa carregada com carga oposta. Hertz concluiu que os raios eram uma espécie de onda, como a luz. Não estava claro porquê tal onda deveria ser defletida por um magneto, mas a natureza da luz não era bem compreendida e uma deflexão magnética não parecia impossível. Em 1891, Hertz observou um fenômeno que parecia suportar a teoria ondulatória dos raios catódicos: Os raios podiam penetrar folhas finas de ouro e outros metais, assim como a luz penetra o vidro.

Mas outras observações mostravam que o raio não é uma espécie de luz. Em sua tese de doutorado, o físico francês Jean Baptiste Perrin mostrou, em 1895, que os raios depositam carga elétrica negativa em um coletor de carga colocado dentro do tubo de raios catódicos. Sabe-se agora que a razão pela qual Hertz não observou nenhuma atração ou repulsão dos raios pelas placas eletrificadas é que as partículas dos raios trafegam tão rápido as forças elétricas são tão fracas que a deflexão era muito pequena para ser observada. Como Hertz reconheceu, as cargas elétricas nas placas eram parcialmente canceladas por efeito das moléculas residuais no tubo. Essas moléculas eram quebradas pelos raios catódicos em partículas carregadas, que eram, então, atraídas pela placa de carga oposta. Mas com Goldstein mostrou, se os raios fossem partículas carregadas, essas partículas não poderiam ser partículas de moléculas ordinárias. Então o que seriam?

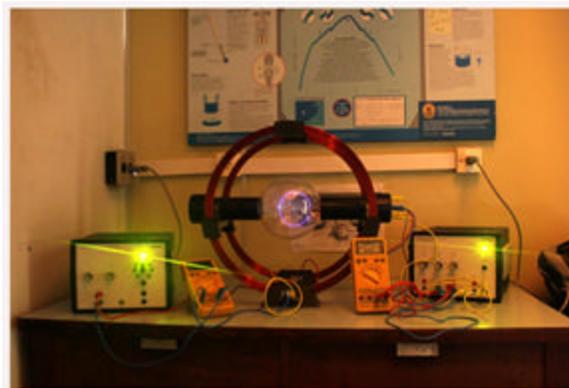
Foi nesse momento que J. J. Thomson entrou na história. Thomson primeiro se dedicou a medir a velocidade dos raios. Em 1894 ele obteve um valor de 200km/s, mas seu método apresentava falhas; depois ele abandonou esse resultado. Em 1897, Thomson teve sucesso onde Hertz falhou: Ele detectou uma deflexão de raios catódicos por forças elétricas entre os raios e placas metálicas eletrizadas. Seu sucesso decorreu do uso de melhores bombas de vácuo, que baixaram a pressão dentro do tubo de raios catódicos até o ponto onde os efeitos dos gases residuais dentro do tubo se tornassem desprezíveis. Alguma evidência da deflexão elétrica foi encontrada mais ou menos no mesmo tempo por Goldstein. A deflexão era na direção da placa carregada positivamente, afastando-se da placa carregada negativamente, confirmando a conclusão de Jean Perrin que os raios carregam cargas elétricas negativas. O problema, agora, era aprender algo quantitativo a cerca da natureza das misteriosas partículas carregadas negativamente dos raios catódicos. O método de Thomson era direto: Ele exercia força elétrica e magnética nos raios e media a quanto eles eram defletidos.

### **Deflexão de raios catódicos**

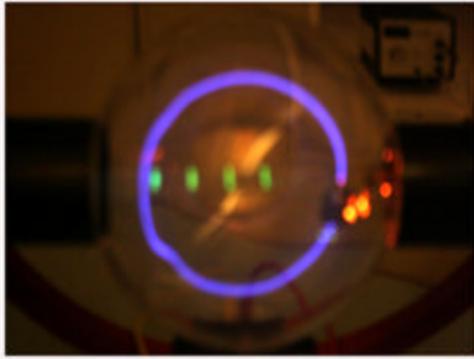
Thomson usou a segunda lei de Newton para obter uma fórmula geral que lhe permitisse interpretar medidas da deflexão dos raios catódicos, produzidas em seu experimento por várias forças elétricas e magnéticas, em termos das propriedades das partículas dos raios catódicos. Em seu tubo de raios catódicos, as partículas dos raios passam através de uma região (vamos chamá-la de região de deflexão), onde elas estão sujeitas a forças elétricas e magnéticas, atuando perpendicularmente à direção original de movimento das partículas; depois, elas passam através de uma região mais extensa, livre de forças (a região de deslocamento), onde elas andam livremente até alcançar o fim do tubo. Uma mancha luminosa aparece onde as partículas do raio batem na parede do vidro no final do tubo; então foi fácil para Thomson medir o deslocamento do raio produzido pelas forças medindo a distância entre as localizações da mancha, quando as forças estavam presentes e quando elas não estavam presentes.

