

Conferência Nobel de Thomson sobre a Descoberta do Elétron Tradução e notas

Ildeu de Castro Moreira
Instituto de Física da UFRJ

Trabalho recebido em 28 de abril de 1997

Introdução: a descoberta progressiva do elétron

A descoberta do elétron foi anunciada, com anos atrás, em uma conferência feita pelo físico inglês Joseph John Thomson, na Royal Institution, no dia 30 de abril de 1897. Tal descoberta resultou de uma série de experimentos e de concepções sobre a estrutura da matéria geradas, na segunda metade do século XIX, por cientistas de vários países. A identificação do elétron não foi, portanto, o produto de um ato de descoberta súbita e individual. Surgiu do estudo de várias questões teóricas e de experimentos relacionados às descargas elétricas em gases rarefeitos, ao estudo de fenômenos químicos, como a eletrólise, e ao desenvolvimento da teoria eletromagnética da matéria. Nos últimos anos do século passado, esses diversos problemas teóricos e experimentais encontraram uma solução única e simples: a existência de uma partícula sub-atômica carregada negativamente que está presente em praticamente todos os fenômenos materiais.

O grande experimentador Michael Faraday havia observado, a partir de 1835, as descargas elétricas luminosas em gases rarefeitos, dentro de um recipiente de vidro, produzidas por dois eletrodos com cargas opostas. Notou que manchas fosforescentes eram produzidas nas paredes do recipiente. Em 1858, o físico alemão Julius Plücker, ao aproximar um ímã de um recipiente similar, viu as manchas fosforescentes se deslocarem nas paredes do vidro. Seu aluno Johann Hittorf, em 1869, observando a sombra projetada sobre a parede de vidro por um objeto colocado diante do catodo, mostrou que

as emissões dele emanadas se deslocavam em linha reta; nasciam os “raios catódicos”.

O inglês William Crookes, em 1879, retomou essas experiências, de forma mais precisa, com um tubo aperfeiçoado por ele e com alto vácuo em seu interior. Quatro anos depois, o alemão Heinrich Hertz, que viria a detectar as ondas eletromagnéticas, fez experimentos em um tubo com evacuação insuficiente (e com as placas defletoras muito próximas da sua extremidade final) e concluiu erradamente que os raios catódicos não possuíam carga elétrica. Surgiu, nesta época, uma curiosa controvérsia que ganhou tons nacionalistas: Hertz e a maioria dos físicos alemães viam os raios catódicos como ondas (perturbações que se propagavam no éter); já os físicos ingleses, como Crookes, Lord Kelvin e Thomson atribuíam uma natureza corpuscular aos mesmos raios.

Em 1895, o francês Jean Perrin concluiu que os raios catódicos são jatos de partículas e mostrou que têm carga elétrica negativa. Dois anos depois, Thomson, com vários experimentos engenhosos, confirma a natureza corpuscular e mede a razão entre a carga elétrica e a massa desses corpúsculos. Faz também a hipótese ousada de que eles estão presentes em todos os átomos e que são, portanto, constituintes universais da matéria. No mesmo ano de 1897, independentemente de Thomson, os alemães Emil Wiechert e Walther Kaufmann haviam também medido a razão carga/massa para os raios catódicos.

Entre 1897 e 1899, Thomson mostra a presença de seus corpúsculos no efeito termoiônico e no efeito fo-

toelétrico, sempre com a mesma razão carga/massa, mede sua carga elétrica e finalmente os identifica com o elétron, a unidade elementar de carga que havia sido proposta, anos antes, pelo alemão Hermann von Helmholtz e pelo irlandês George Johnstone Stoney. Outra contribuição importante na descoberta do elétron veio das considerações teóricas de Joseph Larmor sobre a constituição da corrente elétrica, em 1894, e da descoberta do holandês Pieter Zeeman, em 1896, de que a campo magnético afeta as linhas espectrais. O físico Hendrik Lorentz, compatriota e mentor de Zeeman, constrói imediatamente um modelo, baseado na presença dos corpúsculos carregados dentro do átomo, que explica este fenômeno. Ele estende, então, a teoria eletromagnética de Maxwell para incorporar a idéia das cargas elétricas discretizadas.

Como Zeeman, Lorentz receberia, nos primeiros anos deste século, o prêmio Nobel por seus trabalhos. Em 1905, o húngaro Philipp von Lenard, discípulo de Hertz, recebeu o mesmo prêmio pelos seus estudos sobre a natureza dos raios catódicos, desenvolvidos entre 1893 e 1904; analisou ali, entre outras coisas, o comportamento dos raios fora do tubo, quando penetravam no ar ou quando incidiam sobre lâminas sólidas. O Prêmio Nobel de 1906 foi concedido a Thomson “em reconhecimento dos grandes méritos de suas investigações teóricas e experimentais na condução da eletricidade pelos gases”. Helmholtz denominava os carregadores de carga negativa, que constituem os raios catódicos, de quanta elementares de eletricidade, Thomson os chamava de corpúsculos e Lorentz adotou o termo elétron, que se tornou de uso geral após 1910 e que havia sido proposto, já em 1891, por Stoney.

