

A participação de Fletcher no experimento da gota de óleo de Millikan

C. A. dos Santos

*Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Caixa Postal 15051, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil*

Trabalho recebido em 24 de novembro de 1994

Resumo

O famoso experimento da gota de óleo, com o qual Millikan obteve valores altamente precisos para a carga do elétron, desempenhou papel importante para a concessão do seu Prêmio Nobel. O primeiro trabalho referente a essa série de medidas teve a assinatura solitária de Millikan, apesar da reconhecida participação do seu estudante Fletcher. A partir de uma nota autobiográfica de Fletcher, fica-se sabendo que ele foi o responsável pela construção do primeiro equipamento para o referido experimento. Discute-se aqui também como a questão é apresentada em outras fontes bibliográficas.

Abstract

The famous oil-drop experiment, from which Millikan have obtained precision measurements of the electron charge, played an important role on his Nobel Prize award. Millikan was the sole author of the first paper on this series of measurements, despite the recognized participation of his student Fletcher. From a Fletcher's autobiographical note, it is known that he was responsible for the setup of the first equipment for the above mentioned experiment. It will be also discussed here how the subject is presented in other bibliographical sources.

I. Introdução

Além do papel desempenhado no contexto do desenvolvimento científico do início do século, o experimento da gota de óleo de Millikan desempenha hoje papel importante no ensino da física moderna; trata-se de um dos clássicos experimentos frequentemente realizados nos laboratórios de física moderna^[1].

Físico experimental reconhecidamente habilidoso, Millikan exerceu forte influência no desenvolvimento da ciência norte-americana, não apenas pela realização de pesquisa relevante^[2], como também pela competência administrativa, conforme brevemente discutido a seguir. Entre todos os seus trabalhos, aqueles referentes ao experimento da gota de óleo e à comprovação da equação de Einstein para o efeito fotoelétrico apresentaram significados especiais porque simbolizam o Prêmio

Nobel ganho em 1923.

Com relação ao experimento da gota de óleo, há uma controvérsia quanto ao nível de participação do seu estudante Harvey Fletcher, que, em manuscrito postumamente publicado^[3], sugere que Millikan o "convenceu" de que o primeiro trabalho da série deveria levar apenas a assinatura do "Chefe". Para "infelicidade" de Fletcher, esse foi o "paper" que ficou famoso.

Neste artigo será apresentada a versão de Fletcher, na qual detalha as etapas iniciais da construção do equipamento^[3], e será discutida como a questão é apresentada em outras fontes bibliográficas. A descrição de Fletcher reveste-se de importância porque, aparentemente, não há na literatura uma descrição tão detalhada dessa fase do trabalho de Millikan, nem mesmo apresentada pelo próprio.

II. Os protagonistas

Millikan

Nascido a 22 de março de 1868, em Morrison (Illinois), Robert Andrews Millikan foi o primeiro físico norte-americano de nascimento a ganhar o Prêmio Nobel^[4]. Obteve seu diploma de Ph.D. na Universidade de Columbia, em 1895, numa época em que o sistema universitário norte-americano era considerado de nível inferior ao europeu, tanto no que se referia ao ensino, quanto à pesquisa^[5]. Sob a orientação de um obscuro professor, Ogden Rood, Millikan desenvolveu uma tese na área de ótica^[6]. Depois do doutorado ele passou um ano na Alemanha, em estágio de pós-doutorado, realizando, sob a orientação de Nernst, um trabalho experimental sobre a dispersão de ondas eletromagnéticas num meio artificial preparado com a suspensão de gotas de benzeno em água^[7]. Portanto, se no doutorado Millikan não teve orientador de renome, no pós-doutorado não lhe faltaram oportunidades de contatos com cientistas de primeira linha (Planck, Warburg, Schwartz, Rubens, Klein)^[7]. Na sua relação de Mestres e Aprendiz, entre ganhadores de Prêmio Nobel em Física e em Química, Harriet Zuckerman coloca Millikan como Aprendiz de Nernst^[8].

Na sua volta aos EUA, em 1896, foi trabalhar no recém criado Laboratório Ryerson, do Departamento de Física da Universidade de Chicago, então dirigido por Albert A. Michelson, para quem os fundamentos da física estavam concluídos, faltando apenas rigorosas aplicações desses princípios a todos os fenômenos. Assim, em parte por causa da sua formação anterior e em parte pela influência de Michelson, Millikan dedicou sua vida profissional ao aperfeiçoamento de medidas realizadas por outros cientistas^[9]. Enfim, seu estilo científico, típico da América do Norte daquele tempo, priorizava a habilidade técnica e instrumental, em detrimento de idéias teóricas. Para Segre, apesar da sua fragilidade e simplicidade, Millikan tinha ideais altamente éticos e uma certa nobreza^[10].

