

COMO SE MEDIU A CARGA DO ELECTRÃO *

RÓMULO DE CARVALHO

Professor do Liceu de Camões, Lisboa

1. Os fluidos eléctricos

Até 1833 a interpretação dos fenómenos eléctricos assentava na existência vaga de dois fluidos que os corpos possuíam independentemente da matéria que os formava. Tinham esses fluidos os nomes de positivo e negativo e existiam normalmente em quantidades iguais em vários corpos.

Se, por qualquer motivo, um corpo perdesse parte desses fluidos ficaria carregado com electricidade de sinal igual ao do fluido que não perdera e que, por tal motivo, ficava em excesso em relação ao do outro sinal. A causa dessa electrização poderia ser, por exemplo, o atrito. Assim, um vidro friccionado com um pano de lã ficava com excesso de fluido positivo pois a lã arrancava-lhe parte do negativo. A lã ficava electrizada negativamente e o vidro electrizado positivamente.

Deste modo e doutros semelhantes se explicava com sedutora facilidade a electrização dos corpos e as suas manifestações eléctricas mais elementares. Quanto à natureza desses fluidos ninguém tinha ideias precisas porque também não as tinham acerca dos próprios fenómenos. O recurso ao «fluido» foi sempre, em toda a História da Física, um recurso de urgência para resolver interpretações difíceis. A palavra, acompanhada dum gesto vago, diz tudo e não explica nada.

2. O átomo de electricidade

Em 1833 surgem as primeiras razões para se admitir que os fenómenos eléctricos não são devidos a quaisquer fluidos imponderáveis, invisíveis e imateriais, mas sim a corpúsculos que juntos aos corpos ou retirados deles lhes concedem as propriedades eléctricas. Esta nova

ideia de corpúsculo não explica, na verdade, o facto eléctrico mas coloca o problema numa posição totalmente diferente da anterior. Que corpúsculo é esse? Que dimensões tem? Qual a sua massa? Como abandona os corpos? Como se introduz neles?

Um aspecto particularmente interessante desta nova ideia é o seu paralelismo com a ideia velhíssima da constituição corpuscular da matéria. Assim como se admite que a matéria é formada por pequeníssimas partículas, assim se passa a admitir o mesmo para a electricidade. Ao lado do átomo da matéria passa a existir o átomo de electricidade, como então se disse, dando à palavra átomo o sentido de corpúsculo elementar.

Foi o físico inglês Faraday que, em 1833, nos deu a primeira suspeita da existência dum corpúsculo de electricidade. Faraday, cujo nome glorioso é bastante para envaidecer uma Ciência, estudava então o efeito da passagem da corrente eléctrica através dos solutos aquosos de substâncias minerais. O fenómeno é hoje bem conhecido e dele resulta, em termos sumários a libertação de metais no eléctrodo negativo do vaso que contém o soluto. A massa da substância assim libertada depende da quantidade de electricidade que atravessa o soluto e é-lhe directamente proporcional. Verificou então Faraday que uma dada quantidade de electricidade ao atravessar um soluto dum ácido mineral liberta, no polo negativo do vaso, sempre a mesma massa de hidrogénio qualquer que seja o ácido que se utilize. Analogamente, se uma dada carga eléctrica atravessa o soluto dum sal dum metal M , a massa metálica libertada é sempre a mesma qualquer que seja o sal de que se trate.

* Gazeta de Física, n.º 1, Outubro de 1946.

Os fluidos eléctricos

O átomo de electricidade

A teoria corpuscular

Medida da carga do electrão

Técnica e cálculos

Isso permite concluir imediatamente que há sempre uma certa quantidade de electricidade relacionada, seja como fôr, com as várias massas dos vários metais.

Concluiu-se da experiência que a carga eléctrica necessária para libertar 1 grama de hidrogénio era, em número aproximado, 96 540 coulombs, e também se concluiu que *essa mesma carga* eléctrica libertava, no caso de o soluto ser um de sal de prata, a massa aproximada de 108 gramas de prata.

