

○ INÍCIO DA FÍSICA QUÂNTICA E SEUS CAMINHOS POSSÍVEIS*

Oswaldo Pessoa Jr.¹

1. Possíveis nascimentos da física quântica

É bem sabido que a física quântica nasceu com a postulação, feita por Max Planck em dezembro de 1900, de que os “osciladores” de corpos térmicos teriam valores *discretos* de energia, múltiplos inteiros da grandeza $h\nu$.² O caminho trilhado até essa descoberta passou pelos importantes trabalhos teóricos de Kirchhoff, Boltzmann, Wien e Rayleigh, e experimentais de Stefan, Paschen, Lummer e Rubens, entre outros. Mas o que teria acontecido se algum desses físicos não tivesse se tornado cientista? Será que a física quântica teria nascido da mesma maneira?

Imaginemos um cenário de ficção científica. Numa certa data, digamos janeiro de 1800, cem réplicas exatas da Terra teriam sido produzidas por um “demônio copiador”, e cada uma dessas réplicas seria posta a orbitar em torno de um sistema solar semelhante ao nosso. Talvez fosse mais prudente para o demônio fazer cópias de todo o Universo, para que nenhum

* O tema deste artigo se baseia na palestra “Quatro Caminhos Históricos pelos quais a Física Quântica poderia ter sido Descoberta”, apresentada na 53ª Reunião da SBPC, em Salvador, e posteriormente no Instituto de Física da USP e na Universidade Estadual do Ceará. No Colóquio dedicado ao nosso mestre Michel Paty, enfocaram-se apenas “As Descobertas do Aspecto Granular da Luz no Início do Século XX”.

¹ Departamento de Filosofia, FFLCH, Universidade de São Paulo.

² O termo ν seria a frequência do oscilador e h o que viria a ser chamado “constante de Planck” ou “quantum de ação”. “Osciladores” referiam-se a entidades microscópicas hipotéticas que vibrariam numa certa frequência que seria igual à da radiação emitida pelo corpo. O termo “radiação” se refere não só à luz, mas também à radiação infravermelha, que esquenta os corpos, e a outros tipos de ondas eletromagnéticas.

astrônomo astuto percebesse alterações súbitas nos céus. Em todo caso, cem réplicas idênticas da Terra passariam a existir, mas devido a flutuações e outras fontes de aleatoriedade, as histórias de cada uma dessas Terras seguiria um rumo diferente.³ Nos diferentes mundos, casais namorariam em horas diferentes e os filhos concebidos teriam genomas diferentes, para não falar nas diferenças dos ambientes em que esses jovens cresceriam. Um cientista genial de um mundo poderia ter uma versão modificada em outro mundo que teria se tornado um grande músico.

Será que a física quântica teria surgido da mesma maneira em cada um desses mundos? Certamente não, pelo menos é o que diz nossa intuição. Na Figura 1, indicamos à direita um mundo possível no qual uma hecatombe teria impedido o avanço da ciência. Tais casos, porém, podem ser ignorados em nossa análise. Nosso problema é estimar, dentre aqueles mundos que teriam chegado à física quântica, qual porcentagem teria seguido um certo caminho e qual um outro. Naturalmente, se considerássemos uma data anterior a 1800, digamos 1600, os caminhos possíveis até a física quântica seriam bem diferentes.⁴

Voltando para a história da ciência de nosso mundo atual, vemos que havia pelo menos quatro grandes campos nos quais os cientistas estavam investigando efeitos que hoje chamamos “quânticos”: o da radiação térmica, o dos efeitos ópticos, o da espectroscopia e o dos calores específicos de sólidos. A proximidade desses campos com efeitos quânticos sugere que o caminho para a física quântica poderia ter sido trilhado em cada uma dessas áreas. Neste trabalho, descreveremos esses caminhos com mais detalhes do que em um artigo anterior (PESSOA, 2000).

³ O “grau de flutuação” seria um parâmetro relevante para avaliar a proximidade entre as diferentes histórias paralelas. No entanto, deixemos essa questão de lado e confiemos no cenário construído por nossa imaginação.

⁴ Há uma semelhança aqui com a análise feita por Griffiths (1984) em sua interpretação das histórias consistentes para a mecânica quântica, na qual é preciso definir o evento inicial e o final para estimar as probabilidades.¹

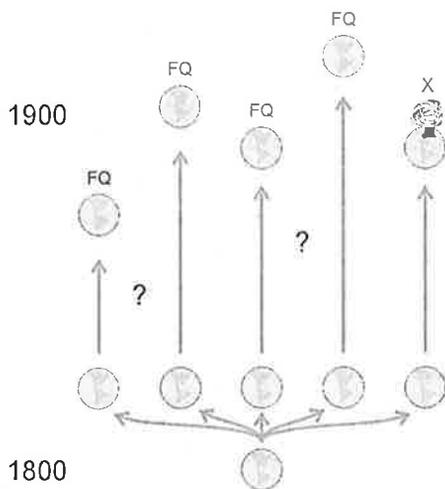


Figura 1: *Diferentes réplicas da Terra chegam à física quântica (FQ) por caminhos diferentes.*

2. A Lei de Radiação de Paschen-Wien

Faremos aqui um relato sucinto do caminho que de fato levou à descoberta da quantização de energia, o da *radiação térmica*, caminho este que é bem conhecido e é relatado com algum detalhe por Jammer (1966, pp. 1-28) e Mehra & Rechenberg (1982, pp. 24-59).⁵

O fenômeno em questão é o da *emissão* de radiação por corpos aquecidos. Um exemplo desse fenômeno é a luz emitida por ferro fundido a altas temperaturas, que assume diferentes cores (comprimentos de onda de radiação) a diferentes temperaturas. Em 1800, William Herschel descobriu que uma radiação semelhante à luz, mas invisível, é também emitida por corpos. Esta radiação “infravermelha”, juntamente com a radiação de luz visível, e sua relação com o aquecimento dos corpos, passou a ser investigada experimentalmente no início do século XVIII, com John Leslie (Edimburgo) e Pierre Prévost (Genebra). Ficou estabelecido, por exemplo, que em condições de equilíbrio cada corpo absorve tanta radiação quanto emi-