Em 1910, o americano Robert Millikan fez medidas muito cuidadosas e mediu a carga elétrica do elétron com grande precisão. Com os experimentos de Ernest Rutherford (natural da Nova Zelândia e discípulo de Thomson), realizados em 1910 e que levaram à idéia de um núcleo atômico, com o modelo atômico de Niels Bohr, criado em 1913, e com o desenvolvimento da mecânica quântica em 1925/26, o elétron passou a ser reconhecido definitivamente como um dos constituintes básicos do átomo e seu papel essencial nas ligações químicas ficou estabelecido. Sua natureza ondulatória, prevista pelo físico francês Louis de Broglie, em 1924, foi demonstrada através de experimentos de difração,

de forma independente e no mesmo ano de 1927, pelos americanos Clinton Davisson e Lester Germer e por George Thomson, filho de J. J. Thomson.

Em homenagem aos cem anos da realização dos principais experimentos de Thomson sobre o elétron, reproduzimos abaixo a sua Conferência Nobel pronunciada em 1906. A clareza e objetividade da exposição a fazem, ainda hoje, um excelente artigo de divulgação científica. A presença universal do elétron em todos os fenômenos materiais é destacada por Thomson em sua conferência; sua descoberta constituiu-se em um passo decisivo no desenvolvimento da física, da química e da biologia modernas.

Carregadores de eletricidade negativa

Conferência Nobel, em 11 de dezembro de 1906, por Joseph John Thomson

Nesta conferência desejo fazer um relato de algumas investigações que levaram à conclusão de que os carregadores de eletricidade negativa são corpos, que denominei corpúsculos, com uma massa muito menor do que a de um átomo de qualquer elemento conhecido, e que têm sempre o mesmo carácter não importando a fonte de onde provenham.

Os corpúsculos foram detectados, em primeiro lugar, em um tubo altamente evacuado, através do qual passava uma corrente elétrica. Quando uma descarga elétrica é enviada através de um tubo deste, os seus lados brilham com uma cor verde vívida e fosforescente. Isso é devido a algo que procede em linhas retas do catodo - o eletrodo onde a eletricidade negativa entra no tubo -, como pode ser mostrado da seguinte maneira (o experimento é um dos que foi feito, muitos anos atrás, por William Crookes): Uma cruz de Malta feita de uma placa fina de mica é colocada entre o catodo e as paredes do tubo. Quando a descarga passa, a fosforescência verde não se estende mais sobre toda a extremidade final do tubo, como fazia antes quando a cruz estava ausente. Há agora uma cruz bem definida na fosforescência do final do tubo; a cruz de mica lançou uma sombra e a forma da sombra prova que a fosforescência é ocasionada por algo proveniente do catodo, que viaja segundo linhas retas e que é bloqueado por uma placa fina de mica.

A fosforescência verde é causada pelos raios catódicos e houve, tempos atrás, uma controvérsia viva sobre a natureza desses raios. Duas vises eram prevalentes: uma, que era defendida sobretudo por físicos ingleses, dizia que os raios são corpos eletrificados negativamente lançados do catodo com grande velocidade; a outra visão, que era sustentada pela grande maioria dos físicos alemães, afirmava que os raios são alguma espécie de vibração do éter ou ondas.

Os argumentos em favor dos raios serem partículas carregadas negativamente são, em primeiro lugar, que eles são defletidos por um ímã exatamente da mesma forma que as partículas eletrificadas negativamente quando em movimento. Sabemos que tais partículas, quando um ímã é colocado perto delas, sofrem uma força cuja direção faz ângulos retos com a força magnética, e que também faz ângulos retos com a direção na qual as partículas estão se movendo.

Assim, se partículas estão se movendo horizontalmente do Leste para o Oeste, e a força magnética for horizontal do Norte para o Sul, a força que atua nas partículas negativamente eletrificadas será vertical e apontará para baixo. Quando o ímã é colocado de tal modo que a força magnética está ao longo da direção na qual a partícula está se movendo, essa não será afetada pelo ímã.

O passo seguinte da prova de que os raios catódicos são partículas carregadas negativamente foi mostrar que, quando são capturados em um recipiente de metal, eles cedem a ele uma carga de eletricidade negativa. Isso foi feito primeiramente por Perrin. Esse experimento tornou-se conclusivo ao se colocar o recipiente capturante fora do trajeto dos raios; quando esses foram defletidos por meio de um ímã, o recipiente ficou, então, carregado negativamente.

