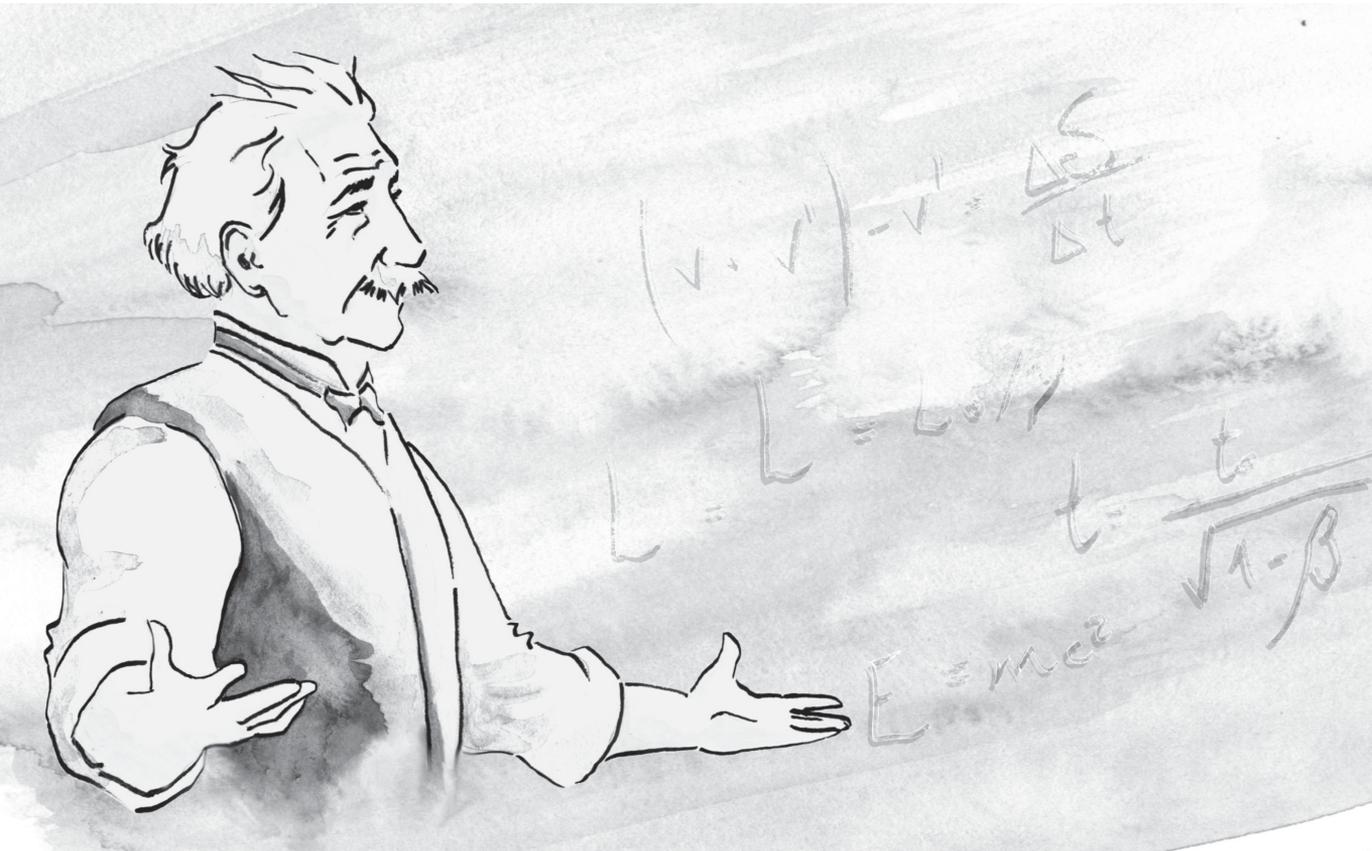


# EINSTEIN X BOHR, O FÓTON E O BRASIL



*Ildeu de Castro Moreira*

Em terras brasileiras ocorreu um dos episódios marcantes do primeiro embate científico entre dois dos físicos mais importantes do século XX:

Einstein e Bohr. Foi aqui, em 1925, que Einstein apresentou uma comunicação à Academia Brasileira de Ciências, na qual analisou sua hipótese dos quanta, para a constituição da luz, em contraposição à teoria proposta pouco tempo antes por Bohr, Kramers e Slater. A teoria desses autores contrariava as idéias de Einstein ao dispensar a idéia do quantum de luz e propor que a conservação da energia e a conservação do momento nos fenômenos atômicos tivessem um caráter apenas estatístico. A comunicação teve pouca repercussão na época, em razão de ter sido publicada em português na revista da Academia e pelo fato de verificações experimentais terem dado razão a Einstein pouco tempo depois. Esse trabalho integra uma das etapas da longa seqüência de discussões que se seguiram sobre a realidade dos fótons.

