

Uma nova luz sobre o conceito de fóton: Para além de imagens esquizofrênicas (*A new light on the concept of photon: Beyond schizophrenic images*)

Indianara Silva¹

Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, Brasil

Recebido em 14/4/2015; Aceito em 25/4/2015; Publicado em 12/12/2015

Nesse artigo celebraremos o Ano Internacional da Luz contando uma história sobre o conceito de fóton ao longo do Século XX. Pode-se pensar que o conceito de fóton tornou-se bem estabelecido na física logo após a década de 1930. Contudo, destacaremos que desenvolvimentos teóricos e experimentais culminaram, após a década de 1950, na revisão do conceito canônico de fóton da velha teoria quântica. Na óptica quântica, o fóton não é mais representado pela imagem de partícula individual, mas por uma ferramenta matemática que descreve uma excitação de um estado quântico. Esse artigo dedica-se a revelar os caminhos que levaram a um conceito de fóton mais sofisticado, passando pelo efeito HBT, os estados coerentes de Glauber, e os experimentos que trouxeram à tona a natureza quântica da luz.

Palavras-chave: conceito de fóton, natureza da luz, dualidade onda-partícula, efeito HBT, estados coerentes, ótica quântica, história da física.

In this paper, we will celebrate the International Year of Light telling a history about the concept of photon in the second half of the twentieth century. One can think that the concept of photon was established in physics just after the 1930s. However, we will highlight that after the 1950s theoretical and experimental developments contributed to revisit the canonical concept of photon of the old quantum theory. In quantum optics, the photon is not represented by the schizophrenic image of individual particle, but rather by a mathematical tool that describes an excitation of a quantum state. This paper dedicates to reveal the ways that led to a sophisticated concept of the photon, passing through the HBT effect, Glauber's coherent states, and ending with the experiments that brought to the fore the quantum nature of light.

Keywords: photon, nature of light, wave-particle duality, HBT effect, coherent states, quantum optics, history of physics.

1. Introdução

O ano de 2015 foi designado o Ano Internacional da Luz pelas Nações Unidas. A ideia é trazer à tona a relevância da luz e das suas aplicações tecnológicas na sociedade moderna, propor ações para avanços globais em diferentes áreas, tais como, energia, educação, agricultura e saúde, e celebrar em 2015 as fortunas herdadas desde mil anos atrás até a era da internet. Tal movimento, também, pode ser visto como uma forma de dar visibilidade para as pesquisas na área. Como enfatizado por John Dudley, presidente do comitê organizador do IYL 2015, acrônimo para *International Year of Light*, “Um Ano Internacional da Luz é uma oportunidade extraordinária para garantir que os formuladores de políticas internacionais e as partes interessadas estejam cientes do potencial de resolução de problemas

através da tecnologia da luz. Temos agora uma oportunidade singular para aumentar a consciência global sobre isso” [1].

Celebraremos o Ano Internacional da Luz, nessa edição especial da RBEF, contando uma história acerca da evolução do conceito de fóton na segunda metade do Século XX. Tal conceito, de fato, nunca mais seria o mesmo após desenvolvimentos teóricos e experimentais daquele período, a saber, o efeito HBT, os estados coerentes de Glauber, e os experimentos que evidenciaram a natureza quântica da luz. Iniciaremos a nossa jornada histórica com uma questão mais fundamental diante de toda a promessa de uma nova área de pesquisa, a da fotônica: *qual é mesmo a natureza da luz? O que é um fóton?* Tais indagações fazem-nos lembrar de duas imagens da luz que foram alvo de discussões durante a construção da teoria quântica – a de onda e a de

¹E-mail: isilva@uefs.br.

partícula – imagens esquizofrênicas da natureza, conceitualmente contraditórias. Tais imagens podem tornar-se obstáculos para a compreensão do conceito de fóton da óptica quântica. O fóton, daí em diante, não é nem onda, e nem partícula. Mas, sim, uma excitação quantizada dos modos normais do campo eletromagnético. Uma definição que dispensa qualquer utilização de imagens, portanto.

Nesse artigo, destacaremos que o conceito canônico de fóton da velha teoria quântica perdurou na comunidade científica até a década de 1950, tornando-se um obstáculo para o entendimento de fenômenos subsequentes, e que uma nova luz sobre o conceito de fóton surgiu com o desenvolvimento de uma teoria quântica para a luz nos anos de 1960. Antes de trilharmos os caminhos que conduziram àquela reviravolta conceitual, todavia, revisitaremos na seção I o desenvolvimento do conceito de fóton da velha teoria quântica. Esse episódio já está bem documentado na literatura de história das ciências [2-16]. Na seção 2, analisaremos como o efeito HBT trouxe à tona a imagem de fóton que ainda fazia parte da mente de alguns físicos. A seção 3 será dedicada às contribuições dos estados coerentes de Glauber para uma compreensão da natureza da luz. Por fim, apresentaremos um Epílogo no qual discutiremos brevemente alguns experimentos que desempenharam um papel importante em evidenciar a natureza quântica da luz.

2. O conceito canônico de fóton da velha teoria quântica

As primeiras discussões sobre o conceito de fóton, termo cunhado em 1926, foram introduzidas pelo físico alemão Albert Einstein entre 1905 e 1917. Propôs que a radiação era composta por uma coleção de partículas indivisíveis que carregavam energia $h\nu$ e momento $h\nu/c$ em uma direção definida, e que tais grandezas seriam conservadas no processo de interação da radiação com a matéria. Nas palavras do próprio Einstein, “a energia não é continuamente distribuída sobre volumes cada vez maiores do espaço, mas consiste em um número finito de quanta de energia, localizados em pontos do espaço que se movem sem se dividir, e que poderiam apenas ser produzidos e absorvidos como unidades integrais” [17]. Tal conjectura heurística não convenceu Max Planck, Max von Laue, Wilhelm Wien e nem Arnold Sommerfeld, por exemplo. “A resistência tornou-se maior porque a ideia do *quantum* de luz parecia lançar por terra aquela parte da teoria eletromagnética que se supunha ser mais bem compreendida: a teoria do campo livre” [18]. A hipótese de Einstein colocava em questão as equações de Maxwell para os campos livres as quais constituíram toda a base do eletromagnetismo desde o final do Século XIX. A questão era paradoxal. Sabia-se que a luz era uma onda eletromagnética governada pelas equações de Maxwell e, conseqüentemente, não

fazia sentido algum considerá-la como um conjunto de partículas indivisíveis.