Deflexão elétrica dos raios

Se os raios forem carregados com eletricidade negativa eles poderão ser defletidos por um corpo eletrificado, de modo similar ao que ocorre com um ímã. Nos primeiros experimentos feitos sobre isto, nenhuma deflexão foi observada. Mostrou-se que a razão disso era a seguinte: quando os raios catódicos passam através de um gás eles o tornam um condutor de eletricidade, de modo que se houver qualquer quantidade apreciável de

um gás no recipiente através do qual os raios estão passando, este gás tornar-se-á um condutor de eletricidade e os raios estarão rodeados por um condutor. Esse condutor os blindará do efeito da força elétrica, do mesmo modo que uma cobertura de metal de um eletroscópio blinda todos os efeitos elétricos externos.

Produzindo uma exaustão no tubo de vácuo até que fosse deixada uma quantidade excessivamente pequena do ar que se torna condutor, fui capaz de eliminar este efeito e obter a deflexão elétrica dos raios catódicos. Essa deflexão tem uma direção que indica uma carga negativa nos raios. Assim, os raios catódicos são defletidos tanto por forças elétricas como por forças magnéticas, do mesmo modo que partículas eletrificadas negativamente o seriam.

Hertz mostrou, contudo, que partículas catódicas possuem outra propriedade que parecia inconsistente com a idéia de que eram partículas de matéria, porque achou que elas eram capazes de penetrar lâminas muito grossas de metal, a saber, folhas de ouro, e produzir uma luminosidade apreciável no vidro atrás delas. A idéia de partículas tão grandes como moléculas de um gás passando através de uma placa sólida era de algum modo espantosa e isto me levou a investigar mais de perto a natureza das partículas que formam os raios catódicos.

O princípio do método usado é o seguinte: quando uma partícula carregando carga e está se movendo com velocidade v através das linhas de força em um campo magnético, colocado de modo que as linhas de força magnética fazem um ângulo reto com o movimento das partículas, então, se B for a força magnética, a partícula movente sofre uma força igual a Bev . Essa força age na direção que está em ângulo reto com a força megnética e com a direção do movimento da partícula. Se também tivermos um campo elétrico de força X , o raio catódico sofrerá a força Xe . Se os campos elétrico e magnético forem dispostos de modo a que se oponham, então, quando a força Bev , devida ao campo magnético, for ajustada para equilibrar a força ocasionada pelo campo elétrico Xe , o trajeto esverdeado da fosforecência devido aos raios catódicos atingindo o final do tubo não será perturbado, e teremos $Bev = Xe$ ou $v = X/B$.

Se medimos, então, e podemos fazer isso sem dificuldade, os valores de X e B quando os raios não estão sendo defletidos, podemos determinar o valor de v , a

velocidade das partículas. Em um tubo altamente evacuado essa pode atingir $1/3$ da velocidade da luz, ou cerca de 60.000 milhas por segundo. Em tubos não tão evacuados ela pode não ser maior que 5.000 milhas por segundo, mas, em todos os casos, quando se produzem raios catódicos, suas velocidades são muito maiores do que a velocidade de qualquer outro objeto em movimento com o qual estamos acostumados. É, por exemplo, muitas milhares de vezes maior do que a velocidade média com a qual as moléculas de hidrogênio estão se movendo em temperaturas ordinárias, ou, na verdade, em qualquer temperatura até agora atingida.

Determinação de e/m

Tendo achado a velocidade dos raios, vamos agora submetê-los à ação de um campo elétrico apenas. Assim as partículas que formam os raios sofrerão uma força constante e o problema é similar àquele de um projétil projetado horizontalmente com uma velocidade v e caindo sob a ação da gravidade. Sabemos que no tempo t , o projétil cairá uma altura (na vertical) $(1/2)gt^2$, onde g é a aceleração proveniente da gravidade. No nosso caso, a aceleração ocasionada pelo campo elétrico é igual a Xe/m , onde m é a massa da partícula. O tempo $t = L/v$, onde L é o comprimento do trajeto, e v a velocidade de projeção.

Desse modo o deslocamento do trajeto da fosforescência onde os raios incidem no vidro será igual a $(1/2)(Xe/m)(L^2/v^2)$. Podemos facilmente medir esse deslocamento d , e podemos, então, achar e/m a partir da equação $e/m = (2d/X)(v^2/L^2)$.

