

O CAMINHO DA ÓPTICA FOTÔNICA

1. A Postulação do Quantum de Luz

Em 1905, Albert Einstein postulou que a luz poderia ser descrita como se fosse um gás de partículas de energia $h\nu$. Com isso, conseguiu dar conta de três fenômenos experimentais já conhecidos em sua época, mas que ainda não tinham explicação satisfatória: o efeito fotoelétrico, a fotoionização e a fluorescência. Como foi que Einstein chegou a este resultado?

Certamente, ele se inspirou na descoberta de Planck da quantização de energia. Einstein foi um dos primeiros a reconhecer a importância desse resultado de Planck.¹⁰ Se os osciladores tinham energia discreta, será que a radiação emitida também não teria? No entanto, é curioso que a derivação que Einstein faria da energia do fóton *não* utiliza a lei de radiação de Planck e nem a noção de quantização dos osciladores do corpo aquecido. Isso sugere que sua descoberta poderia ter sido feita de maneira independente da de Planck.

A teoria de Einstein baseava-se numa comparação entre a lei de radiação de Wien e a lei dos gases ideais, cuja expressão em termos de entropia era muito parecida. Da mesma maneira que um gás ideal é composto de moléculas, a luz seria composta de corpúsculos: pelo menos, era essa a “sugestão heurística” das conclusões do jovem funcionário do escritório de patentes em Berna.¹¹

Mas será que a descoberta da quantização da radiação através do caminho da óptica fotônica,¹² feita de forma independente da quantização dos osciladores do corpo negro, não dependeria de um cientista excepcionalmente genial como Einstein? A história factual sugere que não: Joseph John Thomson já tinha desenvolvido, em 1904, uma teoria eletromagnética que buscava explicar o aspecto granular da luz!

A entropia do gás ideal, derivada por Boltzmann e conhecida de Einstein (ele fizera uma resenha de um artigo de N. Schiller de 1904 em que aparece a fórmula), é:

$$S - S_0 = n k_B \ln (V/V_0) . \quad (13)$$

Nesta equação, S e S_0 são as entropias do gás ideal correspondentes respectivamente aos volumes V e V_0 , e n o número de moléculas. A constante de Boltzmann k_B era escrita por Einstein como R/N_0 (a constante dos gases dividido pelo número de Avogadro).

A entropia da radiação emitida por um corpo negro, que segue a lei de Wien, foi obtida por Planck em 1898 (e é semelhante à eq. 3). Exprimindo-a em termos da dependência de volume, Einstein obteve:

$$s - s_0 = (u/av) \ln (V/V_0) . \quad (14)$$

¹⁰ Antes disso, em 1902, Joseph Larmor notou que os osciladores da teoria de Planck não conseguiam dar conta da mudança de qualidade da radiação incidente (por exemplo, na fluorescência), e assim buscou reconstruir sua teoria sem osciladores discretos.

¹¹ Boltzmann (1884) já tinha explorado a analogia entre radiação e gás ideal, como mencionamos na seção I.2.

¹² O termo “fotônica” surgiu nos anos 1960 em associação com a pesquisa em laser. Utilizo este termo aqui para distinguir o caminho de pesquisa aqui explorado do caminho envolvendo a espectroscopia óptica, a ser examinado no Cap. III. Outra expressão possível seria “o caminho da eletro-óptica”.

Identificando as expressões das eqs.(13) e (14), tem-se $nk_B = u/av$, e com $h = ak_B$ obtém-se a seguinte expressão para a energia $u(\nu)$ da radiação com frequência ν :

$$u(\nu) = n h \nu. \quad (15)$$

Nas palavras de Einstein: “Se radiação monocromática (de densidade suficientemente baixa) se comporta, no que tange à dependência de sua entropia com o volume, como um meio descontínuo consistindo de quanta de energia de magnitude $R\beta\nu/N_0$ [ou seja, $h\nu$], então é plausível que se investigue se as leis da criação e transformação da luz são constituídas como se a luz consistisse de tais quanta”.¹³

Em seguida, Einstein apresentou três fenômenos experimentais que podiam ser explicados por sua nova teoria. O primeiro é o fenômeno da fluorescência (ou “fotoluminescência”, nas palavras de Einstein). Em 1852, George Stokes constatou que a luz absorvida por um material fluorescente tem sempre comprimento-de-onda menor do que a luz emitida, fato cuja explicação era desconhecida na teoria ondulatória da luz. É curioso que dois anos depois de os experimentos de Foucault, Fizeau e Breguet (que compararam a velocidade da luz no ar e na água) refutarem de vez a velha teoria corpuscular da luz de Newton, surgisse a primeira “anomalia” da triunfante teoria ondulatória da luz. Em retrospecto, podemos dizer que o primeiro indício experimental para a existência de quanta foi esta descoberta da “regra de fluorescência” em 1852. Segundo a teoria de Einstein, a energia de cada quantum de luz emitido, num regime de luz de intensidade não muito alta, provém apenas de um quantum absorvido; assim, em vista da eq.(15), a frequência da luz emitida tem que ser menor ou igual à da luz absorvida.

