

6.4 A descoberta do elétron

Em 1858 o matemático e físico Julius Plücker¹ descobriu os raios catódicos, aqueles que vimos na discussão da força magnética e que aparecem nas figuras 6.1.2 e 6.1.3. Ele, junto com seu aluno Johann Hittorf², constatou que numa passagem de corrente elétrica num gás rarefeito sai algum tipo de radiação do eletrodo negativo. Esta radiação se propaga em linha reta e objetos densos feitos de metal ou vidro produzem sombra com estes raios. Sir William Crookes³ também chegou a este resultado e sugeriu que estes raios seriam íons negativos.



Fig. 6.4.1 Ampola para geração de raios catódicos (tubo de Crookes)

(Imagem tomada da Wikipedia Autor Zátanyi Sándor https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2f/Kat%C3%B3dsugarak_m%C3%A1lgneses_mez%C5%91ben%281%29.jpg)

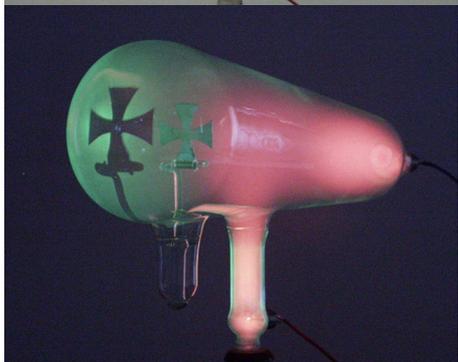


Fig. 6.4.2 Formação de sombra com raios catódicos.

(Imagem tomada da Wikipedia Autor Zátanyi Sándor Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kat%C3%B3dsugarak_m%C3%A1lgneses_mez%C5%91ben\(1\).jpg#/media/File:Kat%C3%B3dsugarak_m%C3%A1lgneses_mez%C5%91ben\(1\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kat%C3%B3dsugarak_m%C3%A1lgneses_mez%C5%91ben(1).jpg#/media/File:Kat%C3%B3dsugarak_m%C3%A1lgneses_mez%C5%91ben(1).jpg))

A figura 6.4.1 mostra uma ampola de vidro para geração de raios catódicos e nela há um obstáculo em forma de cruz. Na figura 6.4.2 os eletrodos desta ampola foram ligados à alta tensão, o eletrodo da base no pólo positivo e o eletrodo traseiro no negativo. Na luz emitida pela parede fronteiria da ampola se nota a sombra desta cruz. Eugen Goldstein⁴ notou em 1876 que estes raios saem perpendicularmente da superfície do eletrodo negativo, ou seja, do cátodo. Isto indica que se trata de partículas negativas e não de raios luminosos que seriam emitidos em diversas direções. Foi ele quem inventou o nome de *raios catódicos*.

Então se os raios catódicos consistem de partículas eletricamente carregadas deve ser possível desviar seu caminho com campos elétricos. Em 1883 Heinrich Rudolf Hertz⁵ tentou desviar um feixe de raios catódicos deixando-os passar no espaço entre placas de um capacitor. Ele não conseguiu desviar os raios e concluiu que não eram partículas. Ele e outros pesquisadores como Goldstein e Lenard⁶ acreditavam naquela época que seriam ondas do éter.

¹ Julius Plücker (16/06ou07/ 1801 – 22/05/1868).

² Johann Hittorf (27/03/1824 - 28/11/1914).

³ Sir William Crookes (17/06/1832 – 04/04/1919).

⁴ Em 1886 Eugen Goldstein (05/09/1850 – 25/12/1930) gerou também feixes de íons positivos inclusive de prótons cujas propriedades foram depois medidas por Wilhelm Wien.

⁵ Heinrich Rudolf Hertz (22/01/1857 – 01/01/1894) é muito conhecido por ter mostrado experimentalmente que ondas eletromagnéticas existem. Para criar estas ondas, ele inventou um oscilador e durante estes trabalhos descobriu o efeito fotoelétrico. Grande parte da formulação moderna do eletromagnetismo é devido a Hertz. Hertz estudou também línguas, especialmente árabe e sânscrito. A unidade de frequência Hz foi escolhida em sua homenagem. 1 Hz (= 1 oscilação/s) é aproximadamente a frequência das batidas do nosso coração. É uma coincidência curiosa que a palavra alemã que denomina coração é *Herz*, porém sem o “t”, mas com a mesma pronúncia de Hertz.