Entre 1896 e 1907, Millikan contribuiu bastante

para a melhoria do ensino, principalmente preparando textos didáticos e manuais para laboratório^[11], mas sua produção científica ficou muito abaixo do desejável^[12]. Foi a partir do final de 1907 que seu trabalho de pesquisa despoitou. Millikan já vinha prestando muita atenção no trabalho desenvolvido por J.J. Thomson e seus estudantes no Laboratório Cavendish da Universidade de Cambridge^[13]. Chamou-lhe a atenção, sobremaneira, os resultados obtidos por H.A. Wilson (1903), referentes à medida da carga do elétron com o uso da câmara de bolhas^[14]. O valor médio obtido por Wilson para a carga do elétron foi aproximadamente 1.04×10^{-19} coulomb. Conforme discutido mais adiante, o método de Wilson apresentava dificuldades muito sérias, entre as quais a rápida evaporação das bolhas, repercutindo claramente nos valores obtidos para a carga do elétron.

Coerentemente com seu espírito científico, Millikan percebeu que essas dificuldades experimentais poderiam constituir uma boa oportunidade para a realização de trabalhos significativos. Sua primeira iniciativa foi a repetição e adaptação do experimento de Wilson. Com a colaboração do seu estudante Louis Begeman, Millikan inicia sua caminhada rumo ao Prêmio Nobel. Nas primeiras medidas eles obtiveram para a carga do elétron um valor médio de 1.3×10^{-19} coulomb. Esses resultados foram apresentados na reunião da Sociedade Americana de Física, realizada em Chicago, em janeiro de 1908^[15], mas eram claramente insatisfatórios. Tentativas para melhorar esses resultados levaram à descoberta do método da gota isolada, através do qual eles obtiveram o valor médio de 1.56×10^{-19} coulomb. Esses resultados foram preliminarmente publicados na *Physical Review* [16]. Em agosto de 1909, Millikan relatou essas experiências durante a reunião anual da Associação Britânica para o Avanço da Ciência, realizada em Winnipeg (Canadá) e logo depois publicou um trabalho completo na *Philosophical Magazine* (19 (1910) 209). Os resultados eram animadores, mas o problema da evaporação continuava. Tentativas para resolver este

problema desembocaram no experimento da gota de óleo e na controvérsia-objeto do presente trabalho.

Paralelamente aos trabalhos para a determinação da carga do elétron, Millikan investia no estudo do efeito fotoelétrico, iniciando-o em 1907, quando ele sugeriu ao seu estudante George Wincheste um projeto obtendo a determinação do efeito da temperatura na emissão fotoelétrica. Todavia, seu mais importante trabalho na área só foi publicado em 1916^[17]. Essas duas linhas de pesquisa levaram-no a ganhar o Prêmio Nobel de Física em 1923, dois anos depois de deixar a Universidade de Chicago para ser Diretor do Laboratório de Física Norman Bridge, do Instituto de Tecnologia da Califórnia (CALTECH), em Pasadena, onde faleceu no dia 19 de dezembro de 1953.

Fletcher

Nascido em 1884, em Provo, Utah, Harvey Fletcher chegou a Chicago em setembro de 1908, depois de ter obtido o bacharelado em física na sua cidade natal, na Brigham Young University, BYU^[18]. Desejava fazer o doutorado junto ao Laboratório Ryerson, então dirigido por Michelson, mas, ao invés do ingresso, foi-lhe sugerido que frequentasse quatro anos de "college", em Chicago, antes de iniciar um trabalho de doutorado. A sugestão significava simplesmente que ele deveria repetir o curso de graduação. Com tamanha decepção e uma noite insone, Fletcher procurou Millikan para discutir a questão, ouvindo dele a sugestão de que deveria matricular-se como aluno especial e frequentar os cursos que os alunos de primeiro semestre da pós-graduação normalmente frequentavam. Se ele fosse bem sucedido nos cursos, o comitê de admissão poderia reexaminar sua inscrição. Aprovado entre os primeiros da classe, foi admitido como aluno de doutorado, defendendo sua tese^[19] em 1911, com a primeira distinção *summa cum laude* conferida a um estudante de física na Universidade de Chicago.

Logo depois do doutorado ele retornou para Provo, onde ocupou a chefia do Departamento de Física da BYU, ali permanecendo até 1916, quando aceitou con-

vide para trabalhar em Nova Iorque, na Western Electric. A partir de então Fletcher passa a se concentrar em pesquisas aplicadas. Em 1925 ele assumiu a diretoria de pesquisas acústicas do Bell Telephone Laboratories, no momento em que ele foi organizado para a realização das pesquisas do sistema Bell. Depois, ele ocupou a diretoria de pesquisas físicas na Bell.

