

# O modelo do grande elétron: o *background* clássico do efeito Compton

(The large electron model: the classical background of Compton effect)

Indianara Silva<sup>1</sup>, Olival Freire Junior<sup>2</sup> e Ana Paula Bispo da Silva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, Universidade Federal da Bahia  
e Universidade Estadual de Feira de Santana, Salvador, BA, Brasil

<sup>2</sup>Instituto de Física, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil

<sup>3</sup>Grupo de História da Ciência e Ensino, Departamento de Física, Universidade Estadual da Paraíba,  
Campina Grande, PB, Brasil

Recebido em 16/5/2011; Aceito em 30/6/2011; Publicado em 21/11/2011

A figura de Arthur Holly Compton geralmente é concebida como um dos pais fundadores da teoria quântica devido à sua formulação quântica para explicar o processo de interação entre a radiação de alta frequência e a matéria. Todavia, a história de Compton evidencia-nos um personagem que destoa da imagem de um físico interessado no desenvolvimento da teoria quântica. De fato, o seu interesse e a sua motivação, de 1916 a 1922, estavam relacionados com o uso da física clássica para o estudo do espalhamento dos raios X e  $\gamma$  pela matéria. A descoberta do efeito Compton foi o resultado obtido por um físico clássico que relutava em aceitar o quantum de radiação. O objetivo deste artigo é, portanto, destacar a imagem de um físico clássico que estava inserido em um programa de pesquisa bem definido, a física dos raios X e  $\gamma$ , a partir do qual ele contribuiu tanto para o desenvolvimento dessa área de pesquisa quanto para a da construção da teoria quântica. Para isto, apresentaremos o modelo do grande elétron utilizado por Compton para explicar o processo de espalhamento dos raios X pela matéria.

**Palavras-chave:** Arthur Holly Compton, física clássica, espalhamento dos raios X e  $\gamma$ , teoria quântica, história da física, história da ciência.

Arthur Holly Compton's persona is usually conceived as one of the founder fathers of the quantum mechanics due to his quantum formulation to explain the process of interaction between the high-frequency radiation and matter. Nevertheless, the Compton's history revealed a character that disagrees of the physicist's image interested in the development of the quantum mechanics. In fact, his interest and motivation, from 1916 to 1922, were associated with the use of classical physics to deal with X and  $\gamma$  rays. The discovery of the Compton Effect was the result obtained by a classical physicist who was loath in accepting the *quantum* of radiation. Our objective is therefore emphasizing the image of a classical physicist who was inserted in a research program well definite, X and  $\gamma$  rays physics, from which he contributed both to the development of this research area and to the construction of the quantum mechanics. We will present the model of the large electron used by Compton to explain the X and  $\gamma$  radiation scattering processes.

**Keywords:** Arthur Holly Compton, classical physics, X and  $\gamma$  rays scattering, quantum theory, history of physics, and history of science.

## 1. Introdução

A imagem pública de Arthur Holly Compton (1892-1962) sempre está associada à sua contribuição para o desenvolvimento da velha teoria quântica devido à sua descoberta do efeito Compton que lhe rendera o Prêmio Nobel de Física de 1927.<sup>2</sup> De fato, tal descoberta foi uma forte evidência experimental da ne-

cessidade da quantização da radiação para explicação do espalhamento dos raios X pela matéria. Não obstante, a reconstrução da trajetória científica de Compton mostrou-nos um personagem que destoa da imagem de um físico quântico, um dos “pais fundadores da teoria quântica”. De 1916 a 1922, o interesse e a motivação de Compton referiam-se ao uso da física clássica para tratar o espalhamento da radiação de alta frequência

<sup>1</sup>E-mail: isilva@mit.edu.

<sup>2</sup>Compton dividiu o Prêmio Nobel com Charles T.R. Wilson (1869-1959). Wilson descobriu um método capaz de fazer com que as trajetórias das partículas carregadas eletricamente se tornassem visíveis através da condensação de vapores. Para mais detalhes, ver [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1927/](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1927/).

pela matéria. A linha de investigação do nosso personagem era, portanto, o estudo dos raios X e  $\gamma$ , e não aquela da construção da teoria quântica. A ideia de que Compton estava interessado em um campo de pesquisa diferente daquele destinado à discussão do desenvolvimento da teoria quântica pode ser ilustrada a partir da seguinte frase escrita por Allison, enquanto ele escrevia notas biográficas sobre Compton, “ele não se juntou as peregrinações da década de 1920 a Göttingen ou Copenhague, meramente parando naquelas cidades incidentalmente em uma turnê européia” [1, p. 796]. A sua abordagem quântica para explicar o processo de espalhamento dos raios X e  $\gamma$  foi fruto de um longo período no qual Compton relutava em aceitar a teoria quântica. Enquanto isso, ele utilizava modelos e teorias clássicas para fundamentar as suas conjecturas.