⁶ Philipp Eduard Anton von Lenard (07/06/1862 – 20/05/1947) ganhou o prêmio Nobel pelas suas pesquisas sobre raios catódicos. De fato alguns dos seus resultados influenciaram o desenvolvimento da teoria do átomo e da mecânica quântica, mas não ajudaram a desvendar a natureza destes raios. Lenard

O resultado negativo de Hertz era um erro experimental causado por um vácuo de baixa qualidade que descarregava as placas do capacitor porque o gás restante ficava ionizado e conduzia a eletricidade. Em 1895 Jean Perrin⁷ deixou os raios catódicos entrarem numa gaiola de Faraday através de um pequeno furo e verificou com um eletroscópio que este *copo de Faraday* se carregava negativamente com a entrada dos raios. Isto era uma prova irrefutável de que se tratava de cargas negativas e não de ondas do éter.

Faltava ver se estas cargas eram objetos materiais e quais seriam as características destas partículas. Qual seria a carga q deles e qual o valor m de sua massa? Em princípio o movimento circular de partículas num campo magnético permite medir o quociente destas grandezas. Vimos que a frequência angular deste movimento é

$$|\vec{\omega}| = \left| \frac{q}{m} \vec{B}_0 \right|. \text{ Para os raios catódicos as frequências típicas são tão elevadas que na}$$

época teria sido impossível medi-las. Naquela época não existiam ainda circuitos eletrônicos. Mas há ainda outra maneira de determinar este quociente usando um campo magnético junto com um campo elétrico. Sir Joseph John Thomson usou este método para medir o quociente q/m das partículas dos raios catódicos no famoso laboratório de Cavendish em Cambridge. Este trabalho, junto com diversas outras medidas relacionadas com estas partículas, foi publicado em 1897 e é considerado como a descoberta do elétron⁸. A figura 6.4.3 mostra o esquema desta experiência.

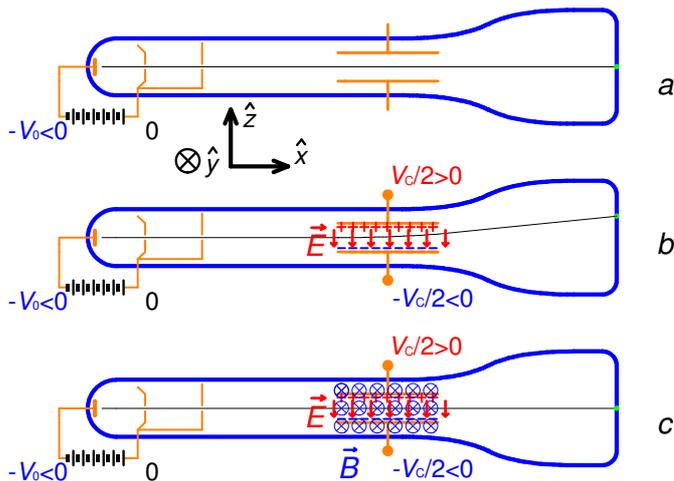


Fig. 6.4.3 Esquema da experiência de Thomson para medir q/m dos raios catódicos.

O método é o seguinte. Dentro de uma ampola de bom vácuo se aplica alta tensão entre dois eletrodos para gerar raios catódicos. Para formar um feixe bem definido o eletrodo positivo consiste de dois discos com furos no centro. Os furos estão alinhados e a linha que os une começa perpendicularmente na superfície do cátodo, ou seja, do eletrodo negativo. Os raios são gerados na superfície do cátodo e são acelerados percorrendo uma diferença de potencial de módulo V_0 . Os eletrodos com furo e a tela fluorescente se mantêm no mesmo potencial, e na figura escolhi o valor deste potencial como zero. As partículas negativas que passam pelos dois orifícios seguem em linha reta e marcam um ponto luminoso numa tela fluorescente. Supondo que estas partículas de carga q e massa m partem da superfície do cátodo com velocidade aproximadamente nula, sabemos que sua velocidade após a passagem pelos furos será

$$\vec{v} = \hat{x} \sqrt{\frac{2|qV_0|}{m}} \quad (6.4.1).$$

pesquisou também sobre o processo de eletrizar gotas de água. Fora disso Lenard era uma figura nefasta e invejosa fortemente envolvida nas atividades nazistas na Alemanha de Hitler.

