

MODELO QUÂNTICO DO ÁTOMO: UMA ANÁLISE DO ENSINO DAS NOÇÕES DE QUANTUM DE UMA GRANDEZA E COMPORTAMENTO DUAL DA ENERGIA E DA MATÉRIA

Lucilene Correia Ramos* ⁽¹⁾ (IC), José Luis P. B. Silva ⁽¹⁾ (PQ)

lucilene.ramos2@gmail.com

1- Instituto de Química da UFBA, 40.170-115 Salvador-BA.

Palavras-Chave: Quantum de uma grandeza, comportamento dual, modelo quântico do átomo.

RESUMO

Partindo do pressuposto de que as noções de *quantum* de uma grandeza e de comportamento dual (onda/partícula) da radiação e da matéria são dois aspectos básicos para a compreensão de um sistema quântico — a exemplo do átomo — este trabalho teve como objetivo analisar livros didáticos de Química para o ensino médio, aprovados no PNLD para 2012, no que se refere a tais conteúdos. Os resultados revelam insuficiências na elaboração do texto de todos os materiais analisados, principalmente relacionadas falta de clareza dos conceitos da teoria quântica e de articulação com outras informações apresentadas anteriormente no próprio texto. Concluímos, portanto, pela necessidade de detalhamento e aprofundamento dos textos didáticos de química no que se refere aos conteúdos em foco.

INTRODUÇÃO

Para a realização do trabalho aqui relatado consideramos a seguinte questão de pesquisa: *Como as noções de quantum de uma grandeza e de dualidade (onda-partícula) da energia e da matéria aparecem (e se aparecem) nos livros didáticos de Química para o ensino médio?* A escolha desta questão se deu pela relevância do ensino do modelo quântico do átomo na disciplina Química para o ensino médio, dada a variedade de fenômenos que pode prever e descrever, ao mesmo tempo em que vem sendo largamente utilizada nas tecnologias modernas (GRECCA; FREIRE JR, 2003). Em contrapartida, uma análise preliminar em algumas revistas voltadas ao ensino de ciências, aponta que ainda há poucos trabalhos sendo publicados abordando de maneira mais abrangente o ensino da Mecânica Quântica, tanto na disciplina Química quanto na Física, para o ensino médio.

De acordo com os documentos oficiais (PCN, PCN+ e OCN) relativos à educação brasileira o ensino de Química no ensino médio (EM) ao se estabelecer uma base nacional comum de conteúdos da disciplina Química, deve-se considerar uma visão atualizada dos mesmos. Obviamente, uma visão atualizada dos conteúdos da Química deve “contemplar os avanços tanto no conhecimento químico, quanto nas concepções de Química como ciência, sua historicidade e suas implicações sociais (...)” (Brasil, 2006).

Em contraste com tal recomendação, estudos recentes (SILVA; CUNHA, 2009) mostram que pouca literatura tem sido produzida no sentido de discutir propostas de transposição didática no ensino do modelo quântico do átomo. Além disso, fazendo-se uma busca nessas fontes bibliográficas, percebe-se que, apesar de uma quantidade significativa de artigos voltados ao ensino da Mecânica Quântica (MQ) na disciplina Física no ensino médio, poucos artigos estão relacionados diretamente ao ensino de Química, através do modelo quântico do átomo.

Outro fator que justifica a nossa pesquisa diz respeito aos livros didáticos (LD) utilizados pelas escolas públicas. No que diz respeito aos LD (de Física) analisados por

Brockington (2005) em sua dissertação de mestrado, percebe-se uma inadequação dos mesmos quanto ao ensino da Física Moderna Contemporânea (FMC):

[...] nota-se hoje uma tímida tentativa dos autores na adequação de temas de Física Moderna para o ensino em nível médio. Parece haver, no entanto, mais uma preocupação em estar de acordo com os PCNs do que realmente uma tomada de consciência sobre a necessidade de uma profunda reflexão pedagógica. Percebe-se, então, que os temas de FMC limitam-se aos últimos capítulos do último volume das respectivas coleções. (BROCKINGTON, 2005, p.13)

Já em relação aos livros de Química, Silva e Cunha (2009) confirmam que, em detrimento às recomendações dos documentos oficiais, alguns dos livros didáticos selecionados pelas escolas públicas nem mesmo consideravam o modelo quântico do átomo como o mais atual. Por outro lado, outros livros que traziam alguma abordagem sobre tal modelo, apresentavam as noções da teoria quântica de forma insuficiente e inadequada ao ensino médio.

