

**Instituto de Física  
UFRJ**



**PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO DE FINAL DE CURSO**

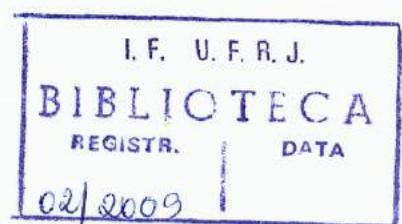
**O experimento de J. J. Thomson, razão carga/massa do elétron no enfoque do Ensino Médio.**

Aluno: Luiz Cesar Mendes da Silva

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Wilma Machado Soares Santos

Rio de Janeiro, maio/2009

**02/2009**



## **Agradecimentos**

- Agradeço a Deus, simplesmente por tudo, pois sem Ele, nada seria. A Ele confio o início desta nova caminhada.
- A minha mãe e ao meu pai (este em memória), não existem palavras para expressarem minha gratidão pelos seus ensinamentos e tantos anos de dedicação.
- As minhas irmãs Leila e Regina, que tanto me apoiaram e sempre acreditaram em mim.
- Ao meu tio Paulo Cezar Rodrigues e todos meus familiares.
- A professora Wilma Machado Soares Santos, pela paciência, dedicação, ensinamentos, sugestões, críticas e sua amizade durante a realização desse trabalho.
- Aos meus amigos que de alguma forma me ajudaram nessa caminhada.
- Aos meus amigos da faculdade, que lutaram junto comigo para que esse momento chegasse. Eles sabem como estou me sentido, essa vitória também é deles.
- A professora Penha Maria Cardoso Dias pelas ajudas durante a realização desse trabalho.
- Ao professor Marcos Binderly Gaspar pelas ajudas durante a realização desse trabalho, assim como seu apoio no XVIII SNEF.
- Aos professores da UFRJ, que contribuíram para minha formação.
- Ao professor Sérgio Tobias, que prontamente colocou sua turma a disposição para realização experimental desse trabalho.

|  |               |
|--|---------------|
| <b>Capítulo 1- Introdução. ....</b>  | <b>1</b>      |
| <b>Capítulo 2- Abordagem Histórica. ....</b>   | <b>3</b>      |
| <i>sobre o processo que Thomson utilizou para chegar aos seus resultados. Esta abordagem está sendo realizada a partir do livro “The Discovery of Subatomic Particles” de Steven Weinberg. Está dividida em:</i> |               |
| <b>Secção 2.1- A História da Descoberta dos raios Catódicos. ....</b>  | <b>3</b>      |
| <b>Secção 2.2- A natureza da eletricidade. ....</b>  | <b>3</b>      |
| <b>Secção 2.3 - Descargas elétricas e raios catódicos. ....</b>  | <b>5</b>      |
| <b>Secção 2.4- Deflexão de raios catódicos. ....</b>   | <b>7</b>      |
| <b>Secção 2.5- Deflexão elétrica dos raios catódicos. ....</b>   | <b>10</b>     |
| <b>Secção 2.6- Deflexão Magnética dos raios catódicos. ....</b>  | <b>11</b>     |
| <b>Secção 2.7- Relação de energia no experimento de Thomson. ....</b>  | <b>13</b>     |
| <b>Secção 2.8- Elétrons como partículas elementares. ....</b>  | <b>15</b>     |
| <b>Secção 2.9- Elétrons como partículas elementares. ....</b>  | <b>19</b>     |
| <br><b>Capítulo 3 – Experimento. ....</b>  | <br><b>20</b> |
| <i>Neste capítulo é detalhado toda parte instrumental da experiência.</i>  |               |
| <b>Secção 3.1- Modelo teórico. ....</b>  | <b>20</b>     |
| <b>Secção 3.2- Materiais Utilizados. ....</b>  | <b>21</b>     |
| <b>Secção 3.3- Montagem do experimento. ....</b>   | <b>21</b>     |
| <b>Secção 3.4- Experimento. ....</b>   | <b>22</b>     |
| <br><b>Secção 3.4.1. ....</b>  | <br><b>22</b> |
| <i>Primeiro Experimento: “Visualizar” o Feixe de Elétrons.</i>   |               |
| <br><b>Secção 3.4.2. ....</b>  | <br><b>23</b> |
| <i>Segundo Experimento: Feixe na Presença de um Campo Magnético.</i>   |               |
| <br><b>Secção 3.4.3. ....</b>  | <br><b>24</b> |
| <i>Terceiro Experimento Analisar a relação do ângulo formado pelo campo magnético e o Feixe.</i>   |               |
| <br><b>Secção 3.4.4. ....</b>  | <br><b>25</b> |
| <i>Quarto Experimento Obtenção de Dados em um Feixe Circular.</i>  |               |

|  |    |
|--|----|
| <b>Secção 3.4.5.</b> .....                                       | 25 |
| Análise de Dados e Determinação da Razão Carga/Massa do Elétron. |    |
| <b>Capítulo 4- Conclusão.</b> .....                              | 28 |
| <b>Capítulo 5 – Referências Biográficas.</b> .....               | 29 |

## 1- Introdução

De acordo com os princípios propostos pela lei de Diretrizes e Bases LDB [1], assim como pelos Parâmetros Curriculares PCN-EM do MEC [2], é recomendada a aprendizagem de física moderna ou contemporânea no ensino médio. Tal aprendizagem tem importância crucial para os alunos, tendo em vista que a física moderna estabelece o contato dos alunos com as idéias que mudaram a ciência do século XX.

Neste trabalho apresentamos uma proposta de ensino que utiliza a compreensão dos conceitos físicos teóricos a partir do entendimento da construção destes conceitos utilizando para tal a História da Física, no processo ensino-aprendizagem. A História da Física é um recurso inesgotável ao ensino da Física. “Entendemos que, revivendo os problemas que deram origem a um conceito, com os mesmos argumentos da época em que foi estabelecido, o estudante terá uma melhor compreensão do conceito, pois vai entender porque o conceito existe”, ao entender os argumentos que realmente convenceram aos cientistas. Este trabalho segue a mesma linha de outros nos quais a produção de material instrucional apresenta alternativas, diferentes das tradicionais, para o ensino de temas em que, usualmente, os alunos apresentam dificuldade de compreensão, devido à abstração envolvida [3,4].

Tem se revelado eficiente ao aprendizado [5,6]: 1. O uso de atividades experimentais relacionadas à teoria e ao cotidiano, na construção do conhecimento pelo aluno; 2. A experimentação como ferramenta importante na obtenção de informações (observações e medidas) e na produção de idéias que constituem uma das bases de apoio no processo de formação do saber; 3. A análise e a interpretação dos resultados experimentais como auxiliares na evolução conceitual e na introdução aos modelos teóricos e seus significados.

Um tema bastante interessante para ser abordado no ensino médio é a espectroscopia de massa, que foi iniciada com o trabalho experimental realizado pelo físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940), no Laboratório Cavendish da Universidade de Cambridge. A pesquisa de Thomson, que levou à descoberta do elétron em 1897 também produziu o primeiro espectrômetro de massa. Thomson notou que os íons se moviam na presença de campos elétricos e magnéticos e em trajetórias parabólicas, e determinou com seu experimento a razão carga/massa do elétron. A descoberta de Thomson forneceu-lhe o prêmio Nobel de Física em 1906 [7]. Atualmente assim como as impressões digitais são usadas para identificar pessoas, a espectroscopia de massa é usada para identificar substâncias.

Além da espectroscopia de massa, o elétron tem uma importância única para a química, física e biologia, devido sua leveza, carga e estabilidade. Uma corrente elétrica em um fio não é nada mais que um fluxo de elétrons. Elétrons participam de reações nucleares que produzem o calor do sol. Cada átomo no universo consiste de um caroço denso, (o núcleo) rodeado por uma nuvem de elétrons. As diferenças químicas entre um elemento e outro dependem quase inteiramente dos números de elétrons no átomo.

Neste trabalho apresentamos uma proposta instrucional para determinar a razão carga/massa do elétron. Na abordagem sugerida, a capacitação teórica é introduzida pelo uso da história, apresentando as etapas realmente seguidas por Thomson, suas dificuldades e as soluções encontradas; o enfoque histórico segue a abordagem de Weinberg [7]. A viabilidade desta proposta depende do uso de equipamento específico com o qual foram

realizados quatro experimentos de forma acessível, para alunos da terceira série do ensino médio. A idéia é que os alunos participem desde a montagem experimental.

No primeiro experimento, mostra-se como um feixe de elétrons é produzido quando aplicada uma tensão, entre o catodo e o anodo. No segundo experimento, os alunos aplicam corrente em uma bobina e observam o efeito de um campo magnético sobre o feixe. No terceiro experimento eles observam o efeito produzido no feixe com a variação do ângulo entre o feixe e o campo magnético. Finalmente, no quarto experimento a partir de um feixe circular, eles fazem medidas de corrente e tensão e determinam a partir de seus resultados, plotados em um gráfico, o valor da relação carga/massa do elétron.