⁵ O tratamento mais completo do assunto é Kangro (1976), especialmente sobre a parte experimental. A continuidade do projeto de elaboração do “modelo causal” referente aos caminhos que levaram à física quântica (PESSOA, 2000, 2004) se baseará neste livro. Em português, essa história é contada por Martins (1992) e Studart (2000), sendo que este último é acompanhado por duas traduções de Planck.

te. Em 1858, Balfour Stewart (Edimburgo) obteve dados experimentais que o levaram, por indução, a uma lei empírica que Gustav Kirchhoff, de Heidelberg, anunciaria, um ano depois, de maneira independente, com maior sofisticação matemática, a partir da constatação espectroscópica de que o gás de sódio *absorve* fortemente nos mesmos comprimentos de onda (o par de linhas D, no espectro amarelo) em que *emite* fortemente (SIEGEL, 1976). A lei de Kirchhoff diz que todos os corpos seguem uma lei térmica universal: à mesma temperatura, a razão entre a emissividade e a absorvibilidade, para cada comprimento-de-onda, é a mesma para cada corpo.

Em 1860, Kirchhoff simplificou a abordagem teórica ao considerar corpos que absorvem toda radiação incidente, chamados “corpos negros” pelo fato de não refletirem nenhuma parte desta radiação incidente. Apenas 35 anos depois os físicos experimentais conseguiriam construir cavidades radiativas que se aproximavam bem do comportamento de um corpo negro (LUMMER & WIEN, 1895). Tais cavidades consistiam em um pequeno buraco incrustado num corpo mantido à temperatura constante, de forma que praticamente nenhuma luz incidente no buraco conseguia escapar. Toda luz ou radiação térmica que saísse deste buraco se originaria do processo de emissão.

Em torno de 1878, os físicos passaram a buscar uma lei que exprimisse a emissão de radiação de um corpo negro, em função da temperatura e do comprimento-de-onda. Josef Stefan (Viena) conseguiu, no ano seguinte, mostrar experimentalmente que a emissão total de radiação (ou seja, integrada para todos os comprimentos-de-onda) é proporcional à quarta potência da temperatura. Uma explicação para isso foi fornecida em 1884 por Ludwig Boltzmann, trabalhando em Viena. Ele partiu de uma analogia teórica entre radiação e gás ideal, atribuindo à radiação não só uma temperatura, mas também uma pressão, conforme fora determinado por Adolfo Bartoli (Florença) em 1876. Construiu um modelo no qual a radiação exercia uma pressão em um pistão móvel e era refletida por este, conseguindo desta forma derivar a lei de Stefan.

Esses trabalhos tratavam da dependência da radiação com a temperatura da fonte, mas não havia ainda uma explicação para a distribuição da radiação em diferentes comprimentos-de-onda (para uma mesma temperatura). Em 1887, o russo Vladimir Michelson, que trabalhava como visitante em Berlim, teve a idéia de associar o comprimento de onda da radiação emitida por uma molécula em um corpo negro à velocidade desta molécula.

Ora, desde 1860 sabia-se que as velocidades das moléculas de um gás seguem a distribuição de Maxwell, e tal distribuição se assemelha à distribuição da radiação ao longo dos comprimentos de onda. No entanto, Michelson não conseguiu derivar uma lei de radiação. O problema despertava interesse, também, por causa do interesse industrial que havia em se determinar as altas temperaturas de metais derretidos.

O problema começou a ser resolvido por Willy Wien, que trabalhava no *Physikalisch-Technische Reichsanstalt* (PTR) em Berlim. Em 1894, modificou o modelo do pistão de Boltzmann, substituindo o pistão por uma esfera perfeitamente refletora que se contraía lentamente. Tal contração era “adiabática” (não envolvia calor), e disto pode-se mostrar que o produto da temperatura T pelo comprimento de onda λ é uma constante, chamada “constante adiabática”. Obteve uma relação importante, chamada “lei de deslocamento” de Wien, que permaneceria verdadeira mesmo depois do advento da física quântica. Tal “lei”, na verdade, é um “esquema de lei” (no mesmo sentido que a 2ª lei de Newton, que só se torna aplicável quando a força é substituída por uma expressão definida). Ela diz que a densidade de energia $u(\lambda, T)$ da radiação emitida por um corpo negro é proporcional a uma função de λT (produto de λ e T):⁶

$$u(\lambda, T) = \lambda^{-5} \cdot \phi(\lambda T). \quad (1)$$

Uma conseqüência verificável desta expressão geral era o fato de que, para cada temperatura T , o valor máximo de $u(\lambda, T)$ se dá num comprimento-de-onda λ_{\max} , de tal forma que o produto $\lambda_{\max} \cdot T$ é uma constante para qualquer temperatura.

O problema agora seria determinar a expressão exata de $\phi(\lambda T)$. Em 1896, supondo a distribuição de velocidades de Maxwell, para as moléculas emissoras de radiação, e a dependência do comprimento de onda emitido com as velocidades (efeito Doppler óptico), concluiu que $\phi(\lambda T) = c_1 \cdot \exp[-c_2/(\lambda T)]$, onde c_1 e c_2 são constantes positivas. A lei de radiação de Wien seria então:

$$u(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} \cdot \exp[-c_2/(\lambda T)]. \quad (2)$$

⁶ Esta não é a notação original de Wien, mas uma reelaboração de Larmor (1900), reproduzida por Jammer (1966, p. 8), segundo nos conta Kangro (1976, p. 46).

Um resultado semelhante foi publicado um mês antes pelo físico experimental Friedrich Paschen (Hannover), que buscou por indução uma lei a partir de dados referentes a comprimentos-de-onda curtos. Temos assim mais um caso de descoberta independente, envolvendo um caminho empírico e outro teórico (como acontecera com Stewart e Kirchhoff).