Com base em tais considerações, buscamos analisar os livros didáticos de Química aprovados pelo PNLD para o ano de 2012 a fim de avaliar se concepções acerca do modelo atômico quântico agora aparecem de forma apropriada. Tal análise foi realizada tendo-se como base o relato histórico de como os conceitos de quantização da energia e comportamento dual da energia e da matéria foram elaborados, com base em fontes primárias e secundárias da Teoria Quântica. Apresentamos, a seguir, uma síntese do relato histórico empregado como base para a análise dos LD e, posteriormente, os resultados da análise dos livros didáticos.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Conforme dito anteriormente, a análise dos livros didáticos selecionados foi realizada de acordo com um texto de referência elaborado com base em pesquisas sobre os acontecimentos históricos que levaram à elaboração das concepções de *quantum* de uma grandeza e de dualidade (onda-partícula) da energia e da matéria. Tal escolha se justifica pelo fato de que estas duas concepções surgiram num contexto bastante específico (em relação ao local e ao estágio de desenvolvimento da ciência Física naquele período) sendo essencial conhecermos tal contexto se quisermos entender os princípios que levaram à elaboração da Teoria Quântica.

O primeiro passo em direção à introdução da quantização da energia foi dado a partir da consideração feita por Max Planck (1858 – 1947) de que as paredes do corpo negro eram constituídas por osciladores, que seriam os responsáveis pela emissão e absorção de radiação (DIONÍSIO, 2005). Planck sugeriu que a energia total de tais osciladores poderia estar distribuída entre uma quantidade n de osciladores de maneira descontínua. A fim de dar suporte à sua afirmação, Planck teve que admitir uma distribuição dessa energia em um número definido de partes, cada parte com uma energia mínima determinada pela relação: $\epsilon = h \cdot \nu$ (em que ϵ corresponde ao valor dos elementos de energia distribuídos entre os osciladores; h é uma constante universal, denominada constante de Planck e; ν é a frequência natural de um dado oscilador).

Vale salientar que Planck introduziu tais elementos de energia ϵ e a constante h como um artifício matemático a fim de que sua equação para a radiação do corpo negro mantivesse uma concordância com os dados empíricos. No entanto, o relato histórico indica que, pelo menos num período inicial, Planck não supôs que a energia total dos osciladores fosse, de fato, um múltiplo inteiro dos elementos de energia ϵ (ROSA, 2004). Mesmo porque, ele utilizou de equações para a emissão e absorção de energia

que eram provenientes da teoria eletromagnética, a qual prevê a continuidade da emissão ou absorção da radiação pelos osciladores e não um comportamento descontínuo para estes fenômenos.

No ano de 1905, ao publicar o artigo intitulado: *Sobre um ponto de vista heurístico referente à produção e conversão da luz*, Albert Einstein (1879 – 1955) relatou suas primeiras considerações sobre a teoria quântica (PAIS, 1982). Neste artigo, Einstein propôs uma solução diferente para o problema da radiação do corpo negro, de forma independente da solução apresentada por Planck em 1900. De fato, comparando os trabalhos de Planck e Einstein, pode-se afirmar que “Em 1900, Planck descobriu a lei da radiação do corpo negro *sem usar os quanta de luz*. Em 1905, Einstein descobriu os quanta de luz sem recorrer à lei de Planck.” (PAIS, 1982, p. 425).

Em síntese, podemos afirmar que a principal contribuição de Einstein para a ampliação do conceito de quantização foi decorrente da sua proposta de que esta propriedade deveria ser característica de toda radiação eletromagnética livre. De acordo com a sua teoria, a energia deveria estar concentrada numa pequena região do espaço e seu valor seria dado pela relação $\epsilon=h.v$. Assim, a partir da afirmação de que “a radiação monocromática [...] se comporta como um meio discreto constituído de quanta de energia [...]” (EINSTEIN *apud* PAIS, 1982, p. 447), Einstein estendeu a propriedade quântica da luz à interação entre a luz e a matéria. Este foi considerado o principal passo revolucionário para o advento da teoria quântica.