Em 1933, sua equipe demonstrou, pela primeira vez, a transmissão de som estereofônico, em 1939 foi a vez da gravação estereofônica. Em 1952, aposentou-se nos laboratórios da Bell e passou dois anos dando aulas na Escola de Engenharia da Universidade Columbia, após o que retornou à sua cidade natal, onde faleceu em 1981.

Autor de mais de 40 trabalhos e 5 livros, Fletcher foi o primeiro presidente da Sociedade de Acústica da América e um dos presidentes da Sociedade Americana de Física.

III. Medida da carga do elétron: de Thomson a Millikan

Tendo como referências básicas o ensaio de Holton^[2] e o livro de Anderson^[20], objetiva-se com esta seção apresentar uma breve descrição da evolução dos métodos baseados na câmara de bolhas, desde Thomson até Millikan.

Por volta de 1897, C.T.R. Wilson, um dos estudantes de Thomson^[13], desenvolveu a sua famosa câmara de bolhas, ou câmara de nuvens, que permitiu o desenvolvimento de pesquisas revolucionárias na área da física moderna. O uso da câmara de Wilson para a determinação da carga do elétron fundamenta-se no fato de que íons gasosos servem como núcleos de condensação de vapor d'água. Em outras palavras, os íons são decorados por gotículas do vapor supersaturado. Os íons são produzidos com um feixe de raios X, ou com um feixe de raios gama emitidos por uma fonte radioativa.

Em 1851, Sir George Stokes^[20] mostrou que uma gota esférica, de raio a e densidade ρ , caindo sob a

ação de um campo gravitacional g , num fluido uniforme de viscosidade η , atinge uma velocidade terminal uniforme dada por $v = (2/9)(g a^2 \rho / \eta)$. Sendo este movimento exatamente o mesmo daquele experimentado por cada gota ionizada na câmara de Wilson, Thomson usou a relação de Stokes para estimar o raio médio das gotículas. Não cabe aqui apresentar o trabalho de Thomson detalhadamente; ele é importante pela introdução da câmara de bolhas, e pelo uso da relação de Stokes, mas as dificuldades metodológicas imediatamente apontaram para a necessidade de aperfeiçoamentos. Para compreender essa necessidade e as motivações das tentativas seguintes, vejamos, mesmo que superficialmente, algumas etapas do método de Thomson. A carga total da nuvem de gotículas era medida com um eletrômetro, de modo que a carga de cada gotícula era obtida pela média; o número de gotículas era obtido através de um complicado processo de medidas e cálculos, começando pela medida da velocidade da nuvem e passando pelo uso da relação de Stokes. O melhor valor obtido por Thomson foi da ordem de 1.1×10^{-19} coulomb.

Em 1903, outro estudante de Thomson, H.A. Wilson, implementou duas novidades nesse método. A primeira foi a decisão de observar apenas a parte superior de cada nuvem, porque consistia de gotículas menores e que se deslocavam mais lentamente. A segunda e mais importante novidade, foi a introdução de um campo elétrico na mesma direção do campo gravitacional. O tratamento matemático desse método é apresentado no livro de Anderson^[20], não cabendo aqui repeti-lo. Todavia, é interessante apresentar a expressão final para a carga do elétron, usada por Thomson e Wilson^[21]:

$$e = 3.1 \times 10^{-9} \frac{g}{E} (V_z - V_g) V_g^{1/2}$$

onde g é o módulo da aceleração gravitacional, E é o módulo do campo elétrico aplicado, V_z e V_g são, respectivamente, os módulos das velocidades terminais com e sem campo elétrico. A carga do elétron obtida com este método oscilava em torno de 1.04×10^{-19} coulomb.

Conforme dito antes, Millikan e seu estudante Begegan iniciaram, em 1907^[22], a repetição do experimento de H.A. Wilson. A seqüência de tentativas de Millikan é dividida em três etapas, cada uma caracterizada por um método. Esses métodos foram enumerados por Holton^[23] como Método I (essencialmente o método de Wilson), Método II (gota d'água isolada com alto campo elétrico) e Método III (gota de óleo).