Os resultados das determinações dos valores de e/m feitos pelo método são muito interessantes, porque foi achado que, não importa como tenham sido produzidos os raios catódicos, sempre encontramos o mesmo valor de e/m para todas as partículas nos raios. Podemos, por exemplo, pela alteração da forma do tubo de descarga e da pressão do gás no tubo, produzir grandes modificações na velocidade das partículas, mas a menos que a velocidade das partículas se torne tão grande que se movam com velocidade próxima à da luz, quando então outras considerações devem ser levadas em conta, o valor de e/m é constante. Esse valor não é meramente independente da velocidade. O que é mesmo mais notável é que ele é independente do tipo de eletro-

dos que nós usamos e também do tipo de gás no tubo. As partículas que formam os raios catódicos devem vir ou do gás no tubo ou dos eletrodos; podemos, contudo, usar qualquer espécie de substância que queiramos para os eletrodos e encher o tubo com gás de qualquer tipo e ainda assim o valor de e/m permanecerá inalterado.

Esse valor constante, quando medimos e/m nas unidades magnéticas CGS é de cerca de $1,7 \times 10^7$. Se compararmos isso com o valor da razão da massa para a carga de eletricidade transportada por qualquer sistema anteriormente conhecido, encontramos que ela é de uma ordem de grandeza bem diferente. Antes dos raios catódicos serem investigados, o átomo carregado de hidrogênio, encontrado na eletrólise de líquidos, era o sistema que tinha o maior valor conhecido de e/m , e neste caso o valor é somente 10^4 . Portanto, para o corpúsculo nos raios catódicos o valor de e/m é 1700 vezes o valor da quantidade correspondente para o átomo de hidrogênio carregado.

Essa discrepância deve surgir de uma das duas maneiras: ou a massa do corpúsculo deve ser muito menor comparada com aquela do átomo de hidrogênio, que até bem recentemente era a menor massa conhecida na física, ou então a carga no corpúsculo deve ser muito maior do que aquela no átomo de hidrogênio. Foi então mostrado, por um método que descreverei brevemente e logo em seguida, que a carga elétrica é praticamente a mesma nos dois casos. Portanto, somos levados à conclusão de que a massa do corpúsculo é apenas cerca de $1/1700$ daquela do átomo de hidrogênio. Então o átomo não é o último limite da subdivisão da matéria; podemos ir mais longe e obter o corpúsculo, e nesse estágio o corpúsculo é o mesmo não importa a fonte da qual derive.

Os corpúsculos estão amplamente distribuídos

Os corpúsculos podem ser obtidos não apenas a partir dos raios catódicos, que poderiam ser considerados uma fonte algo superficial e sofisticada. Uma vez descobertos, verificou-se que tinham uma ocorrência muito geral. Eles são liberados por metais quando aquecidos ao rubro; na verdade, qualquer substância quando aquecida libera corpúsculos, em uma certa medida. Podemos detectar a emissão deles por algumas substâncias, tais como rubídio e a liga de sódio

e potássio, mesmo quando estão frios; e talvez seja permitido supor que haja alguma emissão por todas as substâncias, embora nossos instrumentos não sejam suficientemente precisos, no presente, para detectá-la a menos que ela seja invulgarmente grande.

Corpúsculos são também liberados por metais e outros corpos, mas especialmente pelos metais alcalinos, quando são expostos à luz. Eles são liberados continuamente em grande quantidade e com velocidades muito grandes por substâncias radioativas tais como urânio e rádio; são produzidos em grandes quantidades quando sais são colocados no fogo, e há boa razão para supor que corpúsculos nos alcançam provenientes do Sol. O corpúsculo é, então, amplamente distribuído, mas, independentemente de onde é achado, preserva sua individualidade, e/m sendo sempre igual a um certo valor constante. Parece formar uma parte de todos os tipos de matéria sob as mais diversas condições; é natural, portanto, considerá-lo como um dos tijolos dos quais os átomos são construídos.

Magnitude da carga elétrica carregada pelo corpúsculo

Retornarei à prova de que o valor muito grande de e/m para o corpúsculo, quando comparado com aquele do átomo de hidrogênio, é devido à pequenez da massa m , e não da grandeza da carga e . Podemos fazer isso medindo diretamente o valor de e , aproveitando-nos, para este fim, de uma descoberta de C. T. R. Wilson de que uma partícula carregada age como um núcleo em torno do qual o vapor de água se condensa e forma gotinhas de água. Se tivermos ar saturado com vapor de água e o esfriarmos, de modo que ele se torne supersaturado sem haver deposição de umidade, sabemos que, se qualquer poeira estiver presente, as partículas de poeira agirão como núcleos em torno dos quais a água se condensará e obteremos o fenômeno familiar do nevoeiro e da chuva. Se o ar estiver bastante livre de poeira, no entanto, podemos esfriá-lo muito sem que qualquer deposição de umidade ocorra. Se não houver poeira, C. T. R. Wilson mostrou que a nuvem não se forma até que a temperatura tenha abaixado a um tal ponto que a supersaturação é de cerca de oito vezes maior. Quando essa temperatura é alcançada, contudo, um nevoeiro grosso se forma mesmo em um ar sem poeira.