## Introdução

*Ilustração de abertura*

Marcus de Moura

- <sup>1</sup> Veja, por exemplo, Bibliography of the writings of Albert Einstein to May 1951, compilada por M. C. Shields, in SCHILPP, P. A. (org.). *Albert Einstein. Philosopher-Scientist*. Open Court Publishing, 1949; MEHRA, J. & RECHENBERG, H. *The historical development of Quantum Theory*. vol. 1, part 2. New York: Springer-Verlag, 1982; PAIS, A. *Subtle is the Lord... The science and the life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press, 1982; BALIBAR, F.; DARRIGOL, O. & JECH, B. (orgs.) *Albert Einstein. Oeuvres Choiesies*. Quanta. Paris: Éditions du Seuil/Éditions du CNRS, 1989; KLEIN, M. J. The first phase of the Bohr-Einstein dialogue, *Historical Studies in the Physical Sciences II*, 1970, 1-39; MEHRA, J. M & RECHENBERG, H. *The historical development of Quantum Theory*. v. 1, part 2. New York: Springer-Verlag, 1982.
- <sup>2</sup> A designação de fóton para o quantum de luz só viria mais tarde, em 1926, proposta por G. Lewis.
- <sup>3</sup> Outros trabalhos que trataram deste tema: MOREIRA, I. C. & TOLMASQUIM, A. T. Um manuscrito de Einstein encontrado no Brasil. *Ciência Hoje*, v. 21, n. 124, 22-29, 1995; NUSSENZVEIG, H. M. A comunicação de Einstein à ABC. In: MOREIRA, I. C. & VIDEIRA, A. A. P. (orgs.). *Einstein e o Brasil*. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 1995. p. 47-60; PATY, M. *Einstein philosophe*. La physique comme pratique philosophique. Paris: Presses Universitaires de France, 1993;

A comunicação que Einstein apresentou à Academia Brasileira de Ciência (ABC), em 1925, e que não é citada nas principais livros e bibliografias sobre ele e sua obra<sup>1</sup>, é, no entanto, interessante do ponto de vista histórico por ser o único artigo de Einstein publicado em uma revista científica no qual há uma comparação direta entre a idéia do fóton<sup>2</sup> e a teoria proposta por Bohr, Kramers e Slater (BKS) para a luz. De fato, esse trabalho pode ser visto como uma etapa a mais dentro de uma longa seqüência de discussões acirradas sobre a realidade dos fótons. Desde a proposição da idéia do quantum de luz, em 1905, Einstein foi praticamente o único físico a sustentá-la durante quase vinte anos. Entre os oponentes da idéia estava Niels Bohr. No período entre os anos 1923 e 1925, Einstein e Bohr terçaram armas pela primeira vez, de forma intensa, em torno de questões fundamentais na física – neste caso, a realidade dos quanta de luz e a validade estrita das leis de conservação da energia e do momento para processos elementares.

Enquanto Einstein estava em viagem à América do Sul, entre março e maio de 1925, experiências estavam sendo realizadas na Alemanha, por Geiger e Bothe; elas viriam refutar a suposição de Bohr e de seus colegas e fazer com que o conceito proposto por Einstein passasse a ser amplamente aceito. Experimentos na mesma direção vinham sendo feitos nos Estados Unidos por Compton e Simon. Nessa primeira fase do debate Einstein x Bohr, os resultados experimentais favoreceram as idéias de Einstein sobre a realidade dos quanta de luz. Contudo, novas etapas, e mais profundas, emergiriam nos anos seguintes. Einstein e Bohr viriam a protagonizar, a partir de 1926, o debate científico mais instigante do século XX. Em pauta, a interpretação da física quântica, as concepções físicas sobre causalidade, determinismo, probabilidade e não localização quântica, além do significado de uma descrição completa nas teorias físicas.

Neste artigo exploramos o texto e o contexto da comunicação sobre a realidade dos quanta de luz apresentada por Einstein no Brasil.<sup>3</sup>

### Einstein na Academia Brasileira de Ciências

Em sua viagem à América do Sul, no primeiro semestre de 1925, Einstein visitou a Argentina, o Uruguai e o Brasil.<sup>4</sup> Fez conferências científicas, visitou universidades e instituições de pesquisa, participou de recepções organizadas pela comunidade judaica e pela comunidade germânica,

MOREIRA, I. C. & TOLMASQUIM, A. T. Einstein in Brazil: the communication to the Brazilian Academy of Sciences on the constitution of light.. In: KRAGH, H.; VANPAEMEL, G. & MARRAGE, P. (orgs.). *History of Modern Physics*. Turnhout, Belgium: Brepols, 2002. p. 229-242.