2. O Efeito Fotoelétrico

A segunda evidência experimental explorada por Einstein corresponde ao efeito “fotoelétrico” (ou, mais precisamente, “efeito fotoemissivo”). Este efeito foi observado pela primeira vez em 1887, de maneira independente por Heinrich Hertz (Kiel), Svante Arrhenius (Uppsala) e Arthur Schuster (Manchester). No caso de Hertz, ele estava realizando seus famosos experimentos com ondas (eletromagnéticas) de rádio, quando percebeu que a luz ultravioleta de uma descarga primária afetava uma descarga secundária. Seu relato despertou o interesse de vários pesquisadores alemães, como Wilhelm Hallwachs (1888), Wiedemann & Ebert (1888) e os professores secundaristas Elster & Geitel (1890), além do russo Alexander Stoletov (1889) e do italiano Augusto Righi (1888). Suas investigações levaram às seguintes conclusões: *i*) as placas metálicas expostas à luz ultravioleta tornam-se carregadas positivamente; *ii*) disto, conclui-se que o efeito deve consistir da emissão de radiação de carga negativa; *iii*) a intensidade da corrente gerada é proporcional à intensidade da luz; *iv*) luz vermelha e infravermelha não geram efeito fotoelétrico.

¹³ Apud MEHRA & RECHENBERG, 1982, op. cit. (nota 4), p. 80. Pode-se perguntar se havia uma ligação conceitual entre o trabalho de Einstein sobre a teoria da relatividade e seu artigo sobre o quantum de luz. Michel PATY (*Einstein, les quanta et le réel*, texto inédito, 1999, cap. 2, pp. 17-18) aponta dois pontos de contato, mencionados pelo próprio Einstein. (a) A abolição do éter luminífero, feita pela relatividade, faria da luz uma entidade autônoma, como a matéria (carregando inércia), e não um estado ondulatório de um meio hipotético. (b) Tanto na relatividade quanto na fotônica, a razão ε/ν é constante e independente do sistema de coordenada.

Qual seria a causa desse fenômeno? Acreditava-se inicialmente que moléculas do gás ambiente dissociavam-se com a luz ao entrar em contato com a placa metálica, com a subsequente repulsão das partes eletricamente negativas.¹⁴ Desde cedo, Philipp Lenard, que se tornaria o principal pesquisador desta área, discordava desta explicação. Em 1899, concluiu que o que é emitido no efeito são raios catódicos. Esta conclusão já tinha sido obtida por J.J. Thomson, que mostrara que raios catódicos consistem de partículas subatômicas de carga elétrica negativa, os elétrons. Lenard, porém, manteve-se fiel à tradição alemã, segundo a qual os raios catódicos seriam vibrações do éter, e defendeu que esses raios envolveriam “pedaços individuais do éter”, que chamou de “quanta”. De qualquer forma, Lenard conseguiu observar o efeito fotoelétrico no vácuo, mostrando a partir de 1899 que esses raios catódicos de baixa velocidade são gerados diretamente na placa metálica pela ação da luz ultravioleta.

Em 1902 publicou um extenso e importante estudo. Confirmou a descoberta de Stoletov (1889) de que a intensidade da corrente gerada no efeito fotoelétrico é diretamente proporcional à intensidade da luz incidente, numa faixa de variação de intensidade de três milhões. Mais surpreendente que isso, constatou que a velocidade máxima dos raios catódicos emitidos não depende da intensidade da luz, mas apenas do tipo de luz e do metal usado no cátodo. Ou seja, luzes de diferentes comprimentos-de-onda geravam raios catódicos com velocidades máximas diferentes. Para obter este resultado, introduziu um procedimento experimental para medir tal velocidade por meio da variação do potencial entre cátodo e ânodo. Confirmou também a observação de Hallwachs (1888) de que luz acima de um certo comprimento-de-onda não gera o efeito fotoelétrico.