O que há nestes números de mais impressionante é que eles (1 de hidrogénio e 108 de prata) correspondem às massas atómicas desses elementos, o que nos conduz a prever existência de inesperada relação entre as massas atómicas dos metais e as cargas eléctricas necessárias à sua libertação.

O resultado surpreendente a que se chegou foi este: todos os átomos-gramas de metais da mesma valência exigem a mesma carga eléctrica para se libertarem. Se a valência é de 1 o valor dessa carga é, aproximadamente, a que apontámos: 96 540 coulombs. Se a valência for 2 ou 3 a carga necessária será também 2 ou 3 vezes 96 540 coulombs.

Se, por outro lado, soubermos, como está averiguado, que o átomo-grama de qualquer elemento é constituído pelo mesmo número de átomos, concluiremos que a cada átomo da mesma valência (e agora repare-se bem que falamos em átomos e não em átomos-gramas) está associado a mesma carga eléctrica.

3. A teoria corpuscular

A primeira experiência que preparou a ideia da electricidade granular foi, como disse, realizada em 1833. As conclusões que resumimos nas linhas anteriores foram muito menos rápidas do que se poderia imaginar. Levaram algumas dezenas de anos a estabelecer-se, foram apoiadas por uns e criticadas por outros, até que se firmaram em segura base. Só bem no fim do século XIX é que se admite, sem controvérsia, a existência dum corpúsculo eléctrico relacionado com a existência do átomo. Foi só então, em 1891, que Stoney propôs que esse corpúsculo tivesse um nome próprio e o nome proposto e aceite foi o de *Electrão*.

Encontramo-nos assim em presença de uma *unidade natural de carga eléctrica*, o electrão. A sua definição, na época, apontada, será: a quantidade que deverá atravessar um soluto para libertar no eléctrodo negativo um átomo de hidrogénio ou um átomo de qualquer outro elemento monovalente.

Terminou o século XIX convencido da existência de corpúsculos materiais (moléculas e átomos) e de grãos de electricidade (os electrões). Com estes se pretendiam explicar as propriedades eléctricas da matéria.

Começa, porém o século XX e logo, no seu alvorecer, se alarga de maneira imprevista e soberba o conhecimento da estrutura dos corpos. O olhar arguto dos cientistas devassa a intimidade insuspeitada dos corpúsculos.

O átomo deixa de ser a partícula una e indivisível para ser um pequeno universo de partículas várias que gravitam sem descanso segundo leis novas onde o arrojo da concepção dos físicos é posta à prova mesmo sob a pena de destruírem muito saber anteriormente acumulado.

Dentro da nova ideia o grão de electricidade passa a considerar-se componente de tudo quanto existe, desde o muitíssimo pequeno até ao muitíssimo grande. Agora tudo são grãos de electricidade. Todos os átomos de todos os elementos são formados por partículas que são grãos de electricidade, umas positivas e outras negativas, em número maior ou menor, consoante a natureza do átomo. Todas estas cargas, porém, em cada átomo, compensam os seus efeitos e o conjunto apresenta-se-nos neutro como na velha teoria dos dois fluidos quando ambos se compensavam. Se, eventualmente, entrar ou sair desse pequeno universo, um ou mais grãos de electricidade, eis que o conjunto se desequilibra e aí o temos electrizado positivamente ou negativamente, conforme a mecânica do fenómeno.

Assim se passa a explicar, com maior experiência ou menor cópia de pormenores, as propriedades eléctricas da matéria. O termo electrão mantém-se através das novas concepções mas como agora há corpúsculos eléctricos de duas espécies reserva-se o nome para o corpúsculo negativa. A linguagem própria passa então a ser esta: se um átomo dum elemento perde, não importa como nem porquê, um ou mais dos seus electrões (que são negativos) fica electrizado positivamente e passa a denominar-se um *ião positivo*; se, pelo contrário, um átomo capta um ou mais electrões fica electrizado negativamente e deixa de ser um átomo para ser um *ião negativo*.

4. O fundamento do processo da medida directa da carga do electrão

Se qualquer porção de matéria é constituída por corpúsculos eléctricos será possível isolar um ou mais deles e medir-lhes a carga?