<sup>4</sup> Para maiores informações sobre essa viagem consultar: CAFFARELLI, R. Einstein e o Brasil. *Ciência e Cultura*, v. 31, n. 12, dez. 1979; MOREIRA, I. C. & VIDEIRA, A. A. P. (orgs.) *Einstein e o Brasil*. Op. cit. MOURÃO, R. R. F. *Explicando a Teoria da Relatividade e a visita de Einstein no Brasil*. Rio de Janeiro: Ediouro, 1997; TOLMASQUIM, A. T. *Einstein – O viajante da relatividade na América do Sul*. Rio de Janeiro: Vieira & Lent, 2004.

<sup>5</sup> TOLMASQUIM, A. T. Op. cit.

realizou excursões turísticas, defendeu a paz e a conciliação mundial. Ao longo de sua viagem redigiu um diário telegráfico que foi recentemente publicado em português.<sup>5</sup>

A recepção a Einstein na ABC, no dia 7 de maio de 1925, foi o compromisso científico mais importante do cientista durante sua visita ao Rio de Janeiro. A instituição, criada em 1916 com o nome de Sociedade Brasileira de Ciências, reunia cientistas e professores com o objetivo de promover as atividades científicas no Brasil. A sessão de recepção a Einstein foi aberta por Juliano Moreira, presidente da entidade, que discorreu sobre a possível influência da relatividade em várias áreas da ciência. Einstein recebeu, em seguida, o diploma de Membro Correspondente da ABC. Francisco Lafayette, outro membro da Academia, fez um apanhado sobre os trabalhos científicos de Einstein, mencionando suas pesquisas sobre o movimento browniano, o efeito fotoelétrico e as teorias relativísticas. Em seguida, Mário Ramos estabeleceu o prêmio Albert Einstein, a ser concedido anualmente ao melhor trabalho apresentado à ABC. Por fim, Einstein fez uma comunicação científica sobre a situação da teoria da luz naquele momento, com destaque para a questão da realidade dos quanta de luz. Einstein se expressou em francês, mas o texto de sua comunicação havia sido redigido em alemão em folhas de papel timbrado do Hotel Glória onde ficara hospedado, tendo sido posteriormente traduzido por Roberto Marinho de Azevedo e publicado na nova revista da ABC. O manuscrito original foi entregue a Getúlio das Neves, do Clube de Engenharia, que presidia a comissão de recepção a Einstein. O texto foi mantido pelos familiares de Getúlio das Neves, após sua morte em 1928.

Em vez de fazer um discurso, Einstein – que criticaria a verbosidade brasileira em seu diário – preferiu apresentar à Academia uma questão científica candente naquele momento. Isso está registrado na ata da sessão:

*O professor Einstein, agradecendo às homenagens que lhe são prestadas, ao invés de um discurso, diz ele, mostra o seu reconhecimento e o seu apreço à Academia fazendo uma rápida comunicação sobre os resultados que, na Alemanha, estão sendo obtidos nos estudos realizados sobre a natureza da luz, comparando a teoria ondulatória e a dos quanta.<sup>6</sup>*

Não existe registro de perguntas feitas a Einstein referentes ao conteúdo de sua apresentação. O interesse maior despertado por suas palestras no Rio de Janeiro havia se centrado na teoria da relatividade.

<sup>6</sup> PEREIRA, F. L. R. Recepção de Einstein. *Revista da Academia Brasileira de Ciências*, n. 1, p. 77-79, abril de 1926; ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS. *Professor Albert Einstein: sua visita ao Brasil e homenagens recebidas durante sua estada no Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: Typ. Jornal do Comércio, 1925.

Einstein deixou o Brasil para retornar à Europa no dia 12 de maio de 1925. Sua visita havia influenciado positivamente a pequena comunidade científica brasileira em sua luta pela afirmação da ciência “pura” no país e tivera repercussão ampla na mídia carioca. Em particular, catalisou um interessante debate entre defensores da relatividade e oponentes a ela, estes de estrato positivista mais radical, que teve palco nos salões da ABC e que também repercutiu na mídia da época.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Ver, por exemplo: MOREIRA, I. C. & VIDEIRA, A. A. P. (orgs.) *Einstein e o Brasil*. Op. cit.

### A realidade dos fótons e a resistência dos físicos

Em seu famoso trabalho de 1905, Einstein fez uma revolucionária generalização do conceito de quantum, que havia sido introduzido por Planck, em 1900, para explicar o comportamento da radiação do corpo negro. Einstein se refere assim à sua hipótese:

*De fato, penso que as observações sobre a radiação do corpo negro, a fotoluminescência, a produção de raios catódicos pela luz ultravioleta, e outras classes de fenômenos concernentes à produção e à transformação da luz, parecem como mais compreensíveis se admitirmos que a energia da luz está distribuída de maneira descontínua no espaço. Segundo a hipótese proposta aqui, quando da propagação de um raio luminoso emitido por uma fonte pontual, a energia não está distribuída de maneira contínua sobre espaços cada vez maiores, mas é constituída de um número finito de quanta de energia localizados em pontos do espaço, cada um se deslocando sem se dividir e podendo ser absorvido ou produzido apenas em bloco.*<sup>8</sup>

<sup>8</sup> EINSTEIN, A. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, *Annalen der Physik* XVII, 132-148, 1905.