O trabalho foi aplicado no Colégio Santo Inácio, da rede particular de ensino do Município do Rio de Janeiro. Os resultados obtidos, e a análise dos mesmos são apresentados de forma detalhada na secção 3.4.5.

## 2- Abordagem histórica

### 2.1- A História da Descoberta dos raios Catódicos

#### Baseada no livro “The Discovery of Subatomic Particles” de Steven Weinberg

Existem quase sessenta tipos de partículas, mas uma partícula que é especialmente lembrada na Física é o elétron. O elétron foi umas das primeiras partículas elementares a serem observadas, é também a mais leve das partículas elementares (alguns de poucos tipos de partículas eletricamente neutras que parecem não ter massa) e umas das poucas que não decaem em outras partículas.

Como consequência da sua leveza, carga e estabilidade, o elétron tem uma importância única para a química, física e biologia. Uma corrente elétrica em um fio não é nada mais que um fluxo de elétrons. Elétrons participam de reações nucleares que produzem o calor do sol. Mesmo mais importante cada átomo no universo consiste de um caroço denso, (o núcleo) rodeado por uma nuvem de elétrons. As diferenças químicas entre um elemento e outro dependem quase inteiramente dos números de elétrons no átomo.

A descoberta do elétron é em geral e com justiça, reconhecida ao físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940). Foi nas suas pesquisas experimentais e na sua liderança no laboratório Cavendish de 1884-1919 que Thomson fez suas melhores contribuições para a física. Ele foi honrado com o prêmio Nobel em 1906, como cavalheiro em 1908, e a presidência da “Royal Society”. *Honrosamente ele foi enterrado na abadia Westminster Abbey próximo a Newton e Rutherford.*

Logo após assumir a posição de professor do laboratório Cavendish, Thomson começou sua investigação das descargas elétricas dos gases raro-efeitos, e em particular tipos de descargas conhecidas como raios catódicos. Esse fenômeno espetacular levou Thomson a um problema muito mais interessante: A natureza da eletricidade. Sua conclusão, que a eletricidade é um fluxo de partículas hoje conhecidas como elétrons foi publicada em três artigos em 1897 [8].

### 2.2- A natureza da eletricidade

A observação da atração elétrica em muitas substâncias leva a idéia que a eletricidade não é uma propriedade intrínseca das substâncias, mas uma espécie de fluido (para Gilbert um “effluvium”), que é produzido ou transferindo quando corpos são atritados juntos e se espalha para objetos próximos. Esse quadro teve suporte pela descoberta de Stephen Gray (1667 – 1736) da condução elétrica.

O problema da natureza da eletricidade tornou-se mais complicado quando foi descoberto que corpos eletrizados podiam atrair ou repelir outros corpos eletrizados, trazendo a questão se havia um ou dois tipos de eletricidade.

Em 1733 Du Fay iniciou seu trabalho na eletricidade e concluiu que “existem duas eletricidades, muito diferentes uma da outra; uma chamada de eletricidade vítreia e a outra de eletricidade resinosa” [9]. A eletricidade vítreia é produzida quando substâncias como vidro, são atritadas especialmente com sedas. E a eletricidade resinosa é produzida quando

resinas como âmbar, são atritadas especialmente com pele de animal. Substâncias com o mesmo tipo de eletricidade se repelem e com tipos diferentes se atraem.

Gray e Du Fay não escreveram sobre eletricidade como um fluido, mas como uma condição que pode ser induzida na matéria, foi Abbé Jean Antoine Nollt (1770) que interpretou os dois tipos de eletricidade do Du Fay como dois tipos de fluido elétricos, um vítreo e o outro resinoso.

Franklin tornou-se interessado no estudo da eletricidade em 1743, ele supôs que a matéria tinha eletricidade como uma “espécie de esponja”. Quando um tubo de vidro é atritado com um pedaço de seda parte da eletricidade da seda é transferida para o vidro, deixando uma deficiência na seda. É esta deficiência de eletricidade identificada com que Du Fay chamou de eletricidade resinosa. Similarmente, quando um tubo de resina é atritado com pele de animal, alguma eletricidade é transferida, mas desta vez do tudo para a pele do animal, deixando a deficiência de eletricidade no tubo; novamente, a deficiência de eletricidade no tubo e o excesso na pele de animal são identificados como eletricidades resina e vítreas de Du Fay, respectivamente. Franklin chamou à falta de eletricidade de eletricidade negativa e ao excesso de eletricidade positiva; a quantidade de eletricidade (positiva ou negativa em qualquer corpo, como sendo a *carga elétrica do corpo*). Estes termos são usados até hoje.

Franklin, também introduziu a hipótese fundamental da conservação da carga. A eletricidade nunca é criada ou destruída, mas apenas transferida. Daí, quando uma barra de vidro é atritada com seda, a carga elétrica positiva na barra é exatamente numericamente igual à carga negativa da seda; entre cargas positivas e negativas, a carga total permanece nula.

E sobre atração e repulsão? Franklin supôs que a eletricidade repele a si mesma, mas atrai a matéria que a contém. Isto explicava a maioria dos fatos conhecidos na época. Mas outros fatos como, por exemplo, a repulsão entre dois corpos portando eletricidade resina não se encaixava. Esta lacuna na teoria de um fluido de Franklin foi preenchida por F. U. Aepinus (1724-1802). Depois de estudar as idéias de Franklin, Aepinus sugeriu que na ausência de uma quantidade contrabalançada de eletricidade, a matéria ordinária repele a si mesma. Com esta emenda, a teoria de um fluido de Franklin ficou capaz de dar conta de todos os fenômenos que eram explicados pela teoria de dois fluidos de Du Fay e Nollt.

Do ponto de vista do que conhecemos hoje, fica a pergunta: Qual das duas teorias a de um fluido ou a de dois fluidos seria a correta? A resposta é que ambas são corretas. Em condições normais, a eletricidade é transportada por partículas chamadas elétron, a qual, com Franklin supôs possui eletricidade de apenas um tipo. Mas Franklin errou quanto ao tipo da eletricidade. De fato, os elétrons transportam eletricidade do tipo que Du Fay chamou de “resinosa” e não do tipo “vítreo”.

Nos átomos da matéria comum os elétrons são ligados aos densos núcleos atômicos que contém a maior parte da massa de qualquer substância e são normalmente imóveis nos sólidos. Como Franklin pré-supôs elétrons repelem elétrons e elétrons e núcleo se atraem; e como Aepinus supôs os núcleos atômicos repelem outros núcleos.

De uma maneira puramente empírica foi desenvolvida uma lista de substâncias chamada seqüência tribo-elétrica, uma parte desta foi transcrita a seguir:

*Pele de coelho/ lucite/ quartzo/ lã/ pele de gato/ seda/ algodão/ madeira/ âmbar/ resina/ metal/ teflon.*

As substâncias no início da lista tendem a perder elétrons, e as do final tendem a retê-los. Assim se dois objetos são atritados os que estiverem mais próximos do início da lista, tendem a ficar com uma carga elétrica positiva ou vítrea e aqueles perto do final da lista tendem a ficar com carga negativa ou resinosa. A seqüência tribo elétrica não é bem entendida teoricamente, e mesmo uma mudança no clima pode afetar o posicionamento relativo das várias substâncias.

É irônico que não tenhamos um entendimento detalhado da eletrização por atrito, obstante ter sido este o primeiro fenômeno elétrico a ser estudado cientificamente. Mas esta é freqüentemente a maneira pela qual a ciência progride, não por resolver cada problema apresentado pela natureza, mas selecionando problemas que estão tanto livres quanto possíveis, de complicações irrelevantes que oferecem oportunidades para obter os princípios fundamentais que estão na base dos fenômenos físicos.