Com o Método I eles obtiveram, para a carga do elétron, uma relação formalmente idêntica à de Thomson-Wilson, com valor médio em torno de 1.3×10^{-19} coulomb. Uma fonte de erro muito importante nos métodos baseados na câmara de bolhas foi destacada por Rutherford^[24], segundo o qual, a dificuldade de se levar em consideração o efeito da evaporação das gotículas de água resultava em valores superestimados para o número de gotículas e , conseqüentemente, em valores subestimados para a carga do elétron. Portanto, o problema crucial era reduzir o efeito da evaporação. A idéia imediata de Millikan foi utilizar um forte campo elétrico (obtido com uma tensão da ordem de 10 kV) para imobilizar a camada superior da nuvem de gotículas ionizadas e com isso acompanhar seu processo de evaporação. Qual não foi sua surpresa quando, ao ligar a bateria, a nuvem se dissipou completa e imediatamente, ao invés de ficar imobilizada como ele estava esperando! Observações sucessivas levaram Millikan a descobrir que depois da "explosão" da nuvem, algumas minúsculas gotículas permaneciam, proporcionando, pela primeira vez, a observação de gotas individuais; estava nascendo o Método II, na classificação de Holton^[23]. Millikan parece ter ficado extasiado com o que viu; gotas que iniciavam o movimento, depois paravam, e às vezes invertiam a direção do movimento quando o campo elétrico era desligado e depois ligado^[24]. Com a obtenção de aproximadamente 1.56×10^{-19} coulomb para a carga do elétron, Millikan e Begegan deveriam ficar mais do que satisfeitos; todavia, o problema da evaporação continuava. Tentativas para resolver este problema desembocaram

no experimento da gota de óleo, descrito a seguir com base no artigo de Fletcher^[3]. Para concluir essa fase do trabalho de Millikan, é muito importante destacar o fato de que, com a colaboração de Begeman, ele chegou à conclusão de que os valores das cargas das diversas gotículas eram sempre múltiplos exatos da menor carga que eles haviam obtido. Portanto, o resultado fundamental de que existe uma carga elementar, a carga do elétron, foi obtido com o Método II. Conforme veremos a seguir, o Método III, um experimento conceitualmente simples e extraordinariamente bem conduzido, ratificou a conclusão anterior, a partir de dados experimentais mais confiáveis.

IV. O Método III e a controvérsia Millikan-Fletcher

Em setembro de 1909, Fletcher procurou Millikan para saber se ele poderia lhe sugerir algum tema de pesquisa para sua tese de doutorado. Segundo Fletcher^[3], Millikan era um homem muito ocupado, de modo que foi muito difícil marcar uma reunião com ele. Finalmente foi marcado um encontro num dos laboratórios onde Millikan trabalhava com Begeman^[25]. Naquele momento, o principal problema a ser resolvido era o da rápida evaporação das gotículas de água. Segundo Fletcher, ao longo das discussões que eles tiveram, mercúrio, óleo, e duas ou três outras substâncias foram sugeridas, mas nesse tipo de discussão não é fácil ter certeza de quem sugeriu o que. De qualquer forma, ele ficou com a impressão de que ele tinha feito a sugestão, por causa da facilidade de obtenção e de manuseio do óleo. Causou-lhe surpresa o fato de que Millikan afirmou na sua autobiografia que já vinha pensando nessa solução antes de discuti-la com Fletcher e Begeman. Na verdade, Millikan escreveu que havia pensado nessa solução quando retornava da conferência do Canadá^[26]. Quer tenha sido um, ou outro o proponente, o fato, segundo Fletcher, é que Millikan teria dito que ali estava sua tese, na escolha de uma substância que não evaporasse. Em seguida ele descreve os detalhes da montagem do experimento, mas não volta a discutir a

questão da substância; aparentemente os resultados obtidos com o óleo de relógio ("watch oil") foram tão bons que eles não se dispuseram a testar outros materiais.

O equipamento usado por Millikan e Begeman era razoavelmente bem acabado, de modo que Fletcher logo percebeu que levaria algum tempo para construir um semelhante. Todavia, o grau de excitação era tal que ele resolveu fazer uma montagem rústica. Comprou um atomizador de perfume^[27], um pouco de óleo de relógio e iniciou sua montagem, cujo esquema é apresentado na Fig. 1. Na primeira montagem, realizada em apenas um dia de trabalho, Fletcher borrifou gotículas de óleo diretamente sobre a abertura da placa superior do condensador; não havia a câmara (C) apresentada na Fig. 1. Quando ele olhou pela primeira vez através do telescópio, ficou maravilhado com o que viu: o campo de visão da ocular cheio de pequenas estrelas com todas as cores do arco-íris. As gotas maiores desciam rapidamente, mas as menores permaneciam no ar durante quase um minuto, executando uma dança fascinante, ele estava tendo, pela primeira vez, uma espetacular visão do movimento Browniano [ref. 3, p. 45]. Durante a pulverização algumas gotículas de óleo ionizam-se por atrito, de modo que em seguida Fletcher pôde observar o efeito do campo elétrico sobre elas, ligando as placas do condensador a uma bateria de 1000 volts. Imediatamente observou que algumas gotículas subiam lentamente, enquanto outras desciam rapidamente, um resultado lógico para quem sabia que algumas gotículas estavam positivamente carregadas, e outras negativamente. Ligando e desligando a bateria na frequência adequada, ele conseguia selecionar uma gotícula e mantê-la no seu campo de visão por um longo tempo. Com algumas medidas e o tratamento matemático utilizado por Millikan e Begeman^[28], Fletcher obteve, com seu rústico equipamento, resultados bastante razoáveis.