Se partículas carregadas estiverem presentes no gás, Wilson mostrou que uma quantidade muito menor de esfriamento é suficiente para produzir o nevoeiro. Uma supersaturação de quatro vezes é tudo o que é requerido para isso, no caso em que as partículas carregadas são aquelas que ocorrem em um gás quando está em um estado no qual conduz eletricidade. Cada uma das partículas carregadas torna-se o centro em torno do qual uma gota de água se forma; as gotas formam uma nuvem, e então as partículas carregadas, embora sejam pequenas para isso, tornam-se agora visíveis e podem ser observadas.

O efeito das partículas carregadas na formação de uma nuvem pode ser mostrado de maneira muito nítida pelo seguinte experimento:

Um recipiente, que está em contato com água, está saturado com umidade na temperatura ambiente. Esse recipiente está em comunicação com um cilindro no qual um grande êmbolo desliza para cima e para baixo. No início, o êmbolo está no alto de seu percurso; evacuando rapidamente o ar debaixo do êmbolo, a pressão do ar acima dele o força para baixo com grande rapidez, e o ar no recipiente expandirá muito rapidamente. Contudo, quando o ar expande, ele se torna frio; então, o ar no recipiente previamente saturado está agora supersaturado. Se não houver poeira presente, nenhuma deposição de umidade ocorrerá, a menos que o ar seja esfriado até uma temperatura tão baixa que a quantidade de umidade exigida para saturá-lo seja de somente cerca de 1/8 daquela realmente presente.

Mas, de quanto o ar se esfriou, e, portanto, de quanto ficou supersaturado, depende do percurso do êmbolo; quanto maior for este percurso, maior será o esfriamento. Suponha que o percurso esteja regulado de modo que a supersaturação seja menor do que oito vezes e maior do que quatro vezes. Nós podemos agora livrar o ar da poeira através da formação de nuvem após nuvem, no ar empoeirado; quando as nuvens se precipitam elas carregam com elas a poeira para baixo, do mesmo modo que, na natureza, o ar fica clareado após os aguaceiros. Por fim, chegamos ao ponto no qual não há mais nenhuma nuvem visível quando fazemos uma expansão.

O gás é, em seguida, levado a um estado condutor aproximando-se do recipiente um pequena quantidade de rádio; isso enche o gás com uma grande quantidade

de partículas eletrificadas tanto positivas quanto negativas. Fazendo agora a expansão, uma nuvem excessivamente densa é formada. Pode ser mostrado que isto é devido à eletrificação do gás através do seguinte experimento:

Ao longo das paredes interiores do recipiente instalamos duas placas verticais isoladas que podem ser eletrificadas. Se essas placas estiverem carregadas, elas arrastarão as partículas carregadas para fora do gás tão logo estas sejam formadas, de modo que podemos eliminar assim, ou pelo menos reduzir bastante, o número de partículas eletrificadas no gás. Se a expansão for feita agora com as placas carregadas antes de trazer o rádio, haverá somente uma pequena nuvem formada.

Podemos usar as gotas para encontrar a carga nas partículas, porque se conhecemos o percurso do êmbolo, podemos deduzir a quantidade de supersaturação e, daí, a quantidade de água depositada quando a nuvem se forma. A água é depositada na forma de um número de pequenas gotas todas do mesmo tamanho; então, o número de gotas será o volume de água depositado dividido pelo volume de uma das gotas. Portanto, se acharmos o volume de uma das gotas, poderemos encontrar o número de gotas que são formadas em torno das partículas carregadas. Se as partículas não forem muito numerosas, cada uma delas terá uma gota em torno dela, e poderemos achar o número de partículas eletrificadas.

A partir da taxa na qual as gotas caem lentamente podemos determinar seu tamanho. Em consequência da viscosidade ou fricção do ar, pequenos corpos não caem com uma velocidade constantemente acelerada, mas alcançam logo uma velocidade que permanece uniforme no resto da queda. Quando menor o corpo, menor é essa velocidade. Sir George Stokes mostrou que ν , a velocidade com que a gota de chuva cai, é dada pela fórmula $\nu = (2/9)ga^2/\mu$, onde a é o raio da gota, g a aceleração da gravidade e μ o coeficiente de viscosidade do ar.

Se substituirmos os valores de g e μ , obteremos $\nu = (1,28 \times 10^6)a^2$. Portanto, se medirmos ν poderemos determinar a , o raio da gota. Podemos dessa maneira encontrar o volume de uma gota e, portanto, como explicado acima, calcular o número de gotas e, em consequência, o número de partículas eletrificadas. É simples achar, por meios elétricos, a quantidade total

de eletricidade nessas partículas; daí, como conhecemos o número de partículas, podemos deduzir ao mesmo tempo a carga de cada partícula.