### **2.3- 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 observada 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, reemitida como luz. Hoje as lâmpadas fluorescentes e 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 deste 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 interferia 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  $10^{-4}$  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. (Segundo 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 emitem luz visível quando voltam para seu estado inicial. 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 quando um ímã era colocado perto do tubo. Como veremos, era um sinal que os raios eram formados por partículas carregadas de alguma espécie. J.W. Hittor (1824-1914), estudante de Plücker, observou que corpos sólidos, colocados próximos de um 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 então violentamente repelidas por ela. No entanto, a teoria de Crookes foi efetivamente refutada por Goldstein, que notou que, em um tubo de raios catódicos, com pressão igual a  $10^{-5}$  da pressão normal do ar, os raios se deslocavam pelo menos 90 cm, enquanto o valor típico do livre caminho médio de uma molécula, nessa pressão, era somente em torno 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 dar suporte 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 o motivo pelo qual Hertz não observou nenhuma atração ou repulsão dos raios pelas placas eletrificadas, foi em razão do fato de que as partículas dos raios se deslocavam com grande velocidade, e como as forças elétricas eram fracas, 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

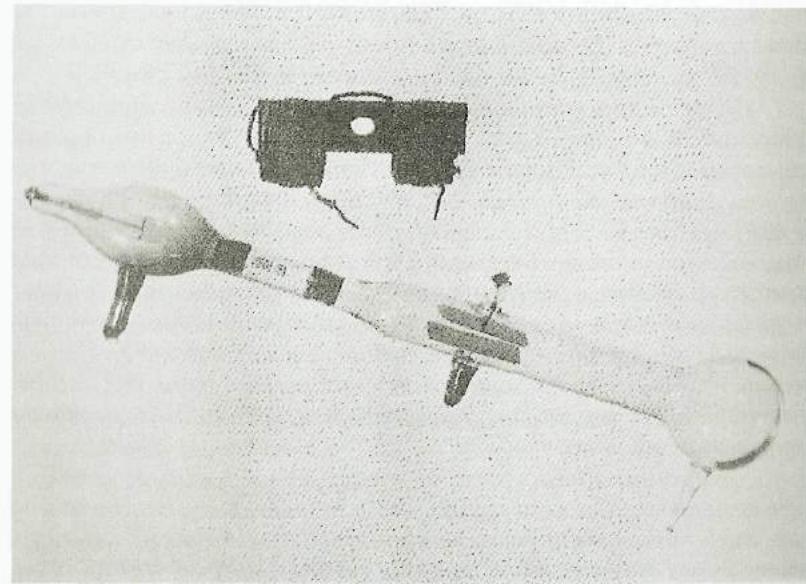
tubo. Essas moléculas eram quebradas pelos raios catódicos em partículas carregadas, que eram, então, atraídas pela placa de carga oposta. Mas com Goldstein mostrou, se os raios fossem partículas carregadas, essas partículas não poderiam ser partículas de moléculas ordinárias. Então o que seriam?

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 falha; 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.

#### **2.4- Deflexão de raios catódicos**

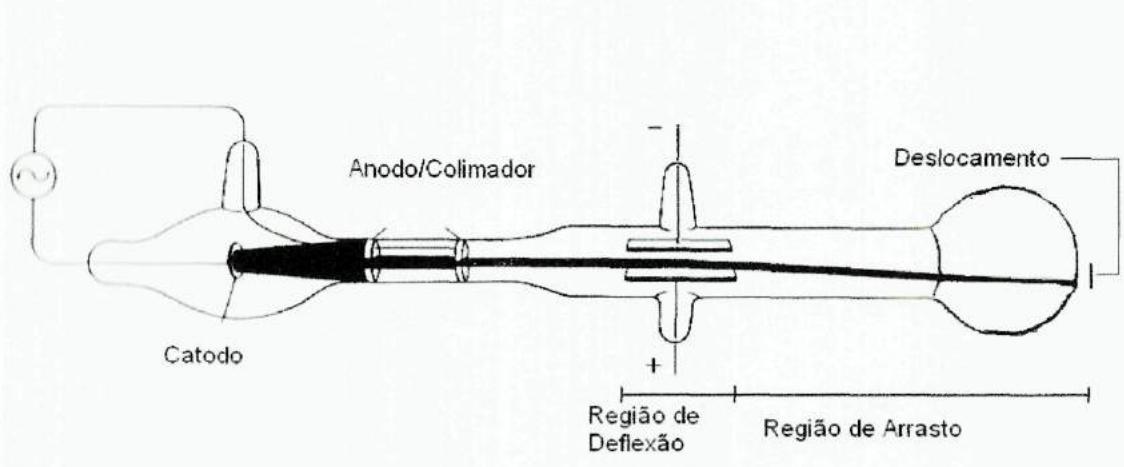
Na época de Thomson a natureza da eletricidade não era conhecida! Desde 1709 já eram observadas descargas elétricas em tubos de vidro, com baixa pressão. O que se vê, no interior do tubo, são luzes cujas cores dependem do gás. As luzes são provenientes das colisões entre moléculas do gás e os elétrons do catodo. Se o vácuo for muito bom, ocorre menos difusão dos íons e um feixe bem colimado dos elétrons do catodo. Descargas em tubos de vidro eram largamente investigadas na época de Thomson como parte do estudo da natureza da luz. Diferente de outros pesquisadores, Thomson conseguiu obter um bom vácuo.

Thomson usou a segunda lei de Newton para obter uma fórmula geral que lhe permitisse interpretar as medidas da deflexão dos raios catódicos, produzidas em seu experimento com seu tubo de raios catódicos, figura 1, por forças elétricas e magnéticas, em termos das propriedades das partículas que formam os raios catódicos.



**Figura 1.** Um dos tubos de raios catódicos utilizados por Thomson [6]. Esse tubo de raios catódicos usado por Thomson e por outros cientistas foi o precursor dos tubos de imagem usados em receptores de TV, osciloscópios, telas de radar e monitores de computador.

Em um tubo de raios catódicos, as partículas passam através de uma região (vamos chamá-la de região de deflexão), figura 2, onde elas estão sujeitas a forças elétricas e magnéticas, atuando perpendicularmente à direção original de movimento das partículas; em seguida, elas passam através de uma região maior, livre de forças (a região de deslocamento), figura 2, onde elas andam livremente até alcançar o fim do tubo. Uma mancha luminosa aparece onde às partículas batem na parede do vidro no final do tubo; então foi fácil para Thomson medir o deslocamento produzido pelas forças medindo a distância entre as localizações da mancha, quando as forças estavam presentes e quando elas não estavam presentes.



**Figura 2.** Visão esquemática do aparelho de Thomson. O catodo está conectado por um fio através de um tubo de vidro a um gerador de cargas elétricas negativas; o anodo e o colimador estão conectados ao gerador por outro fio de forma que a carga elétrica negativa pode fluir de volta para o gerador. As placas defletoras estão conectadas aos terminais de uma bateria elétrica. Os raios catódicos invisíveis são repelidos pelo catodo; alguns deles passam através de fendas no anodo e colimador, que só admite um estreito feixe dos raios. Os raios então são defletidos por forças elétricas enquanto passam entre as placas; eles então viajam livremente até bater na parede do tubo produzindo luz. Esta figura é baseada em um desenho de Thomson para os tubos de raios catódicos em seu artigo "Cathode Rays," *Phil. Mag.* 44(1897), 293.

De acordo com a fórmula de Thomson o deslocamento da partícula do raio  $D$ , pode ser obtido por:

$$D = \frac{F_p \cdot L_D \cdot L_A}{m \cdot v^2} \quad (1)$$

Sendo,  $F_p$  a Força na partícula do raio;  $L_D$  o comprimento da região de deflexão;  $L_A$  o comprimento da região de arrasto;  $m$  a massa da partícula do raio e  $v$  a velocidade da partícula.

Utilizando números mais ou menos realistas, suponha que a força exercida na partícula do raio é  $10^{-16}$  N, o comprimento da região de deflexão 0,05 m, o comprimento da região de arrasto 1,1 m, a massa da partícula do raio  $9 \cdot 10^{-31}$  Kg e a velocidade da partícula do raio  $3 \cdot 10^7$  m/s. então o deslocamento do raio quando ele chega no final do tubo é 0,0068m.

Para compreender a fórmula de Thomson, a coisa importante é que as forças exercidas nas partículas as aceleram fazendo ângulos retos com o eixo do tubo, então pelo tempo que as partículas emergem da região de deflexão elas têm uma pequena componente

de velocidade que formam ângulos retos com o movimento original. Esta componente é igual ao produto da aceleração pelo tempo que ela gasta na região de deflexão, sendo o tubo horizontal e a deflexão para baixo, como na figura 2, as partículas entram na região de arrasto, e como não existem forças atuando, elas mantêm a mesma direção horizontal e componente de velocidades para baixo.

Como a distância percorrida em qualquer direção é igual à componente da velocidade nesta direção vezes o tempo gasto no percurso, o deslocamento do feixe para baixo, quando ele alcança o final do tubo é simplesmente igual à componente da velocidade produzida na região de deflexão vezes o tempo que ele gasta na região de arrasto.

Thomson mediou o deslocamento produzido por várias forças elétricas e magnéticas agindo na partícula do feixe. O que isso revelou acerca das partículas nos raios catódicos? Sobre as quantidades que aparecem na fórmula de Thomson, os comprimentos das regiões de deflexão e arrasto são quantidades conhecidas e determinadas pelo desenho do tubo do raio catódico; a massa e a velocidade são propriedades das partículas que se gostaria de determinar.

