

também para cada problema a resolução que julgemos mais clara e mais curta entre as que nos forem enviadas.

Num dos nossos próximos números iniciaremos a publicação de problemas resolvidos, que são problemas saídos em exames de frequência ou finais em qualquer estabelecimento de ensino, oficial ou não, desde que sejam acompanhados das respectivas resoluções.

As obras portuguesas contendo problemas de Física não são muitas; não obstante, são numerosos os enunciados incorrectos, vulgares os problemas de solução errada. Com o objectivo exclusivo de contribuímos para a

**1 M** — Um ascensor parte do repouso 30 m acima do solo, e executa o seu movimento de descida, primeiro com a aceleração constante de  $2,0 \text{ m/s}^2$  e depois com a aceleração constante de  $-4,0 \text{ m/s}^2$  e atinge o solo com velocidade nula. Calcular o tempo de descida. (*Mecânica por A. Ferreira*).

melhoria dêste estado de coisas, publicaremos críticas a alguns desses enunciados e emendaremos algumas dessas soluções: a melhoria surgirá em futuras edições de tais obras.

Neste número da *Gazeta de Física* iniciaremos a publicação de duas séries de problemas, a série M baseada na Física que se estuda nos cursos médios, destinada por exemplo a alunos dos últimos anos dos cursos liceais, e a série S baseada em conhecimentos que só se adquirem em cursos superiores. E agora mãos ao trabalho, amigo leitor; e, cautela com os enunciados inocentes...

**1 S** — Uma esfera maciça condutora com a carga eléctrica  $Q$  em equilíbrio, de raio  $r$ , está mergulhada no vácuo, sendo apenas actuada pela carga eléctrica pontual  $Q'$  à distância  $d$  do seu centro; a carga está situada no vácuo também. Calcular a força que actua esta carga pontual.

AMARO MONTEIRO

## 8. DIVULGAÇÃO E VULGARIZAÇÃO

### COMO SE MEDIU A CARGA DO ELECTRÃO

RÓMULO DE CARVALHO

#### § 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. Tinha esses fluidos os nomes de positivo e negativo e existiam normalmente em quantidades iguais nos vários corpos.

Se, por qualquer motivo, um corpo perdesse parte de um 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 arranca-

va-lhe parte do negativo. A lã ficava electrizada negativamente e o vidro electrizado positivamente.

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

Um aspecto particularmente interessante desta nova idéia é o seu paralelismo com a idéia 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 á palavra átomo o sentido de corpúsculo elementar.

Foi o fisico 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 dêle 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. Análogamente, 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. Isto 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 hi-

drogénio era, em número aproximado, 96540 coulombs, e também se concluiu que *essa mesma carga* eléctrica libertava, no caso de o soluto ser um sal de prata, a massa aproximada de 108 gramas de prata.

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

O resultado surpreendente a que se chegou foi êste: todos os átomos-gramas de metais da mesma valência exigem a mesma carga eléctrica para se libertarem. Se a valência é 1 o valor dessa carga é, aproximadamente, a que apontámos: 96540 coulombs. Se a valência fôr 2 ou 3 a carga necessária será também 2 ou 3 vezes 96540 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 associada a mesma carga eléctrica.

### § 3. A TEORIA CORPUSCULAR

A primeira experiência que preparou a idéia 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 êsse 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 de electricidade que deverá atra-

vessar 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 do mundo 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 arrôjo da concepção dos físicos é posto à prova mesmo sob a pena de destruírem muito saber anteriormente acumulado.

Dentro da nova idéia o grão de electricidade passa a considerar-se componente de tudo quanto existe, desde o muitíssimo pequeno até o 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. Tôdas essas 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 dêsse 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 passam a explicar, com maior 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 negativo. 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 dêles e medir-lhes a carga?

Qual o homem que não estaca de assombro perante o arrôjo desta pergunta? Pois bem. A pergunta foi 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 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 do electrão foi Robert-Andrews Millikan no Laboratório Norman Bridge do Instituto da Califórnia em Pasadena. Êste trabalho, como todos os trabalhos científicos, não surgiu esporadicamente da mão e do cérebro dum só homem. Outros o antecederam e outros o 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 tôdas as outras e que, de qualquer modo, a electrizamos. Electrizará-la significa, dentro da teoria que apresentámos, 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 eletrizada 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 elétrico, o movimento da queda livre da gota será imediatamente perturbado. Se a gota estiver eletrizada 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. Vejamos como.

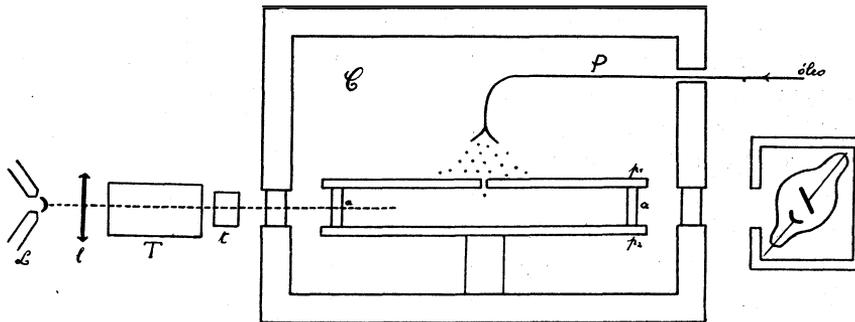
### § 5. A TÉCNICA DO PROCESSO

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 sumã

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 duma gota*—No meio do prato circular  $p_1$  fizera-se um orifício tão fino como se fôsse 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. Nêsse anel abriam-se três pequenas janelas em posições convenientes. (A figura só representa duas:  $a, a$ ). Por



riamente, 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 sêco e liberto de tôdas as poeiras. Por meio dêle lançava-se azeite na

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 uma das outras janelas (suponhamos a que não está indicada na figura) o observador via a gota iluminada como se fôsse uma estrêla 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 que 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-a subir, ora fazendo-a 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 traçados 3 fios equidistantes cujas distâncias eram rigorosamente 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, êle 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 quantidade de electricidade).

A massa  $m$  da gota, que é esférica, calcula-se pela expressssão  $m=4/3\pi a^3\sigma$  em que  $a$  é o raio da gota e  $\sigma$  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:

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

em que  $\eta$  é a viscosidade do ar e  $\rho$  a sua massa específica.

Tôdas 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.

RÓMULO DE CARVALHO

PROF. DO LICEU CAMÕES

*A «Gazeta de Física» luta por um curso independente de Física*