A sua contribuição à física dos raios X e  $\gamma$  foi sendo esquecida face à imagem de um físico quântico. Nas obras dos historiadores da ciência [2-4], por exemplo, Compton não é mencionado como um dos protagonistas nas pesquisas sobre os raios X e  $\gamma$ , sendo incluído apenas quando os autores referem-se à história da construção da teoria quântica. Isto acaba sugerindo que o nosso personagem sempre estivera interessado no desenvolvimento da física quântica. Todavia, outros historiadores têm sido mais atentos à especificidade da prática científica de Compton, tais como [5-7]<sup>3</sup>. As principais contribuições de Compton à física dos raios X e  $\gamma$  foram a descoberta da reflexão interna total dos raios X em 1922, o estudo sobre a distribuição dos elétrons nos átomos pelos métodos de difração, e obviamente, o efeito Compton [1, p. 795].

A finalidade deste artigo é, portanto, evidenciar o *background* clássico de Compton que o conduziu ao efeito Compton, quântico, a partir da análise do seu modelo do grande elétron utilizado para a explicação do processo de espalhamento dos raios X e  $\gamma$  pela matéria. Para tal, utilizamos os artigos originais publicados no período em estudo, a literatura secundária publicada por historiadores da ciência, além de consulta aos arquivos pessoais de Compton. Deste modo, tentamos compreender os principais problemas relativos à interação da radiação com a matéria e as soluções propostas pelo nosso personagem de acordo com a época em estudo, evitando, assim, o anacronismo.

Desse modo, este artigo não analisará a transição no trabalho de Compton dos tratamentos clássicos ou semi-clássicos para o tratamento quântico, ocorrida em 1922. Para este tema, remetemos o leitor às Refs. [5, 23, 25, 26]. Este artigo está organizado como segue. As duas primeiras seções, de caráter ainda introdutório, apresentam notas biográficas e a aderência de Compton à física clássica. A quarta, e mais importante, seção, apresenta o modelo do grande elétron com o qual Compton buscou explicar o espalhamento da radiação pela matéria. A quinta seção explora as dificuldades

encontradas por esse modelo. As considerações finais incluem sugestões relativas ao ensino da física.

## 2. Notas biográficas

Compton nasceu na cidade de Wooster, estado de Ohio nos Estados Unidos, em 10 de setembro de 1892. Seu pai, Elias Compton, foi professor de filosofia e, em seguida, reitor da Universidade de Wooster. Nesta mesma universidade, Compton recebeu o título de bacharel em Ciências em 1913. Um ano depois, ele concluiu o mestrado na Universidade de Princeton, Nova Jersey, e, em 1916, Compton tornou-se doutor pela mesma universidade, trabalhando com a relação entre a intensidade dos raios X e os seus ângulos de reflexão em um cristal [5, p. 92-93, 8].

Durante os anos de 1916 e 1917, Compton foi professor de física na Universidade de Minnesota, Minneapolis, ministrando a disciplina física geral para o curso de engenharia e teoria matemática da eletricidade e magnetismo para um curso de graduação. No mesmo ano de 1917, ele foi contratado como engenheiro para realizar pesquisas na *Westinghouse Lamp Company* em Petersburgo, Pensilvânia. Após dois anos, Compton recebeu uma bolsa da *National Research Fellow in Physics* para realizar pesquisa no laboratório Cavendish em Cambridge, Inglaterra. Ele também foi professor da Universidade de Washington em Saint Louis, Missouri, durante 1920 a 1923 e, da Universidade de Chicago nos anos de 1923 a 1944. Compton retornou à Universidade de Washington, em 1945, como reitor desta universidade [9, p. 1-2, 5, p. 95, 11, p. 516].

Desde 1916, o interesse de Compton consistia em estudar a difração e o espalhamento dos raios X pela matéria [11, p. 511]. Nos anos seguintes, ele também estendeu o seu estudo aos raios  $\gamma$ . Porém, a partir da década de 1930, Compton iniciou um novo programa de investigação destinado aos estudos dos raios cósmicos no qual ele organizou e dirigiu diversas expedições para diferentes lugares do mundo. Estas expedições visavam medir o efeito da latitude sobre os raios cósmicos e foram decisivas para resolver, a favor das ideias de Compton, a disputa entre ele e R.A. Millikan (1868-1953) sobre a natureza desses raios [12-13]). Em 1941, Compton visitou o Brasil, participando de uma conferência sobre os raios cósmicos no Rio de Janeiro, além de realizar experimentos com balões em São Paulo. Esta viagem ao Brasil, além do seu caráter científico, foi parte de uma iniciativa do Departamento de Estado dos Estados Unidos para estabelecer e fortalecer as suas relações científicas com a América do Sul às vésperas da Segunda Guerra Mundial [14-16].