Posteriormente, o próprio Einstein, ao comparar a sua teoria para a luz com a teoria também corpuscular para a luz proposta por Newton no século XVII, apresenta uma definição para o *quantum* de luz:

Para manter a ideia principal da teoria de Newton, devemos admitir que a luz homogênea seja composta de grãos de energia e substituir os velhos corpúsculos de luz por *quanta* de luz, a que chamaremos de *fótons*, pequenas porções de energia caminhando pelo espaço vazio com a velocidade da luz.[...] Não apenas a matéria e a carga elétrica, mas também a energia de radiação tem uma estrutura granular, i.e., é constituída de *quanta* de luz. (EINSTEIN; INFELD, 1976, p. 210)

A partir dos trabalhos publicados por Einstein no início do século XX, vários cientistas passaram a considerar a teoria corpuscular da luz na explicação de determinados resultados experimentais. No decorrer do desenvolvimento da teoria quântica, estudos sobre diversos tipos de radiação, em especial as radiações denominadas raios X levaram alguns cientistas a tentarem conciliar as propriedades ondulatória e corpuscular da luz numa mesma relação.

Tais estudos na área de raios X, com os quais estava familiarizado, influenciaram grandemente a Louis de Broglie (1892 – 1987), uma vez que seu irmão, Maurice de Broglie (1875 – 1960) se dedicava a esta área. Foi a partir de diversos resultados experimentais (por exemplo, efeito fotoelétrico e efeito Compton), que pareciam consolidar a interpretação para o comportamento corpuscular da luz, que Louis de Broglie passou a “procurar uma relação que fosse simétrica: se ondas se comportam como partículas, partículas talvez se comportem como ondas.” (BROCKINGTON, 2005, p. 43).

O raciocínio elaborado por de Broglie para estabelecer sua relação, era baseado numa analogia com a hipótese do *quantum* de Einstein para a radiação. Para tanto, sugeriu a existência de uma onda associada a um corpúsculo de massa m_0 , assim como haveria uma partícula associada à onda luminosa. Matematicamente, sua equação foi obtida a partir da igualdade entre as equações que relacionam energia e frequência ($E = hv$), e energia e massa ($E = m_0c^2$), ou seja: **$hv = m_0c^2$** .

De acordo com Rosa (2004), a partir desta relação, de Broglie passou a atribuir movimento oscilatório a qualquer porção de energia sendo esta o *quantum* de luz ou o elétron. Em outras palavras, esta é a introdução de de Broglie para a idéia de dualidade onda/partícula aplicada tanto à radiação quanto à matéria.

A comprovação experimental e o reconhecimento da teoria proposta por de Broglie foi obtida principalmente após a descoberta da difração eletrônica, fenômeno em que o elétron apresenta uma propriedade tipicamente ondulatória, a difração. Assim, “ao introduzir [...] relações matemáticas que expressavam a dualidade onda-partícula para a matéria, ele [de Broglie] impulsionou [...] o desenvolvimento da Física Moderna.” (RIBEIRO FILHO, 2002, p.325). De fato, foi o trabalho de de Broglie que “estimulou Erwin Schrödinger a deduzir sua famosa equação de onda para o elétron ao perceber a sua importância para a compreensão da matéria.” (BROCKINGTON, 2005, p. 44). Este veio a ser identificado como o início da formulação matemática da Mecânica Quântica.

METODOLOGIA

A fim de se responder à questão de pesquisa, a metodologia utilizada foi a análise de conteúdo dos livros didáticos de Química aprovados pelo PNLD para o ano de 2012. Buscamos, através de palavras-chave (*Energia; modelo atômico; átomo; níveis de energia; discreta(o), quantum; quantização; quantizada(o), fóton; ondas eletromagnéticas; dualidade; modelo; luz; espectro*), identificar no sumário de cada livro, as seções referentes à quantização da energia e à dualidade onda-partícula. Em seguida, foi realizada a leitura dos trechos selecionados para verificar como os conceitos de *quantum* de uma grandeza e dualidade onda-partícula da luz e da matéria são apresentados. Esses trechos foram analisados em comparação com os conceitos elaborados pelos cientistas e constantes do nosso referencial teórico.

RESULTADOS

Livro 01 (LISBOA, 2010): As palavras-chave, procuradas a partir dos sumários dos livros da coleção, foram encontradas apenas no primeiro volume. O modelo quântico do átomo não é citado como o modelo atômico mais atual, o capítulo que aborda os modelos atômicos se limita ao modelo de Rutherford – Bohr.