A precisão experimental obtida por Paschen seria superada, nos anos seguintes, pela técnica desenvolvida por Heinrich Rubens, do Technische Hochschule de Berlim. A tecnologia para conseguir medições precisas de radiação se baseava em dois instrumentos fundamentais desenvolvidos nos Estados Unidos. A grade de difração, que Henry Rowland (Baltimore) conseguira em 1880 aperfeiçoar para 15 mil ranhuras por polegada, era usada para obter radiação com comprimento de onda bem definido. O bolômetro, de Samuel Langley (Pittsburgh), era um detector de radiação 10 vezes mais sensível que os anteriores, que consistia de uma ponte de Wheatstone com dois braços de platina, cuja resistência varia com a temperatura. A inovação de Rubens era conhecida como “método dos raios residuais”, que amplificava, através da reflexão múltipla, os raios infravermelhos de comprimentos de onda longos. Outra dificuldade em se obter dados precisos era a emissão de radiação pelos gases (ver seção 9).

Em 1898-99, Max Planck (Berlim) aplicou com sucesso as técnicas termodinâmicas (Rudolf Clausius, 1854) e eletrodinâmicas clássicas (James Maxwell, 1873) para explicar a lei de radiação de Wien. Usando a eletrodinâmica, obteve uma relação entre a energia média dos osciladores de frequência n do corpo negro, $U(\nu, T)$, e a densidade de energia $u(\nu, T)$ expressa em termos da mesma frequência n da radiação:⁷ $U(\nu, T) = (c^3/8\pi\nu) \cdot u(\nu, T)$. Utilizou também a relação termodinâmica entre U e a entropia S , que no equilíbrio é dada por $dS/dU = 1/T$.

Para a lei de Wien expressa em termos da frequência (e de constantes a e b),

$$u(\nu, T) = (8\pi b \nu^3/c^3) \exp(-a\nu/T), \quad (2a)$$

⁷ Para converter o diferencial de energia $u(\lambda)d\lambda$ da radiação, escrita em termos do comprimento de onda λ , para a expressão $u(\nu)d\nu$ em termos da frequência n , basta considerar que $\lambda=c/\nu$, e portanto $d\lambda=(-c/\nu^2) d\nu$, onde c é a velocidade da luz no vácuo. A notação em termos de comprimento de onda era preferível para fins de comparação com os dados experimentais (Figura 2), mas na comparação com os osciladores do corpo negro (que não tinham um comprimento de onda associado) era necessário trabalhar em termos de frequência.

obteve a seguinte expressão para a entropia S dos osciladores (a expressão para a entropia da radiação tem forma semelhante):

$$S = (U/av) \cdot \ln (U/bv). \quad (3)$$

A partir dessa expressão, mostra-se que a entropia satisfaz a seguinte equação diferencial, com $\alpha = 1/(av)$:

$$d^2S/dU^2 = \alpha/U. \quad (4)$$

Até o final de 1899, medições fotométricas de Paschen continuavam confirmando a lei de Wien.

3. Lei de Radiação de Planck e a quantização de energia

Em 1898, Hermann Beckmann (Tübingen), usando o método dos raios residuais, notou um desvio do expoente da lei de Paschen-Wien. Em fevereiro de 1899, Otto Lummer & Ernst Pringsheim, do mesmo PTR onde trabalhava Wien, notaram pequenos desvios para comprimentos de onda altos. No entanto, a interpretação dada para essas discrepâncias era de que seriam erros experimentais.

Os primeiros a anunciarem que o erro estava na lei e não nos dados foram os mesmos Lummer & Pringsheim, em novembro de 1899. Isso estimulou a proposta de novas leis empíricas de radiação, como as de Thiesen (fevereiro de 1900) e Lummer-Jahke (outubro de 1900).

Paralelamente a isso, em junho de 1900, John Strutt, conhecido como Lorde Rayleigh, do Royal Institution de Londres, derivou teoricamente uma outra lei de radiação, sendo que sua constante multiplicativa C seria corrigida por James Jeans em 1905:

$$u(\lambda, T) = C \lambda^{-5} \cdot \lambda T. \quad (5)$$

Está claro que a lei de Rayleigh-Jeans seguia a lei de deslocamento (equação 1), com $\phi(\lambda T) = C \lambda T$, mas ela incorporava o “princípio de equipartição de energia” da mecânica estatística clássica. Tal princípio fora introduzido por Maxwell em 1860, ao considerar que a energia cinética das moléculas de um gás ideal se distribuiria igualmente por todos os graus de

liberdade da molécula (no caso de uma molécula monoatômica, haveria três graus de liberdade, correspondendo às translações ao longo das três dimensões espaciais).⁸ A partir de 1886, Peter Tait e William Thomson (futuro Lord Kelvin) começaram a lançar dúvidas sobre a validade de tal princípio, pois não explicava o calor específico de gases (para tanto, deveria haver mais graus de liberdade do que seria explicado pelos modelos mecânicos).

O próprio Wien reconheceu, em um artigo publicado em agosto, que sua derivação, assim como a justificação teórica de Planck, tinham limitações. Planck só se deu conta dos problemas em 7 de outubro de 1900, com o anúncio feito por seus colegas Rubens & Kurlbaum de que medições mais precisas claramente desviavam da previsão de Wien.⁹ Doze dias depois, Planck apresentou sua solução para o problema.

Ciente de que a lei de Rayleigh funcionava bem para comprimentos de onda longos, região em que a lei de Wien falhava (Figura 2), escreveu a expressão para a entropia dos osciladores do corpo negro e obteve a seguinte expressão, surpreendentemente próxima à equação 4:

$$d^2S/dU^2 = \text{const.}/U^2. \quad (6)$$

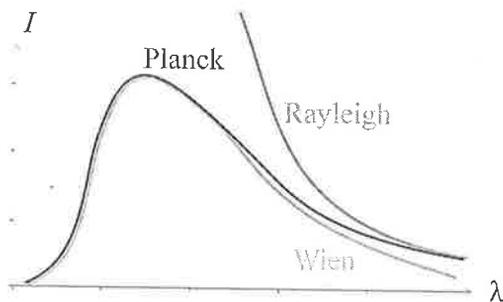


Figura 2: Comparação das previsões das leis de radiação de Wien, Rayleigh e Planck.