No dia seguinte, Millikan ficou muito surpreso quando soube que Fletcher tinha montado o equipamento e que este funcionava bem! Mais surpreso ficou

quando, no laboratório, observou os belos fenômenos relatados acima. De acordo com Fletcher, Millikan ficou muito excitado, especialmente depois de aplicar o campo elétrico e perceber que o método seria capaz de fornecer um valor muito preciso para o valor de e . Imediatamente Millikan chamou o mecânico e encomendou uma montagem "profissional". Além dos outros componentes mostrados na Fig. 1, foi acrescentada uma fonte radioativa para aumentar a ionização das gotículas. O novo equipamento ficou pronto em uma semana, e depois de, aproximadamente, um mês de trabalho a imprensa já estava no laboratório em busca de informações sobre o revolucionário experimento. A publicidade foi enorme, e, na mesma medida, o entusiasmo de Fletcher; pela primeira vez o seu nome aparecia na imprensa, ao lado do nome de Millikan, e por várias vezes ele mostrou o experimento a personalidades importantes [29].

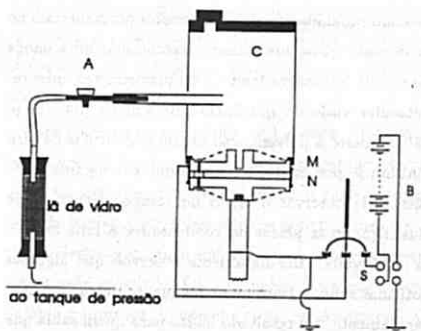


Figura 1. Esquema do equipamento utilizado por Millikan e Fletcher no famoso experimento da gota de óleo. Ar filtrado, com o qual se mistura gotículas de óleo do atomizador (A), é admitido na câmara (C). Algumas gotículas penetram num condensador de placas M e N, separadas por bastões de ebonite (a). As placas são carregadas por uma bateria (B), controlada por uma chave (S). As gotículas são iluminadas e vistas (com o uso de um telescópio de curta distância focal) através da janela (C). (Estilização da figura apresentada em *Physical Review* 32, 352 (1911)).

Na primavera de 1910, eles começaram a escrever um artigo para publicação. Segundo Fletcher, ele escreveu mais do que Millikan, principalmente no que se

refere à modificação da lei de Stokes. Millikan contribuía principalmente fazendo correções de linguagem. Para Fletcher, aquele era um trabalho de parceria, assim como haveriam de ser os outros quatro artigos planejados [30]. Todavia, em fins de junho, quando o artigo estava concluído, Millikan apareceu no apartamento de Fletcher, e, para sua surpresa, iniciou uma discussão genérica sobre utilização, como tese, de artigo publicado. Para Millikan, artigo usado em tese deveria ter a assinatura solitária do estudante. Fletcher logo percebeu que Millikan desejava ser o único autor do primeiro artigo: "Era óbvio que ele queria ser o único autor do primeiro artigo. Eu não queria isso, mas não via outra saída, de modo que eu concordei em usar o quinto artigo listado acima como minha tese" ("*It was obvious that he wanted to be the sole author on the first paper. I did not like this, but I could see no other way out, so I agreed to use the fifth paper listed above as my thesis*", ref. 3, p. 47. Tradução do autor). Que Millikan estava certo do grande sucesso que adviria com a publicação daquele artigo, parece não haver dúvida; o que não se pode afirmar é que, em consequência disso, ele tenha planejado afastar Fletcher. Aparentemente, quando Millikan foi discutir a autoria com Fletcher, já se encontrava em andamento pelo menos a publicação de um resumo, com a sua assinatura [31].

V. Comentários finais

Os fatos, ou supostos fatos, aqui relatados constituem belo material para um exercício de especulação histórica. Para tanto, talvez seja conveniente estabelecer as relações triangulares Millikan-Begeman-Fletcher. De 1907 a setembro de 1909, Begeman trabalhou com Millikan no desenvolvimento dos Métodos I e II; em 1908, eles publicaram o primeiro artigo na *Physical Review* (vol. 26, p. 197) sobre resultados obtidos com o método I; em 1910 Begeman publicou outro artigo, também na *Physical Review* (vol. 31, p. 45), mas, de acordo com Fletcher, ele já não trabalhava com Millikan [3]. Por outro lado, em 9 de outubro de 1909 Millikan

submete a *Philosophical Magazine* o primeiro trabalho sobre a gota isolada [32], sendo hoje considerado seu primeiro grande artigo; o segundo grande artigo foi justamente aquele publicado em *Science*, em 1916[30], o primeiro da série de artigos baseados nas medidas realizadas com Fletcher. Portanto, chama a atenção que os dois principais trabalhos de Millikan tenham sido publicados sem a participação dos respectivos estudantes, embora no texto o devido crédito seja dado aos colaboradores [33].