### **EXPERIMENTO**

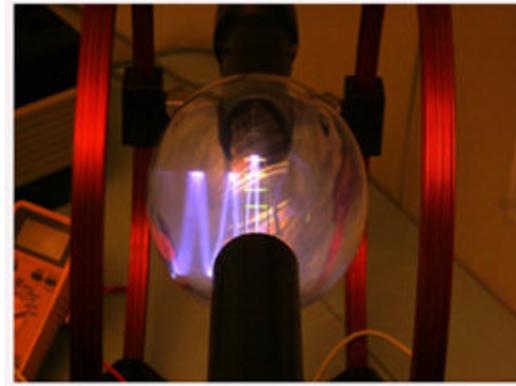
O experimento montado se encontra na figura 1, onde o feixe de elétrons pode ser visto no centro do tubo, este feixe é mostrado em detalhe na figura 2.



**Figura1: Foto do experimento montado.**



**Figura 2: Foto do feixe de elétrons, formando um círculo, com velocidade inicial perpendicular ao campo magnético.**



**Figura 3: Foto do feixe de elétrons em espiral**

O feixe de elétron é submetido ao campo magnético perpendicular à sua velocidade assim, forma-se um círculo, como mostrado na figura 2. No caso de feixes paralelos ao campo, não há deflexão. Para os outros ângulos, obtém-se uma bela trajetória em espiral, como na figura 3.

## **RESULTADOS**

Os conteúdos de física aprendidos no último ano do Ensino Médio, como campo elétrico, campo magnético e força magnética, necessitam de grande grau de abstração dos alunos, pois o campo elétrico, o campo magnético e a força no elétron em movimento estão em três direções perpendiculares entre si. É notório que esses assuntos são de extrema importância, porém são vistos rapidamente e, devido ao pouco tempo disponível, quase não são realizados experimentos para uma melhor aprendizagem.

De acordo com nossa proposta, todos esses tópicos são abordados no experimento. No decorrer da experiência, desliga-se a corrente elétrica da bobina, não existindo, assim, o campo magnético produzido por ela. O aluno interage diretamente. Ele aproxima um ímã comum do feixe de elétrons e pode observar uma interação entre os elétrons e o campo magnético de um ímã. Na figura 4, podemos observar os alunos realizando a deflexão do feixe com o uso do ímã.



**Figura 4: Com a corrente elétrica da bobina desligada, o aluno aproxima um ímã do feixe de elétrons.**

Os alunos entenderam que os elétrons são acelerados em um campo elétrico e penetram em um campo magnético perpendicular a sua direção de movimento. A carga específica do elétron é determinada pela medida do potencial acelerador do campo magnético e do raio da órbita eletrônica. Um elétron de massa  $m_0$  e carga  $e$  é acelerado por uma diferença de potencial  $U$ , adquire energia cinética:

$$e.U = m_0 \cdot v^2 / 2 \quad (1)$$

onde  $v$  é a velocidade do elétron

Em um campo magnético de intensidade  $B$ , o módulo da a força magnética que atua sobre um elétron com velocidade  $v$  é dado por :

$$F = e.v \times B \quad (2)$$

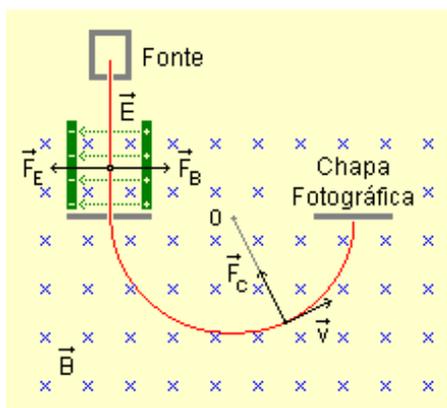
Se o campo magnético é uniforme, como é no arranjo utilizado, o elétron descreve uma trajetória em espiral ao longo das linhas de força magnéticas que se torna um circulo de raio  $r$  sendo a velocidade  $v$  ortogonal a  $B$ . Como a força resultante é a força magnética, pela segunda Lei de Newton temos que:

$$v = e.B.r / m_0 \quad (3)$$

onde  $B$  é o valor absoluto do vetor campo magnético. Das equações 1 e 3 obtém-se:

$$e / m_0 = 2. U / B^2 \cdot r^2 \quad (4)$$

Como exemplo de aplicação atual, foi discutido com os alunos o espectrômetro de massa, que é muito usado para determinar massas atômicas com grande precisão. O elétron é submetido a um campo elétrico entre as placas e a um campo magnético entrando perpendicularmente para dentro do papel, como esquematizado na figura 5 [<http://portalsaofrancisco.com.br/alfa/fisica-nuclear/imagens/fisica-nuclear13.gif>]



**Figura 5: Esquema de um espectrômetro de massa.**

## CONCLUSÕES

O novo conhecimento foi construído a partir dos conceitos aprendidos em sala de aula, trazidos pelos próprios alunos. O enfoque histórico associado à montagem e realização de cada etapa do experimento facilita a compreensão da determinação da razão carga/massa do elétron, desmistificando, no aluno, temas tão complexos de serem abordados apenas teoricamente.

A realização do experimento possibilitou a compreensão dos seguintes conceitos: campo elétrico, campo magnético, força elétrica e força magnética, e chegar à equação para determinação da relação carga/massa. Os alunos ficaram motivados pela visão do feixe de elétrons, compreenderam que o feixe foi formado por uma combinação de campos elétrico e magnético. Entenderam como variavam os campos com a corrente e a voltagem. Variando-se o campo magnético (corrente) e a velocidade dos elétrons (potencial) pode-se ajustar o raio da órbita para que coincida com um valor pré-estabelecido 0,02m, 0,03m ou 0,04m. Se a polaridade do campo magnético for invertida, veremos ao invés do raio luminoso, um feixe com sentido contrário ao esperado.

Houve grande motivação do grupo, que mostrou compreender a aplicabilidade da Física Moderna nas mais diversas áreas do cotidiano e no desenvolvimento tecnológico da sociedade. Os alunos compreenderam que esta descoberta trouxe, com ela, ainda que indiretamente, avanço tecnológico, possibilitando o uso de equipamentos tais como: tubos de imagem CRT, leitores ópticos, xérox, impressora laser, portas e torneiras automáticas, controle remoto, uso do laser em Medicina.

O material desenvolvido insere-se em uma linha de pesquisa de produção de material instrucional, que vem apresentando alternativas, diferentes das tradicionais, para o ensino de temas em que, usualmente, os alunos apresentam dificuldade de compreensão, devido à abstração envolvida. O uso da história da física associada a experimentos tem se revelado de grande eficiência [Magalhães, Dias, Mendes da Silva, Ferreira].

### Referências

- Magalhães M. F, Santos W. M. S. e Dias P. M. C. Uma proposta para ensinar os conceitos de campo elétrico e magnético: Uma aplicação da História da Física. Revista Brasileira de Ensino de Física. Vol. 24, No4, 326-333 (2002)
- Dias P. M. C., Santos W. M. S. e Souza M. T. M. A Gravitação Universal (Um texto para o ensino médio), Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol. 26, No 3, 257-271 (2004)
- Mendes da Silva L. C. e Santos W. M. S. Razão carga/massa do elétron no enfoque do Ensino Médio. VII ENLIF – IF – UFRJ site: [www.if.ufrj/~enlif](http://www.if.ufrj/~enlif)
- Ferreira R. C., Santos W. M. S. e Dias P. M. C. Construção do conceito de ‘momento de uma força’ a partir de experimentos relacionados ao cotidiano. Física na Escola, v. 9, n. 1, 2008
- Weinberg S. The Discovery of Subatomic Particles. Penguin Books, 1993
- <http://portalsaofrancisco.com.br/alfa/fisica-nuclear/imagens/fisica-nuclear13.gif>