

EFEITO COMPTON E CAMPOS VIRTUAIS (1921-25)

1. A Filosofia Natural

No verão de 1922, Niels Bohr foi convidado para uma série de palestras na Universidade de Göttingen, situada no centro da Alemanha. Na plateia deste “Festival Bohr” estavam dois jovens alunos de Sommerfeld, em Munique. Wolfgang Pauli já havia terminado seu doutorado e trabalhava como assistente de Max Born em Göttingen. Werner Heisenberg, um “jovem aluno loiro, quase parecendo um colegial”, veio com seu orientador de Munique. Os dois jovens ficaram marcados pelo físico dinamarquês, “cheio de excitação juvenil, mas um pouco constrangido e tímido, com sua cabeça pendendo levemente para um lado”. A certa altura Bohr se referiu positivamente a um cálculo teórico de seu colaborador holandês Hendrik Kramers, trabalho este que Heisenberg já havia estudado e do qual discordava. Na discussão que se seguiu, este colocou sua objeção, e após a reunião Bohr o convidou para um passeio nas cercanias.²⁵

“Aquela discussão, que nos levou de um lado para outro nos bosques montanhosos de Hainberg, foi a primeira discussão meticulosa que eu me lembro sobre os problemas físicos e filosóficos fundamentais da moderna teoria atômica, e ela certamente teve uma influência decisiva na minha carreira posterior. Pela primeira vez eu compreendi que a visão de Bohr a respeito de sua teoria era muito mais cética do que a de muitos outros físicos da época – por exemplo, Sommerfeld –, e que seu discernimento sobre a estrutura da teoria não era resultado de uma análise matemática das suposições básicas, mas de uma ocupação intensa com o fenômeno atual, de maneira que era possível para ele perceber intuitivamente o relacionamento ao invés de derivá-lo formalmente.²⁶

“Então eu compreendi: conhecimento sobre a natureza era obtido primordialmente dessa maneira, e apenas como um passo seguinte pode alguém conseguir fixar seu conhecimento em forma matemática e sujeitá-lo a uma análise racional completa. Bohr era em primeiro lugar um filósofo, não um físico, mas ele compreendeu que a filosofia natural em nossa época tem importância apenas se cada um de seus detalhes puder se sujeitar ao teste inexorável da experiência.”

2. Modelo do Cerne Magnético

Entre 1921-23, Alfred Landé e Sommerfeld desenvolveram um modelo para tratar de átomos de muitos elétrons, conhecido como modelo do “cerne magnético” (*magnetic core model*). O cerne consistia do núcleo e dos elétrons internos (não ópticos), que como um todo possui um momento angular de s unidades de $h/2\pi = \hbar$, e um correspondente momento magnético. Assim, o elétron óptico fica sujeito a um campo magnético, que produz um efeito Zeeman interno.

Heisenberg (1922) trabalhou neste modelo enquanto era aluno de Sommerfeld. “Abandonando qualquer descrição detalhada das órbitas eletrônicas conforme exigido pela teoria, Heisenberg restringiu a descrição do átomo essencialmente àquela dada pelos números

²⁵ Citações obtidas de Friedrich Hund, in FRENCH, A.P. & KENNEDY, P.J. (orgs.) (1985), *Niels Bohr: A Centenary Volume*, Harvard U. Press, Cambridge, pp. 71-72.

²⁶ Heisenberg, in VAN DER WAERDEN (1967), “Introduction”, in op. cit. (nota 26), pp. 1-59; citação das pp. 21-22.

quânticos”.²⁷ Introduziu números quânticos meio-inteiros, conseguindo um certo sucesso, abordagem esta desenvolvida por Landé.