⁸ Na verdade, esse princípio de equipartição de energia já aparecera em uma publicação de John Waterston, de Bombaim, em 1845, mas seu trabalho fora ignorado. Rayleigh comporia o seguinte cenário contrafactual em 1892, na introdução do artigo de Waterston que seria finalmente publicado no *Philosophical Transactions* da Royal Society: "A omissão em publicá-lo na época foi um infortúnio que provavelmente atrasou o desenvolvimento do assunto em dez ou quinze anos [...]" (citado por JAMMER, 1966, p. 13).

⁹ Em 1923, Planck exprimiria seu agradecimento a Rubens com um cenário contrafactual: "[...] sem a intervenção de Rubens, a formulação da lei de radiação e conseqüentemente a fundação da teoria quântica teriam talvez ocorrido de uma maneira totalmente diferente e talvez até fora da Alemanha" (cf. MEHRA & RECHENBERG, 1982, p. 41).

A única diferença entre as duas expressões da entropia, correspondendo às leis de Wien e de Rayleigh, é que a primeira é proporcional a $1/U$, ao passo que a segunda a $1/U^2$. Planck buscou interpolar entre essas duas expressões, obtendo uma sugestão que recaísse nos casos anteriores nos limites de comprimentos de onda curtos e longos. Sua tentativa foi $1/(\beta U + U^2)$, onde β seria uma grandeza que depende de λ . Com sua nova sugestão:

$$d^2S/dU^2 = \alpha/(\beta U + U^2), \quad (7)$$

obteve a lei de radiação de Planck, que seguia a lei de deslocamento com $\phi(\lambda T) = c_1 [\exp(c_2/\lambda T - 1)]^{-1}$:

$$u(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} \cdot [\exp(c_2/\lambda T - 1)]^{-1}. \quad (8)$$

Na notação de Planck (comparar com a lei de Wien, equação 2a), em termos de freqüências:

$$u(n, T) = (8\pi b v^3/c^3) [\exp(-av/T) - 1]^{-1}. \quad (8a)$$

Essa lei descrevia de maneira excelente os dados de Rubens & Kurlbaum, e seria confirmado nos meses seguintes também por Paschen. Nesta derivação, $\alpha = 1/(av)$ e $\beta = bv$. A constante b já aparecera na derivação que Planck fizera em meados de 1899 para obter a entropia da lei de Wien (equação 3), e ele pôde calcular seu valor a partir dos dados experimentais de Paschen. A constante b viria a ser chamada o “quantum de ação” h , só que a esta altura (outubro 1900) ela era simplesmente uma constante relacionando energia e freqüência:

$$\beta = h v. \quad (9)$$

O problema agora era buscar uma explicação termodinâmica para a lei de radiação de Planck (equação 8). Planck resolveu se dobrar à concepção probabilista de entropia adotada por Boltzmann a partir de 1877, e à qual ele resistia. Segundo esta concepção, a entropia podia ser expressa como $S = k_b \cdot \ln J$, onde k_b é a chamada constante de Boltzmann e J seria o número de maneiras de distribuir P elementos de energia ϵ entre n moléculas. A equação que Planck encontrou no artigo de 1877 foi a seguinte:

$$\ln J = n [(P/n + 1) \ln(P/n + 1) - (P/n) \ln(P/n)]. \quad (10)$$

que corresponde a seguinte expressão de entropia:

$$S = k_B n [(P/n + 1) \ln(P/n + 1) - (P/n) \ln(P/n)]. \quad (10a)$$

Ora, ela era formalmente idêntica à expressão da entropia para a lei de radiação de Planck, que satisfazia a equação 7:

$$S = \alpha [(U/\beta + 1) \ln(U/\beta + 1) - (U/\beta) \ln(U/\beta)]. \quad (11)$$

Esta analogia formal levou-o então a identificar P/n com U/β . Ou seja, nU , que é a energia total do sistema – pois U é a energia média e n o número de osciladores – seria igual a $P\beta$. Mas a energia total do sistema é $P\varepsilon$, de forma que β passou a ser identificado com a energia ε de cada elemento discreto postulado no método de Boltzmann.

Planck se viu assim forçado a postular a *quantização de energia* dos osciladores do corpo. Considerando a relação entre β e ν da equação 9 (onde β não era ainda interpretado como um unidade discreta de energia), o valor deste quantum de energia é dado por:

$$\varepsilon = h\nu. \quad (12)$$

4. 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

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.

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 óptico, 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 equação 3). Exprimindo-a em termos da dependência de volume, Einstein obteve:

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

Identificando as expressões das equações 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 :

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

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

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. (Apud MEHRA & RECHENBERG, 1982, p. 80).¹²

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 equação 15, a frequência da luz emitida tem que ser menor ou igual à da luz absorvida.

5. O efeito fotoelétrico

A segunda evidência experimental explorada por Einstein corresponde ao efeito “fotoelétrico” (ou, mais precisamente, “efeito fotoemissivo”). Este

¹² 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. Paty (2006, cap. 2) indica 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, 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.

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 Hallwachs (1888), Wiedemann & Ebert (1888) e os professores secundaristas Elster & Geitel (1890), além do russo Stoletov (1889) e do italiano 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 na 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.

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 (WHEATON, 1978). 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 em 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!¹³

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 em 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 E. Ladenburg chegaram perto desta descoberta, independentemente de Einstein.

6. 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 1895-6, 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

¹³ Isso é sublinhado claramente por Wheaton (1978, pp. 74 e 318), mas autores como Jammer (1966, p. 35) dão a impressão de que Lenard, e mesmo Stoletov, teriam mostrado que “a energia dos elétrons ejetados se eleva com o aumento da diferença $\nu - \nu_0$ ”. Segundo Jammer, Erich Ladenburg teria “verificado irrefutavelmente” em 1903 que a dependência entre a energia e frequência é linear. Wheaton (1978, p. 320), porém, afirma que tal dependência só seria explorada por Ladenburg a partir de 1907.

em 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 se 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 idéia 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 seria 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 (McCORMACH, 1967).