⁷ Jean Baptiste Perrin (30/9/1870 – 17/4/1942) investigou também o movimento Browniano e os raios-X.

⁸ J. J. Thomson. Cathode Rays *Philosophical Magazine*, **44**, 293 (1897).

Nesta fórmula usei um vetor unitário \hat{x} que aponta na direção do feixe como indicado na figura 6.4.3. Com uma medida do módulo da velocidade, pode-se obter o valor do quociente q/m usando a fórmula (6.4.1). Mas medir a velocidade diretamente como um $\Delta x/\Delta t$ teria sido muito difícil, pois a velocidade é alta e o Δt correspondentemente pequeno. Não existiam naquela época circuitos eletrônicos sofisticados. De fato na mesma época da experiência de Thomson, Emil Wiechert⁹ conseguiu esta proeza usando um oscilador de Heinrich Hertz como cronômetro¹⁰. Wiechart chegou a valores de q/m compatíveis com os de Thomson. Mas com uma combinação de campo elétrico e magnético pode-se medir a velocidade de partículas carregadas sem necessidade de um cronômetro e foi este método que Thomson usou.

Na região do movimento retilíneo uniforme, colocam-se placas planas e paralelas de um capacitor de tal forma que o feixe atravessasse o centro do capacitor numa direção paralela às placas como mostra a figura 6.4.3 (situação a). Marca-se a posição de incidência do feixe. Depois um campo elétrico é aplicado com a ajuda deste capacitor mantendo a média dos potenciais das placas do capacitor no valor zero para não provocar aceleração das cargas na direção do feixe original. A aplicação deste campo elétrico transversal provoca uma deflexão do feixe (situação b). Mas agora se aplica um campo magnético numa direção perpendicular ao feixe original e ao campo elétrico se regula seu módulo de tal forma que a força magnética cancele exatamente a força elétrica e o feixe volte para sua trajetória reta original (situação c). Para que isto seja possível, o sentido do campo magnético \vec{B} tem que ser escolhido de tal forma que a trinca ordenada $\langle \vec{B}, \vec{v}, \vec{E} \rangle$ forme um triedro direito.

Veremos como se extrai informação a respeito da velocidade desta experiência. Na situação c, isto é, com o campo elétrico transversal e com o campo magnético, as partículas seguem em linha reta sem aceleração. Então na região do capacitor a força resultante que atua sobre as partículas deve ser zero.

$$0 = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad (6.4.2)$$

Na figura indiquei os vetores da base $\langle \hat{x}, \hat{y}, \hat{z} \rangle$. Vamos expressar os campos na região do capacitor e a velocidade nesta base:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= -E \hat{z} & \text{com } E > 0 \\ \vec{B} &= B \hat{y} & \text{com } B > 0 \\ \vec{v} &= v \hat{x} & \text{com } v > 0 \end{aligned} \quad (6.4.3)$$

Com os parâmetros E , B e v definidos pela (6.4.3), a condição de movimento retilíneo uniforme é

⁹ Emil Wiechert (26/12/1861-19/03/1928) descobriu independentemente de Alfred-Marie Liénard a expressão do potencial eletromagnético de uma carga em movimento acelerado. Este potencial é conhecido com o nome de Potencial de Liénard-Wichert. Wiechert participou também ativamente com discussões no desenvolvimento da teoria da relatividade. Mas sua maior obra é no campo da geofísica com modelos de camadas do interior da Terra e com pesquisas sobre ondas sísmicas. Geralmente ele é considerado o fundador da geofísica. Sua medida da velocidade dos raios catódicos baseada em tempo de voo numa época sem circuitos eletrônicos é uma façanha notável. Hoje medidas de massa de partículas com tempo de voo são feitas rotineiramente com alta precisão.