E sobre a força? Como veremos, a força elétrica atuando na partícula é proporcional à carga da partícula. Com relação à fórmula de Thomson, observa-se que o deslocamento das partículas quando chegam ao final do tubo, é proporcional a uma combinação particular de parâmetros das partículas; carga elétrica dividida pela massa e pela velocidade ao quadrado, então medidas do deslocamento do raio só podem dar um valor desta combinação de parâmetros. Mas isso não é realmente o quê se quer saber. As quantidades interessantes são a carga e a massa das partículas; a velocidade é simplesmente um valor que é produzido em um tubo particular de raios catódicos.

## 2.5- Deflexão elétrica dos raios catódicos

No experimento, forças elétricas foram produzidas por placas metálicas paralelas carregadas (figura 3). A força elétrica em qualquer corpo elétrico carregado pode em geral ser expressa pelo produto da carga pelo valor do campo elétrico na posição do corpo. Então, para interpretar medidas na deflexão dos raios catódicos em termos das propriedades das partículas dos raios catódicos, foi necessário para Thomson determinar o campo elétrico ao longo do percurso dos raios entre as placas. Esse problema é simplificado tremendoamente se levasse em conta que no experimento de Thomson o comprimento e a largura das placas metálicas eram muito maiores que a separação entre elas. Em consequência, na maior parte dos pontos entre as placas pode se ignorar qualquer efeito de borda. Então, esperá-se que próximo às bordas das placas, o campo elétrico entre as placas deve formar ângulos retos com as placas, apontando da placa positiva para a negativa, como no diagrama da figura 3. O campo elétrico também não pode depender da localização ao longo das placas, porque qualquer ponto na placa é igual a qualquer outro (mesmo se nós colocamos uma distribuição não uniforme de cargas elétricas nas placas, as forças elétricas que seriam estabelecidas por essas cargas moveriam as cargas ao redor das placas até que sua distribuição fosse uniforme). Finalmente, e talvez mais surpreendente, o campo elétrico em um ponto entre as placas não depende das distâncias entre esse ponto e as placas. Isto é uma consequência da interpretação do campo elétrico como o número de

linhas de campo por unidade de área. A figura 4 mostra que o mesmo número de linhas de campo passa através de uma dada área perpendicular as linhas de campo em qualquer lugar entre as placas. Concluímos então que a força elétrica no problema de Thomson faz realmente ângulos retos com o eixo do tubo de raios catódicos, a intensidade igual à carga do elétron vezes uma constante, o campo elétrico.

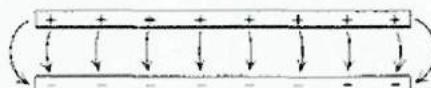


Figura 3

As forças elétricas produzem um deslocamento dos raios catódicos no final do tubo dado pela seguinte equação:

$$D_E = \frac{q \cdot E \cdot L_D \cdot L_A}{m \cdot v^2} \quad (2)$$

Ao usarmos medidas desta deflexão para aprendermos alguma coisa sobre as partículas dos raios, é necessário conhecer o valor do campo elétrico entre as placas carregadas. Uma forma de encontrar o campo elétrico é encontrar em seu lugar uma partícula teste de carga elétrica conhecida entre as placas e medir a força sobre ela; campo elétrico é a razão entre esta força sobre a carga de teste. O campo elétrico pode também ser determinado pela voltagem conhecida da bateria usada para carregar as placas metálicas e a partir da separação das mesmas, este é o método realmente usado por Thomson.

## 2.6- Deflexão Magnética dos raios catódicos

Um modo simples de determinar a força magnética em uma partícula carregada a partir da força conhecida em uma corrente que atravessa um fio foi proposta por Wilhelm Weber (1804 a 1890), uns dos primeiros físicos a interpretar a corrente elétrica como fluxo de partículas carregadas. A força sobre um comprimento de fio devido a um campo magnético (perpendicular ao fio) é o produto do comprimento do fio, da corrente elétrica e do campo magnético. Então, o problema é reinterpretar o produto do comprimento do fio e da corrente em termos do número da velocidade das cargas individuais do fio.

Considere um fio atravessado por uma corrente elétrica  $i$ . Como a distância que a partícula atravessa é o produto da sua velocidade  $v$ , pelo tempo transcorrido, o comprimento do fio  $L_{fio}$  é igual ao produto da velocidade das partículas que o atravessam, pelo tempo  $t$  que essas partículas levam para atravessar o fio de um lado ao outro. Multiplicando esse produto pela corrente elétrica temos:

$$L_{fio} \cdot i = v \cdot t \cdot i \quad (3)$$

Olhando para o produto dos últimos dois fatores, o produto do tempo que a carga leva para atravessar o comprimento do fio pela corrente elétrica é simplesmente a carga total do fio. Então, o comprimento do fio vezes a corrente é igual à carga  $q$  vezes a velocidade da partícula carregada. Isto é:

$$L_{fio} \cdot i = v \cdot q \quad (4)$$

A força magnética no comprimento do fio é o produto das cargas elétricas, de todas as partículas em movimento do fio, suas velocidades, e o campo magnético. Se todas as partículas têm a mesma carga e a mesma velocidade, elas devem contribuir com a mesma parcela de força para força total no comprimento do fio. Então, a força magnética  $F_M$  sobre qualquer partícula devido a um campo magnético  $B$  perpendicular a sua direção é dada por:

$$F_M = q \cdot v \cdot B \quad (5)$$

Por exemplo, partículas lançadas do sol, que colidem na atmosfera da terra, possuem cargas elétricas cerca de  $2 \times 10^{-19}$  C e velocidade cerca de  $5 \times 10^5$  m/s, assim no campo magnético terrestre (cerca de  $5 \times 10^{-5}$  N/Am) estão submetidas à uma força magnética igual à  $F_M = 5 \cdot 10^{-18}$  N. Tal força é pequena, mas como essas partículas possuem uma massa próxima de  $5 \cdot 10^{-26}$  kg, elas são aceleradas à  $108$  m/s $^2$ , ou seja um valor muito maior que o da aceleração da gravidade 9,8 m/s $^2$ .

A força na partícula é menor se a velocidade da mesma não é perpendicular ao campo magnético, e desaparece para partículas que se movem ao longo das direções do campo magnético. Dessa forma, partículas com altas velocidades carregadas emitidas pelo sol são canalizadas pelo campo magnético da Terra de forma que elas tendem a viajar ao longo da direção do campo, colidindo com a terra, próximo aos pólos magnéticos, e produzindo as bonitas luzes no norte e no sul quando elas entram na atmosfera.

A ênfase do trabalho de Weber, sobre a questão da força magnética sobre um fio carregado por uma corrente, relacionado à força sobre partículas ajudou na preparação do tratamento de Thomson sobre os raios catódicos como fontes de partículas individuais. Em particular, Thomson foi capaz de usar a equação para a força magnética sobre uma partícula em movimento, junto com a equação (1), para calcular o deslocamento do raio catódico devido ao campo magnético perpendicular a sua direção. Ele obteve a expressão abaixo para o deslocamento  $D_M$  do raio catódico pelo campo magnético.

$$D_M = \frac{q \cdot B \cdot L_D \cdot L_A}{m \cdot v} \quad (6)$$

O ponto importante para Thomson era que a deflexão magnética dependia das diferentes combinações de carga, massa e velocidade das partículas do raio, assim como a deflexão elétrica.

## 2.7- Resultados de Thomson

A teoria desenvolvida nas seções prévias será aplicada aos resultados experimentais de Thomson. Primeiro, campos elétricos ou magnéticos perpendiculares ao raio catódicos na “região de deflexão” produziram um deslocamento do feixe, dadas pelas fórmulas 2 e 6.

Thomson conhecia os valores dos campos elétrico e magnético no interior do tubo, assim como o comprimento das regiões de deflexão e de arrasto, ele mediu as deflexões produzidas pelas forças elétricas e magnéticas. O que, então, poderia ele deduzir sobre o feixe de partículas de raios catódicos? É imediatamente claro que não havia nenhum modo para Thomson e outra pessoa usarem essas fórmulas para aprenderem algumas coisas separadamente sobre a carga ou massa das partículas dos raios catódicos, em ambas as fórmulas somente a razão dessa quantidade aparece.