<sup>9</sup> É interessante destacar que Millikan, em seu artigo (*Phys. Rev.*, 7, 18, 1916), buscou várias outras alternativas para se chegar à equação de Einstein para o efeito fotoelétrico, justamente porque a idéia do fóton ainda não era aceita por ele. Confessaria mais tarde (*Rev. Mod. Phys.*, 21, 343, 1949): “passei dez anos da minha vida testando a equação de Einstein de 1905. Contrariando minhas expectativas, em 1915, fui compelido a validá-la sem ambigüidade, apesar de seu caráter não razoável, pois parecia violar tudo o que sabíamos sobre a interferência da luz.”

A idéia de uma estrutura granular da radiação luminosa estava em confronto direto com a teoria ondulatória da luz que vinha sendo consolidada e aceita hegemonicamente na física ao longo de um século. Por causa disso, ela sofreria uma grande resistência durante anos, incluindo aí físicos da estatura de Planck, Lorentz, Nernst e Bohr. Mesmo após a confirmação experimental da fórmula de Einstein para o efeito fotoelétrico – feita por Millikan<sup>9</sup> em 1915 – e pela qual receberia o Prêmio Nobel, a oposição ao conceito dos quanta de luz ainda se manteve forte. Não foi à toa que Einstein, numa carta a seu amigo Conrad Habicht, em maio de 1905, considerara essa idéia como muito revolucionária; aliás, essa foi a única contribuição sua à qual atribuiu este adjetivo. Em 1918, reconhecia que estava quase solitariamente defendendo a idéia do quantum de luz.

Em 1917, Einstein supôs que, nos processos elementares de emissão ou absorção, somente são emitidos (ou absorvidos) feixes de radiação direcionados e postulou a conservação de energia e do momento – que ele propôs valer  $hn/c$  ( $h$  é a constante de Planck,  $n$  a frequência da radiação e  $c$  a velocidade da luz) para um quantum de luz.<sup>10</sup> Fez também uma afirmação forte em oposição à teoria ondulatória da luz:

*Se a molécula sofrer, sem excitação externa, uma perda de energia de magnitude  $hn$  pela emissão dessa energia na forma de radiação (radiação para fora), então esse processo é também direcional. Radiação para fora, na forma de ondas esféricas, não existe. Durante o processo elementar de perda radiativa, a molécula sofre um recuo de magnitude  $hn/c$  em uma direção que é determinada apenas por “chance” segundo o status atual da teoria.*

Einstein reconhecia a fraqueza de sua teoria: “ela se situa, por um lado, no fato de que a teoria não nos possibilita chegar mais perto de uma conexão com a teoria ondulatória; por outro lado, ela deixa ao acaso a duração e a direção dos processos elementares.”

Boa parte dos físicos viu no experimento de Compton<sup>11</sup> de 1923 – quando ele descobriu que o comprimento de onda dos raios X aumentava quando eram espalhados por elétrons – e na explicação proposta por ele (um fóton se chocaria individualmente com um elétron livre e as leis de conservação se verificavam) uma evidência definitiva sobre a realidade dos fótons. Bohr, no entanto, ainda resistia fortemente à idéia e buscava outra forma de explicar os fenômenos de interação entre a radiação e a matéria. Ele esperava que se chegasse a uma generalização natural da teoria ondulatória clássica. Em seu relato ao Terceiro Congresso Solvay, escreveu que o conceito de quantum de luz “parece, por um lado, oferecer a única possibilidade de dar conta do efeito fotoelétrico, se nos limitamos à aplicabilidade irrestrita das idéias de conservação da energia e do momento. Por outro lado, ele aparentemente apresenta dificuldades insuperáveis do ponto de vista dos fenômenos de interferência ótica...”<sup>12</sup> Na sua conferência Nobel, de 1922, Bohr mantinha essa posição crítica.

Um trabalho de Slater, publicado na *Nature* no início de 1924, ofereceu oportunidade para a construção de uma teoria na direção do que Bohr propugnava. Slater desenvolveu a idéia de um “campo de radiação virtual” emitida por osciladores virtuais.<sup>13</sup> Bohr e Kramers viram nisso a possibilidade de usar o campo para induzir uma probabilidade de

<sup>10</sup> EINSTEIN, A. Zur Quantentheorie der Strahlung. *Physikalische Zeitschrift*, 18, 121-128, 1917.