Em uma tentativa de refutar os quanta de luz de Einstein, o físico norte-americano Robert A. Millikan acabou confirmando experimentalmente, por ironia do destino, a equação $E = h\nu - P$ para o efeito fotoelétrico, na qual E é a energia máxima, ν , a frequência, e P , a energia para remover um elétron. Em um artigo dedicado a homenagear o septuagésimo aniversário de Einstein, Millikan expressou a sua frustração com aquele resultado: “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 irrazoável, pois parecia violar tudo o que sabíamos sobre a interferência da luz” [19]. Em outras palavras, se a radiação era formada por quanta de luz, então como explicar os fenômenos de interferência? Como enfatizado pelo historiador da ciência Abraham Pais, “de 1905 a 1923 [Einstein] foi um homem isolado, por ser o único, ou quase, a levar a sério o *quantum* de luz” [20]. Como uma ilustração desse isolamento intelectual de Einstein na sua defesa dos quanta de luz, temos o discurso do físico dinamarquês Niels Bohr durante a cerimônia do Prêmio Nobel de 1922, mesmo ano em que Einstein fora convidado para receber o seu prêmio do ano anterior, “apesar de seu valor heurístico, no entanto, a hipótese dos quanta de luz, a qual é bastante incompatível com os chamados fenômenos de interferência, não é capaz de lançar luz sobre a natureza da radiação” [21]. Bohr foi um dos críticos da hipótese dos quanta de luz, embora tenha a utilizado no seu modelo atômico. Sugeriu que os elétrons apenas absorvem ou emitem quantidades discretas de energia durante as transições de estados. A luz continuava, porém, sendo uma onda eletromagnética no espaço livre.

Um resultado experimental oriundo de pesquisas em raios X e γ contribuiria para a mudança do curso dessa história. Após uma longa trajetória científica utilizando modelos e teorias clássicas para explicar o processo de espalhamento dos raios X pela matéria, Compton decidiu finalmente empregar a hipótese dos quanta de luz no final de 1922, chegando então a formulação teórica do que viria a ser conhecido como efeito Compton, garantindo-lhe o Prêmio Nobel de Física de 1927 [22, 23]. Utilizando as leis de conservação da energia e do momento, ele explicou a diferença no comprimento de onda da radiação incidente e o da radiação secundária a partir da ideia de que a energia de um *quantum* singular era transferida para um elétron, tipo uma colisão bola de bilhar, e, como resultado, o fóton perderia uma energia $h(\nu_1 - \nu_2)$, na linguagem atual, em que h é a constante de Planck, e ν_1 , a frequência da radiação incidente, e ν_2 , a da radiação secundária após a colisão. Conforme destacado por Compton, “a notável concordância entre as nossas fórmulas e os experimentos pode deixar pouca dúvida de que o espalhamento

dos raios X é um fenômeno quântico” [24].

Aquela constatação não agradaria a Bohr. Almejando refutar definitivamente a ideia dos quanta de luz, juntou-se ao físico holandês Hendrik A. Kramers e ao norte-americano John C. Slater, e propôs em 1924 uma explicação alternativa para o espalhamento da radiação pela matéria, cuja abordagem era semiclássica – a luz continuaria sendo uma onda eletromagnética e apenas a matéria seria quantizada. Deste modo, não haveria necessidade alguma em introduzir a hipótese do *quantum* de luz no espaço livre. A teoria de Bohr, Kramers e Slater, a teoria BKS como ficou amplamente conhecida, introduziu a ideia de um campo virtual de radiação e a de que em processos atômicos a energia e o momento apenas seriam conservados estatisticamente, diferindo-se significativamente do efeito Compton através do qual tanto a energia quanto o momento seriam conservados em colisões individuais entre um elétron e um *quantum*. Na teoria BKS, os átomos emitiriam um campo virtual de radiação – análogo à radiação emitida por osciladores harmônicos virtuais – que probabilisticamente interferiria nas transições atômicas. Em síntese, a teoria BKS baseava-se na natureza ondulatória da luz e na não conservação das leis de energia e momento [25, 26].

A disputa teórica entre o efeito Compton e a teoria BKS foi resolvida experimentalmente em 1925 pelos físicos alemães Walther Bothe e Hans Geiger. A ideia do experimento era observar se os dois eventos – um *quantum* espalhado e um elétron recuado – eram simultâneos ou apenas estatisticamente relacionados. Bothe e Geiger observaram um número significativo de correlações, e concluíram que as leis de conservação eram preservadas nos processos atômicos [27]. Ainda em 1925, Compton e seu estudante Alfred W. Simon também chegaram a mesma inferência [28]. Esses resultados eram portanto uma assinatura da natureza corpuscular da luz. Com efeito, assim como apontado pela historiadora Mara Beller, “muitos físicos consideraram os experimentos como uma evidência crucial a favor da ideia corpuscular dos quanta de luz. Pauli, por exemplo, declarou que, a partir de então, os quanta eram “tão reais” quanto os elétrons materiais” [29]. Não obstante, é importante destacar que houve algum movimento na tentativa de salvar a natureza ondulatória da luz. Por exemplo, os trabalhos independentes de 1927 dos físicos alemães Erwin Schrödinger, Gregor Wentzel e Guido Beck. Enquanto Schrödinger explicou semiclasicamente o efeito Compton, Beck e Wentzel fizeram o mesmo para o efeito fotoelétrico [30-32].

Em torno daquele ano, vinte e dois anos após a inserção da hipótese dos quanta, o dilema ainda permanecia sem resposta: Como conciliar a natureza corpuscular da luz com os fenômenos de interferência? O problema da dualidade onda-partícula foi resolvido por Bohr a partir da sua definição de complementaridade. Com o intuito de manter os conceitos clássicos – favorecendo, assim, uma visualização dos fenômenos

quânticos – ele introduziu a ideia de que os conceitos de onda e partícula eram complementares para o entendimento da natureza, mas, também, excludentes. Logo, as imagens de onda e partícula nunca apareceriam simultaneamente em uma situação experimental definida. Em um experimento de interferência, por exemplo, enquanto a natureza ondulatória da luz é exibida, a corpuscular desaparece. Tal interpretação afluía sentimentos profundamente desconcertantes, como expressado por estas declarações: em 1958 Werner Heisenberg perguntava-se “como a mesma coisa pode ser uma onda e uma partícula?”, em 1969, Max Born, “como esses aspectos contraditórios estão para ser reconciliados?”, e já em 1992 Lawrence Sklar, “como isto poderia ser compreendido?” [33]. Apesar da complexidade subjacente à ideia de complementaridade, esta acabou sendo utilizada para fins didáticos e de divulgação científica. Os físicos a utilizavam usualmente em palestras para o público em geral. Os sujeitos familiarizados com o formalismo matemático da teoria quântica claramente poderiam vislumbrar a sua consistência lógica sem a necessidade de utilizar as diferentes imagens de onda e partícula. Como enfatizado por Born, “essa prova é mais direta e apenas convincente para aqueles que compreendem o formalismo matemático” [34]. Desse modo, não haveria contradição alguma se apenas a estrutura matemática da mecânica quântica fosse levada em consideração.

O que ficou então a respeito do conceito de fóton após a década de 1930? Os clássicos livros didáticos sobre teoria quântica são boas ilustrações acerca de como a comunidade científica passou a adotá-lo. Dois exemplos. Em seu livro *Atomic Physics*, Born definiu, como segue, o fóton: “de acordo com a hipótese dos quanta de luz (fótons) [...] a luz consiste de quanta (corpúsculos) de energia $h\nu$, os quais viajam através do espaço como um conjunto de balas com a velocidade da luz” [35]. Já o físico Paul Dirac, em *The Principles of Quantum Mechanics*, “os fenômenos tais como emissão fotoelétrica e espalhamento de elétrons livres [...] mostram que a luz é composta por partículas pequenas. Estas partículas, que são chamadas de fótons, têm energia e momento definidos [...] e apresentam ser tão reais quanto a existência de elétrons, ou qualquer outra partícula em física. Uma fração de fóton nunca é observada” [36]. Parece, então, que o conceito de fóton que ficou subentendido era aquele mesmo introduzido por Einstein em 1905 – partícula pequena, indivisível e localizável.