Esse foi o método pelo qual determinei inicialmente a carga na partícula. H. A. Wilson, desde então, usou um método mais simples baseado nos seguintes princípios: C. T. R. Wilson mostrou que as gotas de água condensam mais facilmente em partículas eletrificadas negativamente do que nas positivamente eletrificadas. Então, ajustando-se a expansão, é possível obter gotas de água em torno de partículas negativas e não em torno de positivas; com essa expansão, portanto, todas as gotas estarão eletrificadas negativamente. O tamanho dessas gotas e, portanto, seu peso podem, como antes, ser determinados medindo-se a velocidade com a qual caem sob a gravidade.

Suponha agora que coloquemos acima das gotas um corpo eletrificado positivamente: então, desde que as gotas estão eletrificadas negativamente, serão atraídas para a eletricidade positiva e a força para baixo nas gotas será diminuída; assim elas não cairão tão rapidamente como faziam quando estavam livres da atração elétrica. Se ajustarmos a atração elétrica de modo que a força para cima em cada gota seja igual ao peso da gota, as gotas não cairão de modo algum, mas permanecerão, como o ataúde de Maomé, suspensas entre o céu e a terra.

Se ajustarmos, então, a força elétrica até que as gotas estejam em equilíbrio e nem caiam nem subam, saberemos que a força para cima em cada gota será igual ao peso da gota, que já tínhamos determinado medindo a taxa de queda quando a gota não estava exposta às forças elétricas. Se X for a força elétrica, e a carga na gota, e w seu peso, temos, quando há equilíbrio: $Xe = w$. Desde que X pode ser facilmente medida e w é conhecido, podemos usar essa relação para determinar e , a carga na gota. O valor de e , achado por estes métodos, é $3,1 \times 10^{-10}$ unidades eletrostáticas, ou 10^{-20} unidades eletromagnéticas. Este valor é o mesmo daquele da carga elétrica transportada por um átomo de hidrogênio na eletrólise de soluções diluídas, valor este que, há tempos, tem sido conhecido aproximadamente.

Pode ser questionado que a carga medida nos experimentos precedentes é a carga em uma molécula ou coleção de moléculas de um gás e não a carga em um

corpúsculo. Essa objeção, contudo, não se aplica a outra forma na qual tentei o experimento, onde as cargas nos corpúsculos foram obtidas não pela exposição do gás ao efeito do rádio, mas permitindo que luz ultravioleta incidisse sobre uma placa metálica em contato com o gás. Nesse caso, como experimentos feitos em alto vácuo mostram, a eletrificação, que é inteiramente negativa, escapa do metal na forma de corpúsculos. Quando um gás está presente, os corpúsculos chocam-se contra as moléculas do gás e grudam nelas.

Então, apesar de serem as moléculas que estão carregadas, a carga em uma molécula é igual à carga em um corpúsculo, e quando determinamos a carga nas moléculas, pelos métodos que descrevi há pouco, determinamos a carga carregada pelo corpúsculo. O valor da carga quando a eletrificação é produzida por luz ultravioleta é o mesmo que aparece quando a eletrificação é produzida pelo rádio.

Acabamos de ver que e , a carga no corpúsculo, é, em unidades eletromagnéticas, igual a 10^{-20} , e achamos anteriormente que e/m é igual a $1,7 \times 10^7$, portanto, $m = 6 \times 10^{-28}$ gramas. Podemos perceber mais facilmente o que isso significa se expressarmos a massa do corpúsculo em termos da massa do átomo de hidrogênio. Vimos que, para o corpúsculo, $e/m = 1,7 \times 10^7$. Se E for a carga elétrica transportada por um átomo de hidrogênio na eletrólise de soluções diluídas, e M for a massa do átomo de hidrogênio, $E/M = 10^4$; portanto, $e/m = 1700E/M$.

Já afirmamos que o valor de e , encontrado pelos métodos precedentes, concorda bem com o valor de E que tem sido conhecido aproximadamente há bastante tempo. Townsend usou um método no qual o valor de e/E é medido diretamente e mostrou também, desta maneira, que e é igual a E . Logo, desde que $e/m = 1700E/M$, temos $M = 1700m$, isto é, a massa de um corpúsculo é somente cerca de 1/1700 partes da massa do átomo de hidrogênio.

Em todos os casos conhecidos nos quais a eletricidade negativa ocorre em gases a pressões muito baixas, ela ocorre na forma de corpúsculos, pequenos corpos com uma carga e uma massa invariáveis. O caso é inteiramente diferente com a eletricidade positiva.

Biografia de J. J. Thomson



Joseph John Thomson nasceu em Manchester em 18 de dezembro de 1856. Estudou e se formou, em 1880, no Trinity College, Cambridge, e se tornou membro dessa instituição pelo resto de sua vida. Foi Professor de Física Experimental em Cambridge, sucedendo a Lord Rayleigh, de 1884 a 1918, tendo dado grande desenvolvimento ao laboratório Cavendish. Foi também Professor Honorário de Física da Royal Institution; tornou-se membro da Royal Society em 1884, da qual foi presidente entre 1916 e 1920.