<sup>11</sup> COMPTON, A. H. Wavelength measurements of scattered x-rays. *Phys. Rev.*, 21, 483-502, 1923.

<sup>12</sup> BOHR, N. L'application de la théorie des quanta aux problèmes atomiques. In: *Atomes et électrons*. Paris, 1923. p. 241-242.

<sup>13</sup> SLATER, J.C. Radiation and atoms. *Nature*, 113, 307-308, 1924.

<sup>14</sup> WAERDEN, B. L. van der. *Sources of Quantum Mechanics*. New York: Dover Publications, 1968.

<sup>15</sup> BOHR, N. ; KRAMERS, H. A. & SLATER, J. C. The quantum theory of radiation. *Philosophical Magazine*, 47, 785-802, 1924; Über die Quantentheorie der Strahlung. *Zeitschrift für Physik*, 24, 69-87, 1924.

<sup>16</sup> EINSTEIN, A. Carta a Ehrenfest (31 de maio de 1924), citada em *Albert Einstein. Oeuvres Choiesies*. Quanta. *Op. cit.*, p. 164.

<sup>17</sup> BOTHE, W. & GEIGER, H. Ein Weg zur experimentellen Nachprüfung der Theorie von Bohr, Kramers und Slater. *Zeitschrift für Physik*, 26, 44, 1924 [recebida em 7 de junho de 1924, publicada em 5 de agosto de 1924].

<sup>18</sup> BOTHE, W. & GEIGER, H. *Op. cit.*

transição e não para guiar os quanta corpusculares.<sup>14</sup> Os três escreveram então um trabalho no qual dispensavam o conceito de quantum de luz: “Apesar do grande valor heurístico dessa hipótese mostrado pela confirmação das previsões de Einstein referentes ao efeito fotoelétrico, a teoria dos quanta de luz obviamente não pode ainda ser considerada como uma solução satisfatória do problema da propagação da luz.”<sup>15</sup> Eles abandonaram qualquer tentativa de uma conexão causal entre transições em átomos distantes e a aplicação dos princípios de conservação da energia e do momento, que passavam a ter apenas um significado estatístico.

O preço a pagar era muito alto para Einstein. Ele reagiu imediatamente à teoria BKS se opondo frontalmente a ela. Em carta a Ehrenfest, observou que a idéia de abandonar a conservação da energia havia sido uma possibilidade tentada por ele antes, mas que não a considerava bem fundamentada.<sup>16</sup> Para um jornal popular alemão, expôs oito pontos críticos sobre a teoria BKS e destacou novamente a necessidade de manter leis de conservação estritas para todos os processos elementares. Em uma carta a Magnus, de novembro de 1924, Einstein descreveu sua visão sobre a polêmica: “As tentativas de Bohr, Cramers [note-se que Einstein escrevia com ‘C’] e Slater partem da teoria ondulatória, enquanto que eu me inclino a considerar os quanta luminosos como elementos reais da estrutura da radiação. Mas jamais houve uma controvérsia propriamente dita, mesmo porque nenhuma das teorias conseguiu de maneira minimamente satisfatória representar globalmente o conjunto dos fenômenos que deve ser considerado. Por outro lado, há a esperança de que a via experimental possa decidir proximamente entre as duas possibilidades teóricas descritas anteriormente. É com grande interesse que os físicos aguardam o resultado das pesquisas experimentais feitas com esse propósito por Geiger e Bothe no Instituto Físico-Técnico de Berlim.” Nessa fase, Einstein não trocou correspondência direta com Bohr a respeito de suas divergências.<sup>17</sup> Foi Pauli que, em outubro de 1924, escreveu a Bohr para informar sobre suas discussões com Einstein acerca do artigo BKS e sobre as críticas deste.

A possibilidade de construir um aparato experimental para testar as previsões da teoria BKS foi explorada, em junho de 1924, pelos físicos experimentais alemães Walther Bothe and Hans Geiger.<sup>18</sup> A teoria BKS, se aplicada ao experimento de Compton, levaria à conclusão de que o espalhamento dos raios X, que leva a uma variação no

comprimento de onda, não estaria necessariamente correlacionado com o recuo de um elétron individual. Bothe e Geiger utilizaram em seu aparato um detector de coincidência com dois contadores de ponta: um para a detecção dos raios X (fótons) espalhados e outro para registrar os elétrons de recuo. Mais ou menos na mesma época, nos Estados Unidos, Compton e Simon iniciavam um experimento, usando uma câmara de Wilson, para medir o ângulo de espalhamento dos raios X e o ângulo de recuo do elétron.