3. Depois da calmaria, a tempestade!

A discussão sobre o conceito de fóton viveu o seu momento de bela adormecida, aparentemente, entre os anos de 1930 e 1956. Ousáramos conjecturar que estes 26 anos de calmaria podem trazer à tona duas práticas distintas dos físicos diante daquele conceito. Os físicos

consciente ou inconscientemente, de um lado, adotaram a conduta do “não, não vamos tocar nesse assunto” em relação à natureza do fóton. O silêncio refletia, assim, uma forma de pragmatismo – um modo encontrado para utilizar o fóton, cujo conceito era elusivo, nas atividades de pesquisa sem preocupar-se com a sua natureza. A ênfase restringia-se ao formalismo matemático, conforme enfatizado por Born. Por outro lado, a complementaridade estava no ar – ainda que a sua assimilação e incorporação pelos físicos tenham acontecido a passos lentos – e, portanto, não haveria nenhum problema subjacente ao que um fóton é.²

O que levaria então a ruptura da calma? Em que momento as discussões acerca da natureza da luz voltaram a fazer parte da agenda dos físicos? Foi em 1956 quando a tempestade chegou e desafiou o conceito canônico de fóton da velha teoria quântica. O resultado experimental que gerou uma controvérsia foi obtido pelos cientistas britânicos Robert Hanbury Brown e Richard Quentin Twiss, enquanto estavam construindo um interferômetro de intensidade para determinar o diâmetro angular das estrelas visíveis na Jodrell Bank Experimental Station. Nem Hanbury Brown nem Twiss estavam ligados à pesquisa em fundamentos da teoria quântica ou à fronteira da física. À época, eles estavam aplicando conceitos físicos na área de radioastronomia.

Após formar-se em engenharia na University of London em 1935, Hanbury Brown assumiu um cargo de confiança para trabalhar no desenvolvimento secreto do radar pela Royal Air Force. Nos anos de 1942 e 1947, integrou o US Naval Research Laboratory contribuindo para a construção do que ficou estabelecido como sistema NATO “identification friend or foe” (IFF), utilizado até os dias atuais nas aviações civil e militar, por meio do qual é possível identificar aeronaves. Retornando à Inglaterra posteriormente ao trabalho de guerra, em 1949, Hanbury Brown começou a realizar pesquisas na University of Manchester levando à construção de um telescópio de 218ft na Jodrell Bank e à obtenção do título de Doutor em radioastronomia. Aceitou em 1963 a cátedra de astronomia na University of Sydney [38].

Twiss concluiu em 1941 a graduação com distinção em matemática na University of Cambridge, e em 1949 o doutorado no MIT trabalhando com a teoria de magnétons. Durante a Segunda Guerra Mundial, também fez parte das pesquisas sobre o radar para os militares britânicos. Após o doutorado, Twiss realizou pesquisas em geração de radiação eletromagnética, tornando-se em 1955 pesquisador na Division of Radiophysics em Sydney, Austrália [39].

Uma lição do tempo de guerra foi o quão frutífero e bem sucedido um programa de pesquisa poderia ser quando tanto teóricos e experimentais eram colocados para trabalhar em colaboração. Certamente, Hanbury

Brown aprendeu a lição. Depois de vislumbrar a técnica necessária para a construção do interferômetro de intensidade – era de fato “um engenheiro excelente e imaginativo, um astrônomo natural, um verdadeiro visionário” – Hanbury Brown precisava de um modelo teórico sofisticado [40]. Mas, segundo ele, “infelizmente não sabia matemática, suficientemente, para resolver a questão [...] Vivian [Bowden] me encontrou alguém chamado Twiss que, diferente de mim, [...] era um matemático talentoso” [41]. Foi, assim, que nasceu a colaboração entre Hanbury Brown e Twiss. Ainda que estivessem trabalhando em instituições distintas, 293 km de distância, os nossos personagens foram capazes de criar uma rede de cooperação científica através de visitas a Jodrell Bank e correspondências.

Vamos, então, ao resultado experimental que “colocou o gato entre os pombos” provocando uma acalorada controvérsia na comunidade de físicos [42]. Antes mesmo de investir financeiramente na construção do interferômetro de intensidade para mensurar o diâmetro angular das estrelas visíveis, Hanbury Brown e Twiss precisavam se certificar de que as mesmas técnicas e princípios que eles haviam aprimorados, anteriormente, na radioastronomia poderiam ser aplicados no novo interferômetro. À vista disso, decidiram realizar um teste de laboratório utilizando uma luz artificial proveniente de um arco de mercúrio de baixa intensidade que foi dividida em duas componentes por um espelho semi-transparente; em seguida, as componentes foram detectadas separadamente por dois detectores. Hanbury Brown e Twiss (HBT) observaram que o tempo de chegada dos fótons estava correlacionado. Ou seja, fótons foram detectados simultaneamente em detectores distintos. Esse resultado parecia um contrassenso. Se a fonte utilizada era de baixa intensidade, com fótons um a um chegando no espelho, e considerando a natureza corpuscular da luz, era inconcebível aceitar uma correlação entre fótons [43].

Não demorou muito tempo para surgir a primeira crítica à observação de HBT. No mesmo ano da publicação do artigo deles, 1956, o físico Eric Brannen da University of Western Ontario e seu estudante de graduação Harry I.S. Ferguson realizaram um experimento similar – a diferença mais substancial referia-se ao sistema de detecção – cujo intuito era verificar se haveria mesmo uma correlação entre fótons. “Se tal correlação existisse”, segundo Brannen e Ferguson, “exigiria uma grande revisão de alguns conceitos fundamentais da mecânica quântica”. Após a análise dos dados experimentais, Brannen e Ferguson afirmaram não ter encontrado uma correlação significativa entre fótons, menor do que 0,01% [44]. Essa constatação corroborava um resultado obtido anteriormente pelo físico húngaro Lajos Jánossy e colaboradores, os quais haviam encontrado correlações sistemáticas de aproxima-

²Em seu livro *Quantum Generations*, Helge Kragh mostra que a noção de complementaridade estava ausente nos livros didáticos de teoria quântica, por exemplo como mostra a Ref. [37].

damente 0,6%. O artigo de Jánossy e coautores de 1955 apresentava a interpretação deles acerca da definição de fóton da velha teoria quântica, a qual também refletia a de Brannen e Ferguson: se fótons eram partículas indivisíveis, após atravessarem o espelho, eles deveriam estar em um ou no outro componente do feixe [45].

Hanbury Brown lembrou anos depois, “se você insiste em pensar na luz como um fluxo de partículas independentes, como bolas de pingue-pongue, que é o que a maioria dos físicos [...] prefere fazer, então, é impossível ver como os tempos de chegada destas partículas podem estar correlacionados”. Essa era a razão pela qual o resultado HBT parecia ser “não apenas herético... mas obviamente absurdo” [46], pois desafiava o conceito canônico de fóton da velha teoria quântica.