A propósito, Holton comenta que Millikan freqüentemente dava crédito a participação dos seus estudantes nos experimentos, e que as anotações nos cadernos do laboratório nem sempre eram de Millikan [34]. Nesse sentido, seria interessante ter acesso aos cadernos de 1909, para verificar as etapas iniciais da montagem do equipamento, bem como o uso do óleo e outras substâncias. Infelizmente esses cadernos desapareceram.

Agradecimentos

Ao professor José Wilson de Paiva Macedo, do Departamento de Física Teórica e Experimental da UFRN, que me indicou o excelente livro de Gerald Holton; à bibliotecária Zuleika Berto, pela organização das referências bibliográficas; ao bolsista de Iniciação Científica do PIBIC CNPq/UFRGS Cássio Stein Moura, pela estilização da Fig. 1, e aos colegas do IF-UFRGS, C. Schneider, J.I. Kunrath, M.A. Moreira, P.M. Mors e S.R. Teixeira pelas leituras críticas e proveitosas sugestões; ao CNPq, pelo financiamento parcial.

Notas e Referências Bibliográficas Ao leitor interessado em dados biográficos sobre outros cientistas mencionados neste artigo, recomenda-se a obra em quatro volumes do professor Bassalo: BASSALO, J.M.F. *Crônicas da Física*. Tomo 1 (1987), Tomo 2 (1990), Tomo 3 (1992), Tomo 4 (1994), Editora Universitária UFPA, Belém.

1. KUNRATH, J.I. *Experiências que abalaram a física clássica*, Porto Alegre: Instituto de Física

da UFRGS (1993). Trata-se de uma série de roteiros para a disciplina Laboratório Avançado I, com breves revisões históricas.

- Além das importantes contribuições para a determinação do valor da carga do elétron, objeto do presente trabalho, Millikan realizou trabalhos importantes sobre o efeito fotoelétrico, a determinação da constante de Planck e raios cósmicos (EPSTEIN, P. S. *Rev. Mod. Phys.* **20**, 10-25 (1948)).
- FLETCHER, H. *Phys. Today*, **35**, 43-47, June (1982). O manuscrito foi confiado ao seu amigo e colaborador Mark B. Gardner, com a condição de que fosse publicado postumamente.
- KARGON, R.II. *The rise of Robert Millikan*, Ithaca: Cornell University Press, (1982). p.11.
- Em carta enviada a J.J. Thomson, em 1902, Rutherford teria dito "The present status of Columbia in physical science is miserable". (KARGON, op. cit., p.34).
- O resultado da tese foi publicado, sob o título "A Study of the Polarization of the Light Emitted by Incandescent Solid and Liquid Surfaces" em duas revistas norte-americanas: *Transactions of the New York Academy of Sciences* (**14**, 155-185 (1895)) e *Physical Review* (**3**, 81-99 e 177-192 (1895)). (KARGON, op. cit., p.36).
- ROMER, A. *The Phys. Teacher*, **16**, 78-85 (1978).
- ZUCKERMAN, H. *Scientific elite*, New York: The Free Press, (1977). p. 101
- Na sua Conferência de Prêmio Nobel ("Nobel Lecture") Millikan foi claro e honesto, ao afirmar que "my own work has been that of the mere experimentalist whose main motive has been to devise, if possible, certain crucial experiments for testing the validity or invalidity of conceptions advanced by others regarding the unitary nature of electricity" (FLETCHER, op. cit. p. 44). Esse era o espírito do trabalho orientado por Michelson.

Aliás, há um texto de Michelson na introdução de um catálogo do laboratório, de 1894, que tem grande valor histórico: "While it is never safe to affirm that the future of Physical Science has no marvels in store even more astonishing than those of the past, it seems probable that most of the grand underlying principles have been firmly established, and that further advances are to be sought chiefly in the rigorous applications of these principles to all the phenomena which come under our notice. It is here that the science of measurement shows its importance - where the quantitative results are more to be desired than qualitative work...An eminent physicist has remarked that the future truths of Physical Science are to be looked for in the sixth place of decimals" (KARGON, op. cit., p. 43). Apesar disso, não se pode afirmar que Michelson era um cientista bitolado. O próprio Einstein, em entrevista concedida em 1950, manifestou sua admiração por esse cientista: "Michelson's instinctive feeling for the essentials of a crucial experiment without completely understanding the related theories, Einstein considered the surest sign of his genius" (SHANKLAND, R.S. *Am. J. Phys.* **31**, 47-57 (1963)).