O advento da II Guerra Mundial modificou a forma pela qual a física desenvolvera-se. Isto acabou influenciando o programa de pesquisa de Compton. O seu

<sup>3</sup>Para uma análise mais detalhada da imagem de Compton difundida pelos livros didáticos e historiadores da ciência, ver Ref. [10].

interesse, em meados de 1941, estava agora relacionado ao problema do urânio, e não mais aos estudos acerca dos raios cósmicos. Ele tornou-se presidente da comissão do urânio da Academia Nacional de Ciências norte-americana, e “apresentou um relatório sobre o potencial militar da energia atômica” no qual descreveu a sua potencialidade científica e tecnológica [11, p. 515]. O trabalho de Compton em conjunto com o de E.O. Lawrence foi de extrema importância para a elaboração do Projeto Manhattan,<sup>4</sup> nos Estados Unidos, o que conduziu à produção da primeira bomba atômica. A atuação de Compton também foi essencial para a criação de laboratórios importantes como *Palos Park* e *Clinton Engineer Works*, e na implantação do reator de produção de plutônio em Hanford, Washington. Após a Segunda Guerra Mundial, Compton dedicou-se quase exclusivamente à carreira administrativa, o que surpreendeu os seus colegas físicos.

Além do Prêmio Nobel de Física, Compton também recebeu muitos títulos honorários e distinções, a saber, a *Rumford Gold Medal* em 1927; a *Gold Medal of Radiological Society of North America* em 1928; a *Hughes Medal* e a *Franklin Medal*, ambas em 1940 [8]. Além disto, ele também publicou estes livros na área da física dos raios X: *Secondary Radiations Produced by X-rays* em 1922, *X-rays and Electrons* em 1926, e *X-rays in Theory and Experiment* juntamente com S. K. Allison em 1935.

### 3. A predisposição de Compton à física clássica

A confiança de Compton nos fundamentos da teoria clássica foi fruto das suas atividades de pesquisa, afinal a sua tese de doutoramento estava baseada na física clássica; do seu conhecimento da descoberta relacionada à detecção dos efeitos de interferência dos raios X por Max von Laue (1879-1960) em 1914,<sup>5</sup> e das suas discussões com o seu irmão Karl T. Compton (1887-1954) e com o britânico Prêmio Nobel Owen W. Richardson (1879-1959), as quais aconteceram em Princeton no final da década de 1910. Compton, então, “havia adquirido uma atitude de completa confiança na validade universal da eletrodinâmica clássica” [5, p. 97].

Além de ter influenciado as ideias de Compton, a descoberta de von Laue foi extremamente importante para as pesquisas em raios X que, segundo o historiador Wheaton, aumentaram três vezes mais durante os anos de 1911 e 1913 [17, p. 201]. Após este período, quase todos os físicos acreditavam que a difração de

raios X por cristal havia evidenciado que os raios X e a luz ordinária eram equivalentes, ou seja, ondas eletromagnéticas [*ibid.*, p. 200]. Sobre esta descoberta de von Laue, Compton comentou que ainda existiam outras hipóteses, tal como aquela defendida pelo físico britânico William L. Bragg, que defendia a hipótese de que os raios X eram constituídos de corpúsculos cada qual tendo um par de partículas carregadas que se moviam com a velocidade da luz [5, p. 97]. Através desta conjectura, Bragg tentou explicar a diferença existente entre a radiação espalhada<sup>6</sup> e aquela espalhada na face emergente quando os raios X atravessavam a matéria. Contudo, Compton tinha conhecimento do fato de que Richardson já havia demonstrado que tal fenômeno era compatível com a teoria ondulatória dos raios X [*ibid.*, p. 98]. Compton estava, portanto, convencido de que os raios X eram, de fato, ondas eletromagnéticas.

A descoberta da interferência dos raios X conduziu, de acordo com os historiadores Mehra e Rechenberg, ao quase abandono da hipótese do *quantum* de luz. Até mesmo Albert Einstein (1879-1955), quem o havia proposto em 1905, mostrara-se mais cauteloso ao trabalhar com os problemas quânticos, não se referindo diretamente aos quanta de luz após Arnold Sommerfeld (1868-1951) mostrar que a assimetria na distribuição de intensidade dos raios-X poderia ser explicada pela teoria clássica de ondas [18, p. 514-515]. Porém, ainda havia uma forte evidência a favor dos quanta de luz: a explicação de Einstein para o calor específico dos sólidos.

A solução fornecida por Einstein para o problema do calor específico, contudo, não havia convencido o nosso personagem. Compton tentou, neste caso, resolvê-lo *sem* a hipótese dos quanta, derivando uma equação para o calor específico que dependia de uma temperatura crítica, e era independente da constante de Planck [19, p. 377 (18),<sup>7</sup> 5, p. 98] em 1915. Em outro trabalho publicado no ano seguinte, o qual também estava relacionado com a condutividade térmica dos sólidos, Compton [20, p. 348 (38)] declarou que o seu resultado era uma “evidência contra as hipóteses dos quanta”.

Todos estes fatores demonstram, portanto, o ceticismo de Compton quanto à hipótese dos quanta de luz e, por outro lado, a sua forte convicção na potencialidade explicativa da eletrodinâmica clássica. Este ceticismo relacionado à teoria quântica “[não] foi modificada nem com a visita de Rutherford a Princeton em torno de 1915, nem como um resultado das pesquisas de Compton na Universidade de Minnesota durante 1916 e 1917. Ele daria à teoria quântica, de fato, uma consideração um pouco séria até 1921” [5, p. 98-99].