Qual o homem que não estaca de assombro perante o arrojo desta pergunta? Pois bem. A pergunta feita e a resposta foi dada. Isolou-se um electrão e mediu-se-lhe a carga eléctrica, directamente, apesar de se tratar duma partícula cujas dimensões do átomo vão muito abaixo das dimensões do átomo as quais já por si são tão insignificantes que não podemos concebê-las.

O gigante da Física que mediu directamente a carga foi Robert-Andrews Millikan no Laboratório Norman Bridge do Instituto da Califórnia em Pasadena. Este trabalho, como todos os trabalhos científicos, não surgiu esporadicamente da mão e do cérebro dum só homem. Outros antecederam e outros acompanharam. Com Millikan, porém, o problema foi magistralmente resolvido, com requintes técnicos admiráveis e ao fim de muitos anos de esforços continuamente aperfeiçoados.

Eis o fundamento do processo da medida directa da carga do electrão.

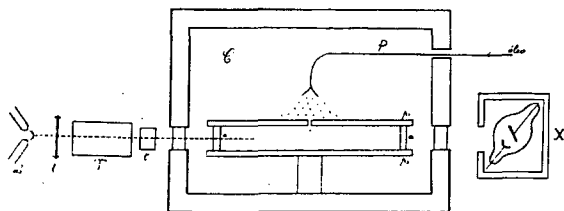
Imaginemos uma chuva de gotas muito miudinhas que caem verticalmente e serenamente. Suponhamos que é possível separar uma só gota de todas as outras e que, de qualquer modo, a electrizamos. Electrizar-la significa, dentro da teoria que apresentamos, que obrigamos a gota a libertar um ou mais electrões dos seus átomos ou então que a forçamos a captar um ou mais electrões existentes no espaço onde ela cai. No primeiro caso a gota ficaria electrizada positivamente e no segundo caso, negativamente.

Imaginemos agora que esta gota electrizada é obrigada a prosseguir a sua queda no intervalo entre dois pratos metálicos colocados horizontalmente e a pequena distância um do outro. Se, durante essa queda, ligarmos os pratos a um circuito eléctrico, o movimento da queda livre da gota será imediatamente perturbado. Se a gota estiver electrizada positivamente será atraída para o prato negativo e se o estiver negativamente será atraída para o positivo. Esta atracção, dirigida no mesmo sentido ou no sentido oposto da queda da gota, modificará a velocidade do movimento e será então possível conhecer o valor da carga eléctrica a partir do conhecimento da mudança que a velocidade sofreu.

Foi esta extraordinária concepção que Millikan realizou com surpreendente êxito. Veja como.

5. A técnica do processo

Em 1916, depois de alguns anos de experiências cada vez mais cuidadosas e minuciosas, Millikan terminou o seu trabalho. A figura que se segue mostra, muito sumariamente, o dispositivo, utilizado. Nela está indicado só o que é essencial à compreensão do assunto mas, na realidade, a aparelhagem era muito mais complicada. Sigamos a ordem indicada anteriormente.



1.º *Formação da chuva de gotas miudinhas* — O tubo *P* da figura representa um pulverizador que era accionado por pressão de ar muito bem seco e liberto de todas as poeiras. Por meio dele lançava-se azeite na câmara *C* o qual se espalhava em gotas finíssimas cujos raios eram da ordem de um milésimo de milímetro. Toda

a câmara *C* estava contida noutro recipiente (que a figura não representa) e completamente envolvido por 40 litros de um óleo cujo fim era o de manter constante a temperatura da câmara, condição essencial para o bom êxito da experiência.

2.º *Isolamento de uma gota* — No meio do prato circular *p*₁, fizera-se um orifício tão fino como se fosse aberto por uma agulha fina que o atravessasse. Das várias gotas que caíam lentamente na câmara *C*, havia uma, de quando em quando, que caía na direcção do orifício e ficava na situação desejada entre os pratos *p*₁ e *p*₂. Mas... como ver esta gota?