¹⁰ E. Wiechert "Ergebnis einer Messung der Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen" Schriften der physikalisch-ökonomischen Gesellschaft zu Königsberg 38 (1897).

$$0 = -qE\hat{z} + qvB\hat{x}\times\hat{y} \quad (6.4.4)$$

ou

$$E = vB \quad (6.4.5).$$

Então com valores conhecidos de E e B obtemos a velocidade. Combinando isto com a (6.4.1) se obtém

$$\frac{|q|}{m} = \frac{E^2}{2B^2V_0} \quad (6.4.6).$$

Thomson mediu este quociente, que é às vezes chamado de *carga específica*, e encontrou um valor muito maior do que qualquer quociente $|q|/m$ das espécies iônicas conhecidas das experiências de eletrólise. Com as unidades usadas atualmente o valor é aproximadamente

$$\frac{|q|}{m} \approx 1,76 \times 10^{11} \text{ C kg}^{-1} \quad (6.4.7).$$

Isto é quase duas mil vezes maior do que o valor do íon H^+ .

Naturalmente Thomson ficou assombrado com este valor alto da carga específica. Mas um outro fato tornou o seu resultado ainda mais significativo. Estas partículas tinham que sair de algo. Ou eram componentes das moléculas do gás envolvido na condução entre cátodo e anodo, ou elas saíam do material do cátodo. Já mencionei algumas vezes que aquilo que chamamos de vácuo é na verdade um gás de baixa pressão. Na geração dos raios catódicos, como no tubo da figura 6.4.2 ou nas experiências de Joseph John Thomson, este gás tem um papel essencial na geração dos raios catódicos. O gás é ionizado e conduz eletricidade entre cátodo e anodo. Enquanto a tensão entre os eletrodos não for suficientemente alta para gerar esta corrente, não se formam os raios catódicos. Então de alguma maneira as partículas destes raios pareciam sair das moléculas do gás ou do material do eletrodo. Thomson usou diversos gases e materiais de eletrodos diferentes e achou sempre o mesmo valor de $|q|/m$. Então aparentemente estas partículas eram um componente universal. Elas pareciam estar presentes em todos os elementos químicos.

Do valor enorme de $|q|/m$ pode-se concluir que sua massa é minúscula ou que a carga destas partículas é gigantesca supondo uma massa parecida com outros íons conhecidos. Qual destas possibilidades se aplica aos raios catódicos – carga pequena e massa minúscula ou carga gigante e massa de íons corriqueiros? Pelo sinal do potencial de aceleração V_0 , sabemos que se trata de partículas negativas. Quando se ioniza um átomo de hidrogênio, ficamos com um íon H^+ que possui quase a mesma massa do átomo e, por conservação de carga, uma carga elementar negativa deve ter saído do átomo. Se estas partículas dos raios catódicos foram realmente um ingrediente em todo elemento químico, devemos admitir que o que saiu do átomo era uma destas partículas muito leves dos raios catódicos com uma carga elementar negativa. Isto favorece a primeira hipótese, ou seja, carga pequena e massa minúscula. Hoje, com um valor muito preciso da carga elementar e medidas muito precisas da frequência angular do movimento circular num campo magnético, pode-se medir a massa destas partículas com muita precisão:

$$m_{\text{elétron}} = (9,10938291 \pm 0,00000040) \times 10^{-31} \text{ kg} \quad (6.4.8)$$

J. J. Thomson ainda não tinha usado o nome “elétron”, mas chamou as partículas dos raios catódicos de “corpúsculos”. A palavra “elétron” (em inglês “*electron*”) tinha sido inventada por George Johnstone Stoney¹¹, mas com outro significado. “Elétron” era o nome das cargas elementares, ou seja, daquilo que Helmholtz, numa famosa palestra homenageando Faraday, tinha chamado de “átomos de eletricidade”¹². Mas depois do trabalho de Thomson a palavra “elétron” começou a ser usada como nome das partículas dos raios catódicos.

O elétron é o que hoje chamamos de uma partícula elementar. Thomson descobriu esta primeira partícula elementar. Por ter mostrado que os raios catódicos consistem de partículas, ele ganhou o prêmio Nobel em 1906. É irônico que, 31 anos depois, seu filho George Paget Thomson¹³ ganhou o prêmio Nobel por ter mostrado que elétrons também são ondas. Hoje sabemos que ambos os conceitos de ondas e de partículas são apenas possíveis manifestações de sistemas quânticos.

Na mesma época das medidas de J.J. Thomson e E. Wiechert, o quociente $|q|/m$ dos raios catódicos foi ainda medido por Walter Kaufmann¹⁴, inclusive com uma precisão maior que aquela de Thomson¹⁵.