<sup>4</sup>Para mais detalhes históricos do Projeto Manhattan, consultar o livro *The Making of the Atomic Bomb* escrito por Richard Rhodes.

<sup>5</sup>Nesse mesmo ano, von Laue recebeu o Prêmio Nobel de Física por esta descoberta. Para mais informações, ver <http://nobelprize.org/nobel-prizes/physics/laureates/1914/laue-bio.html#>.

<sup>6</sup>“A radiação ‘espalhada’ significava a radiação emitida pelos elétrons na matéria [...] devido às acelerações para as quais eles foram diretamente sujeitos pelos raios primários” [23, p. 1].

<sup>7</sup>A paginação entre parêntese corresponde àquela do livro *Scientific Papers of Arthur Holly Compton* no qual Robert Shankland fez uma coletânea de todos os artigos originais dedicados à física dos raios X e  $\gamma$  publicados por Compton entre 1913 e 1961.

#### 4. Eis a solução para os problemas: “o tamanho e a forma do elétron”

No início do século XX, a teoria clássica utilizada para explicar os fenômenos relacionados com o espalhamento dos raios X e  $\gamma$  pela matéria era aquela desenvolvida pelo físico britânico, Prêmio Nobel de 1906, Joseph J. Thomson (1856-1940). De acordo com a teoria proposta por Thomson, o valor estimado para o coeficiente de absorção de massa era dado por  $\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho}$ , nesta expressão,  $\tau/\rho$  representa o coeficiente fluorescente de massa e,  $\sigma/\rho$ , o coeficiente de espalhamento de massa. Na expressão de Thomson, o coeficiente de espalhamento de massa era uma constante de valor igual a  $0,188 \text{ cm}^2/\text{g}$  que não dependia do comprimento de onda da radiação incidente. Logo, o coeficiente de absorção não deveria ser menor do que  $0,188 \text{ cm}^2/\text{g}$  [5, p. 96-97].

Ao contrário disto, o físico britânico Charles G. Barkla (1877-1944), Prêmio Nobel de 1917, havia observado que o coeficiente de absorção de massa dependia do comprimento de onda da radiação incidente. Barkla encontrou que, para raios X de  $0,145 \text{ \AA}$  este coeficiente era igual a  $0,153 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Em outras medições relacionadas com o coeficiente de absorção do alumínio, Barkla e o físico japonês M. Ishino encontraram um valor de  $0,045$  para aquele coeficiente [21, p. 330].

Na opinião de Compton, a única forma plausível de explicar aquele baixo valor observado para o coeficiente de absorção seria considerando um elétron de tamanho comparável em magnitude com o comprimento de onda da radiação incidente [22, p. 23 (142)]. Esta hipótese era bastante contrária à de Thomson na qual o elétron era concebido como uma partícula quase pontual de carga elétrica elementar negativa em interação com os campos elétricos e magnéticos da radiação.

Na construção do seu modelo teórico, Compton considerou uma frente de onda S incidindo sobre um elétron relativamente grande. Na Fig. 1 os dois pontos A e B representam a radiação espalhada pela parte do elétron em A, e a outra pela parte do elétron em B. Conforme observado no diagrama, há uma diferença de caminho entre a radiação espalhada em A e aquela espalhada em B o que resulta em uma diferença de fase entre aqueles dois caminhos [22, p. 23 (142)]. Tal diferença de caminho pode resultar em uma interferência destrutiva já que as ondas superpostas não possuem a mesma fase [5, p. 99]. A intensidade dos raios espalhados em P, portanto, teria um valor reduzido. Compton chegou, então, a conclusão de que “a suposição de um elétron relativamente grande é [...] capaz de explicar qualitativamente o decréscimo observado no espalhamento da radiação eletromagnética quando o comprimento de onda torna-se muito curto” [*ibid.*]. Foi, assim, que Compton expli-

cou os resultados experimentais obtidos por Barkla e Ishino.

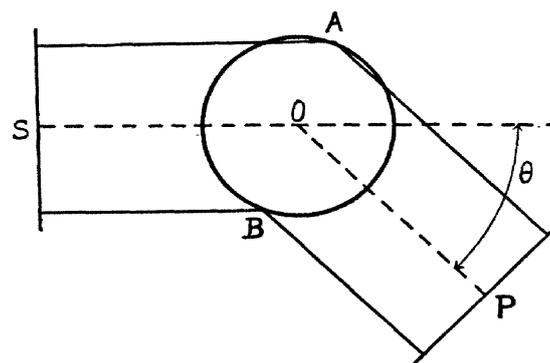


Figura 1 - O diagrama do grande elétron proposto por Compton no final da década de 1910. Fonte: Ref. [22, p. 23 (142)].

Além de propor um grande elétron, Compton também sugeriu diferentes formas para o mesmo. Ele calculou novas equações para o coeficiente de espalhamento,  $\sigma/\rho$ , baseado nas seguintes formas para o hipotético modelo de grande elétron: (I) uma esfera rígida de eletricidade, (II) uma casca esférica flexível de eletricidade e (III) um fino anel flexível de eletricidade. Em seguida, Compton inseriu os resultados experimentais obtidos por Ishino, A.W. Hull e M. Rice para o coeficiente de espalhamento nas equações encontradas por ele e, assim, determinou o valor estimado para o raio do grande elétron, conforme a Tabela 1.