Enquanto Brannen e Ferguson viam o resultado HBT como contrário às predições da teoria quântica, o físico norte-americano Edward Purcell – Nobel de 1952 – defendia que “o efeito Brown-Twiss, longe de requerer uma revisão da mecânica quântica, é uma ilustração instrutiva de seu princípio elementar” [47]. Na sua explicação para o que chamaria de efeito HBT, Purcell interpretou fótons como bósons e não como partículas pontuais. Mesmo após o desenvolvimento da estatística de Bose-Einstein, resultando na indistinguibilidade de partículas, a controvérsia em torno do experimento HBT evidencia a forma pela qual alguns físicos, tais como Brannen e Ferguson, ainda interpretavam fótons como entidades distinguíveis, individualmente identificáveis [48]. Outros eram mais cuidadosos, como exemplificado por Schrödinger, a imagem de partícula apenas nos conduz a querer obter mais informações sem significado, “exibindo características que são estranhas na prática real”. Claro que naquele contexto, Schrödinger estava querendo defender a sua interpretação de grupo de onda associado à partícula, uma “imagem tolerada” [49].

Para Purcell, a questão do experimento HBT era relativamente simples sendo desnecessário tamanho murmúrio. Considerando o comportamento estatístico do tipo de fonte de luz utilizada, demonstrou que o fenômeno era devido ao agrupamento de fótons – probabilidade de fótons chegarem agrupados no detector. Purcell também afirmou que se um feixe de partículas clássicas fosse empregado no experimento HBT, o número de correlações tenderia a zero. “O efeito Brown-Twiss é, assim, de um ponto de vista de partícula, um efeito quântico característico” devido à estatística de um sistema de bósons [50]. A controvérsia ilustrava, como destacado por Hanbury Brown, que “muitos físicos gostam de pensar em fótons como pequenos meninos independentes que estão relutantes em dar as mãos como todos os bósons adequados deveriam” [51].

Em uma correspondência a Purcell, Twiss declarou que na primeira versão do artigo de 1956, ele e Hanbury Brown tentaram de fato utilizar os conceitos

quânticos de agrupamento de fótons e princípio da incerteza. Mas, a interpretação baseada na imagem corpuscular da luz era efetivamente dificultosa. Foi o físico belga Léon Rosenfeld quem sugeriu uma explicação baseada na complementaridade para o experimento HBT na qual considerava-se a natureza ondulatória da luz (e não a corpuscular) e a teoria quântica para o processo de detecção. No final de sua interação com Rosenfeld, Twiss estava convencido de que era muito mais inteligível explicar os resultados experimentais por meio das flutuações do campo eletromagnético clássico do que empregar o conceito de fóton em todo o formalismo teórico [52]. Quando uma onda incide em um espelho semitransparente, por exemplo, é possível que diferentes pontos do campo eletromagnético estejam correlacionados e, portanto, podem ser detectados simultaneamente. Considerando a natureza ondulatória da luz, a correlação deixava de ser um mistério.

Na sua autobiografia Hanbury Brown recordou em 1991 que “tivemos que persuadir nossos opositores [...] que não há uma imagem mental satisfatória da luz que forneça a resposta correta para esse problema particular e que a única forma de conseguir a resposta certa era fazer matemática”. Apesar de sofrer fortes críticas da comunidade de físicos, ele reconheceu que “toda a controvérsia ensinou muitos físicos algo novo sobre a natureza da luz” [53].

Foi ilusão de Purcell achar que a controvérsia se findaria ainda em 1956. Com efeito, alastrou-se até o ano de 1958. Ao seu final, Brannen reconheceu os resultados de HBT como um fenômeno físico enfatizando que o problema era que tanto ele quanto Ferguson acham que HBT estavam considerando “a divisão de fótons individuais”, o que violaria a mecânica quântica. Brannen e Ferguson não observaram o efeito em 1956 por causa da sensibilidade do aparato experimental deles. Para observar correlações sistemáticas com as condições iniciais de cada equipamento, Hanbury Brown e Twiss afirmaram que Brannen e Ferguson precisariam de mil anos, Jánossy e colaboradores de 10^{11} anos, enquanto que HBT de cinco minutos. Mais uma evidência da astúcia técnica de Hanbury Brown. Realizando em 1957 uma versão local do experimento HBT na Harvard University, o físico norte-americano Robert V. Pound e o seu estudante Glen A. Rebka conseguiram observar o mesmo fenômeno que Hanbury Brown e Twiss [54].

A controvérsia HBT ilustra o modo pelo qual alguns físicos concebiam o conceito de fóton da velha teoria quântica – partícula pequena, indivisível e localizável, mesmo após o desenvolvimento da estatística de Bose-Einstein. A tempestade em torno do resultado experimental de HBT contribuiu para revisitar aquele conceito permitindo, assim, novas discussões sobre a natureza da luz. O efeito HBT, agrupamento de fótons, apenas é observado quando está se lidando com um número grande de fótons. Ao contrário do que se imaginava, a fonte utilizada por Hanbury Brown e Twiss não fornecia

fótons um a um. Atualmente tal efeito é empregado em diversas áreas, tais como, física de alta energia, física nuclear, física atômica, e física da matéria condensada [55].

Após a controvérsia, Hanbury Brown e Twiss finalmente conseguiram chegar ao objetivo inicial que gerou todo o debate em relação ao conceito de fóton: a construção do que é conhecido como o Narrabri Stellar Intensity Interferometer (NSII), o primeiro instrumento astronômico capaz de determinar o diâmetro angular de estrelas visíveis. Foram laureados com a Eddington Medal da Royal Astronomical Society em 1968, e com a Albert A. Michelson Medal do Franklin Institute em 1982.

4. Uma nova luz sobre o conceito de fóton

Além de suscitar um debate acerca da natureza da luz, o experimento HBT também influenciou parcialmente o desenvolvimento da óptica quântica. Como enfatizado pelo físico norte-americano Roy J. Glauber, na sua autobiografia para o Prêmio Nobel de 2005,

O final da década de 1950 provou ser um período empolgante por várias razões. Uma fonte de luz radicalmente nova, o laser, estava sendo desenvolvida e havia questões no ar referentes à estrutura quântica de seu funcionamento [...] Foi o período no qual eu comecei a trabalhar sobre óptica quântica com a conjectura de que a correlação Hanbury Brown-Twiss seria encontrada ausente em um feixe de laser estável, e, assim, seguindo-se com uma sequência de artigos mais gerais sobre estatística de fótons e o significado de coerência [56].

Atualmente Glauber é Mallinckrodt Professor da Harvard University e professor adjunto de ciências ópticas da University of Arizona. Obteve em 1946 o título de bacharel em física pela Harvard University, doutorando-se três anos depois, também na Harvard, trabalhando com teoria quântica de campos sob a supervisão de Julian Schwinger. Durante a Segunda Guerra Mundial, com apenas vinte anos, Glauber foi um dos integrantes do Projeto Manhattan debruçando-se sobre o problema da difusão de nêutrons.