Outro problema é que nenhuma fórmula poderia ser usada para conhecer a razão da carga pela massa das partículas dos feixes, porque Thomson não sabia a velocidade das partículas. Entretanto, este problema poderia ser solucionado pela medida de ambas as deflexões elétrica e magnética. Por exemplo, suponha que usamos a razão dessas duas equações. A massa, a carga, e ambos os comprimentos se cancelam do lado direito, mas a velocidade não se cancela porque ela aparece em um das fórmulas ao quadrado. O que leva ao resultado simples

$$\frac{D_M}{D_E} = \frac{B}{E} \cdot v \quad (7)$$

Como ambos os campos eram conhecidos e as deflexões correspondentes foram medidas, isso possibilitou a Thomson resolver para velocidade. Então, sendo a velocidade uma grandeza conhecida ele pode determinar a razão carga massa (ou massa carga) das partículas dos feixes de raios catódicos.

Agora aos dados. Thomson mediu as deflexões elétrica e magnética para um número de diferentes casos para diferentes valores de campo magnético e elétrico,

diferentes pressões de gases no interior do tubo, diferentes matérias de catodo e diferentes velocidades dos raios catódicos. Seus resultados se encontram na tabela 1 abaixo, que é adaptada do artigo de 1897 no *Philosophical Magazine* (8). Em todos esses casos, Thomson usou um raio catódico para o qual à distância percorrida pelo feixe enquanto sobre a influência das forças magnéticas e elétricas eram 0,05 m, e a distância que é subsequente percorrida sem ação dos campos antes de alcançar o final do tubo era 1,1m.

**Tabela 1.** Resultados dos experimentos de Thomson para a deflexão elétrica e magnética dos raios catódicos.

| Gás no tubo de raio catódico | Material do catodo | Campo Elétrico (N/C) $10^4$ | Deflexão Elétrica (m) | Campo Magnético (N/A.m) $10^{-4}$ | Deflexão Magnética (m) | Velocidade obtida pela partícula do feixe (m/s) | Razão massa/carga obtida para as partículas do feixe ( $10^{-11}$ kg/C) |
|------------------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------------|------------------------|---|---|
| Ar                           | Alumínio           | 1,5                         | 0,08                  | 5,5                               | 0,08                   | $2,7 \times 10^7$                               | 1,4   |
| Ar                           | Alumínio           | 1,5                         | 0,095                 | 5,4                               | 0,095                  | $2,8 \times 10^7$                               | 1,1   |
| Ar                           | Alumínio           | 1,5                         | 0,13                  | 6,6                               | 0,13                   | $2,2 \times 10^7$                               | 1,2   |
| Hidrogênio                   | Alumínio           | 1,5                         | 0,09                  | 6,3                               | 0,09                   | $2,4 \times 10^7$                               | 1,6   |
| Dióxido de Carbono           | Alumínio           | 1,5                         | 0,11                  | 6,9                               | 0,11                   | $2,2 \times 10^7$                               | 1,6   |
| Ar                           | Platina            | 1,8                         | 0,06                  | 5,0                               | 0,06                   | $3,6 \times 10^7$                               | 1,3   |
| Ar                           | Platina            | 1,0                         | 0,07                  | 3,6                               | 0,07                   | $2,8 \times 10^7$                               | 1,0   |

As deflexões elétricas variam para o mesmo valor do campo elétrico, devido às diferentes velocidades dos raios catódicos nos diferentes casos. As deflexões magnéticas são as mesmas que as elétricas, porque em cada caso Thomson ajustou o campo magnético para obter as mesmas deflexões elétricas e magnéticas. Os resultados das últimas duas colunas foram calculados dos dados publicados por Thomson.

As duas colunas maiores à direita da tabela indicam os valores das velocidades e da razão massa carga deduzida das medidas de Thomson para as deflexões elétricas e magnéticas (fórmulas 2 e 6 respectivamente). Para os valores da primeira linha da tabela 1 obtem-se os valores apresentados abaixo de acordo com as equações:

$$\text{Deflexão elétrica} = \frac{(7 \times 10^{10} \text{ C/Kg}) \times (1,5 \times 10^4 \text{ N/m}) \times 0,05 \text{ m} \times 1,1 \text{ m}}{(2,7 \times 10^7 \text{ m/s})^2} = 0,08 \text{ m} \quad (8)$$

$$\text{Deflexão magnética} = \frac{(7 \times 10^{10} \text{ C/Kg}) \times (5,5 \times 10^{-4} \text{ N/A.m}) \times 0,05 \text{ m} \times 1,1 \text{ m}}{2,7 \times 10^7 \text{ m/s}} = 0,08 \text{ m} \quad (9)$$

O resultado calculado concorda com as deflexões medidas, que confirmam que a velocidade e que a razão massa/carga foram calculados corretamente. Incidentalmente, as deflexões para ambos os campos elétrico e magnético foram iguais, sem uma razão de grande importância; simplesmente porque Thomson achou conveniente ajustar os campos até obter os mesmos valores para as deflexões.

A última coluna da tabela 1 mostra razoável consistência. Mesmo quando o gás no interior do tubo e o material do catodo são variados e a velocidades das partículas variam de quase fator 2, a razão massa/carga das partículas ficam muito próximas em todos os casos. Isso foi (pelo menos para Thomson) uma evidência convincente que os raios catódicos são formados por uma única espécie de partícula com um único valor de massa e carga, independente do material do catodo do qual elas foram emitidas.

Uma média dos resultados de Thomson para razão carga massa das partículas dos raios catódicos dá um valor igual a  $1,3 \cdot 10^{-11} \text{ Kg/C}$ . Thomson não publicou estimativas das incertezas de suas medidas individuais (um problema que poderia causar que seu artigo fosse retornado para ele por algum bom jornal de física). Entretanto, a partir de seus valores massa/carga, pode-se concluir que esses valores podem estar sujeitos a uma incerteza estatística (em cada direção) cerca de  $0,2 \cdot 10^{-11} \text{ Kg/C}$ .

O resultado de Thomson, para razão massa carga provavelmente entre  $1,1 \cdot 10^{-11} \text{ Kg/C}$  e  $1,5 \cdot 10^{-11} \text{ Kg/C}$ , pode ser comparado com o valor moderno  $0,56857 \cdot 10^{-11} \text{ Kg/C}$ . Evidentemente Thomson não chegou muito perto. Como seus resultados tem um grau de consistência interna, suspeita-se que deveria ter algum erro sistemático razoável nas medidas de Thomson dos campos elétrico e magnético que permearam todos os seus dados experimentais, mas após tantos anos quem pode nos dizer? Thomson não era muito bom na manipulação dos aparelhos. De fato, entretanto, Thomson não se baseou somente nas medidas experimentais das deflexões dos campos elétrico e magnético para determinar a razão carga massa das partículas dos raios catódicos. Ele também empregou outro método, baseado em medidas do calor depositado no final do tubo.

## 2.8- Relação de energia no experimento de Thomson

Agora estamos em posição de apresentar as análises finais das nossas discussões dos experimentos de Thomson.

Inicialmente, como Thomson determinou o valor do campo elétrico entre as placas de alumínio carregadas em seu tubo de raios catódicos? Em seus primeiros cinco experimentos as placas de alumínio que produziram o campo estavam conectadas a uma bateria de 225 V. Isso significa que o trabalho realizado para transportar uma carga elétrica de uma placa para a outra era de 225 J/C da carga. A distância entre as placas era de 0,015 metros. Como o trabalho é força x distância, a força elétrica por Coulomb x 0,015 metros era de 225 J/C dividindo pela distância obtém-se uma força por Coulomb igual a:

$$\frac{225 \text{ J/C}}{0,015 \text{ m}} = 1,5 \times 10^4 \text{ J/Cm} = 1,5 \times 10^4 \text{ N/C}$$

Essa força por Coulomb é a força elétrica das cinco primeiras linhas da tabela 1. Os diferentes campos elétricos para os dois últimos dados experimentais foram obtidos com baterias de 270 e 150 V.

Este pequeno cálculo sugere um módulo diferente para fazer o experimento de Thomson. Se o catodo e o anodo forem ligados aos terminais de uma bateria ou um gerador de voltagem conhecida  $V$ , então as partículas de raios catódicos passando do catodo para o anodo adquirem uma quantidade conhecida de energia cinética por Coulomb. A energia cinética é a metade da massa das partículas vezes o quadrado de sua velocidade, então dividindo o resultado pela carga temos:

$$V = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2}{q} \quad (10)$$

O método que foi usado por Walter Kaufmann em 1896-98 do instituto de física de Berlim para medir a razão massa/carga dos raios catódicos teve como resultado  $0,54 \cdot 10^{-11}$  kg/C, bastante bom comparado com o valor moderno igual a  $0,5687 \cdot 10^{-11}$  Kg/C. Entretanto, Kaufmann não tirou conclusões sobre a natureza dos raios catódicos.