O grande elétron proposto por Compton era, portanto, mil vezes maior do que o modelo de elétron descrito pela teoria de Thomson a partir da qual o seu raio deveria ser igual a  $1 \times 10^{-13} \text{ cm}$ , ou  $10^{-5} \text{ \AA}$  [5, p. 99]. Fazendo uma analogia entre o raio do grande elétron e o raio do átomo de hidrogênio, conhecido desde 1913 através do modelo atômico de Niels Bohr (1885-1962), nota-se que um grande elétron de raio igual a  $0,02 \text{ \AA}$ , como o estimado por Compton, era cem vezes menor do que o átomo de hidrogênio o qual era estimado ser da ordem de  $1 \text{ \AA}$ . Tratava-se de um grande elétron, sim, mas ainda menor que o próprio átomo.

Compton também utilizou o seu modelo de grande elétron para explicar a dissimetria observada entre a radiação espalhada no lado emergente<sup>8</sup> e aquela espalhada no lado incidente quando raios X relativamente moles e raios  $\gamma$  muito duros atravessavam uma fina placa. Os resultados experimentais mostravam que os raios espalhados na face emergente da placa eram mais intensos do que aqueles espalhados na face incidente [22, p. 27 (146)]. Todavia, “a radiação espalhada por raios muito duros<sup>9</sup> deveria ser, pela teoria clássica, igualmente intensa sobre as faces incidente e emergente de uma placa através da qual os raios atravessavam” (*ibid.*).

<sup>8</sup>Quando os raios X atravessam uma placa, os raios espalhados para trás são os espalhados na face incidente, e aqueles espalhados para frente são os raios espalhados na face emergente.

<sup>9</sup>Raio X duro é um termo qualitativo utilizado, quando ainda não se conhecia a natureza dos raios X, para especificar o mais penetrante tipo de radiação X, enquanto que raio X mole é usado para descrever o menos penetrante.

Tabela 1 - A estimativa do raio do grande elétron feita por Compton em 1919 para diferentes modelos de elétrons. Fonte: Ref. [10, p. 419].<sup>11</sup>

Modelo do elétron	Expressão teórica	Raio do elétron
Uma casca esférica rígida de eletricidade (incapaz de rotação)	$\frac{\sigma}{\rho} = \frac{8\pi}{3} \frac{e^4 N}{m^2 C^4} \sin^4 \left( \frac{2\pi a}{\lambda} \right) / \left( \frac{2\pi a}{\lambda} \right)^4$	$a_1 = 1.9 \times 10^{-10}$ cm $a_2 = 1.7 \times 10^{-10}$ cm
Uma casca esférica flexível de eletricidade	$\frac{\sigma}{\rho} = 2\pi N L^2 \int_0^\pi \frac{I_\theta}{I} \sin \theta d\theta$ , onde $I_\theta = I \frac{e^4 (I + \cos^2 \theta)}{2L^2 m^2 C^4} \left\{ \sin^2 \left( \frac{4\pi a}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \right) / \left( \frac{4\pi a}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \right)^2 \right\}$	$a_1 = 2.0 \times 10^{-10}$ cm $a_2 = 2.1 \times 10^{-10}$ cm
Um fino anel flexível de eletricidade	$\frac{\sigma}{\rho} = \frac{8\pi}{3} \frac{N e^4}{m^2 C^4} \left\{ I - a \left( \frac{a}{\lambda} \right)^2 + b \left( \frac{a}{\lambda} \right)^4 - c \left( \frac{a}{\lambda} \right)^6 + \dots \right\}$	$a_1 = 1.9 \times 10^{-10}$ cm $a_2 = 2.7 \times 10^{-10}$ cm

Quando se utilizava átomos pesados ou ondas de comprimentos de ondas longos, por exemplo, acontecia o fenômeno chamado de excesso de espalhamento. Conforme a predição da teoria clássica de Thomson, “a dissimetria entre a radiação espalhada emergente e a espalhada incidente era acompanhada por um acréscimo na energia espalhada total” (*ibid.*). Neste caso, o espalhamento total seria a resultante do espalhamento da radiação incidente por elétrons independentes. E, considerando-os como uma carga quase pontual de eletricidade, eles estariam tão intimamente agrupados que os raios espalhados pelos diferentes elétrons possuíam a mesma fase, portanto, ter-se-ia uma interferência construtiva que culminaria em um acréscimo na energia total espalhada [22, p. 27-28 (146-147)].