Já no Departamento de Física da Harvard, Glauber foi convidado pelo físico norte-americano Saul Bergman para ser consultor da American Optical Company. O interesse de Bergman era compreender o funcionamento do experimento HBT com a luz laser. Glauber, então, colocou-se a seguinte questão: “Como os resultados de

Hanbury Brown e Twiss e o aspecto completamente coerente da luz de laser poderiam ser incorporados em uma teoria estritamente quântica?” [57]. O primeiro passo seria então construir uma teoria capaz de descrever a estrutura do feixe de luz.

Na sua construção teórica, Glauber abordou estritamente a natureza quântica da luz quantizando-a juntamente com a matéria, e descreveu o campo eletromagnético através dos operadores de criação (ligado à emissão de um fóton) e aniquilação (à absorção de um fóton) cujas propriedades eram modificar o estado do campo. Com esse novo formalismo para descrever o feixe de luz, introduziu um novo significado para a coerência e os estados coerentes. Diferentemente da óptica clássica, em que a coerência associava-se à monocromaticidade, Glauber sugeriu que para um feixe de luz ser completamente coerente deveria satisfazer um conjunto de condições para a coerência. Nesse caso, “as condições de coerência restringem-se à aleatoriedade do campo, ao invés da sua largura de banda” [58]. Também definiu os estados coerentes do campo de radiação, estados completamente coerentes e autoestados do operador aniquilação de fótons, que relacionam o número de fótons com o valor esperado mecânico-quântico da fase do campo eletromagnético [59].

Glauber então explicou o resultado HBT a partir da sua teoria quântica para a luz. O efeito HBT foi observado porque a fonte de luz utilizada, mesmo que extremamente monocromática, não possuía uma coerência de segunda ordem. Como a luz laser era coerente em todas as ordens, todavia, uma correlação sistemática de fótons não seria observada. Isto é, a detecção de um fóton em um detector seria estatisticamente independente da detecção de outro fóton no outro detector [60].³

Voltando, agora, a nossa atenção à natureza da luz. No Prefácio do livro publicado por Glauber, *Quantum Theory of Optical Coherence*, o físico norte-americano Marlan O. Scully relembrou um episódio que aconteceu em 1964 na Les Houches Summer School:

Muitos cientistas em Les Houches estavam utilizando a palavra “fóton”, mesmo quando eles estavam se referindo a um efeito cuja explicação não dependia da teoria quântica da radiação. Este mau uso da palavra “fóton” irritava [Willis] Lamb, e ele introduziu uma licença que autorizava o seu proprietário o direito de usar a palavra “fóton”. Cientistas sem uma licença não eram permitidos sequer mencionar fótons. Roy [Glauber] era um dos poucos colegas que recebeu tal licença de Lamb [61].

Eis que surgiu a questão: Que conceito de fóton Lamb estava se referindo? Que conceito de fóton emer-

³Para mais detalhes sobre a repercussão do trabalho de Glauber na comunidade científica, especialmente, a controvérsia com o físico Emil Wolf, ver a Ref. [56, p. 123].

giu do desenvolvimento teórico de Glauber? Naquele ano, Lamb não estava se referindo ao conceito canônico de fóton da velha teoria quântica, como viria a comentar sarcasticamente,

Está na hora de abandonar o uso da palavra ‘fóton’ e de um conceito ruim que brevemente terá um século de idade [...] Tratar a radiação em termos de partículas é como utilizar frases ubíquas, tais como You know ou I mean [...] Para um amigo de Charlie Brown, ele serviria como uma espécie de cobertor de segurança [62].

De fato, Lamb concedeu a Glauber o direito de usar o vocábulo “fóton” porque os estados coerentes de Glauber forneceram novos insights acerca da sua natureza conceitual. A confusão em torno do termo “fóton” parece residir no fato de que a imagem que ficou dele estava associada à de partícula individual. Uma alternativa seria talvez introduzir uma linguagem diferente, designando-o de objeto quântico, com o propósito de distinguir o fóton da imagem de partícula indivisível.

Respondendo sobre qual é a definição de um fóton na óptica quântica, Glauber disse:

Bem, é um dilema [...] O que é um fóton? É uma partícula pontual? Não. É um pacote de onda? Bem, talvez [...] Então, o que é isso? Para mim, é principalmente apenas uma excitação de um estado quântico [...] Não posso facilmente construir imagens deles, mas sei fazer matemática utilizando os operadores criação e aniquilação [63].

O conceito de fóton tem se tornado muito mais complexo e complicado do que as imagens esquizofrênicas de onda e de partícula pontual. Essa imagem, cuja apresentação é simplista, pode tornar-se um obstáculo para o entendimento do experimento HBT e os estados coerentes de Glauber. O fóton tornou-se claramente uma ferramenta matemática da qual é extremamente difícil criar uma imagem dele. Com efeito, não há uma boa imagem para um fóton, mas, sim, um sofisticado formalismo matemático que representa o conceito de fóton da óptica quântica. Comentando o legado dos avanços teóricos de Glauber na questão da natureza da luz, Scully ressaltou que “ele conectou um *quantum* de luz no campo a um click no detector” [64]. Nos experimentos de detecção, sempre que um fóton singular é absorvido, o estado do campo modifica-se para $|n - 1\rangle$ e o detector é capaz de registrá-lo

Na década de 1970 o conceito de fóton voltou a ser alvo de discussão. Scully e seu colega Murray Sargent III, por exemplo, tentaram trazer à tona “uma definição logicamente consistente da palavra ‘fóton’ – uma declaração muito mais necessária do que se possa imaginar pelos diversos usos contraditórios existentes dessa

criatura elusiva” [65]. Pode-se pensar que o conceito de fóton, após o desenvolvimento da teoria quântica na década de 1930, tornou-se uma questão resolvida na física. Isto pode ser um equívoco. De fato, os físicos ainda tentam definir ou tirar conclusões sobre a natureza de um fóton. Mesmo antes em 1961, já havia indícios da confusão em torno de seu conceito, o físico que trabalhou no Apollo Program, Carrol Alley escreveu que “não sabemos o que um fóton é” [66]. Essa frase ilustra muito bem que a conceitualização do objeto – fóton – é muito mais complicado do que parece. Scully e Sargent III destacaram um aspecto importante que permaneceu na mente dos físicos por anos: “a imagem de fuzzy-ball de um fóton sempre conduz à confusão desnecessária” [67]. Tal imagem limitou os físicos a interpretar o experimento HBT e, se continuarmos abraçando-o, pode ser complicado compreender o moderno conceito de fóton que está na raiz da teoria quântica da luz.

Diferentemente do período anterior, o debate sobre o conceito de fóton não ficou adormecido, sobrevivendo até a transição dos séculos [68]. Revisitando aquele conceito no Século XXI, Finkelstein ressaltou que os esforços não deveriam ser em busca da compreensão da natureza de um fóton, mas, sim, do que ele faz. A sugestão é “definir o que os fótons são, se ainda desejar, pelo o que eles fazem”. Ou seja, o que deveria nos interessar é o processo no qual o fóton faz parte, e não o próprio objeto em si, uma vez que “provavelmente nunca seremos capazes de visualizar um fóton” [69]. Compartilhando uma perspectiva semelhante, Muthukrishnan, Scully e Zubairy destacaram a relevância de se estudar o conceito de fóton através de experimentos reais ou de pensamento que têm contribuído para o entendimento da natureza da luz. Parafrazeando Glauber, os autores afirmam que “o fóton é o que um fotodetector detecta” [70].