A ideia de quantização da energia aparece relacionada apenas ao modelo de Bohr, como uma aplicação da teoria sobre a luz, proposta por Planck, ao átomo. A energia do elétron como sendo quantizada aparece no texto da seguinte forma: “Segundo Planck, toda energia do elétron é **quantizada**, ou seja, os elétrons absorvem ou emitem quantidades fixas de energia na forma de pequenos pacotes denominados **quanta**.” (LISBOA, 2010, v.1, p. 124). Primeiramente, vemos aqui a atribuição de Planck como sendo o responsável por introduzir a ideia de quantização da energia. Apesar de ser comum nos livros didáticos, tal afirmação não é verdadeira, pois de acordo com o relato histórico feito anteriormente vimos que na realidade Einstein foi o responsável por tal proposta.

Além disso, a própria definição de quantização não parece ser adequada, pois a comparação com ‘pequenos pacotes’ não é suficiente para explicar a energia como uma grandeza que apresenta valores discretos, ou descontínuos. Na verdade, nem mesmo uma explicação para a palavra ‘quantizada’ aparece no texto, embora seja essencial tal definição, afinal esta não é uma palavra do cotidiano dos estudantes do ensino médio, de um modo geral.

Dessa forma, em relação ao ensino da quantização da energia como um dos aspectos fundamentais para o entendimento do modelo quântico do átomo, o livro aqui referido

apresenta uma abordagem muito superficial, não apresentando os aspectos que consideramos mais importantes para que os estudantes possam entender a origem e a fundamentação do modelo quântico do átomo.

Não há qualquer citação à dualidade onda - partícula no que diz respeito ao comportamento da luz ou aplicado ao modelo quântico do átomo.

Livro 02 (SANTOS; MOL, 2010): O ensino da quantização da energia, como uma das propriedades do átomo segundo o modelo quântico, aparece nos três volumes desta coleção. Nos dois primeiros volumes, parte do capítulo sobre o modelo atômico de Bohr e sobre o modelo quântico do átomo é uma repetição do mesmo texto, com algum acréscimo de informação no segundo volume. Já no terceiro volume, o texto é mais detalhado e apresenta o conteúdo mais aprofundado acerca de alguns conceitos da teoria quântica.

O texto sobre o modelo quântico do átomo apresenta a teoria dos quanta como uma proposta de Max Planck em 1900. A noção de quantificação aparece desta forma: “[...] a radiação é emitida de forma descontínua, em minúsculas quantidades fixas, denominadas *quanta*. De acordo com essa teoria, a radiação emitida pelos corpos ocorre sempre em quantidades discretas que se propagam na forma de pacotes de energia, denominados quanta.” (SANTOS; MOL, 2010, v.1, p. 196). Vemos aqui que a palavra *quanta* aparece relacionada a ‘minúsculas quantidades fixas’ e a ‘pacotes de energia’. Embora tais comparações não demonstrem o verdadeiro significado dos quanta, a forma como o texto está escrito indica a relação entre os quanta e quantidades discretas de energia, o que consideramos como a correta definição para o termo.

No entanto, tal conceito não é aplicado posteriormente no texto, quando os autores tratam da transição dos elétrons de um nível quântico a outro, sendo apenas afirmado que “costuma-se representar os níveis energéticos encontrados para os elétrons em órbitas circulares ao redor do núcleo. Essa representação foi inicialmente usada por Bohr. Mas ela não corresponde à realidade, pois os estudos quânticos indicam que os elétrons não giram em órbitas.” (SANTOS; MOL, 2010, v.1, p. 197). A partir desse ponto, os autores passam a descrever os orbitais atômicos e não voltam a citar a quantização da energia para explicar o comportamento energético (mudanças de energia) dos elétrons, nem mesmo para explicar os espectros atômicos citados anteriormente.

A mesma análise é válida para o segundo volume da coleção, uma vez que, os textos dos dois volumes são muito semelhantes, apenas com pequenas diferenças que não interferem nas considerações feitas aqui.

O terceiro volume, por outro lado, apresenta o conteúdo de forma mais aprofundada incluindo um relato histórico razoável acerca dos fatos que levaram ao desenvolvimento da teoria quântica. O início do capítulo *Modelo Quântico e Radioatividade* cita a utilização de modelos na ciência para a explicação de fenômenos, como o modelo da teoria cinética utilizado para explicar comportamento dos gases e os modelos atômicos, utilizados para explicar vários processos químicos (SANTOS; MOL, 2010, v.3, p. 289). Consideramos esta uma boa proposta para introdução aos modelos atômicos, especialmente ao modelo quântico do átomo, pois é importante que os estudantes saibam que se tais modelos são apenas aproximações da realidade, uma forma de representar algo que não conhecemos plenamente, mas que pode ser explicado a partir das suas propriedades.