3. O Efeito Compton

A estagnação da pesquisa na teoria quântica foi chacoalhada pela descoberta feita em 1923 por Arthur Holly Compton, em Saint Louis, no interior dos Estados Unidos, de que o raio X, em certos experimentos, se comporta como uma partícula de momento h/λ . Compton iniciou suas pesquisas experimentais em 1916, com difração de raios X. Sabia-se que ao incidir ondas de raios X em uma amostra, raios X “secundários” eram emitidos com comprimento-de-onda maior, sendo que o valor deste comprimento-de-onda dependia do ângulo θ em que se detectava a radiação secundária. Explicações teóricas para esses dados envolviam a teoria de espalhamento de J.J. Thomson (1906), a hipótese de fluorescência e o efeito Doppler. Um experimento dos britânicos Charles Barkla & Margaret White (1917), de espalhamento do raio X (de 0,1 Ångström) em folhas metálicas finas, o fez desenvolver um modelo do elétron (sujeito ao espalhamento Thomson) como sendo uma casca esférica de raio 0,02 Å. Esse modelo do “grande elétron” foi abandonado após críticas que recebeu de Rutherford, em sua estada de um ano em Cambridge (1919-20).²⁸

De volta aos Estados Unidos, Compton trouxe consigo um espectrômetro de Bragg, que podia ser usado tanto para analisar um espectro de raio X quanto para produzir feixes de raio X monocromáticos. Concluiu que os raios X espalhados têm um comprimento-de-onda maior, mas tal resultado não era consistente com dados de outros cientistas, o que o fez aprimorar seus experimentos. Em dezembro de 1921 obteve resultados preliminares com a montagem que lhe renderia o Prêmio Nobel. Gerou um raio X da linha K_α do molibdênio, que espalhou em grafite ou pirex, analisando o espalhamento a 90° . O pico da radiação secundária (espalhada) exibia um pequeno deslocamento para comprimentos-de-onda maior. Em outubro de 1922 anunciou que a razão entre esses comprimentos-de-onda é de 0,969, o que tentou explicar em termos de fluorescência e efeito Doppler.

Um mês depois, percebeu que uma análise desses dados em termos de conservação de momento era muito mais satisfatória. Para isso, supôs que os fótons de raio X carregavam momento linear $p = h/\lambda = h\nu/c$ (hipótese desenvolvida por Stark, 1909, e Einstein, 1909, 1916), e utilizando as leis de conservação de energia e momento para o choque elástico entre fóton e elétron (inicialmente em repouso, com massa m_0) (Fig. V.1), Compton obteve uma expressão para a diferença $\Delta\lambda$ entre os comprimentos-de-onda dos raios X incidentes e espalhados (percebendo que a razão entre os comprimentos-de-onda é irrelevante), cuja dependência angular é dada por:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos \theta) \quad (\text{V.1})$$

O seu experimento correspondia a $\theta = 90^\circ$, levando então a $\Delta\lambda = h/m_0c = 0,024 \text{ \AA}$, bastante próximo do resultado experimental $\Delta\lambda = 0,022 \text{ \AA}$ (Fig. V.2). Seu resultado foi

²⁷ HENDRY, J. (1984), *The Creation of Quantum Mechanics and the Bohr-Pauli Dialogue*, Reidel, Dordrecht, p. 39.

²⁸ STUEWER, R.H. (2000), “The Compton effect: transition to quantum mechanics”, *Annalen der Physik (Leipzig)* 9: 975-89. SILVA, Indianara; FREIRE JR., O. & BISPO DA SILVA, Ana Paula (2011), “O modelo do grande elétron > o background clássico do efeito Compton”, *Revista Brasileira de Ensino de Física* 33: 4601-1 a 7. SILVA, I. & FREIRE JR., O. (2014), “A descoberta do efeito Compton: de uma abordagem semiclassical a uma abordagem quântica”, *Revista Brasileira de Ensino de Física* 36: 1601-1 a 14. O artigo original é COMPTON, A.H. (1923), “A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements”, *Physical Review* 24: 483-502.

anunciado em evento em novembro de 1922, o artigo enviado em dezembro, e a publicação ocorreu em maio de 1923.