Compton afirmou, entretanto, que esta explicação não poderia ser estendida para o espalhamento de raios muito duros. De um lado, quando os comprimentos de onda da radiação incidente tornavam-se muito curtos, a fórmula de Thomson indicava que os elétrons foram espalhados independentemente e isto deveria continuar para todos os comprimentos de onda. Por outro lado, o excesso de espalhamento resultava em um aumento na intensidade do espalhamento total, porém, Barkla havia observado um decréscimo. Compton afirmou que a dissimetria observada “não [seria] devido a grupos de elétrons nos átomos, mas, a alguma propriedade dos elétrons individuais” [22, p. 28 (147)]. Compton explicou, então, o fenômeno da dissimetria tendo como base o grande elétron, como segue:

Referindo-se novamente a Fig. 1, é óbvio que se o diâmetro do elétron é comparável com o comprimento de onda da radiação, haverá uma apreciável diferença de fase en-

tre os raios espalhados nas diferentes partes do elétron. *Essa diferença de fase é maior para os raios espalhados em grandes ângulos do que para aqueles em pequenos, a intensidade da radiação incidente será no caso precedente mais fortemente reduzida.* Para explicar esse fenômeno não é suficiente, contudo, meramente assumir que o elétron é relativamente grande. Por exemplo, a hipótese do elétron como uma casca esférica rígida, incapaz de rotação, embora resulte em uma redução do espalhamento total, daria origem ao espalhamento simétrico sobre as faces incidente e emergente de uma placa. *Para explicar a dissimetria observada, deve ser feita a suposição de que a onda eletromagnética incidente é capaz de movimentar as diferentes partes do elétron relativamente umas às outras* [22, p. 28-29 (147-148), grifos nossos].

No final de 1919, após comparar os diferentes modelos de elétrons com os resultados experimentais, Compton estava defendendo um grande elétron, *anelar*,<sup>12</sup> de raio igual a aproximadamente  $2 \times 10^{-10}$  cm, capaz de realizar movimentos de rotação e translação. Neste mesmo ano, ele também modificou a fórmula da lei de absorção total de modo que ela dependesse do tamanho e da forma do elétron.

## 5. O grande elétron: os limites de uma hipótese promissora

Apesar das críticas ao seu modelo, inicialmente relacionadas à incerteza do valor do comprimento de onda

<sup>11</sup>Nessas expressões,  $a_1$  representa o valor encontrado para o raio do elétron a partir dos resultados experimentais de Ishino para o alumínio e,  $a_2$ , o raio do elétron determinado através dos dados observados por Hull e Rice para o alumínio;  $\sigma/\rho$  representa o coeficiente de espalhamento,  $N$  é o número de elétrons em unidade de massa da substância,  $e$  refere-se à carga do elétron e  $m$  a sua massa;  $C$  é a velocidade da luz,  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação incidente,  $I_\theta$  representa a intensidade do feixe espalhado pelo elétron em um ângulo  $\theta$  e,  $I$ , a intensidade do feixe incidente [10, p. 419].

<sup>12</sup>Este modelo de elétron anelar foi inspirado na teoria proposta pelo químico norte-americano A.L. Parson em 1915 quando ele tentara explicar as séries espectrais previstas pelo modelo atômico de Bohr.

<sup>13</sup>Para obter a estimativa do raio do seu grande elétron, Compton precisava utilizar o comprimento de onda dos raios  $\gamma$  nas equações propostas por ele. Todavia, este valor era incerto em torno de 1919. Na sua primeira estimativa, Compton utilizou o valor inicialmente encontrado por E. Rutherford e E.N.C. Andrade em 1914. Após três anos, Rutherford realizou outras medições e encontrou um valor diferente para o mesmo. Compton foi, então, criticado por ele ter utilizado somente a primeira estimativa. Até mesmo H.S. Allen, que

dos raios  $\gamma$ ,<sup>13</sup> Compton não desistiu do seu modelo de grande elétron tão rapidamente. Na verdade, ele somente começara a duvidar da validade do seu modelo em 1922, às vésperas da sua explicação quântica para o efeito que ele tentara deduzir classicamente com o modelo do grande elétron.

Esta mudança de abordagem foi fruto do programa de pesquisa desenvolvido por Compton no laboratório Cavendish durante 1919 e 1920, e na Universidade de Washington em Saint Louis entre 1920 e 1921. Nestas duas instituições, Compton pôde engajar-se, de fato, em um programa de pesquisa mais experimental [5, p. 128]. Durante estes dois períodos, a pesquisa de Compton passou por diversos estágios e diferentes abordagens teóricas.<sup>14</sup> Por exemplo, após a realização de experimentos no laboratório Cavendish, Compton estava defendendo a existência de um novo tipo de radiação fluorescente e um novo modelo de grande elétron, desta vez, esférico. Já na Universidade de Washington, Compton descobriu a reflexão interna total dos raios X, além de passar a utilizar uma abordagem semi-clássica para explicar a mudança observada no comprimento de onda da radiação de alta frequência. Nesta abordagem, Compton considerava a radiação como uma onda eletromagnética, mas quantizava a energia cinética dos fotoelétrons.