Em 1909, Geoffrey I. Taylor,¹⁴ aluno de Thomson em Cambridge, realizou uma série de experimentos de interferência de luz para feixes de diferentes intensidades. O feixe mais fraco levou três meses para formar a franja de interferência, mas o aspecto desta franja era idêntico ao obtido nos outros experimentos (ao contrário do que imaginava 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. (TAYLOR, 1909)

No final, estima que a energia contida em cada uma dessas unidades é menor do que $1,6 \times 10^{-16}$ 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 5×10^{-12} ergs.

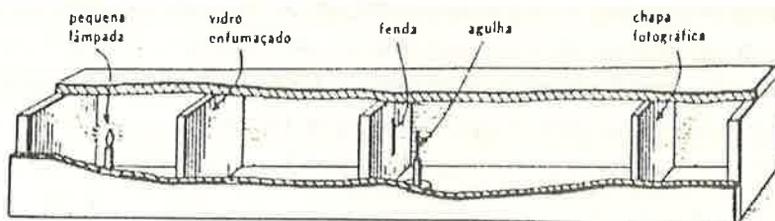


Figura 3: Experimento de Taylor (1909) (figura extraída de PSSC, 1971, IV, p. 179).

¹⁴ Taylor, posteriormente, teria uma brilhante carreira na área de mecânica de fluidos e sólidos (ver BRENNER & STONE, 2000).

7. Aspecto dual dos raios X

Um outro problema, que Wheaton (1983, pp. 85-7) chama de “paradoxo da quantidade”, surgia 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 5), 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 em 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 em 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, contribuindo 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 e 208).

8. Calores específicos de sólidos

Em 1819, Pierre Dulong e Alexis Petit propuseram, a partir de medições, a lei empírica de que os átomos de corpos sólidos simples têm exatamente a mesma capacidade térmica (produto do calor específico e do peso atômico), em torno do valor seis calorias por mol. Em 1832, Franz Neumann estendeu esse resultado para corpos compostos. Medições extensas de Victor Regnault (1841) confirmaram a lei de Dulong & Petit para todos os corpos sólidos estudados.

Com o passar do tempo, porém, ficou claro que alguns materiais violavam a lei de Dulong & Petit, como o diamante, cuja capacidade térmica à temperatura ambiente é 30% do valor dos outros materiais. Em 1872, Heinrich Weber, pesquisador em Zurique e futuro professor de Einstein, investigou a capacidade térmica do diamante de -50°C até 1300°C , mostrando claramente o desvio da lei clássica de Dulong & Petit (ver Figura 4). Uma explicação clássica para esse desvio foi sugerida por Boltzmann (1871) e levada adiante por Franz Richarz, em 1893.

Mais para o final do século, o desvio a baixas temperaturas de outras substâncias foi investigado. Em 1896, Karl von Linde conseguiu liquefazer o ar, em sua fábrica de gelo em Munique, usando o efeito Joule-Thomson (resfriamento de gás não-ideal em expansão, devido ao consumo de energia térmica para vencer a atração intermolecular). Com esse avanço técnico, medições mais precisas levaram U. Behn (1898), em Berlim, e os britânicos W.A. Tilden (1903) e James Dewar (1905) a concluir que o calor específico dos sólidos tende a zero à medida que se aproxima da temperatura de zero absoluto (-273°C).

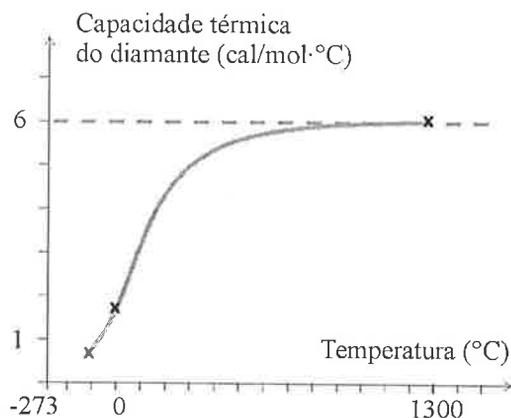


Figura 4: Dados de Weber (1972) para a capacidade térmica do diamante.

Einstein estava ciente desses resultados quando ele resolveu usar, em 1906, a expressão da energia dos osciladores da lei de radiação de Planck (usada na derivação da equação 8) para o cálculo do calor específico. Obteve uma nova lei para os calores específicos dos sólidos, que tendia a zero a baixíssimas temperaturas. A partir de 1910, dados experimentais do grupo de Walter Nernst, em Berlim, confirmariam a lei de Einstein, descartando uma proposta empírica de lei feita por Maximilian Reinganus.

Um ano depois, porém, medições mais precisas mostraram desvios da lei de Einstein, que seriam corrigidas por Peter Debye em 1912. O holandês, que trabalhava em Zurique, corrigiu uma simplificação imposta por Einstein, que considerou que os osciladores do corpo não interagiriam, e levou em conta os modos coletivos de vibração do sólido. Obteve uma lei segundo a qual o calor específico varia com T^3 a baixíssimas temperaturas.

Mas voltando a Einstein, é interessante que sua derivação não tenha feito uso direto da hipótese da quantização! Ele utilizou a expressão dos osciladores da lei de radiação de Planck, mas não precisou da explicação microscópica desta lei. Isso claramente indica que a lei de Einstein sobre os calores específicos de sólidos poderia ter sido derivada sem a hipótese da quantização.

Será que a lei de Einstein poderia ter sido descoberta de maneira independente da lei de radiação de Planck? Ao menos, a evidência experimental do lado dos calores específicos tinha sido dada anteriormente, claramente em 1898 e mesmo antes, a partir do trabalho de Weber de 1872. Esta possibilidade de derivação independente da lei de Einstein é um problema ainda não resolvido na abordagem das histórias contrafactuais. A energia média dos osciladores da equação 8 foi descoberta devido a uma interpolação das expressões da entropia das leis de radiação de Wien e Rayleigh. Semelhante interpolação provavelmente não surgiria no contexto dos calores específicos, já que aparentemente não haveria razão para se derivar uma relação equivalente à lei de Wien. Mas talvez a lei de Einstein pudesse ser derivada dos princípios termodinâmicos de outra maneira, teórica ou empírica. Se isso fosse possível (e essa possibilidade poderia ser avaliada a partir de um exame da matemática subjacente ao problema dos calores específicos), então a passagem para a hipótese de quantização seria a mesma que a feita por Planck. Neste caso, teríamos uma história contrafactual para o surgimento da física quântica dentro da área dos calores específicos dos sólidos!