Da seguinte maneira. Os dois pratos *p*₁ e *p*₂, que eram discos de latão com 22 cm de diâmetro, estavam situados a 16 mm um do outro e rodeados por um anel (*a, a*) de ebonite que fechava completamente o intervalo entre os pratos. Nesse anel abriram-se três pequenas janelas em posições convenientes. (A figura só representa duas: *a, a*). Por uma delas (suponhamos a da esquerda da figura) entrava um feixe intenso de luz que ia iluminar a gota que porventura entrasse no intervalo dos pratos. Por umas das outras janelas (suponhamos a que não está indicada na figura) o observador via a gota iluminada como se fosse uma estrela brilhante no meio obscuro dos pratos. A luz era produzida por uma lâmpada de arco e atravessava primeiramente uma tina *T* de 80 cm de comprimento, cheia de água, e depois outra, *t*, com soluto de cloreto cúprico, ambas com o fim de absorver os raios caloríficos da luz. Pela segunda janela indicada observava-se a gota por meio de uma luneta de curto foco e cuja ocular continha uma escala que permitia medir a velocidade com que a gota caía.

3.º *Electrização da gota* — A electrização da gota era feita por meio dos raios X emitidos por uma ampola. É sabido que os raios X tornam os gases condutores pois descarregam um electroscópio colocado no ambiente que os raios influenciam. Quando a radiação atravessa o meio considerado expulsa electrões dos átomos que formam esse meio. Se a radiação incidir sobre a gota que cai, ela torna-se positiva devido à perda de electrões, e a sua carga será então igual e de sinal contrário à carga que perdeu. Saber a carga que possui é o mesmo saber a carga que perdeu. No dispositivo de Millikan a radiação produzida em *X* incidia no intervalo entre os pratos passando através da terceira janela *a* (à direita da figura).

4.º *Circuito dos pratos* — Os pratos *p*₁ e *p*₂ faziam parte dum circuito alimentado por uma bateria de 10 mil volts. Um comutador apropriado permitia dar aos pratos o sinal que mais conviesse e também pô-los em curto-circuito. Millikan conseguia observar a queda da gota electrizada durante minutos sucessivos sem sair do pequeno intervalo entre os pratos, ora fazendo-as subir, ora fazendo-as descer, ora fazendo-a parar.

5.º *A medida das velocidades da gota* era feita por meio da luneta do observador. Na ocular da luneta estavam 3 fios equidistantes cujas distâncias eram rigorosa-

mente conhecidas. Um cronógrafo especial gravava os tempos das subidas e descidas com a precisão de centésimos de segundo.

6. Os cálculos

Sabemos que forças de intensidades diferentes aplicadas ao mesmo corpo lhe concedem velocidades proporcionais aos valores das forças. Seja mg o peso da gota; v_1 , a sua velocidade em queda livre; Fe a força eléctrica que solicita a gota, sendo e a sua carga e F o valor do campo criado pelo circuito dos pratos no intervalo entre eles; v_2 a velocidade do movimento quando a gota está sujeita, simultaneamente ao seu peso e ao campo eléctrico. Teremos:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{mg}{Fe \pm mg}$$

Os sinais $+$ e $-$ referem-se aos casos das duas forças actuantes terem o mesmo sentido ou sentidos contrários.

Quanto ao valor e que se pretende conhecer, ele pode naturalmente ser a carga de 1 electrão ou de mais do que 1. Contudo, em muitíssimas experiências realizadas por Millikan, foi sempre encontrado um valor mínimo de e , o qual valor foi de $4,774 \times 10^{-10}$ U. Es. Q. (unidades electrostáticas de quantidades de electricidade).

A massa m da gota, que é esférica, calcula-se pela expressão $m = 4/3 \pi a^3 \sigma$ em que a é o raio da gota e σ a sua massa específica.

Por seu turno o raio da gota foi calculado a partir da fórmula de Stokes que dá a velocidade da queda duma esfera polida e rígida através dum meio uniforme. Ela diz que:

$$v_1 = \frac{2}{9} \frac{ga^2}{\eta} (\sigma - \rho)$$

em que η é a viscosidade do ar e ρ a sua massa específica.

Todas as constantes foram determinadas com extraordinário rigor o que exigiu pacientes e delicadíssimos trabalhos á margem do fim principal da obra.