Após a publicação de um relatório para a *National Research Council* em outubro de 1922, Compton mostrou-se estar em dúvida quanto à potencialidade do seu modelo de grande elétron na explicação do espalhamento dos raios X e  $\gamma$  pela matéria. Neste relatório, ele comparou os seus resultados experimentais obtidos no laboratório Cavendish e na Universidade de Washington com a sua hipótese de um elétron relativamente grande, conforme gráfico a seguir. Neste gráfico (Fig. 2), as curvas sólidas foram traçadas para estes três modelos de elétron: (a) um elétron tipo casca esférica, (b) um elétron anelar, e (c) um elétron esférico sólido, e as curvas tracejadas referem-se aos resultados experimentais [5, p. 194-195].

Após a análise daquele gráfico, Compton destacou que “a concordância [entre os dados experimentais e os valores teóricos] não era perfeita”, e concluiu que “[...] se aquela discrepância fosse real, não pareceria possível reconciliar os resultados [experimentais] com a eletrodinâmica clássica” [25, p. 10 (330), grifo nosso]. Já que nenhum modelo de elétron baseado nas teorias clássicas era capaz de explicar todos os resultados experimentais disponíveis. Para se obter uma total concordância entre eles, a partir de um modelo de grande elétron, Compton teria que considerar que o tamanho do elétron aumentaria conforme a variação do comprimento de onda da radiação incidente. Compton sabia, todavia, que esta

era o mais crédulo defensor do modelo de elétron anelar, criticou a estimativa do raio do elétron proposto por Compton. De acordo com Allen, enquanto Compton considerava um elétron na forma de anel, cujo raio fora estimado ser  $2.3 \times 10^{-10}$  cm, as medições recentes de Rutherford haviam mostrado que esse valor deveria ser reduzido para aproximadamente  $1/10$  daquele valor indicado [5, p. 124].

<sup>14</sup>Para uma história mais detalhada deste período, ver as Refs. [5] e [23].

era uma conjectura difícil de defender através de uma explicação física sobre aquela variação de tamanho [5, p. 196; 7, p. 234-235].

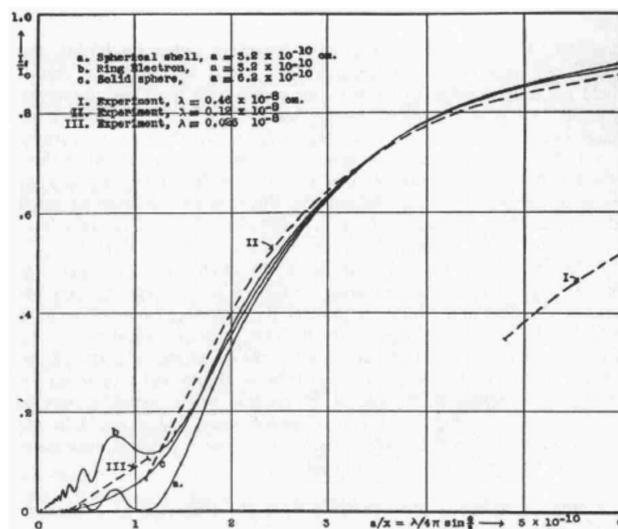


Figura 2 - Gráfico traçado por Compton, em 1922, para comparar os dados experimentais, as curvas pontilhadas, com os dados teóricos fornecidos pelos três diferentes modelos de grande elétron. Fonte: Ref. [25, p. 10 (330)].

## 6. Considerações finais

A explicação quântica do efeito Compton foi o resultado de cinco anos de investigação teórica e experimental baseada nas teorias clássicas. A hipótese do grande elétron revela-nos o *background* científico que a precedeu, o interesse e a motivação de Compton à época e, sobretudo, o seu compromisso com as teorias clássicas. Como uma das mais importantes fortunas de Compton lhe rendera o Nobel de Física, a sua imagem está sempre associada com a construção da teoria quântica. Contudo, a sua biografia científica evidenciam-nos um personagem que estava inserido em um programa de pesquisa bem definido, estudo da radiação de alta frequência, cujos problemas eram independentes daqueles enfrentados pela velha teoria quântica.

O fato de Compton ter criticado a teoria clássica de Thomson na sua explicação do processo de espalhamento não pode ser visto como uma crítica à base das teorias clássicas, mas, sim, ao modelo de elétron utilizado por Thomson. Para Compton, o tamanho e a forma do elétron eram essenciais para uma teoria clássica dos raios X e  $\gamma$  coerente com os resultados experimentais. Durante os anos que antecederam o efeito Compton, quântico, o nosso personagem defendeu um elétron cujo tamanho era comparável em magnitude com o comprimento de onda da radiação incidente, o

qual era completamente antagônico ao elétron pontual carregado negativamente proposto por Thomson.

Esta hipótese do grande elétron de Compton, segundo o historiador Stuewer, é tão radical quanto a hipótese do *quantum* de luz proposto por Albert Einstein em 1905 [5, p. 99]. Em uma conferência dedicada à discussão do seu modelo na *Cambridge Physical Society*, Rutherford iniciou a conferência dizendo “Este é o Dr. Compton dos Estados Unidos que está aqui conosco para discutir o seu trabalho sobre ‘O Tamanho do Elétron’. Eu espero que vocês o ouçam atentamente. Contudo, *vocês não devem acreditar nele*” [ibid., p. 136, *grifo nosso*]. Esta é uma citação que demonstra a forma pela qual o seu modelo de grande elétron foi recebido pelos renomados físicos da época.