Ao buscar explicar esses resultados, desenvolveu a “hipótese do gatilho”: concluiu que a luz incidente não contribuiria para a energia dos raios catódicos emitidos mas, através de um efeito de ressonância, estimularia a liberação dos elétrons, que adquiriam a velocidade que tinham no interior do átomo. Luzes de diferentes qualidades entrariam em ressonância com elétrons de diferentes velocidades, o que explicaria a dependência da velocidade dos raios catódicos emitidos com o comprimento-de-onda da luz incidente. Mas Lenard não percebeu que a dependência entre energia do elétron liberado e frequência da luz incidente é linear!¹⁵

Einstein, por seu turno, a partir de sua hipótese a respeito da natureza quântica da luz, forneceu uma explicação e uma lei detalhada para o efeito fotoelétrico. Como se pode considerar que a luz consiste de partículas de energia $h\nu$, seria apenas quando esta energia é suficiente para vencer a energia de ligação W do elétron que este é ejetado, produzindo uma corrente elétrica detectável. Assim, a energia máxima $E(e^-)$ dos elétrons liberados seria proporcional à frequência da luz incidente: $E(e^-) = h\nu - W$.

Confirmação experimental convincente para a lei fotoelétrica de Einstein foi obtida só em 1916 por Robert Millikan. A principal dificuldade experimental envolvia a concentração de cargas no espaço em torno da placa metálica, que dificultava a medição precisa da energia dos fotoelétrons. É plausível supor que se Einstein não tivesse proposto sua teoria, a lei fotoelétrica poderia ter sido encontrada empiricamente. Lenard e Erich Ladenburg chegaram perto desta descoberta, independentemente de Einstein.

¹⁴ WHEATON, B.R. (1978), “Philipp Lenard and the photoelectric effect, 1889-1911”, *Historical Studies in the Physical Sciences* 9: 299-322.

¹⁵ Isso é sublinhado claramente por WHEATON, B.R. (1983), *The tiger and the shark: empirical roots of wave-particle dualism*, Cambridge U. Press, p. 74, mas autores como JAMMER (1966, op. cit., nota 4, p. 35) dão a impressão de que Lenard, e mesmo Stoletov, teriam mostrado que “a energia dos elétrons ejetados aumenta com o aumento da diferença $\nu - \nu_0$ ”. Segundo Jammer, E. Ladenburg teria “verificado irrefutavelmente” em 1903 que a dependência entre a energia e frequência é linear. WHEATON (1978, op. cit., nota 14, p. 320), porém, afirma que tal dependência só seria explorada por Ladenburg a partir de 1907.

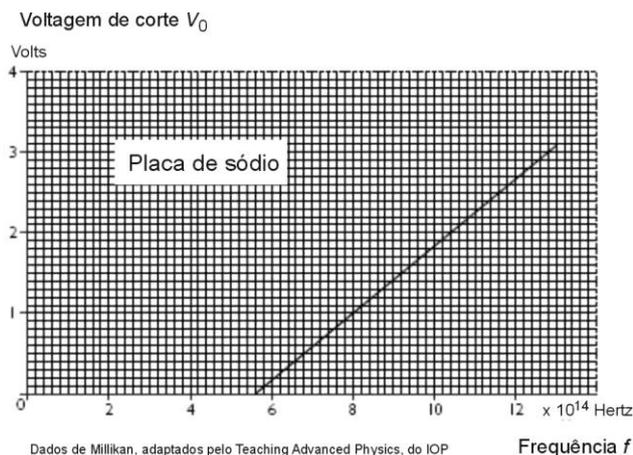
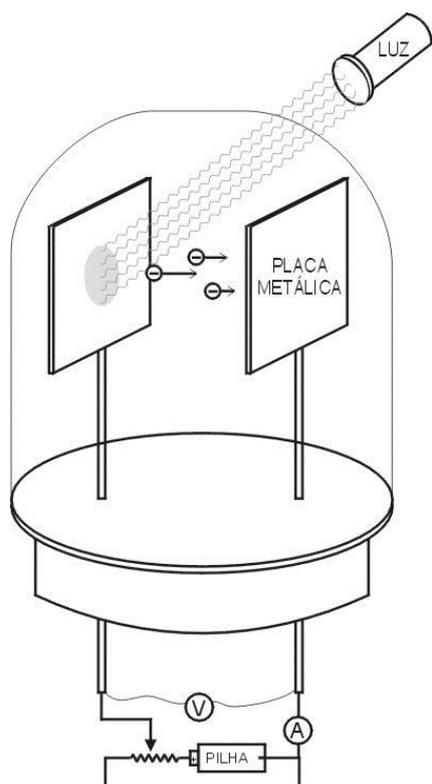


Figura II.1. Efeito fotoemissivo. (a) Luz incide em uma placa metálica e emite elétrons que saem com uma certa velocidade; um potencial retardador variável (entre duas placas) permite determinar a energia dos elétrons emitidos, estabelecendo-se o potencial de corte V_0 (acima do qual os elétrons não atingem a outra placa) (b) Dados de Millikan para a energia do elétron (proporcional a V_0) em função da frequência da luz incidente.