Jammer (1966, p. 1) aventa tal possibilidade.

Teria sido possível que outros problemas em questão na época, se trabalhados consistentemente, tivessem levado à mesma reorientação conceitual, como feita pelo problema da radiação do corpo negro? Considere, por exemplo, a conhecida irreconciliabilidade com a física clássica do calor específico de sólidos a baixas temperaturas, um problema cuja solução foi obtida *de facto* em termos de conceitos formados na resolução do problema do corpo negro. Pode-se conjecturar como uma solução independente e consistente desse problema sobre o calor específico poderia ter influenciado o progresso da física teórica [...].

9. Espectroscopia e modelos atômicos

Um quarto caminho que poderia ter levado à noção de que a energia dos átomos e moléculas é dada de maneira discreta foi o da espectroscopia.

A primeira observação de linhas discretas ao se decompor o espectro da luz, por meio de um prisma, foi feita por William Wollaston, em 1802. Ele percebeu que no espectro da luz solar havia algumas linhas escuras de posição espectral fixa. Investigando a decomposição espectral de chamas, Josef von Fraunhofer (1814) percebeu que algumas das linhas luminosas observadas (as linhas D que mencionamos na seção 2) correspondiam exatamente às linhas escuras da luz solar; posteriormente, o escocês William Swan (1832) mostraria que essas linhas correspondiam às do sódio. Após muita discussão e experimentação, Kirchhoff (1859) pôde concluir que um certo gás, como o sódio na atmosfera solar, absorve luz do mesmo comprimento-de-onda que emite. Assim, seria a presença de gases na atmosfera solar que causa as linhas escuras no espectro solar. Juntamente com Robert Bunsen, desenvolveu um aparelho para análise espectral de sais, que eram salpicados em uma chama com pouca cor, do “bico de Bunsen”. A luz emitida era decomposta por um prisma e observada por meio de um telescópio. Com isso, determinaram o espectro característico de diversos elementos, espectro esse que é independente dos compostos dos quais o elemento participa.

Espectros múltiplos em sais e em gases foram sistematicamente investigados, culminando com as tabelas do sueco Anders Ångström (1868), que se tornaram referência para os espectroscopistas. O químico Alexander Mitscherlich, de Kassel, lançou a idéia, em 1864, de que a espectroscopia revelaria traços essenciais da estrutura interna de átomos e moléculas. O problema da origem dos espectros discretos e das faixas de espectro conti-

nuo não tinha solução satisfatória. Já o problema de descrever as relações numéricas dos espectros foi inicialmente abordado buscando-se relações harmônicas nos espectros (MASCART; LECOQ; STONEY, 1869-71). Diversas regularidades entre espectros de elementos químicos análogos foram descobertas. Mesmo assim, Schuster concluiu, em 1881, que nenhuma lei numérica envolvendo linhas espectrais havia sido descoberta, o que desencorajou vários pesquisadores. Semelhantemente, de Paris, Alfred Cornu afirmou em 1885 que nenhuma lei simples e geral poderia ser encontrada.

No entanto, em 1885 o professor secundarista Johann Balmer, da Basileia, publicou sua famosa lei numérica que daria conta dos comprimentos de onda λ de diferentes séries no espectro do gás de hidrogênio:

$$\lambda = ct. m^2 / (m^2 - n^2), \quad (15)$$

com $m = 2, 3, 4, \dots$, $n = 1, 2, 3, 4, \dots$, e $m > n$. A fórmula descrevia bem os dados da série já conhecida na época, correspondendo a $n=2$, e viria a ser confirmada para outros valores de n . A partir daí, leis análogas foram descobertas para alguns outros elementos.

Em 1900, o sueco Johannes Rydberg encontrou um princípio que seria posteriormente redescoberto e divulgado por Walther Ritz (1908), de Tübingen, falecido prematuramente em 1909. Este chamado “princípio de combinação de Ritz” afirma que a frequência ν de qualquer linha espectral pode ser expressa como a diferença entre dois termos, chamados “termos espectrais”, cada qual dependendo de um número inteiro n :

$$\nu = f(n_1, \dots) - f(n_2, \dots). \quad (16)$$

Esta lei é importante pois ela antecipou a expressão de Bohr para a frequência de um fóton emitido: $\nu = E_1/h - E_2/h$.

A partir de 1910, quando a importância da nascente teoria quântica começou a ser percebida, diferentes tentativas de construir um modelo quântico do átomo foram feitas. Após os modelos insatisfatórios de Arthur Haas (Viena, 1910) e John Nicholson (Cambridge, 1912), foi um aluno de Rutherford em Manchester, o dinamarquês Niels Bohr, que em 1913 resolveu o problema.

Um modelo quântico do átomo, baseado nos resultados da espectroscopia (especialmente a lei de combinação de Ritz), poderia ter precedido

historicamente a quantização de energia e o quantum de luz? É possível que sim. Em 1900 já se conhecia o princípio de combinação de Ritz, que, juntamente com a noção de que cada átomo emite apenas uma linha espectral por vez (CONWAY, 1907), poderia ter levado a um modelo atômico em que as emissões luminosas dependessem da *diferença* entre níveis vibracionais do átomo.

Friedrich Hund (1966, p. 24), que trabalhou em espectroscopia nos primórdios da mecânica quântica e que posteriormente escreveu sobre a história da física quântica, examinou alguns caminhos contrafactuais que partiriam da velha teoria quântica em direção à nova mecânica quântica, e concluiu que neste período posterior o caminho da espectroscopia seria bastante plausível.