Assim como nos volumes 1 e 2, o *quantum* da energia aparece relacionado à quantidade mínima de energia presente nos pacotes de energia, que são os quanta. A

diferença é que aparece também representada a equação de Planck, como: $E = n \cdot h \cdot \nu$ em que n é um número inteiro positivo, ν é a frequência da radiação emitida e h , uma constante denominada constante de Planck.

A questão levantada anteriormente, de que os autores não relacionaram a quantificação da energia com a transição dos elétrons entre diferentes níveis de energia, é mais bem explicada nesse volume da coleção. Inclusive, descrevem como o modelo atômico de Bohr explicou os espectros atômicos descontínuos a partir da inclusão da teoria dos quanta a este modelo (SANTOS; MOL, 2010, v.3, p. 294). No entanto, apenas no volume três da coleção os autores citam que o modelo de Bohr foi superado por outro, que explica uma quantidade maior de fenômenos: o modelo quântico do átomo.

Portanto, podemos observar que tal coleção apresenta aspectos positivos em relação à abordagem da quantização da energia, como: discussão acerca da utilização de modelos, especialmente no ensino de ciências; o reconhecimento do modelo atômico quântico como o modelo mais atual; e a apresentação da noção de quantificação como uma variação discreta da energia. Por outro lado, o texto apresenta também partes que podem ser aprimoradas, a saber: a utilização da metáfora do “pacote” para descrever o *quantum* de energia; a utilização do modelo do corpo negro como introdução à explicação da teoria quântica; e a apresentação do modelo quântico como o mais atual e mais abrangente.

A dualidade onda-partícula é citada nesta coleção apenas no terceiro volume. A palavra-chave *fóton* aparece como a denominação dada às partículas que compõem um feixe de luz ou das demais ondas eletromagnéticas. De outra forma, o fóton é definido como “um pacote de energia ou um *quantum* de energia relacionado à frequência de radiação, conforme prevê a equação de Planck ($E = h \cdot \nu$)” (SANTOS; MOL, 2010, v.3, p. 290).

A seguir, os autores deixam claro no texto que a partir destes novos conceitos da Física a luz passou a ser considerada como tendo um duplo comportamento, representado por dois diferentes modelos: o ondulatório e o de partícula. Ao lançarem o questionamento sobre qual a natureza da luz (onda ou partícula), fica claro ao leitor que um modelo não anula o outro, pois para explicar os fenômenos de difração e interferência da luz devia-se levar em conta o modelo ondulatório, ao passo que para explicar o efeito fotoelétrico tinha de ser levado em conta o modelo de fóton.

Além de aplicar a dualidade onda-partícula às ondas eletromagnéticas, observa-se nesse capítulo sob o subtítulo: *A dualidade onda-partícula da matéria* (SANTOS; MOL, 2010, v.3, p. 295), a ideia de que o comportamento dual também poderia ser aplicado à matéria. Para tanto há uma introdução à equação de De Broglie, a qual implica que toda partícula está associada a um comprimento de onda λ , determinado pela seguinte equação:

$$\lambda = \frac{h}{m \times v}$$

Em que h é a constante de Planck, m é a massa e v , a velocidade da partícula. O caráter ondulatório da matéria estaria representado pelo comprimento de onda λ e o caráter corpuscular, pela quantidade de movimento $m \times v$.

Ao final destas considerações, os autores indicam que tais conceitos resultaram no desenvolvimento de uma nova área de estudos na Física e que favoreceram inúmeras descobertas e invenções, como os computadores, *lasers*, DVDs, etc. A seguir, passam a considerar outra propriedade dos sistemas quânticos: seu caráter probabilístico, a partir do Princípio da Incerteza.

A partir de tais relatos, podemos concluir que, no que diz respeito ao ensino da dualidade onda-partícula, o texto desse livro pode ser considerado apropriado, pois o mesmo apresenta corretamente o desenvolvimento dos conceitos envolvidos nesta teoria, sem aprofundar em conhecimentos que estão além do que se espera para o ensino médio. Em relação ao efeito fotoelétrico, consideramos que poderia ser mais bem descrito e até mesmo utilizado para explicar a quantização da energia, pois apresenta um caráter ilustrativo mais simples que o problema do corpo negro.