Celebrando em 2005 o centenário aniversário do fóton, o renomado físico Anton Zeilinger e colaboradores mencionaram que

Desde 1905, o fóton já percorreu um longo caminho, considerando que ele foi concebido inicialmente para ser apenas um ‘artifício matemático’ ou um conceito sem qualquer significado mais profundo [...] Mas o que exatamente queremos dizer com um ‘fóton’ hoje e qual evidência experimental temos para sustentar o conceito de fóton? [71]

Os autores então discutem alguns experimentos que trouxeram à tona a natureza quântica da luz, os quais serão apresentados na seção subsequente, e destacam que a principal dificuldade no entendimento da interferência quântica é o fato de que “tendemos a materializar – considerar bastante realisticamente – conceitos como onda e partícula” [72]. O conceito de fóton da informação quântica tem as suas raízes na quantização

do campo eletromagnético, logo interpretá-lo como uma partícula individual é de valor ínfimo. Também realçam a que o conceito de fóton deveria estar associado:

Pode-se estar tentado, como estava Einstein, em considerar o fóton como sendo localizado em algum lugar conosco apenas conhecendo aquele lugar. Mas, sempre que falarmos sobre uma partícula, ou mais especificamente, um fóton, devemos apenas associá-lo ao ‘click’ a que o detector refere-se [73].

A imagem de um fóton singular como uma partícula é portanto uma limitação do seu conceito. De acordo com Muthukrishnan e coautores, “se você pensar no fóton como nada mais do que uma excitação de um *quantum* singular do modo normal apropriado, então as coisas não são tão misteriosas, e em algum sentido, óbvias intuitivamente” [74]. A questão é que há uma tendência humana em tentar criar imagens e modelos para representar as entidades [75]. Como criar uma imagem para uma excitação de um estado quântico? O conceito de fóton da óptica quântica não nos permite facilmente a criação de imagens, possibilitando-nos, diferentemente, considerá-lo uma construção lógica que representa uma excitação do estado quântico. As imagens esquizofrênicas de onda e partícula são portanto insatisfatórias na representação de um fóton para a óptica quântica.

Nos últimos tempos, o termo fóton tem apresentado um número significativo de interpretações e conotações, a título de exemplo, o modelo de partícula, de pacote de onda, de singularidade, e o da eletrodinâmica quântica [76]. Tais ambiguidades acerca da representação de um fóton têm levado alguns físicos a constatar, no Século XXI, que “a natureza da luz é uma questão irresolúvel no campo da física” [77]. Reconhecendo a dificuldade conceitual intrínseca ao conceito de fóton, Einstein escreveu em 1951 que “todos esses cinquenta anos de reflexão não me trouxeram próximo à resposta à questão, ‘O que são os quanta?’ Hoje em dia, qualquer Tom, Dick e Harry pensa que sabe, mas ele está enganado” [78]. Reescrevendo a citação de Einstein, concluiremos tal seção afirmando que mesmo após mais de cem anos de seu nascimento, o conceito de fóton ainda é uma caixa preta na fronteira da física moderna e contemporânea.

5. Epílogo

Ao contrário do que é amplamente difundido em alguns livros didáticos de física quântica, a natureza quântica da luz veio à tona, experimentalmente, apenas nas décadas de 1970 e 1980. De fato, os fenômenos ópticos conhecidos, até então, tais como o efeito Compton, o efeito fotoelétrico, o deslocamento Lamb, a emissão

espontânea e até mesmo o efeito HBT, poderiam ser explicados no domínio da física clássica. Uma teoria quântica para a luz tornar-se-ia exclusivamente indispensável com o surgimento de novos fenômenos e resultados experimentais [79]. Apresentaremos, então, alguns experimentos que desempenharam um papel importante a favor da natureza estritamente quântica da luz.

O primeiro experimento que evidenciou a necessidade de uma abordagem não clássica para luz foi realizado em 1974 pelo físico norte-americano John F. Clauser. O seu objetivo era confrontar experimentalmente a predição da teoria quântica de campos com a teoria clássica de campos em relação ao efeito fotoelétrico. “A diferença mais notável entre partículas e onda”, como chamou a atenção Clauser, “é que apenas partículas podem ser localizadas” [80]. Em um arranjo experimental no qual um fóton singular incidia em um espelho semitransparente, a teoria quântica de campos – considerando a interpretação usual de partícula – predizia que não seria observado um número significativo de coincidências, enquanto que, para a teoria clássica de campos, as taxas de coincidências seriam bastante expressivas nos dois detectores [81].

O debate acerca da necessidade, ou não, da quantização do campo eletromagnético havia se intensificado significativamente na ocasião em que o físico norte-americano Edwin T. Jaynes, em colaboração com Michael D. Crisp e Carlos R. Stroud Jr., desenvolveu uma teoria neoclássica da radiação. Tal abordagem baseava-se na ideia de que as equações de Maxwell governava o campo eletromagnético livre e, portanto, não seria necessário a sua quantização para a explicação de fenômenos, assim como na semiclassica [82]. Na opinião de Jaynes, a disputa teórica entre as abordagens quânticas e semiclassicas apenas seria solucionada com a realização de “experimentos ópticos nos quais as diferenças entre QED [Quantum Electrodynamics] e a teoria semiclassica poderiam ser reduzidas a questões de fato mais do que de fé” [83]. Clauser foi então capaz de realizar um experimento daquela natureza descrita por Jaynes, a partir do qual uma cascata atômica foi utilizada como fonte de luz que emitia pares de fótons que atravessavam um espelho semitransparente e, depois, eram detectados por dois eficientes fotodetectores. Após análise dos dados experimentais, Clauser não observou taxas de coincidências significativas concluindo, assim, que o efeito fotoelétrico requer a quantização do campo eletromagnético [84].

O novo fenômeno que trouxe à tona a natureza quântica da luz foi o efeito de anti-agrupamento de fótons. O experimento foi realizado em 1977 por H. Jeff Kimble, Mario Dagenais e Leonard Mandel na University of Rochester. Os autores destacaram a importância do experimento afirmando que “sua observação forneceria mais do que uma evidência direta para a existência dos fótons ópticos, diferentemente dos efeitos de cor-

relações positivas que têm explicações semiclássicas” [85]. A observação do efeito seria então uma constatação da necessidade da quantização da radiação. No experimento de Kimble e coautores, átomos de sódio foram excitados por um feixe de laser dye e, em seguida, a radiação emitida foi dividida por um espelho semitransparente. Após a realização do experimento, Kimble, Dagenais e Mandel concluíram que “a natureza quântica do campo de radiação e o salto quântico na emissão, os quais estão inextricavelmente conectados, são portanto ambos manifestados nessas medidas de correlação fotoelétrica” [86]. O efeito de anti-agrupamento de fótons, contrário ao agrupamento de fótons no efeito HBT, é uma assinatura da indispensabilidade da quantização da luz.