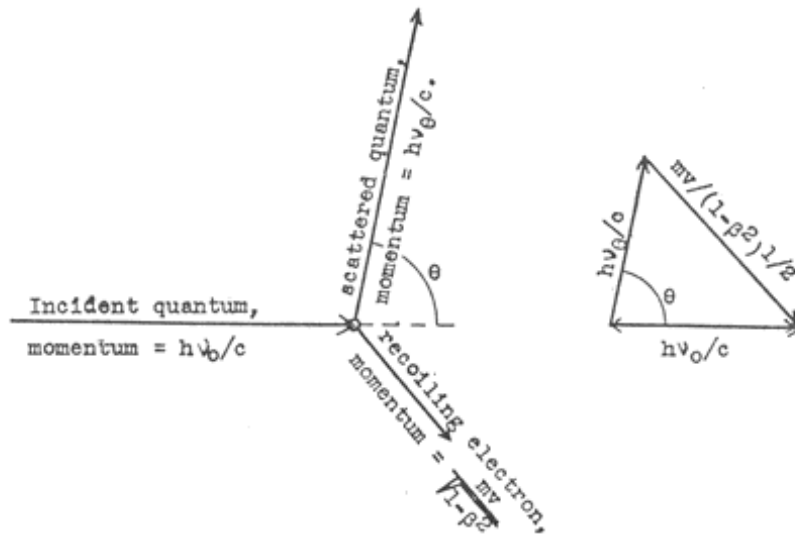


Figura V.1. Diagrama vetorial de conservação de momento publicado por COMPTON (1923), p. 486. Reproduzido por STUEWER (2000), p.985.

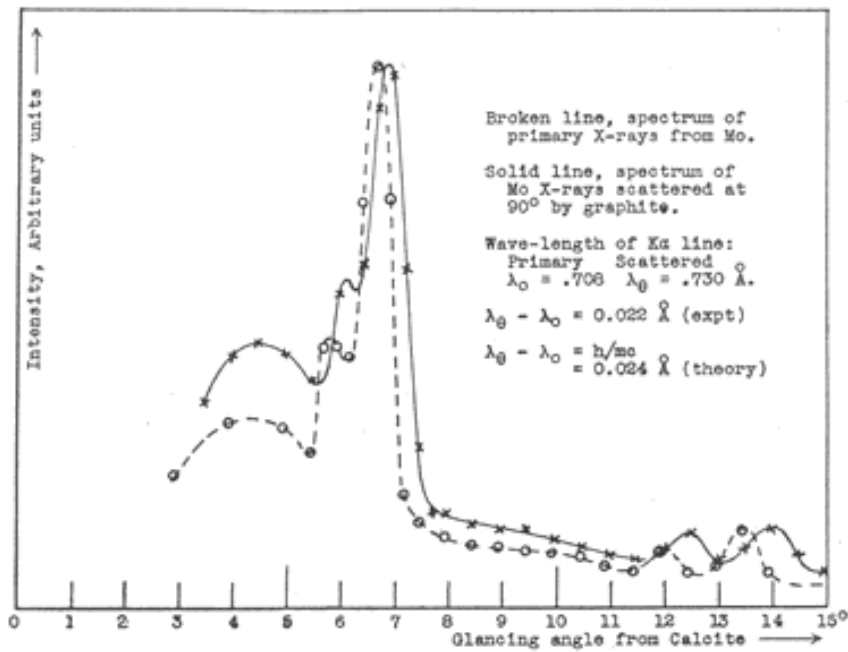


Figura V.2. A abscissa marca ângulo de incidência rasante Φ na calcita, que corresponde ao comprimento-de-onda através da equação de Bragg, $\lambda = 2d \sin \Phi$, onde $d = 3,028$ Å para a calcita. A diferença experimental entre os picos é $\Delta\lambda_{EXP.} = 0,22$ Å, ao passo que a expressão teórica para o espalhamento de Compton (eq. V.1) a 90° fornece $\Delta\lambda_{TEO.} = h/m_0c = 0,024$ Å. A radiação primária, marcada em pontilhado, é bem mais inte e valores absolutos do que a radiação secundária, em linha sólida. Figura publicada por COMPTON (1923), p. 495, e reproduzido por STUEWER (2000), p. 985.