Refletindo sobre este episódio histórico e o ensino de física, percebe-se que as discussões sobre as “teorias ditas radicais” não têm tido espaço na sala de aula de ciências por diversas razões já discutidas pela área de ensino de ciências. Não obstante, gostaríamos de reiterar a importância destas abordagens em sala de aula, seja para a aprendizagem de conceitos físicos, ou seja para a compreensão da dinâmica da atividade científica e da natureza da ciência. O ensino do estágio anterior à descoberta do efeito Compton poderia, portanto, contribuir para uma alfabetização científica mais voltada para aqueles aspectos.

## Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer as bolsas concedidas pelo *American Institute of Physics* e pelo *Department of Special Collections* da *Washington University* para a consulta dos arquivos pessoais de Arthur Holly Compton depositados naquelas instituições durante janeiro e fevereiro de 2010. Também agradecemos o apoio financeiro dado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Ensino Superior (CAPES), através da bolsa de mestrado, para a realização desta pesquisa.

## Referências

- [1] S.K. Allison, *Science* **138**, 794 (1962).
- [2] J.M.S. Ron, *El Poder de la Ciencia – Historia Social, Política y Económica de La Ciencia (Siglos XIX y XX)* (Crítica, Barcelona, 2007).
- [3] M. Paty, *A Física do Século XX* (Ideias e Letras, São Paulo, 2008).
- [4] H. Kragh, *Quantum Generations: A History of Physics in the Twentieth Century* (Princeton University Press, Princeton, 1999).
- [5] R.H. Stuewer, *The Compton Effect: Turning Point in Physics* (Science History Publications, New York, 1975).
- [6] J.L. Heilbron, *X Rays* (The Oxford Companion to the History of Modern Science, Oxford University Press, New York, 2003).
- [7] M. Taketani and M. Nagasaki, *The Way to Quantum Mechanics* (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, New Jersey, 2001).
- [8] Arthur H. Compton, *Biography*. Disponível em <http://nobelprize.org/nobelprizes/physics/laureates/1927/compton-bio.html>. Acesso em 5/4/2011.
- [9] Arthur Holly Compton, *Personal Papers. Series 04: Chronological Aids and Biographical Data. Box 07: Biographical Sketches I 1939-1957* (University Archives, Department of Special Collections, Washington University Libraries, Saint Louis).
- [10] I.L. Silva, O. Freire Jr. e A.P.B. da Silva, in: *Teoria Quântica: Estudos Históricos e Implicações Culturais*, editado por O. Freire Jr, O. Pessoa Jr e J.L. Bromberg (EDUEPB e Livraria da Física, Campina Grande e São Paulo, 2010), p. 411-422.
- [11] R.S. Shankland, in: *Dicionário de Biografias Científicas*, organizado por C.C. Gillispie (Contraponto, Rio de Janeiro, 2007), p. 510-516.
- [12] M. De Maria e A. Russo, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* **19**, 211 (1989).
- [13] M. De Maria, M. G. Ianniello, e A. Russo, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* **22**, 165 (1991).
- [14] Arthur Holly Compton, *Personal Papers. Series 03: Personal Correspondence* (University Archives, Department of Special Collections, Washington University Libraries, Saint Louis).
- [15] I.L. Silva e O. Freire Jr., in *Anais do Meeting of the Americas*, Foz do Iguaçu, 2010. Disponível em: <http://www.agu.org/meetings/ja10/program/index.php>.
- [16] I.L. Silva e O. Freire Jr., in *Anais do 12º Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia & 7º Congresso Latino-Americano de História da Ciência e da Tecnologia*, Salvador, 2010, p. 79.
- [17] B.R. Wheaton, *The Tiger and the Shark. Empirical Roots of Wave-Particles Dualism* (Cambridge University Press, London, 1983).
- [18] J. Mehra and H. Reichenberg, *The Historical Development of Quantum Theory – The Quantum Theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: Its Foundations and the Rise of Its Difficulties 1900-1925* (Springer, New York, 1982), v. 1, Parte 2.
- [19] A.H. Compton, *Physical Review* **6**, 377 (1915).
- [20] A.H. Compton, *Physical Review* **7**, 341 (1916).
- [21] A.H. Compton, *Physical Review* **11**, 330 (1918).
- [22] A.H. Compton, *Physical Review* **14**, 20 (1919).
- [23] I.L. Silva, *Do Grande Elétron aos Quanta de Luz: Arthur Holly Compton e a Física dos Raios X e  $\gamma$* . Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia e Universidade Estadual de Feira de Santana, 2009.
- [24] A.H. Compton, *Bulletin of the National Research Council* **4**, 1(1922b). Reimpresso em *Scientific Papers of Arthur Holly Compton: X-Ray and Other Studies*, edited by R.S. Shankland (The University of Chicago Press, Chicago, 1973), p. 321-377.
- [25] A.V. Barraco, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **10**, 116 (1988).
- [26] R.H. Stuewer, *Annalen der Physik* **9**, 975 (2000).