Finalmente vamos ao método usado por Thomson em 1897 para obter seus melhores valores para razão massa/carga. Nesse método o raio catódico foi direcionado para dentro de um coletor de metal que capturaria a carga elétrica das partículas do raio e também capturaria a sua energia cinética convertida em calor. A razão da energia térmica ( $E_{dep}$ ) e da carga elétrica depositada ( $q_{dep}$ ) no coletor da então a razão entre a energia cinética e a carga de cada partícula do raio.

$$\frac{E_{dep}}{q_{dep}} = \frac{\frac{1}{2} m v^2}{q} \quad (11)$$

Este é um novo belo exemplo do princípio da conservação da energia. Thomson não tinha nenhuma idéia dos detalhes de todos os processos físicos ocorre quando um raio catódico bate no coletor metálico, mas ele pode confiar que o aumento da energia térmica do coletor é precisamente igual à perda de energia cinética dos raios catódicos quando eles eram parados pelo coletor.

Os resultados de Thomson para três diferentes tubos de raios catódicos se encontram na tabela 2. Na segunda coluna se encontram os valores para a razão entre energia térmica e a carga elétrica depositada no coletor, no intervalo de tempo (cerca de 1s). Na terceira coluna estão os valores da massa vezes a velocidade dividida pela carga das partículas pelos raios catódicos, como determinada pela equação 5 da medida da deflexão do raio catódico por um campo magnético. As duas últimas colunas apresentam os valores da velocidade e da razão massa/carga para as partículas dos raios catódicos. Se usarmos os

valores deduzidos para velocidade e a razão massa/carga dada na primeira coluna da tabela 2, então a fórmula 13 dá a razão da energia térmica pela carga de

$$\frac{1}{2} \times (0,57 \times 10^{-11} \text{ kg/C}) \times (4 \times 10^7 \text{ m/s})^2 = 4,6 \times 10^3 \text{ J/C},$$

que é de fato o valor medido por Thomson.

Evidentemente este método produziu resultados muito melhores que o método baseado na medida das deflexões elétricas e magnéticas. Os resultados para os primeiros dois tubos mostram um alto grau de uniformidade, e valores médios para razão massa/carga de  $0,49 \cdot 10^{-11} \text{ Kg/C}$ , próximo do valor atual de  $0,5687 \cdot 10^{-11} \text{ Kg/C}$ . Estranhamente Thomson preferiu os resultados obtidos para o terceiro tubo que deu um valor quase duas vezes maior. Pode ser que Thomson tenha preferido valor maior para razão massa/carga por este ser mais próximo com o resultado que ele obteve pela deflexão elétrica e, assim como a deflexão magnética.

**Tabela 2:** Resultado do experimento de Thomson da relação entre a energia térmica e a carga depositada pelos raios catódicos e a deflexão magnética dos raios.

| Gás no tubo de raio catódico | Energia por carga depositada (J/C) | $\frac{\text{Massa} \times \text{velocidade}}{\text{Carga elétrica}} \text{ (kg.m/s.C)}$ | Velocidade obtida (m/s) | Razão massa/carga obtida (kg/C) |
|------------------------------|------------------------------------|--|-------------------------|---------------------------------|
| <b>Tubo 1:</b>               |                                    |  |                         |                                 |
| Ar                           | $4,6 \times 10^3$                  | $2,3 \times 10^{-4}$   | $4 \times 10^7$         | $0,57 \times 10^{-11}$          |
| Ar                           | $1,8 \times 10^4$                  | $3,5 \times 10^{-4}$   | $10^8$                  | $0,34 \times 10^{-11}$          |
| Ar                           | $6,1 \times 10^3$                  | $2,3 \times 10^{-4}$   | $5,4 \times 10^7$       | $0,43 \times 10^{-11}$          |
| Ar                           | $2,5 \times 10^4$                  | $4,0 \times 10^{-4}$   | $1,2 \times 10^8$       | $0,32 \times 10^{-11}$          |
| Ar                           | $5,5 \times 10^3$                  | $2,3 \times 10^{-4}$   | $4,8 \times 10^7$       | $0,48 \times 10^{-11}$          |
| Ar                           | $10^4$                             | $2,85 \times 10^{-4}$  | $7 \times 10^7$         | $0,4 \times 10^{-11}$           |
| Ar                           | $10^4$                             | $2,85 \times 10^{-4}$  | $7 \times 10^7$         | $0,4 \times 10^{-11}$           |
| Hidrogênio                   | $6 \times 10^4$                    | $2,05 \times 10^{-4}$  | $6 \times 10^7$         | $0,35 \times 10^{-11}$          |
| Hidrogênio                   | $2,1 \times 10^4$                  | $4,6 \times 10^{-4}$   | $9,2 \times 10^7$       | $0,5 \times 10^{-11}$           |
| Dióxido de carbono           | $8,4 \times 10^3$                  | $2,6 \times 10^{-4}$   | $7,5 \times 10^7$       | $0,4 \times 10^{-11}$           |
| Dióxido de carbono           | $1,47 \times 10^4$                 | $3,4 \times 10^{-4}$   | $8,5 \times 10^7$       | $0,4 \times 10^{-11}$           |
| Dióxido de carbono           | $3 \times 10^4$                    | $4,8 \times 10^{-4}$   | $1,3 \times 10^8$       | $0,39 \times 10^{-11}$          |
| <b>Tubo 2:</b>               |                                    |  |                         |                                 |
| Ar                           | $2,8 \times 10^3$                  | $1,75 \times 10^{-4}$  | $3,3 \times 10^7$       | $0,53 \times 10^{-11}$          |
| Ar                           | $4,4 \times 10^3$                  | $1,95 \times 10^{-4}$  | $4,1 \times 10^7$       | $0,47 \times 10^{-11}$          |
| Ar                           | $3,5 \times 10^3$                  | $1,81 \times 10^{-4}$  | $3,8 \times 10^7$       | $0,47 \times 10^{-11}$          |
| Hidrogênio                   | $2,8 \times 10^3$                  | $1,75 \times 10^{-4}$  | $3,3 \times 10^7$       | $0,53 \times 10^{-11}$          |
| Ar                           | $2,5 \times 10^3$                  | $1,60 \times 10^{-4}$  | $3,1 \times 10^7$       | $0,51 \times 10^{-11}$          |
| Dióxido de carbono           | $2 \times 10^3$                    | $1,48 \times 10^{-4}$  | $2,5 \times 10^7$       | $0,54 \times 10^{-11}$          |
| Ar                           | $1,8 \times 10^3$                  | $1,51 \times 10^{-4}$  | $2,3 \times 10^7$       | $0,63 \times 10^{-11}$          |
| Hidrogênio                   | $2,8 \times 10^3$                  | $1,75 \times 10^{-4}$  | $3,3 \times 10^7$       | $0,53 \times 10^{-11}$          |
| Hidrogênio                   | $4,4 \times 10^3$                  | $2,01 \times 10^{-4}$  | $4,4 \times 10^7$       | $0,46 \times 10^{-11}$          |
| Ar                           | $2,5 \times 10^3$                  | $1,76 \times 10^{-4}$  | $4,8 \times 10^7$       | $0,61 \times 10^{-11}$          |
| Ar                           | $4,2 \times 10^3$                  | $2 \times 10^{-4}$   | $4,1 \times 10^7$       | $0,48 \times 10^{-11}$          |
| <b>Tubo 3:</b>               |                                    |  |                         |                                 |
| Ar                           | $2,5 \times 10^3$                  | $2,2 \times 10^{-4}$   | $2,4 \times 10^7$       | $0,9 \times 10^{-11}$           |
| Ar                           | $3,5 \times 10^3$                  | $2,25 \times 10^{-4}$  | $3,2 \times 10^7$       | $0,7 \times 10^{-11}$           |
| Hidrogênio                   | $3 \times 10^3$                    | $2,5 \times 10^{-4}$   | $2,5 \times 10^7$       | $1,0 \times 10^{-11}$           |

## 2.9- Elétrons como partículas elementares

Thomson mediou a razão massa/carga das partículas que formavam os raios catódicos, e concluiu que estas partículas são constituintes fundamentais de toda matéria ordinária. Em suas próprias palavras,...

*...nós temos nos raios catódicos matéria em um novo estado, um estado no qual a matéria está muito mais carregada que no ordinário estado gasoso: no estado no qual toda matéria- isto é, matéria derivada de diferentes fontes tais como hidrogênio, oxigênio, etc. – é de uma e a mesma espécie; está matéria como sendo uma substância a partir da qual os elementos químicos são construídos [7].*

*Inicialmente tinham muitos poucos que acreditavam na existência destes corpos menores que os átomos. [7]*

Entretanto, não havia um modo de verificar a existência de partículas menores que o átomo com base no experimento de Thomson em 1897. Thomson não clamou que provou isto, mas existiam números de indicações que levaram Thomson a chegar nestas conclusões.