Já que há um caminho lógico da teoria quântica preliminar da regra de correspondência para a forma matricial da mecânica quântica (um caminho que é bem conhecido), podemos dizer: as leis espectrais como a única base empírica poderiam ter levado a uma teoria quântica inteira.

10. Outros caminhos possíveis

Alguns outros caminhos possíveis para a física quântica podem ser sugeridos. Neville Mott (1964, pp. 403-5), por exemplo, considera o campo da *teoria cinética dos gases*. A quantização dos átomos poderia ter sido deduzida da observação de que qualquer energia transferida para uma molécula monoatômica aumenta apenas sua energia cinética, e não a energia dos graus internos de liberdade. A energia ΔE necessária para excitar o estado interno desta molécula é da ordem de 5 elétron-volts, ao passo que as energias transferidas nas colisões são apenas da ordem de $(3/2)k_B T$, em torno de 1/13 de elétron-volt à temperatura ambiente. Era isso que possibilitava considerar as moléculas de gases esferas duras, na teoria cinética. Evidência direta para a existência de um estado excitado de energia discretizada, em experimentos nos quais elétrons passam por um gás – e ou não, perdem nenhuma energia de maneira apreciável ou perdem uma energia correspondente ao primeiro estado excitado da molécula do gás –, foi obtida por Franck & Hertz (1914) e, conforme menciona Mott, Dymond & Watson (1929). No entanto, a interpretação do resultado de tais experimentos não é tão unívoca como sugere Mott, pois os próprios Franck & Hertz interpretaram inicialmente seus resultados como indicando que os 5 elétron-volts

(para o gás de mercúrio) eram a energia de *ionização* dos elétrons do mercúrio (MEHRA & RECHENBERG, 1982, p. 199).

Um caminho mais teórico que os examinados até aqui partiria da *analogia mecânico-óptica* de William Rowan Hamilton (Dublin, 1834), que poderia ter levado diretamente à descoberta da dualidade onda-partícula da matéria (ao contrário dos caminhos anteriores, que chegariam à física quântica pela quantização da energia dos átomos materiais ou da radiação). Segundo essa analogia, a óptica geométrica corresponde à mecânica newtoniana; a questão então seria: qual é a mecânica que corresponde à óptica ondulatória? Em seu segundo artigo sobre a mecânica quântica, Erwin Schrödinger derivou sua equação da mecânica ondulatória a partir da teoria de Hamilton, o que indica que essa teria sido uma história possível. No entanto, é relevante que, de fato, Schrödinger *não* seguiu este caminho em sua derivação original (WESSELS, 1979).

Na química já tinha aparecido um fenômeno que, posteriormente, seria visto como tendo origem quântica: o *mesomerismo* dos anéis de benzeno. Em 1865, o alemão August Kekulé, trabalhando em Ghent, na Bélgica, lançou a hipótese de que haveria uma espécie de oscilação envolvendo as ligações simples e duplas entre os átomos de carbono no anel de benzeno, de forma que essas ligações deveriam ser tratadas como idênticas. O alemão Johannes Thiele desenvolveu essa hipótese em 1899, assim como o inglês Christopher Ingold (1922).¹⁵ Com o advento da mecânica quântica, o conceito de “ressonância”, introduzido por Werner Heisenberg (1926) para descrever os estados eletrônicos do átomo de hélio, foi aplicado por Linus Pauling e George Wheland (1933) para o benzeno (ver BRUSH, 1999). Apesar de o mesomerismo exprimir, desde cedo, um aspecto qualitativo do princípio quântico de superposição, esse fenômeno por si só, ao que parece, não poderia levar a uma determinação quantitativa de algum parâmetro quântico, de forma que um caminho contrafactual por esta via deve ser descartado.

À medida que novas perspectivas da teoria quântica são desenvolvidas, novas histórias contrafactuais são sugeridas. Recentemente, Luciën Hardy fez o seguinte comentário:

¹⁵ Ingold cunharia o termo “mesomerismo” em 1933, em oposição ao “tautomerismo”, que envolve a coexistência de moléculas em duas configurações distintas, ao contrário da configuração única do mesomerismo. A distinção é correlata àquela entre estado puro (superposição) e estado misto (mistura estatística), na física quântica.

Imagine duas caixas e uma bola; se a bola está em uma caixa ela representa o dígito binário “1”, na outra caixa ela representa “0”. Na teoria clássica de probabilidade, essas são as únicas opções. Mas na teoria quântica a bola pode estar em ambas as caixas ao mesmo tempo – há um contínuo de estados entre 0 e 1. [...] A teoria quântica poderia ter sido descoberta se algum matemático inteligente [da era vitoriana] tivesse percebido que um salto é necessário para se passar de 0 para 1, e tivesse feito a pergunta crucial: há alguma maneira de chegar lá de maneira contínua? (citação tirada de CHOWN, 2001, p. 5; ver também HARDY, 2001, p. 27)

11. Conclusões

Examinamos diferentes áreas da física do século XIX, cujos objetos de estudo acabariam sendo tratados pela velha física quântica. Se cem cópias da Terra tivessem sido produzidas em 1800, conforme aventamos na seção 1, quais áreas teriam levado à física quântica, e com quais probabilidades? O caminho que de fato foi trilhado para a descoberta da quantização de energia na matéria, o campo da radiação térmica, pode ser visto como um caminho bastante provável, pelo menos até a derivação da lei de radiação de Planck. É curioso que este campo não dependeu das descobertas empíricas feitas em 1895-6 (mencionadas na seção 6) para progredir. A passagem desta lei para a hipótese quântica, porém, dependeu da interpretação probabilista de entropia feita por Boltzmann, e a obtenção desta interpretação não parece ter sido um avanço muito provável.