É interessante que Compton não foi influenciado diretamente pelos artigos de Einstein, tendo aprendido sobre a teoria dos quanta em sua estada em Cambridge e com seu colega G.E.M. Jauncey.²⁹ Por outro lado, a teoria do espalhamento Compton foi publicado independentemente por Peter Debye, em março de 1923, um mês antes de Compton, seguindo as ideias de Einstein, mas sem comprovação experimental. Kramers também teria desenvolvido a teoria em 1921 (STUEWER, 2000, p. 986).

No entanto, tal resultado poderia ser também explicado considerando-se que as leis de conservação seriam leis meramente estatísticas, como veremos a seguir.

4. Osciladores Virtuais

Uma aplicação do princípio da correspondência que iria se tornar importante no desenvolvimento da mecânica quântica (MQ) se deu no contexto da “teoria da dispersão”. O índice de refração de um meio exprime como o comportamento de um raio de luz se altera no meio. No eletromagnetismo clássico, o índice de refração era calculado supondo-se que as cargas do meio seriam forçadas a oscilar na presença de uma onda luminosa, oscilação essa que geraria por sua vez uma onda eletromagnética a ser somada à original. O cálculo desta onda gerada a partir do oscilador “harmônico” (linear) fornece o índice de refração, que irá depender dentre outras coisas da frequência ν da luz incidente (donde se origina a “dispersão” da luz branca em um prisma) e da frequência própria ν_i do oscilador i .

Em 1921, o físico alemão Rudolf Ladenburg aplicou o princípio da correspondência para equacionar o coeficiente de absorção, obtido a partir da teoria clássica da dispersão, com a probabilidade de transição entre dois níveis atômicos, obtida por Einstein (1916) em sua derivação da fórmula de radiação de Planck para o átomo de Bohr (seção IV.1). Com isso, Ladenburg implicitamente “substituiu o átomo, no que tange a sua interação com o campo de radiação, por um conjunto de osciladores harmônicos com frequências iguais às frequências de absorção ν_i do átomo” (VAN DER WAERDEN, 1967, p. 11). Bohr os chamaria em 1922 de “osciladores harmônicos virtuais”.

5. Campo Virtual de Radiação

Influenciado pela dualidade onda-partícula implicada pelo resultado de Compton, o jovem estadunidense John Slater desenvolveu a influente ideia de um *campo virtual de radiação* emitido pelos osciladores virtuais. A hipótese de Slater foi uma elaboração de uma ideia sugerida por várias pessoas após a descoberta do efeito Compton, e talvez uma influência indireta por parte de Louis de Broglie tenha existido (ver HENDRY, 1984, pp. 53-54). Segundo esta ideia, o campo eletromagnético não carregaria uma distribuição contínua de energia, mas de alguma maneira guiaria os fótons (Slater 1975, in FRENCH & KENNEDY, 1985, p. 160).

Inicialmente, Slater concebia que o campo virtual determinava probabilidades de localização do fóton. “Eu havia ido a Copenhague com a ideia de que os osciladores seriam usados para determinar o comportamento de fótons, que eu preferia considerar como entidades reais, satisfazendo conservação como hoje sabemos que eles fazem, e eu desejava introduzir uma probabilidade apenas na medida em que as ondas determinam a probabilidade de o fóton estar em um dado lugar em um dado tempo” (Slater 1964, carta para VAN DER WAERDEN, 1967, p. 13).

²⁹ Isso foi apontado pelo historiador John Jenkin, e aceito por Stuewer; ver SILVA & FREIRE (2014), p. 10.