No início de 1925 havia grande expectativa sobre a questão e muitos rumores sobre os resultados dos experimentos, por causa da disputa subjacente entre os dois grandes físicos. Os resultados preliminares de Bothe e Geiger começaram a se espalhar no início de 1925. Born, em uma carta a Bohr, escrita em 15 de janeiro de 1925, já anunciava: “Estive há pouco tempo em Berlim; ali só se fala da experiência de Geiger e Bothe [...] que, aparentemente, está em favor dos quanta de luz. Einstein triunfa...”.<sup>19</sup> Em 5 de março, quando a situação permanecia ainda indefinida, Einstein deixou a Alemanha e iniciou sua viagem para a América do Sul.

### A conferência de Einstein na Academia Brasileira de Ciências

A conferência de Einstein que resultou num artigo<sup>20</sup>, constituiu-se em uma comunicação breve sobre as duas teorias em competição e sobre a possibilidade dos experimentos que vinham sendo realizados estabelecerem marcos definidores entre elas. Certamente ele não tinha a ilusão de que o problema geral do comportamento da luz estivesse resolvido a partir daí, mas via no experimento uma possibilidade real de se clarear um ponto ainda bastante controverso: a realidade dos quanta de luz.

Inicialmente Einstein, em seu estilo claro e direto, apresentou um apanhado da teoria ondulatória da luz e da nova teoria dos quanta de luz, discutindo vantagens e limitações de ambas. Deixa claro, no entanto, que até aquele momento não se conseguira uma descrição teórica que sintetizasse adequadamente o comportamento da luz:

*Até há pouco tempo atrás, acreditava-se que com a teoria ondulatória da luz, na sua forma eletromagnética, tivéssemos adquirido um conhecimento definitivo sobre a natureza da radiação. No entanto, sabemos já, desde uns vinte e cinco anos atrás, que essa teoria não permite explicar as propriedades térmicas e energéticas da radiação, embora descreva com precisão as propriedades*

<sup>19</sup> BORN, M. Carta a N. Bohr (15 de janeiro de 1925), citada em *Albert Einstein. Oeuvres Choisis*. Quanta. *Op. cit.*, p. 169.

<sup>20</sup> EINSTEIN, A. Bemerkungen zu der gegenwärtigen Lage der Theorie des Lichtes. Tradução em português: Observações sobre a situação atual da teoria da luz. *Revista da Academia Brasileira de Ciências*, 1 (1926), 1-3, 1926 reimpresso em MOREIRA, I. C. & VIDEIRA, A. A. P. (orgs.) *Einstein e o Brasil*. *Op. cit.*, p. 61-64.

*geométricas de luz (refração, difração, interferência etc). Uma nova concepção teórica, a teoria do quantum luminoso, semelhante à teoria da emissão de Newton, surgiu ao lado da teoria ondulatória da luz e adquiriu uma posição firme na ciência pelo seu poder explicativo (explicação da fórmula da radiação de Planck e dos fenômenos fotoquímicos, teoria atômica de Bohr). Não se conseguiu, até hoje, uma síntese lógica da teoria dos quanta e da teoria ondulatória, apesar de todos os esforços feitos pelos físicos. É, por essa razão, muito discutida a questão da realidade dos quanta de luz.*

No parágrafo seguinte, Einstein comenta sobre a teoria de Bohr, Kramers e Slater, publicada pouco tempo antes:

*Há pouco tempo, Bohr, juntamente com Cramers e Slater, tentou explicar teoricamente as propriedades energéticas da luz sem lançar mão da hipótese de que a radiação é constituída de quanta análogos a corpúsculos. Segundo a opinião desses pesquisadores, devemos continuar a imaginar a radiação como constituída de ondas que se propagam em todas as direções. Essas ondas, embora absorvidas pela matéria de modo contínuo, como quer a teoria ondulatória, produzem, de acordo com as leis da estatística, efeitos que são idênticos aos de átomos similares aos quanta. Tudo se passa como se a radiação fosse constituída de quanta, de energia  $h\nu$  e de momento igual a  $h\nu/c$ . Com essa concepção, esses autores abandonaram a validade exata dos teoremas da conservação da energia e do momento linear, substituindo-os por uma relação que possui apenas um valor estatístico.*

A seguir, Einstein comenta o experimento de Compton:

*Com a finalidade de verificar experimentalmente esse modo de ver, os físicos berlinenses Geiger e Bothe tentaram uma experiência interessante sobre a qual desejaria chamar a atenção dos senhores. Alguns anos atrás, Compton tirou uma conseqüência de grande importância da teoria dos quanta de luz. Quando ocorre a difusão dos raios Roentgen duros pelos elétrons constitutivos do átomo, pode acontecer que o impulso do quantum incidente seja suficientemente forte para separar o elétron do átomo. A energia necessária para isso é retirada do quantum, durante a colisão, e se manifesta, de acordo com os princípios da teoria dos quanta, na diminuição da freqüência da radiação difundida, quando comparada com a freqüência da radiação incidente constituída pelos raios Roentgen. Esse fenômeno, verificado tanto qualitativa como quantitativamente por experimentos, é conhecido sob a denominação de efeito Compton.*