Na verdade E. Wiechert, W. Kaufmann e J.J. Thomson não foram os primeiros a medir a razão $|q|/m$ das partículas dos raios catódicos. Já em 1890, então 7 anos antes do trabalho de J. J. Thomson, Sir Franz Arthur Friedrich Schuster¹⁶ tinha medido este quociente com um método que hoje é usado por alunos de boas escolas de segundo grau para medir esta grandeza. O método usa o movimento circular dos raios catódicos num campo magnético uniforme. Se os raios foram acelerados com uma diferença de potencial V_0 , temos a relação (6.4.1) entre velocidade v , voltagem V_0 e $|q|/m$. Além disso, vimos na seção anterior que o raio da trajetória circular é

$$R = \frac{v_{\perp}}{\omega} = v_{\perp} \frac{m}{|qB_0|} \quad (6.4.9)$$

Ajustando as condições iniciais de tal forma que a trajetória fique circular e não helicoidal, sabemos que a componente perpendicular da velocidade v_{\perp} coincide com v . Medindo R e juntando as fórmulas (6.4.1) e (6.4.9), pode-se determinar $|q|/m$.

J. J. Thomson não tinha conhecimento deste trabalho de Schuster. Mas hoje a comunidade científica sabe deste trabalho. Então por que a descoberta do elétron é atribuída à Thomson e não a Schuster? Naturalmente Schuster também ficou

¹¹ George Johnstone Stoney (15/02/1826 – 05/07/1911) também inventou uma escala de massa associada à carga elementar e à constante gravitacional G ; $m_s = e(4\pi\epsilon_0 G)^{-1/2}$.

¹² H. von Helmholtz: The Modern Development of Faraday’s Conception of Electricity (1881); <http://www.chemteam.info/Chem-History/Helmholtz-1881.html>

¹³ Sir George Paget Thomson (03/05/1892 – 10/09/1975) descobriu a difração de elétrons numa rede cristalina, trabalhou em física nuclear e aerodinâmica.

¹⁴ Walter Kaufmann (05/06/1871 – 01/01/1947) foi o primeiro a mostrar o aumento da massa relativística com altas velocidades experimentalmente.

¹⁵ W. Kaufmann . “ Die magnetische Ablenkbarkeit von Kathodenstrahlen und ihre Abhängigkeit vom Entladungspotential ” Annalen der Physik und Chemie 61 p. 544–596 , 1897.

¹⁶ Sir Franz Arthur Friedrich Schuster (12/09/1851 – 17/10/1934) foi um físico atuante em diversas áreas. Ele desenvolveu um método de análise estatística de processos aleatórios e criou o conceito de antimatéria.

assombrado com o valor gigante de $|q|/m$. Mas a reação de Schuster foi diferente. Ele não confiou nos seus próprios resultados e atribuiu este valor grande a uma perda de energia dos raios catódicos por colisões com moléculas do gás. Então ele estimou uma incerteza experimental gigante. Com esta incerteza gigante era impossível concluir que as partículas eram sempre as mesmas para todos os gases e para todos os materiais do cátodo. Assim Schuster teve o mesmo destino dos nossos alunos de laboratório que recebem uma nota baixa quando eles atribuem ao erro experimental o fato de ter medido o campo magnético da Terra duas vezes menor do que o valor nos livros norte-americanos¹⁷. Devemos olhar nossos resultados com autocrítica, mas também devemos confiar nos resultados. O balanço adequado entre autocrítica e confiança certamente não é fácil.

Exercícios:

E 6.4.1: Uma partícula eletricamente carregada atravessa um capacitor de placas paralelas numa linha reta paralela às placas que possuem uma distância de 1 cm. Quando se aplica neste capacitor uma tensão de 20 V e aplica simultaneamente um campo magnético de 0,01 T numa direção perpendicular ao feixe e ao campo elétrico, a partícula consegue seguir em linha reta. Calcule o módulo da velocidade da partícula.

E 6.4.2: Deduza uma fórmula que expresse a razão $|q|/m$ em termos de parâmetros que possam ser determinados experimentalmente com o método de Schuster para medir $|q|/m$.

E 6.4.3 Escreva os pontos de destaque desta seção.

¹⁷ Aqui em Minas Gerais vivemos no mínimo mundial do campo magnético da Terra e o valor medido pelos alunos está correto.