Página imortal da Física é esta e padrão glorioso de quanto pode o génio dos homens.

* Reimpressão do artigo publicado por Rómulo de Carvalho, no primeiro número da Gazeta de Física, em Outubro de 1946.

O autor era, na época, professor do Liceu de Camões e membro da primeira Direcção da Gazeta de Física.

Centenário da Descoberta do Electrão ¹

A comemoração científica do ano é incontestavelmente a descoberta, em 1897, da primeira partícula elementar, que estabelece a ligação entre a Física e a Química, que é a base da computação actual, e que se veio a transformar num servo fiel e incansável da Humanidade — o *electrão*.

Joseph John Thomson (Prémio Nobel da Física em 1906) identificou o que hoje chamamos electrão há 100 anos. O relato habitual do seu sucesso valoriza o modo como Thomson conseguiu sujeitar os chamados raios catódicos à acção conjunta de campos eléctricos e magnéticos, ajustados de modo a ser nula a deflexão total do feixe catódico.

A equação do equilíbrio de forças, que daí resulta, forneceu um valor para a razão *carga-massa* (e/m) das partículas que, de acordo com a maioria dos físicos ingleses do tempo, constituíam os raios catódicos. Uma vez que o valor de e/m então encontrado era 1000 vezes maior do que a razão carga-massa do ião de hidrogénio determinada por electrólise (E/M). Thomson teve de escolher entre as hipóteses $e > E$, $m < M$ ou ambas. Escolheu $m = M/1000$ de modo a ter um *corpúsculo* suficientemente pequeno para descrever o comportamento dos raios catódicos. Conjecturou que estes corpúsculos eram os constituintes não apenas dos raios catódicos mas também de toda a matéria.

Esta conjectura estava evidentemente à frente dos factos. No entanto, em breve foi convincentemente aceite pela comunidade científica. Essa convicção não se deveu propriamente a Thomson ter encontrado um método de exercer uma força electrostática sobre as partículas dos raios catódicos. Impôs-se sobretudo por um conjunto de investigações experimentais — algumas delas independentes de Thomson mas realizadas no Laboratório Cavendish, Cambridge, que ele próprio dirigia — que estavam em perfeito acordo com a sua extrapolação.

Nesses trabalhos incluem-se as descobertas de que as razões *carga-massa* (i) das partículas libertadas em metais iluminados por luz ultravioleta (ii) dos iões então supostamente responsáveis pela emissão de linhas espectrais no efeito Zeeman (iii) e a fracção facilmente absorvida, chamada *beta*, dos raios emitidos por substâncias radioactivas, eram em todos os casos aproximadamente iguais ao valor de e/m do corpúsculo acima referido. Verificou-se também que as cargas transportadas por iões gasosos negativos eram pequenos múltiplos de e . Em 1900, a maior parte dos físicos concordava com Thomson e reconhecia que a sua descoberta tinha transformado completamente a sua ciência.

Entre os cientistas que desempenharam um papel nos acontecimentos de 1897 estava um estudante de Thomson, Ernest Rutherford, que nesse ano distinguiu correctamente os raios alfa dos beta; Marie Curie, que identificou o átomo de urânio como fonte dos "raios de urânio"; e Walter Kaufmann, que também obteve um valor de e/m para os raios catódicos, mas que não soube o que fazer com esse resultado. O *corpúsculo* tornou-se o *electrão* quando toda a gente concordou que transportava a carga unitária, carga que tinha sido chamada electrão em 1891, mais ou menos na altura em que Thomson começou o estudo dos raios catódicos. A facilidade de manipular e explorar o electrão para fins práticos foi ilustrada logo no ano da sua descoberta por Karl Ferdinand Braun (Prémio Nobel da Física em 1909), que projectou um precursor do osciloscópio que, na sua forma moderna, também é o tubo de imagens dos aparelhos de televisão.

¹ Tradução parcial do artigo "Eighteen — ninety-seven and all that", por J. L. Heilbron e W. F. Bynum, *Nature*, vol. 385, 2 de Janeiro de 1997.