3. A Teoria Granular da Radiação Eletromagnética

O terceiro fenômeno óptico relevante para a hipótese quântica da luz, a fotoionização, começou a se manifestar a partir de 1895-96, anos em que ocorreu uma espécie de “revolução empírica” na física, com a descoberta da radioatividade, do raio X, da carga e massa do elétron e do efeito Zeeman. Qual seria a natureza do raio X? Uma hipótese era de que consistia de um “impulso eletromagnético” (Wiechert, Stokes), ou seja, um pulso eletromagnético transversal (e não longitudinal, como queria Röntgen) de pequena extensão (ou seja, não uma onda contínua da alta frequência, como queria Mach). Esta hipótese ganhou maior aceitação a partir da observação (controvertida) da difração de raios X pelos físicos holandeses Wind & Haga (1899) e posterior análise teórica por Arnold Sommerfeld (1900) (ver Wheaton, 1983, pp. 15-48).

Ainda em 1896, J.J. Thomson, em parceria com seu aluno Ernest Rutherford, começaram a investigar a capacidade do raio X para tornar um gás condutor elétrico. Através de algum processo ainda desconhecido, o raio X tinha a capacidade de separar as moléculas nos seus componentes elétricos, processo que viria a ser chamado de “ionização”. Segundo a concepção do raio X como um impulso eletromagnético, igualmente espalhado em todas as direções, todas as moléculas do gás deveriam se ionizar mais ou menos ao mesmo tempo, mas o que Thomson & Rutherford observaram, para sua surpresa, era que apenas uma parcela ínfima das moléculas gasosas era ionizada (1 em 10^{12} moléculas). WHEATON (1983, pp. 76-8) chamou este problema de “paradoxo da quantidade”. Em 1903, Thomson considerou diferentes mecanismos para explicar este paradoxo, por exemplo considerando que os átomos de uma mesma substância seriam diferentes, de forma que alguns fossem facilmente ionizáveis e outros não.

Outra alternativa buscada por Thomson, exposta mais claramente no livro *Electricity and matter* (1904), foi considerar que a radiação eletromagnética tivesse uma estrutura descontínua, “granular”, como se houvesse pontos brilhantes em um fundo escuro! Isso explicaria diretamente porque a fotoionização de gases por luz ultravioleta e por raios X ocorre de maneira pontual. Essa ideia remontava a 1893, quando, no seu livro *Notes on recent researches in electricity and magnetism*, Thomson havia proposto uma “teoria de tubos elétricos moventes”, um “tipo de teoria molecular da eletricidade, com cada tubo de Faraday tomando o lugar de moléculas da teoria cinética dos gases” (apud MEHRA & RECHENBERG, 1982, p. 84). A propagação da luz era concebida como o deslocamento (à velocidade da luz) transversal de tubos ou cordas imersas no éter, que resultaria em uma distribuição não-uniforme de energia na frente de onda.

Em 1904, ele modificou esse modelo: os tubos elétricos não se deslocariam juntamente com a luz, mas a luz seriam pulsos transversais que se propagariam ao longo dos tubos elétricos. Como esses tubos não preencheriam todo o éter, dar-se-ia origem aos “pontos brilhantes” observados em experimentos de fotoionização, “análogos a um enxame de raios catódicos”. Em 1907, forneceu uma explicação para o efeito fotoelétrico, segundo a qual cada elétron receberia a energia de apenas um pulso. Concluiu que a luz de frequência mais alta teria “um caráter mais granular”, o que concordava com as conclusões obtidas por Einstein em 1905, e que aparentemente ele desconhecia. No entanto, ao contrário de Einstein, não conseguiu quantificar a energia associada a cada pulso descontínuo.¹⁶

Em 1909, Geoffrey I. Taylor¹⁷, aluno de Thomson em Cambridge, realizou uma série de experimentos de interferência de luz para feixes de diferentes intensidades. O feixe mais fraco levou 3 meses para formar a franja de interferência, mas o aspecto desta franja era idêntico ao obtido nos outros experimentos (ao contrário do que imaginara Thomson). Seu curto artigo abre com as seguintes palavras:

“O fenômeno da ionização por luz e por raios de Röntgen levou a uma teoria segundo a qual a energia é distribuída de maneira desigual sobre uma frente de onda [...] [Thomson, 1907]. Há regiões de energia máxima amplamente separadas por grandes áreas sem distúrbio. Quando a intensidade da luz é reduzida, essas regiões se tornam amplamente separadas, mas a quantidade de energia em qualquer uma delas não muda; ou seja, elas são unidades indivisíveis”.