A primeira era a universalidade de medir razões massa/carga. O valor da razão massa/carga das partículas de raios catódicos não pareciam depender de qualquer circunstância sobre as quais eram medidas. Por exemplo, o valor da razão era praticamente o mesmo para o tubo contendo dióxido de carbono com catodo de alumínio assim como para o tubo contendo ar com catodo de platina, apesar da velocidade dos raios serem bastante diferentes. Thomson também mencionou o resultado de Tieter Zeeman (1865 – 1943) que indicou que valores similares de razão massa/carga caracterizados pelas correntes elétricas nos átomos são responsáveis pela emissão e absorção da luz.

As medidas de Zeeman mostraram uma estimativa da razão massa/carga do que fosse isso que leva a corrente elétrica nos átomos, e o trabalho de Thomson com raios catódicos mostrou que esses portadores de cargas não são simplesmente parte da arquitetura do átomo, mas tem uma existência separada tanto fora como dentro do átomo. Então isto mostrava que apesar do que toda a matéria ordinária possa conter, ela continha pelo menos um constituinte comum, que podia ser emitida por metais como raios catódicos. A universalidade desta partícula foi logo verificada quando os chamados raios betas que foram observados quando emitidos por substâncias radioativas foram encontradas (por métodos similares a de Thomson) teve a mesma razão massa/carga das partículas dos raios catódicos. Thomson mostrou em 1899 que as partículas carregadas negativamente que eram emitidas por efeito foto elétrico ou por uma superfície metálica incandescente tinha a mesma razão massa/carga dos raios catódicos.

### 3- EXPERIMENTO

#### 3.1- Modelo Teórico

Elétrons são acelerados em um campo elétrico e penetram em uma região com campo magnético perpendicular a direção de movimento e ao campo elétrico. A razão carga/massa do elétron é determinada pela medida do potencial acelerador do campo magnético e do raio da órbita eletrônica.

Quando um elétron de massa  $m_0$  e carga  $e$  é acelerado por uma diferença de potencial  $U$ , adquire energia cinética de mesmo valor de sua energia potencial:

$$e.U = \frac{m_0 \cdot v^2}{2} \quad (10)$$

Em um campo magnético de intensidade  $B$ , a força magnética em um elétron com velocidade  $v$  é:

$$F = e.v.B \cdot \sin\theta \quad (11)$$

onde  $\theta$ , é o ângulo formado pelo vetor velocidade  $v$  e o vetor campo magnético  $B$ .

Se o campo magnético é uniforme, o elétron descreve uma trajetória em espiral ao longo das linhas de força magnéticas, esta trajetória se torna um círculo de raio  $r$  quando a velocidade  $v$  é ortogonal ao campo  $B$ . Como a força centrípeta gerada é igual à força magnética, temos que:

$$v = \frac{e.B.r}{m_0} \quad (12)$$

Substituindo o valor de  $v$  na equação 10 temos que:

$$\frac{e}{m_0} = \frac{2U}{B^2 \cdot r^2} \quad (13)$$

Para o arranjo de Helmholtz de duas bobinas com número de espiras  $n$ , o campo  $B$  no centro entre as bobinas é dado por:

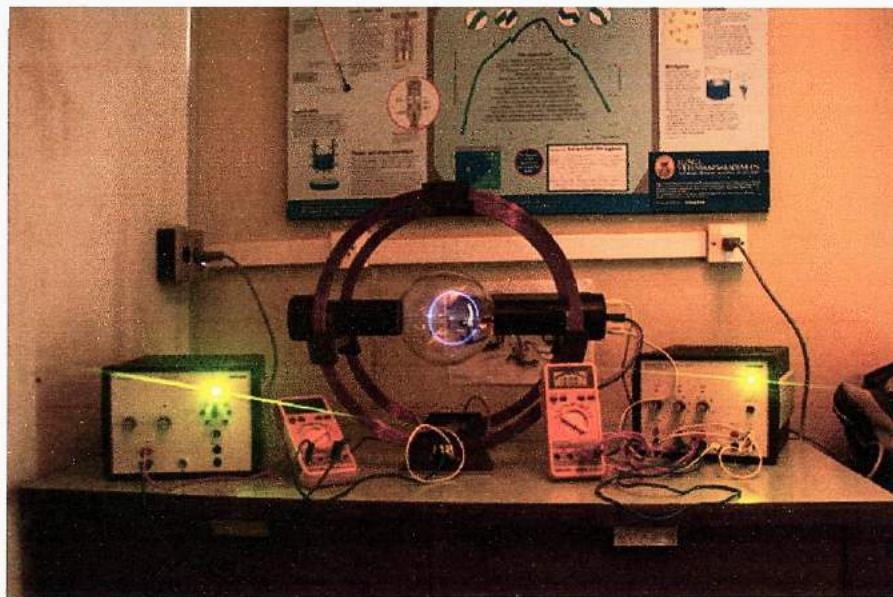
$$B = \left( \frac{4}{5} \right)^{3/2} \cdot \mu_0 \cdot n \cdot \frac{i}{R} \quad (14)$$

onde  $\mu_0$  permissividade elétrica do meio, neste caso o vácuo:

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ V.s/A.m}$$

### 3.2- Materiais Utilizados

Os materiais utilizados no experimento são: Tubo de feixe colimado, par de bobinas de Helmholtz, fonte de tensão 600 V DC, fonte de tensão usada como fonte de corrente, amperímetro, voltímetro e fios de conexão; a foto do equipamento montado se encontra na figura 4.



*Figura 4: Foto do experimento montado.*

### 3.3- Montagem do Experimento

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

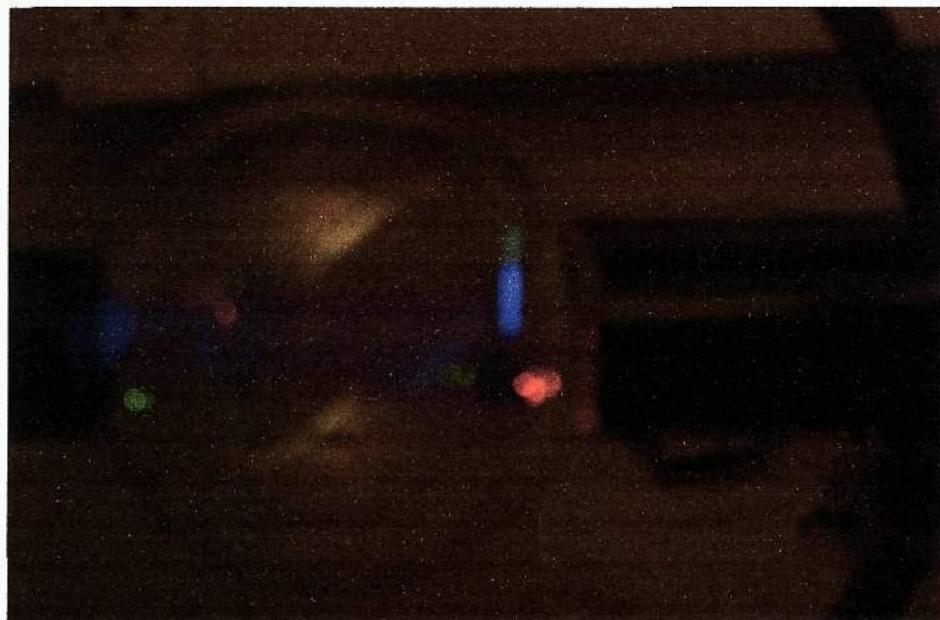
importância, porém são vistos rapidamente e, devido ao pouco tempo disponível, quase não são realizados experimentos para uma melhor aprendizagem, portanto tais conceitos teóricos foram trabalhados com os alunos, inicialmente a partir do texto histórico.

Em seguida foi feita a montagem do experimento, então os alunos interagiram desde o inicio, ou seja, eles ajudaram a separar os materiais que foram usados, como voltímetros, conexões, etc. Após esta separação, começaram a montar o experimento. Logo as dúvidas surgiram, como por exemplo, como colocar o multímetro para ser usado como amperímetro? E as ligações como são realizadas, em série ou em paralelo? Como é na prática essa ligação?