Seus primeiros trabalhos giraram em torno da criação de modelos para o átomo, tendo escrito o *Tratado sobre o movimento dos anéis de vórtices*, com o qual recebeu o Prêmio Adams em 1884. Suas pesquisas posteriores seguiram na trilha aberta por Maxwell, que havia unificado a eletricidade e o magnetismo. Thomson produziu muitos resultados originais nesta direção, além de ter publicado livros didáticos importantes, como a *Aplicação da Dinâmica à Física e à Química* (1886) e *Notas sobre Pesquisas recentes em Eletricidade e Magnetismo* (1892), que complementa resultados obtidos por Maxwell e que chegou a ser chamado de “terceiro volume de Maxwell”. Publicou, juntamente com J. H. Poynting, o livro-texto, em quatro volumes, *Propriedades da Matéria* e, em 1895, produziu o influente *Elementos da Teoria Matemática da Eletricidade e do Magnetismo* que teve várias reedições.

Após ser nomeado professor de física experimental em Cambridge, em 1884, dedicou-se a estudar as descargas elétricas em gases a baixas pressões. Como resultado de conferências sobre este tema, realizadas em Princeton, em 1896, publicou *Descarga de Eletricidade através dos Gases* (1897). Após essa viagem, desenvolveu seus brilhantes trabalhos sobre os raios catódicos que levaram à descoberta e identificação do elétron. Seu livro *Condução de Eletricidade através dos Gases*, publicado em 1903, foi reescrito posteriormente (1928 e 1933) em colaboração com seu filho, Sir George Paget Thomson, que se tornou professor de física na Universidade de Londres e recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1937.

Depois de 1903, Thomson se dedicou novamente a analisar a estrutura do átomo e fez um modelo de estrutura atômica, mencionado nas aulas de física e química do segundo grau e denominado modelo de Thomson - ou do “bolo de nozes”: o átomo seria constituído de uma carga positiva espalhada (o bolo) e as cargas negativas (os elétrons) seriam as nozes ali espalhadas. Este modelo, embora incorreto, foi um ponto de partida importante para os trabalhos experimentais de Ernest Rutherford que mostraram que a carga positiva está concentrada em um núcleo muito pequeno em relação ao tamanho do átomo e, posteriormente, para o modelo de Bohr. Descobriu também um método de separar tipos diferentes de átomos e moléculas pelo uso de raios positivos, uma idéia desenvolvida posteriormente por Aston, Dempster e outros para a descoberta de muitos isótopos.

Thomson esteve sempre ligado a uma visão mecanicista da natureza, dentro da tradição britânica do século XIX, que tinha na construção de modelos mecânicos uma das características de sua abordagem física. Seu objetivo último, ao longo das primeiras décadas do século XX, era a criação de um quadro unificador dos fenômenos físicos, que englobasse a matéria, o éter, a energia e o eletromagnetismo. Publicou vários livros sobre a estrutura da luz, as propriedades da matéria e sobre o elétron na química: *A Estrutura da Luz* (1907), *A Teoria Corpuscular da Matéria* (1907), *Raios de Eletricidade Positiva* (1913), *O Elétron na Química* (1923). Após 1913, contudo, sua influência científica junto aos físicos, que tinha sido muito grande, ficou bastante diminuída em função de teorias que passou a construir e defender, diferentes

das geralmente aceitas. Assim, contrapôs ao modelo atômico de Rutherford-Bohr um modelo no qual os elétrons estavam em equilíbrio com as cargas positivas devido a forças eletrostáticas de atração e repulsão. Entre os químicos, especialmente na Grã-Bretanha e nos Estados Unidos, suas idéias continuaram influentes até o final da década de 20. Neste período, foi também um dos opositores do conceito de fóton, não chegando a aceitar as novas e “estranhas” idéias da física quântica. Esta resistência às idéias novas por parte de velhos cientistas não é incomum, pelo contrário. Segundo outro grande revolucionário da física deste século, Max Planck, as novas idéias só se afirmam realmente quando a velha geração desaparece.

Thomson faleceu em 1940, tendo deixado uma interessante autobiografia *Recordações e Reflexões*, escrita em 1936. Sobre a descoberta do elétron escreveu ali: “...ambos o tempo e o lugar eram afortunados, porque o período entre agora e então tornou-se um dos mais significativos na história do mundo. Do início ao fim, e especialmente na segunda metade, houve uma sucessão rápida de um evento extraordinário após o outro. Monarquias caíram e foram substituídas por repúblicas e ditaduras. O livre comércio, que como um homem de Manchester, considerei sempre e naturalmente com essencial para a prosperidade do país, foi-se também... Quando eu era um menino, não havia bicicletas, nem automóveis, nem aviões, nem luz elétrica, nem telefone, nem telégrafo sem fio, nem gramofone, nem engenharia elétrica, nem radiografia de raios X, nem cinema...”