10. "Despite his weaknesses and simplicity, he [Millikan] had his own high ethical ideals and a certain nobility". (SEGRÉ, E. *From X-rays to quarks*, New York: Freeman and Company, (1980). p. 190).
11. Romer relaciona 12 livros de Millikan, dos quais, 5 publicados até 1907 (ROMER, op. cit. p. 82).
12. HOLTON, G. *The Scientific Imagination: Case Studies*, Cambridge: Cambridge University Press, (1978). p. 39.
13. Em 1897, J.J. Thomson confirmou a natureza corpuscular dos raios catódicos, medindo a relação entre a carga elétrica e a massa desses corpúsculos (elétrons). Depois, com a colaboração de vários estudantes que viriam a ser famosos (E. Ruther-

ford, C.T.R. Wilson, H.A. Wilson, R.J. Strutt (filho do Lord Rayleigh), J.S.E. Townsend, C.G. Barkla, O.W. Richardson e seu filho G.P. Thomson), JJT desenvolveu uma verdadeira escola científica em Cambridge, contribuindo decisivamente para a descoberta e para o estudo do elétron, das câmaras de bolhas, da radioatividade, dos isótopos, entre outros (SEGRÉ, op. cit., p.16).

14. Alguns apontamentos num dos cadernos de Millikan, provavelmente iniciado entre 1897 e 1898, dão uma boa idéia do seu horizonte científico. Neste caderno, intitulado "References to Important Articles", ele destaca: efeito Zeeman, movimento browniano", *m/e Zeeman effect*, *Phil. Mag.* **43**, p. 226, 1897", "Cathode Rays, J.J. Thomson, *Phil. Mag.* **44**, p.293, '97", e continua relacionando diversos artigos importantes, incluindo a determinação da carga do elétron por Thomson, Townsend e H.A. Wilson. Portanto, Millikan acompanhava os trabalhos realizados em Cambridge à medida em que eles iam se desenvolvendo. Na última página do caderno, sob o título "Research Subjects", ele relaciona 27 tópicos, entre os quais destacamos: "Resistance of air in its relation to the velocity of the (falling) moving body" (anotação de 21/5/1898); "Stokes law for size of water particles in clouds, see JJT, *Phil. Mag.* **4**, p.24, 1902" (anotação de 1903?). (Holton, op. cit., p.31).
15. HOLTON, op. cit., p. 43.
16. De acordo com Millikan (MILLIKAN, R.A. *Phys. Rev.* **8**, 595-625 (1916)), esses dados foram publicados em *Phys. Rev.* **29**, 260 (1909).
17. MILLIKAN, R.A. *Phys. Rev.* **7**, 355-388 (1916).
18. GARDNER, M.B. *Phys. Today*, **34**, 116, Oct (1981).
19. Aparentemente, o título da sua tese é o mesmo de um artigo publicado em *Phys. Rev.* (Aug. 1911) e em *Le Radium* (Jul. 1911): "A Verification of the Theory of Brownian Movements and a Direct Determination of the Value of Ne for Gaseous Io-