Estando com uma bolsa de estudos para trabalhar com Bohr e Kramers, Slater apresentou sua hipótese a estes, que aceitaram a noção de campo virtual mas o convenceram a abandonar a ideia de que um quantum de radiação propagaria no espaço. Em uma carta à revista *Nature* (janeiro 1924), Slater já adotava as sugestões dos dois:

“Pode-se supor que qualquer átomo, de fato, se comunica com outros átomos todo o tempo em que ele está em um estado estacionário, por meio de um campo virtual de radiação que se origina de osciladores possuindo as frequências de transições quânticas possíveis, e cuja função é estabelecer uma conservação estatística de energia e momento, por meio da determinação das probabilidades de transições quânticas. Parte do campo que se origina do próprio átomo em questão induziria uma probabilidade para que este átomo perdesse energia espontaneamente, enquanto que radiação de fontes externas induziria probabilidades adicionais para que ele ganhe ou perca energia, de forma semelhante à sugerida por Einstein”.³⁰

6. A Teoria de BKS

Ainda em janeiro de 1924, Bohr, Kramers & Slater (BKS) escreveram “A Teoria Quântica da Radiação” (in VAN DER WAERDEN, pp. 159-76). Redigido por Bohr, o trabalho incorporou a ideia de campo virtual, atribuindo de maneira inusitada um papel fundamental à noção de “probabilidade”, que não estaria ligada à nossa ignorância a respeito do mundo.

O trabalho foi marcado pela tese de “conservação estatística de energia e momento”, mencionada na carta de Slater: as leis de conservação não se aplicariam de maneira rigorosa a interações individuais, apesar de serem válidas na média de muitas interações. Esta hipótese havia sido sugerida entre 1919-22 pelo inglês C.G. Darwin (“neto do verdadeiro Darwin”), com quem Bohr interagiu, e era uma ideia plausível já que era consistente com os dados experimentais da época (JAMMER, 1966, pp. 181-182).

Uma terceira ideia do artigo foi a rejeição da hipótese do quantum de luz, ou de uma conexão causal entre transições em átomos distantes. Kramers defendia que processos de absorção e emissão em átomos distantes, estavam relacionados apenas estatisticamente. Isso naturalmente desagradou a Einstein, que em 1905 havia introduzido a ideia do quantum de radiação. O físico dinamarquês nunca foi afeito à interpretação corpuscular, e o artigo de BKS suscitou o primeiro round do debate Bohr-Einstein (MacKinnon, in FRENCH & KENNEDY, 1985, pp. 105-6).

BKS mostraram que no limite em que o princípio da correspondência é válido, sua teoria coincidia com a teoria clássica da radiação. Segundo o historiador da ciência MAX JAMMER (1966, pp. 183-4), o trabalho de BKS foi importante por três motivos: “(1) foi o primeiro artigo de peso em física que deliberada e programaticamente renunciou aos métodos de explicação e aos princípios fundamentais da mecânica clássica; (2) evocou consequentemente muita discussão entre os físicos, dirigindo assim a atenção dos teóricos quânticos para questões relativas aos fundamentos epistemológicos da física atômica; e (3) foi o ponto de partida para a detalhada teoria da dispersão de Kramers, cuja elaboração posterior por Kramers e Heisenberg levou este à descoberta da mecânica matricial, a primeira formulação da MQ.” Com efeito, em retrospecto, a ideia de um campo virtual de radiação pode ser considerada correta, ou pelo menos fecunda (VAN DER WAERDEN, 1967, pp. 12-13).

³⁰ SLATER, J.C. (1924), “Radiation and Atoms”, *Nature* 113: 307. Citado em VAN DER WAERDEN (1967), op. cit. (nota 26), p. 12.

7. Experimentos de Coincidência

Vimos que para BKS, interações individuais poderiam violar a conservação de energia e momento. Neste caso, no efeito Compton, a direção de recuo do elétron após o choque não seria determinada pela direção de espalhamento do fóton, mas haveria uma probabilidade de recuo em qualquer direção. Essa previsão é passível de ser testada, o que segundo o filósofo da ciência Karl Popper (1934) é a característica mais importante de uma teoria científica.