Ao longo de sua vida, Thomson recebeu inúmeros prêmios científicos e condecorações, entre os quais o Prêmio Nobel, em 1906. Em 1908 foi ungido cavaleiro pelo governo inglês e tornou-se Sir J. J. Thomson. Foi agraciado com o título de doutor *honoris causa* por muitas universidades de todo o mundo, entre as quais Oxford, Columbia, Göttingen, Edinburgh, Sorbonne e Princeton. Mas, certamente, o imenso prestígio que desfrutou em vida e sua glória após a morte estarão para sempre ligados a esta partícula extremamente pequena: o elétron.

Referências sobre a descoberta do elétron

1. D. L. Anderson, *The discovery of the electron*, Van Nostrand, Princeton, 1964.

2. Arabatzis, Rethinking the “discovery” of the electron, *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.* **27**, 405 (1996).
3. J. M. F. Bassalo, A crônica da Física do Estado Sólido: I. Do tubo de Geissler às válvulas a vácuo, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **15**, 127 (1993).
4. N. Bohr, *Física atômica e conhecimento humano*, Editora Contraponto, Rio de Janeiro, 1995.
5. M. Chayut, J. J. Thomson: “The Discovery of the Electron and the Chemists”, *Annals of Science* **48**, 527 (1991).
6. R. K. DeKosky, “William Crookes and the Quest for Absolute Vacuum in the 1870s”, *Annals of Science* **40**, 1 (1983).
7. I. Falconer, “Corpuseles, Electrons and Cathode Rays”: J. J. Thomson and the “Discovery of the Electron”, *Brit. J. Hist. Sciences* **20**, 241 (1986).
8. J. Heilbron, *Joseph John Thomson*, in *Dictionary of Scientific Biographies*, 362-372, C. Gillispie et al. (eds), New York, 1971.
9. J. L. Heilbron, J. J. Thomson and the Bohr atom, *Phys. Today* 23-30, abril 1977.
10. J. L. Heilbron, Rutherford-Bohr atom, *Am. J. Phys.* **49**, 223 (1981).
11. T. Hey and P. Walters, *The quantum universe*, Camb.Univ. Press, 1987.
12. G. Hon, H. Hertz: “The electrostatic and eletromagnetic properties of the cathode rays are either nil or very feeble.”(1883). A case-study of an experimental error. *Stud. Hist. Phil. Sci.* **18**, 367 (1987).
13. A. Keller, *The infancy of atomic physics*, Clarendon Press, Oxford, 1983.
14. D.-W. Kim, J. J. Thomson and the emergence of the Cavendish School, 1885-1990, *Brit. J. Hist. Sci.* **28**, 191 (1995).
15. J. Leite Lopes, *A estrutura quântica da matéria*, Editora da UFRJ, 1992.
16. J.-M. Lévy-Leblond et F. Balibar, *Quantique*, InterEditions, 1984.
17. Lord Rayleigh, *The life of Sir J. J. Thomson*, Dawsons, London, 1969.
18. J. -P. Maury, *Petite histoire de la physique*, Larousse, 1992.
19. I. C. Moreira, A descoberta progressiva do elétron, VI Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia, SBHC, Rio de Janeiro, junho de 1997 (a ser publicado nos anais do encontro).
20. G. E. Owen, The discovery of the electron, *Annals of Science* **11**, 173 (1955).
21. *Physics - Nobel Lectures (1901-1921)*, pp. 99-155, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1967.
22. H. Rechenberg (ed.), Special issue on the centenary of the electron, *Eur. J. Phys.* **17**, 131-168 (1997).
23. N. Robotti, J. J. Thomson at the Cavendish Laboratory: The History of an Electric Charge Measurement, *Annals of Science* **52**, 265-284 (1995).
24. M. H. Shamos (ed.), *Great experiments in physics*, Dover, N. York, 1959.
25. M. Springford (ed.), *Electron, a centenary volume*, Cambridge University Press, 1997.
26. G. P. Thomson, *J. J. Thomson, discoverer of the electron*, Doubleday, New York, 1966.
27. G. P. Thomson, The Septuagenarian Electron, *Phys. Today* **20**, 55 (1967).
28. J. J. Thomson, *Recollections and Reflections*, MacMillan, New York, 1937.
29. D. R. Topper, “To Reason by Means of Images”: J. J. Thomson and the Mechanical Picture of Nature, *Annals of Science* **7**, 393 (1971); **37**, 31 (1980).
30. E. T. Whittaker, *A history of the theories of Aether and Electricity*, Longmans, Dublin, 1916.