- nization". Se este não é o título, com toda certeza este artigo é a base da tese (FLETCHER, op. cit. p.47).
20. ANDERSON, D.L. *The Discovery of the Electron*, Princeton: D. Van Nostrand Company, (1964). p. 77-100.
21. KARGON, op. cit., p. 61.
22. Segundo Anderson: "At the University of Chicago in 1906 he [Millikan] began to duplicate the work of H.A. Wilson, using the top of a cloud of water droplets in a variable electric field." (ANDERSON, op. cit. p.87). Por outro lado, tanto Kargon (KARGON, op. cit. p.58), quanto Epstein (EPSTEIN, op. cit. p. 14) colocam o ano de 1907 como início do trabalho.
23. HOLTON, op. cit. p. 38-58.
24. "It is an exceedingly interesting and instructive experiment to watch one of these drops start, and stop, or even reverse its direction of motion, as the field is thrown off and on". (MILLIKAN, ref. 16, p. 596.)
25. Há uma informação duvidosa no artigo de Fletcher, quando ele afirma que Millikan e Begeman mostraram-lhe "the work they were doing on the electronic charge, and reviewed the work that J.J. Thompson [sic] and E. Regener had been doing along this line in Cambridge, England". A dúvida reside na referência a Regener. Kargon diz claramente que "With his student Louis Begeman, he [Millikan] began, like Wilson..." (KARGON, op. cit., p. 62). Em Holton encontramos, "(...)E. Regener's value, obtained by a method very similar to Rutherford's (...)" (HOLTON, op. cit., p. 51). Aparentemente, os primeiros trabalhos de Regener, em 1908 ou 1909, basearam-se no método radioativo de Rutherford (ANDERSON, op. cit. p. 84). Fletcher pode ter feito uma confusão nas datas, pois é provável que Regener tenha realizado experimentos similares depois de Millikan, como sugere Anderson: "Regener, for example, using essentially the same methods as Millikan, found $e = 4.90 \times 10^{-10}$ esu in 1910." (ANDERSON, op. cit., p.101).
26. De acordo com Kargon, na página 75 da autobiografia de Millikan encontra-se: "Riding back to Chicago from this meeting I looked out the window of the day coach at the Manitoba plains and suddenly said to myself, 'What a fool I have been to try in this crude way to eliminate the vaporation [sic] of water droplets when mankind has spent the last three hundred years in improving clock oils for the very purpose of obtaining a lubricant that will scarcely evaporate at all!'" (KARGON, op. cit. p.63).
27. Lendo apenas esse artigo de Fletcher, pode-se ficar com a impressão de que foi dele a idéia de usar o atomizador, todavia, no primeiro artigo de Millikan sobre a gota de óleo, "The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of its Charge, and the Correction of Stokes's Law", publicado em *Science*, 32, 436 (1910), encontra-se a seguinte observação: "The atomizer method of producing very minute but accurately spherical drops for the purpose of studying their behavior in fluid media, was first conceived and successfully carried out in January, 1908, at the Ryerson by Mr. J.Y. Lee, while he was engaged in a quantitative investigation of Brownian movements." (KARGON, op. cit. p. 63).
28. Detalhes dos cálculos realizados por Millikan encontram-se nas referências [1, 12, 20].
29. "It was the first real publicity that I had ever received. My name ran right along with Professor Millikan's in the newspapers. I spent considerable time showing these experiments to various VIPs from all over the country." [ref. 3, p. 46]. Seria interessante consultar alguns jornais da época para verificar o conteúdo das matérias, porque a julgar pelas manchetes de alguns exemplares, o destaque mesmo era obviamente para Millikan (HOLTON,

- op. cit. p.318, nota 116).
30. Fletcher [3] relaciona os cinco artigos: (1) The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of its Charge, and the Correction of Stokes's Law (*Science*, 30 September 1910 - Millikan); (2) Causes of Apparent Discrepancies and Recent Work on the Elementary Electrical Charge (*Phys. Z.*, January 1911 - Millikan and Fletcher); (3) Some Contributions to the Theory of Brownian Movements, with Experimental Applications (*Phys. Z.*, January 1911 - Fletcher); (4) The Question of Valency in Gaseous Ionization (*Phil. Mag.*, June 1911 - Millikan and Fletcher); (5) A Verification of the Theory of Brownian Movements and a Direct Determination of the Value of N for Gaseous Ionization (*Phys. Rev.*, August 1911 - Fletcher). Como se vê, Fletcher não informa com precisão as referências. O artigo (1) foi publicado em *Science* 32, 436 (1910) (KARGON, op. cit. p. 182, nota 77). Em Holton (op. cit. p. 315, nota 98) vemos que: o artigo (2) foi publicado com o título em alemão "Ursachen der scheinbaren Unstimmigkeiten zwischen neuen Arbeiten über e ", em *Phys. Zs.* 12, 166 (1911); o artigo (5) foi publicado em *Phys. Rev.* 33, 107 (1911). Na mesma referência, p. 316, nota 106, vemos que o artigo (3) foi publicado com o título em alemão "Einige Beiträge zur Theorie der Brownschen Bewegung mit experimentelle Anwendungen", em *Phys. Zs.* 12, 202 (1911).
 31. Um pouco antes da publicação em *Science* (setembro), Millikan apresentou o trabalho (1), em 23 de abril de 1910, na *American Physical Society*, cujo resumo foi publicado em julho, na *Phys. Rev.* 31, 92 (1910); em dezembro o artigo foi publicado com o título em alemão "Das Isolieren eines Ions, eine genaue Messung der daran gebundenen Elektrizitätsmenge und die Korrektur des Stokesschen Gesetzes", na *Phys. Zs.* 11, 1097 (1910), e com o título em francês "Obtention d'un ion isolé, mesure précise de sa charge; correction à la loi de Stokes", na revista *LeRadium* 7, 345 (1910). (HOLTON, op. cit. p. 316, nota 107).
 32. Trata-se do artigo de Millikan, "A New Modification of the Cloud Method of Determining the Elementary Electrical Charge and the Most Probable Value of That Charge", *Phil. Mag.*, 19, 209 (1910). (HOLTON, op. cit., p. 303, nota 6).
 33. Por exemplo, "In 1911 Mr. Harvey Fletcher and the author first combined, in the Ryerson Laboratory(...)" (MILLIKAN 1916a, op. cit., p. 605).
 34. HOLTON, op. cit. p. 321, nota 127.