No final, estima que a energia contida em cada uma dessas unidades é menor do que $1,6 \cdot 10^{-16}$ ergs, o que está errado. A energia $h\nu$ de um fóton de luz ultravioleta, segundo a fórmula de Einstein (que Thomson e Taylor desconheciam), seria em torno de $5 \cdot 10^{-12}$ ergs.

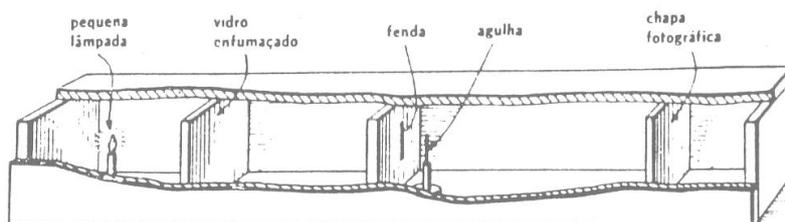


Figura II.2: Experimento de Taylor (1909).

¹⁶ MCCORMACH, R. (1967), “J.J. Thomson and the structure of light”, *British Journal for the History of Science* 3: 362-87.

¹⁷ Taylor, posteriormente, teria uma brilhante carreira na área de mecânica de fluidos e sólidos; ver BRENNER, M.P. & STONE, H.A. (2000), “Modern classical physics through the work of G.I. Taylor”, *Physics Today* 53(5): 30-5. A Fig. II.1 é adaptada de PHYSICAL SCIENCE STUDY COMMITTEE (1971), *Física, Parte IV: Eletricidade e estrutura atômica*, Edart, São Paulo, p. 179 (original em inglês: 1960).

4. Aspecto Dual dos Raios X

Um outro problema, que WHEATON (1983, pp. 85-7) chamou de “paradoxo da qualidade”, surgiu por esta época. Em 1900, Ernst Dorn (Halle) realizou um experimento em que raios X produzidos por elétrons primários incidiam em um cátodo, liberando elétrons secundários. Ao comparar as velocidades (energias) dos elétrons primários e secundários, encontrou valores próximos. Isso era muito estranho, já que a energia do raio X produzido por um elétron deveria se espalhar ao longo da frente de onda, e apenas uma pequena parcela dessa energia deveria ser transmitida para o elétron secundário. Logo em seguida, porém, Lenard propôs sua “hipótese do gatilho” (que vimos na seção II.2), e o problema parecia explicado.

A hipótese do gatilho foi bem aceita tanto na Alemanha quanto na Grã-Bretanha até em torno de 1910. Longe dos grandes centros, porém, William Henry Bragg, trabalhando em Adelaide, na Austrália, não conhecia bem o efeito fotoelétrico e não havia assimilado essa hipótese explicativa. Em 1907, ele redescobriu o problema encontrado por Dorn, e considerou que isso era evidência suficiente a favor da tese de que raios X e raios γ consistem de partículas materiais. Tal partícula seria constituída de um elétron e de uma partícula carregada (por exemplo, uma partícula α), formando um “par neutro”. Após publicar uma primeira parte de seu trabalho, considerou as medições de Erich Marx (1905), que indicavam que os raios X se propagam à velocidade da luz. Bragg propôs, então, que o raio X teria uma natureza dual: consistiria de um impulso eletromagnético acompanhado de um par neutro que se propagaria a velocidades menores. Sua hipótese foi recebida como uma ameaça à teoria do impulso, e ele acabaria se envolvendo em uma acalorada controvérsia com Charles Barkla.

Em 1912, após a descoberta da interferência de raios X por Friedrich, Knipping & Laue, Bragg voltaria a defender a natureza dual (onda-partícula) para essa forma de radiação, e veio a contribuir de maneira importante para a teoria da difração de raios X em cristais. Em suas palavras: “Estou muito longe de ter aversão à reconciliação de uma teoria corpuscular e uma ondulatória: penso que algum dia isso possa acontecer”. Bragg defendia “uma teoria ao mesmo tempo corpuscular e ondulatória da luz” (apud WHEATON, 1983, pp. 167, 208).