### 3.4- Experimentos

#### 3.4.1 Primeiro Experimento: “Visualizar” o Feixe de Elétrons

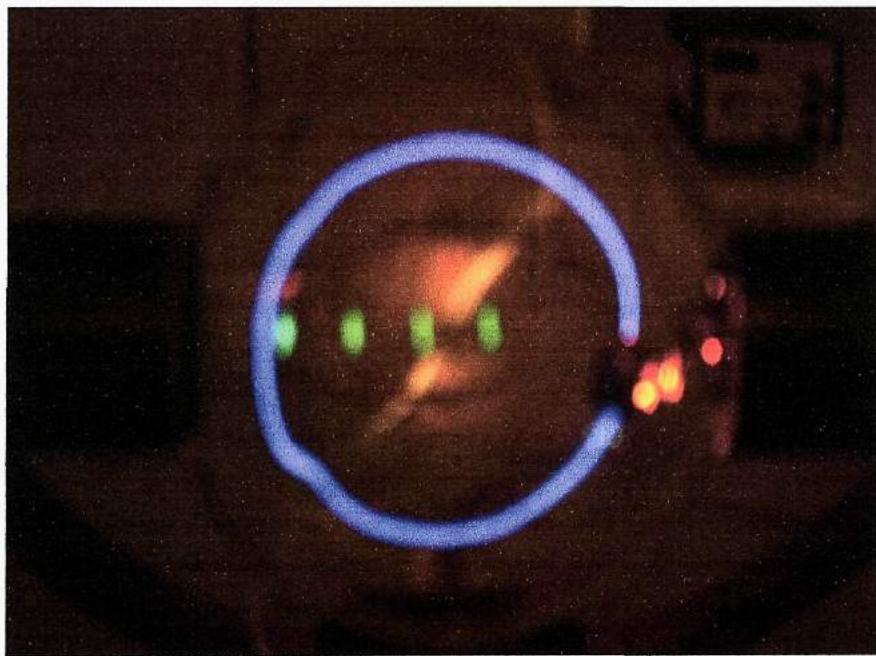
Após a montagem do experimento, liga-se a fonte de tensão, forma-se assim, o feixe de elétrons. O feixe é visualizado por todos, e com o aumento da tensão o feixe fica mais intenso, isto é percebido por todos, pois temos um voltímetro ligado á fonte (os próprios alunos ligaram o voltímetro). Neste momento, não temos ainda o campo magnético formado pelas bobinas, por isso o feixe não sofre nenhum desvio (figura 5).



*Figura 5: Feixe de elétrons, produzido pelo campo elétrico.*

### 3.4.2 Segundo Experimento: Feixe na Presença de um Campo Magnético

A fonte de corrente contínua foi ligada, e as bobinas produziram um campo magnético, pois quando um fio condutor é atravessado por corrente elétrica ele produz um campo magnético, o feixe de elétrons sofre desvio devido à força magnética que age sobre ele, o feixe e a força magnética formam entre si um ângulo de noventa graus ( $90^\circ$ ). Quanto maior a corrente das bobinas, maior o campo magnético e maior o desvio do feixe, isso é percebido por todos na leitura do amperímetro, que foi ligado pelos próprios alunos, assim como o voltímetro. Nesta etapa eles já sabiam que o amperímetro deve ser ligado em série e o voltímetro em paralelo. Observamos o feixe de elétron formado na figura 6.



**Figura 6:** Foto do feixe de elétron formando um círculo, com velocidade inicial perpendicular ao campo magnético.

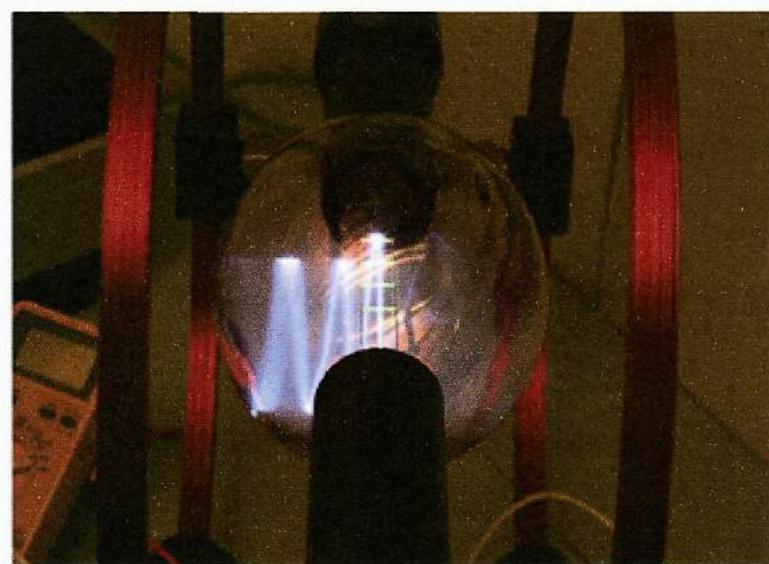
Nesta parte do experimento o aluno já compreendeu a ação do campo magnético, que é então desligado, ele aproximou do feixe um ímã, percebendo que ele agia como uma bobina, logo o aluno chegou à conclusão de que o ímã possuía um campo magnético, porém com origem diferente do campo formado pela bobina. Veja este momento na figura 7.



*Figura 7: Momento em que o aluno aproxima o imã do feixe de elétrons.*

### **3.4.3- Terceiro Experimento: Analisar a relação do ângulo formado pelo campo magnético e o feixe.**

Modifica-se o ângulo formado entre o campo e o feixe, formando assim, uma espiral, como mostrado na figura 8. Os alunos aprenderam a relação entre o ângulo e a força exercida no feixe.



*Figura 8: Foto do feixe de elétron em espiral.*

### 3.4.4 Quarto Experimento: Obtenção de Dados em um Feixe Circular

Variando-se o campo magnético (corrente) e a velocidade dos elétrons (tensão), o raio da órbita do feixe de elétrons foi ajustado para que coincidisse com um valor pré-estabelecido (no trabalho 0,02m). Na tabela 3 abaixo se encontram os valores medidos.

**Tabela 3:** Dados obtidos para  $r = 0,02\text{m}$ .

| $\mathbf{U} \pm 1(V)$ | $\mathbf{I} \pm 0,1(A)$ | $\mathbf{I}^2$ |
|-----------------------|-------------------------|----------------|
| 160                   | 3,00                    | 9,00           |
| 180                   | 3,30                    | 10,89          |
| 200                   | 3,50                    | 12,25          |
| 220                   | 3,60                    | 12,96          |
| 240                   | 3,70                    | 13,69          |
| 250                   | 4,00                    | 16,00          |
| 280                   | 4,10                    | 16,81          |

### 3.4.5 Análise de Dados e Determinação da Razão Carga/Massa do Elétron

Os dados experimentais obtidos foram utilizados no gráfico tensão versus corrente ao quadrado ( $U$  (V) versus  $I^2$  (A) $^2$ ). Esse gráfico corresponde a uma função polinomial de primeiro grau ( $y = a + b.x$ ), veja o gráfico 1.

Discrepância absoluta

$$D_a = \left| \left( \frac{e}{m} \right)_{\text{teórico}} - \left( \frac{e}{m} \right)_{\text{experimental}} \right| = \left| 1,76 \cdot 10^{11} - 1,63 \cdot 10^{11} \right| = 0,13 \cdot 10^{11}$$

Discrepância relativa e percentual:

$$D_r = \frac{D_a}{(e/m)_{\text{teórico}}} = \frac{0,13 \cdot 10^{11}}{1,76 \cdot 10^{11}} = 0,074 = 7,4\%$$

## 5- Referências Biográficas

- 1- *LDB — Leis de Diretrizes e Bases da Educação Nacional. LEI No. 9.394, de 20 de dezembro de 1996, D.O. U. de 23 de dezembro de 1996.*
- 2- *Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio - Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias, MEC, 2002.*
- 3- *Uma proposta para ensinar os conceitos de campo elétrico e magnético: Uma aplicação da História da Física. M. F. Magalhães, W. M. S. Santos e P. M. C. Dias. Revista Brasileira de Ensino de Física. Vol. 24, No 4, 326-333 (2002)*
- 4- *A Gravitação Universal (Um texto para o ensino médio), P. M. C. Dias, W. M. S. Santos e M. T. M. de Souza. Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol. 26, No 3, 257-271 (2004).*
- 5- *Construção do conceito de 'momento de uma força' a partir de experimentos relacionados ao cotidiano. Raphael de Carvalho Ferreira, Wilma Machado Soares Santos e Penha Maria Cardoso Dias. Física na Escola, v. 9, n. 1, 2008.*
- 6- *Determinação de propriedades do elétron no enfoque do ensino médio. Luiz Cesar Mendes da Silva, Wilma Machado Soares Santos, Penha Maria Cardoso Dias e Marcos Binderly Gaspar. XVII SNEF- Vitória- Espírito Santo.*
- 7- *The Discovery of Subatomic Particles. Steven Weinberg. Penguin Books, 1993.*
- 8- *J. J. Thomson, "Cathode Rays," Proceedings of the Royal Intitutition 15 (1897), 419; "Cathode Rays," Philosophical Magazine 44 (1897), 295; "Cathode Rays," Nature 55 (1897), 453.*
- 9- *C. F. Du Fray, letter to the Duke of Richmond and Lenox concerning electricity, Dezember 27, 1733, published in English in Philosophical Transactions of the Royal Society (1734).*