Já o campo dos efeitos ópticos não parece apresentar semelhante “gargalo” em direção à física quântica. O trabalho genial de Einstein não pode ser considerado um avanço provável em sua época, apesar de ele só necessitar da lei de radiação de Wien e da teoria cinética dos gases para derivar o quantum de radiação. Mas a maneira como Thomson Tateava em direção a uma teoria granular da luz, com base no “paradoxo da quantidade” da fotoionização, parece ser um caminho bastante provável, pelo menos em direção a uma concepção qualitativa do aspecto granular da radiação. Bragg também foi levado a uma concepção dualista do raio X devido ao “paradoxo da qualidade”. E a lei do efeito fotoelétrico poderia ter sido descoberta empiricamente, apesar de Lenard não o ter feito. No entanto, deve se reconhecer que essas linhas de progresso científico dependeram crucialmente da descoberta do elétron e do raio X, em 1895-6. Em suma, o caminho pelos efeitos ópticos parece que seria tão provável quanto aquele pela radiação térmica, senão mais.

O campo dos calores específicos de sólidos talvez pudesse chegar à lei de Einstein de maneira independente, dada a evidência precoce de que tais calores específicos tendem a zero na temperatura de zero absoluto. Porém, o mesmo gargalo de aplicação da teoria de Boltzmann existiria para se chegar à noção de quantização. No entanto, talvez o acoplamento deste campo com a teoria cinética dos gases, conforme sugestão de Jammer (1966, pp. 1-2, 60), tornasse esse caminho mais provável.

Por fim, o caminho da espectroscopia fornecia evidência direta de quantização nas linhas espectrais discretas. No entanto, a noção clássica de que cada linha corresponde a um oscilador de frequência definida explicava bem os espectros, e só a partir do princípio de combinação de Ritz (RYDBERG, 1900) é que surgiu evidência de que os próprios níveis energéticos dos átomos seriam discretos, como descobriria Bohr. Assim, este caminho parece menos provável que os dois primeiros.

De modo geral, é o progresso experimental que marca o passo dos caminhos mais prováveis, e portanto uma investigação mais detalhada do desenvolvimento técnico é importante para melhorar nossas conjecturas. Contudo, vimos diversos exemplos de como vãos teóricos aparentemente improváveis fazem a ciência avançar mais rapidamente do que se esperaria numa metodologia indutivista. O trabalho de Hamilton pode ser classificado desta maneira, mas é curioso que o passo teórico seguinte em direção à mecânica quântica não tenha sido proposto antes de 1926.

Referências bibliográficas

- BRENNER, M. P.; STONE, H. A. Modern classical physics through the work of G. I. Taylor. *Physics Today* 53(5): 30-5, 2000.
- BRUSH, S. G. Dynamics of theory change in chemistry: part 1. The benzene problem 1865-1945. *Studies in the History and Philosophy of Science* 30: 21-79, 1999.
- CHOWN, M. Back to the future: 19th century physicists almost discovered quantum theory. *New Scientist* 2288: 5, 2001.
- GRIFFITHS, R. B. Consistent histories and the interpretation of quantum mechanics. *Journal of Statistical Physics* 36: 219-72, 1984.
- HARDY, L. Quantum theory from five reasonable axioms. 2001. 34 pp. <http://xxx.lanl.gov/abs/quantum-ph/0101012>.
- HUND, F. Paths to quantum theory historically viewed. *Physics Today* 19(8): 23-9, 1966.

- JAMMER, M. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1966.
- KANGRO, H. *Early History of Planck's Radiation Law*. Londres: Taylor & Francis, 1976. (Original em alemão: 1970.)
- MARTINS, R. C. Planck e o nascimento da mecânica quântica: sugestões para estudo de condicionantes históricos recentes. In: ÉVORA, F. R. R. (Org.). *Século XIX: o nascimento da ciência contemporânea*. Campinas: Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência, 1992. (Coleção CLE 11)
- MCCORMMACH, R. J. J. Thomson and the structure of light. *British Journal for the History of Science* 3: 362-87, 1967.
- MEHRA, J.; RECHENBERG, H. *The Historical Development of Quantum Theory*. Nova Iorque: Springer, 1982, v. 1.
- MOTT, N. On teaching quantum phenomena. *Contemporary Physics* 5: 401-18, 1964.
- PATY, M. *Einstein, les quanta et le réel*, 2006. (Em preparação)
- PESSOA JR., O. Histórias contrafactuais: o surgimento da física quântica. *Estudos Avançados* 14(39): 175-204, 2000.
- _____. Modelos causais em história da ciência. In: MARTINS, R. A. et al. (Orgs.). *Filosofia e história da ciência no cone sul: 3º encontro*. (Edição Eletrônica: ISBN 85-904198-1-9.) Campinas: AFHIC, 2004.
- PSSC – Physical Science Study Committee. *Física, Parte IV: Eletricidade e Estrutura Atômica*. São Paulo: Edart, 1971. (Original em inglês: 1960.)
- SIEGEL, D. M. Balfour Stewart and Gustav Robert Kirchhoff: two independent approaches to “Kirchhoff’s radiation law”. *Isis* 67, 565-600, 1976.
- STUDART, N. A invenção do conceito de quantum de energia segundo Planck. *Revista Brasileira de Ensino de Física* 22: 523-35, 2000.
- TAYLOR, G. I. Interference fringes with feeble light. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* 15: 114-5, 1909. On-line: www.physik.uni-muenchen.de/leifiphysik/web_ph12/originalarbeiten/taylor/taylor_e.htm.
- WESSELS, L. Schrödinger’s route to wave mechanics. *Studies in the History and Philosophy of Science* 10: 311-40, 1979. ph12/originalarbeiten/taylor/taylor_e.htm.
- WHEATON, B. R. Philipp Lenard and the photoelectric effect, 1889-1911. *Historical Studies in the Physical Sciences* 9: 299-322, 1978.
- _____. *The Tiger and the Shark: Empirical Roots of the Wave-Particle Dualism*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

Agradecimentos

Este artigo se beneficiou de conversas sobre histórias factuais e contrafactuais das ciências físicas que tive com Cibelle Silva, José Luis Silva, Maurício Pietrocola, Michel Paty, Olival Freire Jr. e Valter Bezerra.

FILOSOFIA, CIÊNCIA E HISTÓRIA:
uma homenagem aos 40 anos de colaboração de
Michel Paty com o Brasil

Maurício Pietrocola e Olival Freire Jr.
Organizadores



discurso editorial

São Paulo, 2005