O resultado experimental de Clauser e o de Kimble, Dagenais e Mandel revelaram, assim, os efeitos não clássicos das propriedades estatísticas da radiação usando uma fonte de luz atenuada. Em 1986 outro experimento realizado, agora, com estados de fóton singular da luz também contribuiu para ratificar a natureza quântica da radiação. Inspirado por um curso de física ministrado pelo físico francês Claude Cohen-Tannoudji, cujo foco era discutir sobre a necessidade do conceito de fóton no âmbito da óptica, Alain Aspect teve a ideia de construir uma fonte de fóton singular para utilizar em um experimento de detecção de fótons. Nesse experimento, se a desigualdade de Cauchy-Schwarz – segundo a qual a probabilidade de detectar coincidências clássicas é sempre maior do que coincidências acidentais – fosse violada, então, o efeito de anticorrelação seria evidenciado. Em colaboração com Philippe Grangier e G. Roger, Aspect construiu um experimento no qual uma cascata atômica era capaz de emitir pares de fótons com diferentes frequências v_1 e v_2 . A detecção do primeiro fóton singular com frequência v_1 ativava os dois fotomultiplicadores de modo a detectar v_2 durante um certo intervalo de tempo. Ao fazer isto, os autores tinham certeza de que apenas um fóton singular chegaria no espelho já que o primeiro fóton havia sido detectado para abrir a janela de detecção. A garantia de que o experimento do grupo francês estava lidando com fótons singulares era o fato de que “durante a janela, a probabilidade de detecção de um fóton v_2 , vindo do mesmo átomo que emitiu v_1 , é muito maior do que a probabilidade de detectar um fóton v_2 emitido por outro átomo da fonte” [87]. Com esse dispositivo, Grangier, Roger e Aspect realizaram dois experimentos. No primeiro arranjo experimental em que fótons singulares chegavam no divisor de feixe e, em seguida, eram detectados através de dois fotomultiplicadores, eles verificaram um comportamento de anticorrelação da luz. Tal resultado concordava, portanto, com a teoria quântica de estados de fótons singulares. O segundo foi similar a um interferômetro Mach-Zehnder, mas operando agora com fótons singulares. O grupo francês observou franjas de interferência com uma visibilidade de aproximadamente

cem por cento [88].

Aqueles resultados experimentais poderiam ser interpretados de duas formas, segundo os autores. De um lado, usando os conceitos clássicos – as imagens de onda e partícula – no primeiro experimento, deve-se usar a imagem de partícula “(fótons não são divididos no divisor de feixe)”, enquanto que no segundo, a imagem de onda “(o campo eletromagnético é coerentemente dividido pelo divisor de feixe)”. Grangier, Roger e Aspect chamaram a atenção para um aspecto relevante que também apareceu nos debates anteriores sobre o conceito de fóton: “o problema de descrição incompatível apenas surge se insistirmos em utilizar os conceitos clássicos, tais como onda e partícula” [89]. Por outro lado, os autores enfatizaram que considerando a óptica quântica, “há uma única descrição da luz” baseada nos estados coerentes [90]. Em consequência, o emprego das imagens esquizofrênicas é inadequado no âmbito da óptica quântica.

Em suma, os experimentos de Clauser, do grupo de Rochester e da equipe francesa foram os primeiros a evidenciar o caráter quântico da luz. Clauser demonstrou que a detecção de dois fótons era separada em tempo com o uso de uma fonte proveniente de uma cascata atômica. No caso do grupo de Rochester, foi constatado que os fótons de um átomo de sódio singular foram detectados separadamente no espaço originando, assim, um novo fenômeno na física – o efeito de anti-agrupamento de fótons. Utilizando a primeira fonte de luz contendo apenas um quantum de energia, a equipe francesa observou uma anti-correlação de fótons exibindo, assim, o comportamento estritamente quântico da luz. Tais experimentos, assim como os estados coerentes de Glauber, tornaram-se um divisor de águas no desenvolvimento da óptica quântica na segunda metade do Século XX.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer imensamente ao Prof. Nelson Studart pelo estímulo à publicação desse artigo na edição especial da RBEF sobre o Ano Internacional da Luz. Também externo meus sinceros agradecimentos ao Prof. Olival Freire Jr. pela leitura cuidadosa de uma versão preliminar. Gostaria de agradecer ao apoio financeiro concedido pela Fulbright Commission e CAPES para a realização da pesquisa.

Referências

- [1] J. Dudley, *About the Year of Light*. Disponível em [urlhttp://www.light2015.org/Home/About.html](http://www.light2015.org/Home/About.html). Acessado em 26/3/2015.
- [2] I. Silva e O. Freire Jr., *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 1601 (2014).
- [3] I. Silva, O. Freire Jr. e A.P.B. da Silva, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**, 4601 (2011).