Einstein discute, então, como as duas teorias explicariam o fenômeno do espalhamento dos raios X:

*Para que se possa compreender o efeito Compton pela teoria de Bohr, Cramers e Slater, é necessário conceber a difusão da radiação como um processo contínuo em que tomam parte todos os átomos da substância que difunde aquela radiação, enquanto a emissão dos elétrons tem apenas o caráter de acontecimentos isolados que obedecem a leis estatísticas. Pela teoria dos quanta de luz, também a difusão da luz possui o caráter de acontecimentos isolados, devendo sempre existir, em uma determinada direção, um elétron emitido toda vez que é produzido um efeito secundário pela radiação que incide sobre a matéria. Por essa teoria, existe, assim, uma correlação estatística entre a radiação difundida, no sentido de Compton, e a emissão de elétrons, correlação esta que não deve existir na concepção teórica dos autores citados acima.*

Einstein passa a uma descrição bastante sucinta do aparato de Bothe e Geiger:

*Para verificar o que ocorre realmente, é necessário que se utilize um aparelho capaz de constatar um único processo elementar de absorção, e de, respectivamente, registrar a emissão de um único elétron. Esse dispositivo existe numa ponta eletrizada, na qual um único elétron por ela apreendido gera, pela formação secundária de íons, uma descarga momentânea susceptível de ser medida. Com duas dessas pontas convenientemente dispostas, Geiger e Bothe conseguem responder à importante questão da existência da correlação estatística dos fenômenos secundários mencionados acima.*

Einstein finalizou sua apresentação expressando a esperança de que os experimentos que vinham sendo realizados trouxessem novas luzes ao problema: “Por ocasião de minha partida da Europa, as experiências não estavam ainda concluídas. No entanto, os resultados até agora obtidos parecem mostrar a existência daquela correlação. Se essa correlação for verificada de fato, tem-se um novo argumento de valor em favor da realidade dos quanta de luz.”

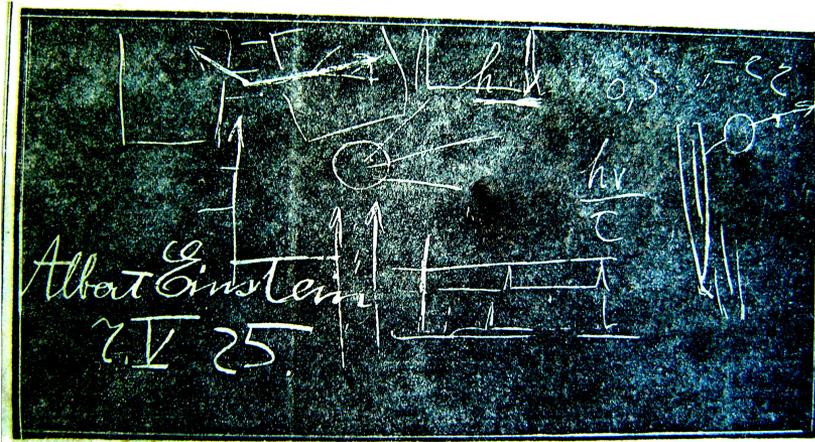
É interessante destacar que, em seu diário, Einstein registrou reflexões relativas ao comportamento da matéria e da radiação nos dias 12 e 18 de março, quando seu navio se dirigia para o Brasil. No dia 18, escreveu: “Idéia para esclarecimento da coerência da emissão de raios em diferentes direções”<sup>21</sup>. Isso mostra que a questão estava presente todo o tempo em suas reflexões ao longo da viagem. Em sua comunicação, ele não procedeu a críticas detalhadas da teoria

<sup>21</sup> TOLMASQUIM, A. T. *Einstein – O viajante da relatividade na América do Sul. Op. cit.*

BKS, como já fizera em cartas e entrevistas a jornais. Limitou-se a expor o problema geral, a citar os dois pontos de vista e a relatar os experimentos que poderiam ter um papel decisivo sobre a questão, como de fato tiveram.

Recentemente, ao organizar uma exposição sobre Roquette-Pinto, localizamos uma foto do quadro-negro que Einstein utilizou durante sua comunicação na ABC. Publicada em jornal do Rio de Janeiro em 8 de maio de