Tal teste foi realizado em abril de 1925, quando Walter Bothe & Hans Geiger mostraram experimentalmente que para ângulos apropriados ocorria 1 coincidência entre o fóton espalhado e o elétron recuado para cada 11 fótons detectados. Isso seria altamente improvável caso a tese de BKS fosse correta. Este experimento é importante do ponto de vista técnico porque foi a primeira realização de um experimento de coincidência em física atômica, sem ainda utilizar circuitos eletrônicos mas empregando o registro fotográfico do sinal dos contadores a cada 10^{-3} segundos. A técnica de coincidência se tornaria essencial para *selecionar* eventos individuais e assim realizar medições quânticas.

Em setembro, Compton em parceria com Alfred Simon verificou as leis de conservação para espalhamentos individuais por meio de fotografias em uma câmara úmida de Wilson. Os raios-X não eram registrados, mas ocasionalmente a radiação secundária ionizava um átomo, que por sua vez produzia uma curta trajetória visível na câmara. Desta maneira, pôde-se observar os ângulos das partículas espalhadas.

A técnica visual associada a câmaras e emulsões pode ser contrastada às técnicas de contagem e de coincidência, ambas tendo importância na história da física de partículas, cada qual tendo vantagens neste ou naquele contexto.³¹

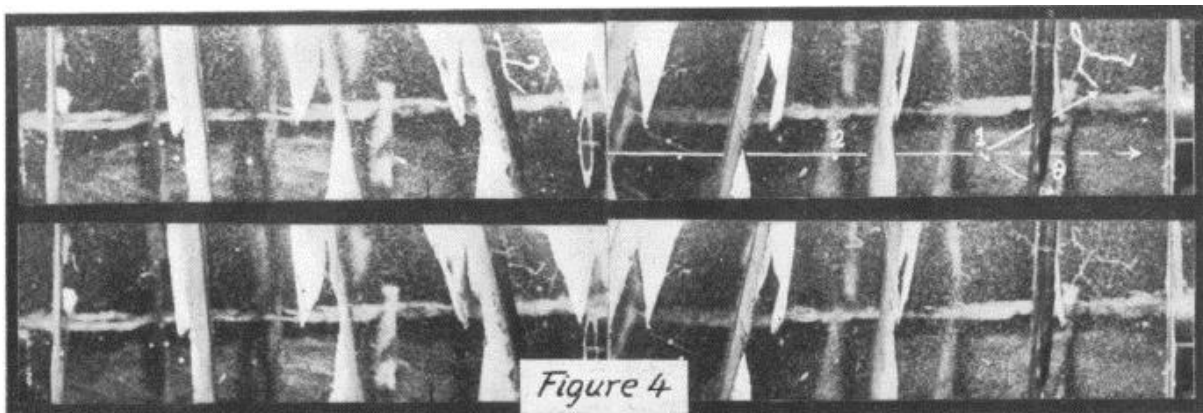


Figura V.3. Fotografia de Compton & Simon (1925), p. 294. Cada evento nesta câmara de nuvem foi fotografado em dois ângulos levemente diferentes, para a obtenção de uma imagem estereoscópica. Na parte de cima são feitas marcações nas imagens, na parte de baixo estão as imagens sem qualquer marcação. Diafragmas de folha fina de chumbo foram suspensas na câmara, na tentativa de fazer os raios X secundários ejetarem fotoelétrons. Na figura vê-se a trajetória tortuosa de um íon formado por choque com o raio X secundário, que se originou no ponto 1, de onde sai a trajetória do elétron a um ângulo θ .

³¹ Este tema é explorado por GALISON, P. (1997), *Image and logic: a material culture of microphysics*, pp. 18-20. A Fig. V.3 foi tirada de COMPTON, A.H. & SIMON, A.W. (1925), "Directed quanta of scattered X-rays", *Physical Review* 26: 289-99