- [4] I. Silva, *Do Grande Elétron aos Quanta de Luz: Arthur Holly Compton e a Física dos Raios X e γ* . Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia e Universidade Estadual de Feira de Santana, 2009.
- [5] S.G. Brush, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* **37**, 205 (2007).
- [6] O. Darrigol, *Studies in History and Philosophy of Science Part B* **40**, 151 (2009).
- [7] D. Fick and H. Kant, *Studies in History and Philosophy of Science Part B* **40**, 395 (2009).
- [8] M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (MacGraw-Hill, New York, 1966).
- [9] H. Kragh, *Quantum Generations* (Princeton University Press, Princeton, 1999).
- [10] T.S. Kuhn, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912* (University of Chicago Press, Chicago, 1987).
- [11] J. Mehra and H. Rechenberg, *The Historical Development of Quantum Theory* (Springer, New York, 1982), v. 1.
- [12] M. Paty, *A Física do Século XX*. Traduzido por Pablo Mariconda (Idéias & Letras, São Paulo, 2009).
- [13] J.M. Sánchez-Ron, *Historia de la Física Cuántica: El Período Funcional (1860-1926)* (Editorial Critica, Barcelona, 2001).
- [14] R.H. Stuewer, *The Compton Effect: Turning Point in Physics* (Science History Publications, New York, 1975).
- [15] M. Taketani and M. Nagasaki, *The Formation and Logic of Quantum Mechanics: The Way to Quantum Mechanics* (World Scientific Publishing, New Jersey, 2001), v. 2.
- [16] B.R. Wheaton, *The Tiger and the Shark: Empirical Roots of Wave-Particle Dualism* (Cambridge University Press, Cambridge, 1983).
- [17] A. Einstein, in: *O Ano Miraculoso de Einstein: Cinco Artigos que Mudaram a Face da Física*, traduzido por Alexandre Carlos Tort (Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, 2001), p. 202.
- [18] A. Pais, *Sutil é o Senhor...": A Ciência e a Vida de Albert Einstein*. Traduzido por Fernando Parente e Viriato Esteves (Editora Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1995), p. 457-458.
- [19] A. Pais, op. cit., p. 423.
- [20] A. Pais, op. cit., p. 424.
- [21] N. Bohr, Nobel Lecture: *The Structure of the Atom*. Disponível em http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1922/bohr-lecture.html. Acessado em 30 de março de 2015, p. 14.
- [22] I. Silva, O. Freire Jr., op. cit. (2014).
- [23] I. Silva, O. Freire Jr. e A. P. B. da Silva, op. cit. (2011).
- [24] A.H. Compton, *Physical Review* **21**, 483 (1923).
- [25] R.H. Stuewer, *Annalen Der Physik* **9**, 9975 (2000).
- [26] M. Beller, *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution* (The University of Chicago Press, Chicago, 1999), p. 132.
- [27] W. Bothe, *Science* **122**, 861 (1955).
- [28] A.H. Compton e A. W. Simon, *Physical Review* **26**, 289 (1925).
- [29] M. Beller, op. cit., p. 132.
- [30] E. Schrödinger, *Annalen der Physik* **387**, 257 (1927).
- [31] G. Beck, *Zeitschriftfür Physik A* **41**, 443 (1927).
- [32] G. Wentzel, *Zeitschriftfür Physik A* **40**, 574 (1927).
- [33] M. Beller, op. cit., p. 224.
- [34] M. Beller, op. cit., p. 239.
- [35] M. Born, *Atomic Physics* (Conn. Hafner: Blackie & Son Ltd, Darien, 1970), p. 82.
- [36] P. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics* (Clarendon Press, Oxford, 1958), p. 2.
- [37] H. Kragh, op. cit. (1999).
- [38] B. Lovell and R. M. May, *Nature* **416**, 34 (2002).
- [39] B. Tango, *Astronomy & Geophysics* **47**, 4.38 (2006).
- [40] B. Lovell and R.M. May, op. cit., p. 34.
- [41] R. Hanbury Brown, *Boffin: A Personal Story of the Early Days of Radar: Radioastronomy and Quantum Optics* (Taylor & Francis Group, New York, 1991), p. 105.
- [42] R. Hanbury Brown, op. cit., p. 120.
- [43] I. Silva and O. Freire Jr., *Historical Studies in the Natural Sciences* **43**, 453 (2013), p. 453-454.
- [44] E. Brannen and H.I.S. Ferguson, *Nature* **178**, 481 (1956), p. 482.
- [45] I. Silva and O. Freire Jr., op. cit., p. 470-471.
- [46] R. Hanbury Brown, op. cit., p. 120-121.
- [47] E. M. Purcell, *Nature* **178**, 1449 (1956), p. 1449-1450.
- [48] I. Silva and O. Freire Jr., op. cit., p. 456.
- [49] M. Beller, op. cit., p. 233.
- [50] E.M. Purcell, op. cit., p. 1450.
- [51] I. Silva and O. Freire Jr., op. cit., p. 475.
- [52] I. Silva and O. Freire Jr., op. cit., p. 475.
- [53] I. Silva e O. Freire Jr., op. cit., p. 488.
- [54] I. Silva e O. Freire Jr., op. cit., p. 487.
- [55] S.S. Padua, *Brazilian Journal of Physics* **35**, 70 (2005).
- [56] R.J. Glauber, *Autobiography*. Disponível em http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2005/glauber-autobio.html. Acessado em 8 de agosto de 2012.
- [57] J.L. Bromberg, *The Laser in America (1950-1970)* (Cambridge: The MIT Press, 1993), p. 109.
- [58] R.J. Glauber, *Physical Review* **130**, 2529 (1963).
- [59] I. Silva, *Uma História do Conceito de Fóton na Segunda Metade do Século XX: Para Além de Histórias do Modelo Bola de Bilhar*. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia e Universidade Estadual de Feira de Santana, 2013, p. 121-122.
- [60] I. Silva, op. cit., p. 120-121 (2013).

- [61] M.O. Scully, in *Quantum Theory of Optical Coherence* (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007), p. xv.
- [62] W.E. Lamb Jr., *Applied Physics B* **60**, 77 (1995).
- [63] R.J. Glauber, Entrevista concedida a Indianara Silva na Harvard University em 25 de junho de 2012. Não publicada.
- [64] M.O. Scully, op. cit., p. xv.
- [65] M.O. Scully and M. Sargent III, *Physics Today* **25**, 38 (1972).
- [66] A. Carroy, in *Interview with John Clauser* by Joan L. Bromberg on 20 May 2002, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA.
- [67] M.O. Scully and M. Sargent III, op. cit., p. 47.
- [68] I. Silva, in *Ciência na Transição dos Séculos*, editado por Olival Freire Jr., Ileana M. Greca e Charbel Niño El-Hani (EDUFBA, Salvador, 2014).
- [69] D. Finkelstein, in *The Nature of Light: What Is a Photon?*, editado por C. Roychoudhuri, A.F. Kracklauer and K. Creath (Taylor and Francis Group, Florida, 2008), p. 23-35.
- [70] A. Muthukrishnan, M.O. Scully and M.S. Zubairy, in *The Nature of Light: What Is a Photon?*, editado por C. Roychoudhuri, A.F. Kracklauer and K. Creath (Taylor and Francis Group, Florida, 2008), p. 37-57.
- [71] A. Zeilinger et al., *Nature* **433**, 230 (2005), p. 230.
- [72] A. Zeilinger et al., op. cit., p. 233.
- [73] A. Zeilinger et al., op. cit., p. p. 233.
- [74] A. Muthukrishnan, M.O. Scully and M. S. Zubairy, op. cit., p. 53.
- [75] I.M. Greca and O. Freire Jr., in *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*, editado por Michael Matthews (Springer, Dordrecht, 2014), v. 3, p. 183-209.
- [76] R. Kidd, L. Arndt and A. Anton, *American Journal of Physics* **57**, 27 (1989).
- [77] C. Roychoudhuri, A.F. Kracklauer and K. Creath, *The Nature of Light: What is a Photon?* (CRC Press Taylor & Francis Bacon, New York, 2008), p. xiii.
- [78] Albert Einstein to Michele Besso (Dec. 1951), in: *Transformation and Tradition in the Sciences: Essays in Honour of I. Bernard Cohen*, editado por Everett Mendelsohn (Cambridge University Press, Cambridge, 2003).
- [79] B. Baseia, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **17**, 1 (1995).
- [80] J.F. Clauser, in *Coherence and Quantum Optics*, editado por Leonard Mandel e Emil Wolf (Plenum Press, New York-London, 1973), p. 825.
- [81] J.F. Clauser, *Physical Review D* **9**, 853 (1974), p. 854.
- [82] J.L. Bromberg, *Isis* **97**, 237 (2006).
- [83] E.T. Jaynes, in *Proceedings of Second University of Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics*, editado por Leonard Mandel e Emil Wolf (Plenum, New York, 1966), p. 22.
- [84] J.F. Clauser, op. cit., p. 859.
- [85] H.J. Kimble, M. Dagenais and L. Mandel, *Physical Review Letters* **39**, 691 (1977), p. 692.
- [86] H.J. Kimble, M. Dagenais and L. Mandel, op. cit., p. 694.
- [87] P. Grangier, G. Roger and A. Aspect, *Europhysics Letters* **1**, 173 (1986).
- [88] P. Grangier, G. Roger and A. Aspect, op. cit., p. 177.
- [89] P. Grangier, G. Roger and A. Aspect, op. cit., p. 178-179.
- [90] A. Aspect e P. Grangier, *Hyperfine Interactions* **37**, 1 (1987).