1925, traz a seguinte legenda: “Quadro negro que será conservado na Academia de Ciências, no qual Einstein traçou, durante sua comunicação, alguns esquemas demonstrando os recentes estudos feitos na Alemanha sobre a constituição da luz.” Este quadro não foi até agora localizado, se é



que ainda existe. Apesar de confuso, o que nos dá também uma idéia sobre a forma não muito organizada pela qual Einstein utilizava o quadro-negro, podemos distinguir no quadro aspectos de sua exposição. Sem maiores cuidados interpretativos, e especulando livremente, passemos a considerar alguns detalhes dele. As duas fórmulas básicas para a energia e o momento do quantum de luz ( $hn$ ,  $hn/c$ ) estão claramente visíveis. No lado esquerdo, acima, vetores parecem indicar uma colisão com espalhamento e, no meio, três traços oblíquos, com um círculo em volta, poderiam constituir uma representação esquemática do espalhamento dos quanta de luz por elétrons, no experimento de Compton. O significado de alguns eixos coordenados no lado esquerdo do quadro nos escapa. Do lado direito, pode ser inferido um esquema simplificado do aparato de Geiger e Bothe. No meio, um pouco para baixo, podem ser observados também gráficos em que estão representados picos isolados; esses possivelmente corresponderiam ao registro da detecção correlacionada de elétrons individuais e de fótons de raios X espalhados, que seriam provenientes das leituras dos dois contadores de Geiger e Bothe.

## Considerações finais

Os resultados definitivos sobre os experimentos de Bothe e Geiger foram publicados em meados de 1925. Um resultado preliminar do experimento de Bothe e Geiger foi enviado para publicação em 18 de abril de 1925 e divulgado na revista *Die Naturwissenschaften*, que saiu no dia 15 de maio.<sup>22</sup> Os resultados definitivos foram recebidos pelo *Zeitschrift für Physik* em 25 de abril de 1925 e saíram publicados em 12 de junho de 1925.<sup>23</sup> No experimento, observou-se que aproximadamente um em cada 11 quanta de luz coincidia com um elétron de recuo. Isso mostrou que as chances de essas coincidências serem acidentais eram muito pequenas, contrariando a previsão de coincidências meramente ao acaso da teoria BKS. Os autores chegaram à conclusão de que os resultados de seu experimento eram incompatíveis com a interpretação de Bohr, Kramers e Slater para o efeito Compton e que “o conceito de *quanta* de luz possuía mais realidade do que essa teoria supunha.”

Naquele momento, os resultados iniciais do experimento de Compton e Simon já haviam sido apresentados no encontro da American Physical Society em Ann Arbor, em novembro de 1924.<sup>24</sup> O artigo completo apareceu no número de 3 de março de 1925 do *Physical Review*.<sup>25</sup> Curiosamente Einstein, possivelmente por desconhecimento ou talvez por não lhe atribuir um significado maior, não mencionou o experimento de Compton e Simon em sua comunicação à ABC.

A reação de Bohr a esses experimentos não tardou e foi expressa publicamente no “Postscript” que ele adicionou a seu artigo sobre colisões atômicas.<sup>26</sup> Aceitou a prova experimental da existência de uma correlação entre processos individuais, mas expressou o ponto de vista de que a questão das propriedades ondulatórias e corpusculares da luz era mais profunda. Ponderou ainda sobre eventuais limites, nos processos atômicos, da visão de espaço-tempo normalmente usada para descrever os fenômenos naturais. Einstein, embora tivesse recebido esses resultados experimentais como uma confirmação de suas expectativas quanto às leis de conservação e a uma estrita causalidade na descrição física da natureza, sabia também que o problema do fóton estava ainda longe de uma solução. Mesmo em 1951, em uma carta a seu amigo Besso, comentava: “Os 50 anos de meditação consciente não me levaram mais próximo da resposta à questão: o que são os *quanta* de luz? Naturalmente, hoje qualquer um pensa que sabe a resposta, mas está enganando a si mesmo.”<sup>27</sup>

<sup>22</sup> BOTHE, W. & GEIGER, H. Experimentalles zur Theorie von Bohr, Kramers und Slater. *Die Naturwissenschaften*, 13, 440-441, 1925.

<sup>23</sup> BOTHE, W. & GEIGER, H. Über das Wesen des Comptoneffekts; ein experimenteller Beitrag zur Theorie der Strahlung. *Zeitschrift für Physik*, 32, 639-663, 1925.

<sup>24</sup> COMPTON, A. H. & SIMON, A. W. Measurements of K-rays excited by hard X-rays. *Physical Review*, 25, 107, 1924.

<sup>25</sup> COMPTON, A. H. & SIMON, A. W. Directed quanta of scattered X-rays. *Physical Review*, 26, 289-299, 1925.

<sup>26</sup> BOHR, N. Über die Wirkung von Atomen bei Stößen. *Zeitschrift für Physik*, 34, 142-157, 1925.

<sup>27</sup> EINSTEIN, A. Carta a M. Besso (12 de dezembro de 1951) citada em KLEIN, M. J. *Op. cit.*, p. 39.

Agradeço a Nelson Studart pelos comentários úteis e pelo interesse permanente em discutir esses temas de história da física.

Ildeu de Castro Moreira é graduado e doutor em Física e professor do Instituto de Física e da Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ildeu@if.ufrj.br