Livro 03 (CANTO; PERUZZO, 2010): O modelo quântico do átomo não é citado nesta coleção como o mais atual. Apenas uma das palavras-chave que poderiam identificar no texto a utilização da noção de quantização de energia foi encontrada, no capítulo 6 do primeiro volume.

Este capítulo do livro apresenta uma pequena introdução sobre o modelo de Bohr, em que há um relato muito breve sobre os postulados que caracterizam tal modelo e uma indicação da sua aplicação para explicar os espectros atômicos. A palavra-chave *quantizada* aparece unicamente quando os autores afirmam que “Uma novidade relevante da teoria de Bohr está na afirmação de a energia dos elétrons ser quantizada, isto é, ter apenas alguns determinados valores.” (CANTO; PERUZZO, 2010, v.1, p.100).

Não há qualquer citação à dualidade onda-partícula no que diz respeito ao comportamento da luz ou aplicado ao modelo quântico do átomo nos três volumes da coleção.

Portanto, podemos concluir que esta se trata de uma abordagem extremamente resumida e que a introdução da noção de *quantum* de energia é feita sem conexão com o restante do texto. Tal afirmação se baseia no fato de que a idéia de quantização da energia não é empregada novamente no texto, nem mesmo para acrescentar alguma discussão mais detalhada sobre a diferença entre os modelos atômicos de Bohr e Rutherford. Além disso, não há qualquer aplicação deste conceito na explicação, por exemplo, dos espectros atômicos, os quais são citados posteriormente no mesmo capítulo.

Livro 04 (MACHADO; MORTIMER, 2010): Nesta coleção, encontramos algumas das palavras-chave que identificam a utilização da noção de quantização da energia nos livros didáticos, apenas no primeiro volume da coleção. O modelo atômico quântico é identificado como o mais atual, porém, a quantização da energia aparece apenas relacionada ao modelo atômico de Bohr, conforme indicaremos a seguir.

A primeira parte relevante do texto que podemos citar é a introdução do capítulo em que os autores tratam dos diferentes modelos atômicos elaborados pela ciência em diferentes épocas. Nesta parte do capítulo discute-se a utilização de modelos na ciência, destacando-se a limitação de alguns modelos para explicar certos fenômenos, ao passo que são suficientes para explicar outros. A principal informação contida nesta introdução é que os modelos não são cópias da realidade, mas sim uma representação ou aproximação da mesma (MACHADO; MORTIMER, 2010, v.1, p.136). Este tipo de introdução é interessante, pois facilita o entendimento dos estudantes acerca da evolução histórica dos modelos atômicos até o modelo atômico atual, o qual posteriormente poderá ser substituído por outro que explique uma quantidade maior de fatos experimentais e assim sucessivamente. Como se tratam de representações da realidade, a formulação de um modelo mais atual, não impede que o anterior seja utilizado para aqueles fenômenos que explica adequadamente.

No que se refere à utilização da noção de quantização da energia, observamos que a palavra-chave *quantum* aparece pela primeira vez neste capítulo no texto 10, intitulado “A natureza ondulatória da luz e o espectro eletromagnético” (MACHADO; MORTIMER, 2010, v.1, p. 163). Depois de uma introdução sobre as propriedades ondulatórias da luz, como frequência, comprimento de onda e a relação entre comprimento de onda e frequência, os autores diretamente afirmam que “Em 1900, Max Planck propôs uma relação simples entre energia e frequência da radiação emitida pela matéria que funcionava para todas as frequências.” (MACHADO; MORTIMER, 2010, v.1, p. 164). Percebe-se que neste trecho do texto falta uma conexão entre os conceitos da teoria ondulatória da luz citados anteriormente e o fato de Planck ter proposto uma determinada relação entre energia e frequência da radiação.

O prosseguimento do texto apresenta a equação de Planck a partir da afirmação de que “Planck propôs que átomos vibrando em um metal aquecido poderiam absorver e emitir energia eletromagnética apenas em certas quantidades discretas, que eram iguais ou múltiplas da quantidade determinada pela equação: $E = h \cdot \nu$ ” (MACHADO; MORTIMER, 2010, v.1, p. 164). A palavra *quantum* aparece a seguir no texto como sendo a denominação da quantidade de energia que pode ser emitida ou absorvida, representada por $h \cdot \nu$. Apesar não fazerem referência direta ao problema do corpo negro, é possível perceber que os autores implicitamente utilizam desse modelo para inserir a noção de *quantum* de energia. Novamente, percebemos que a falta de uma discussão mais elaborada sobre o assunto dificulta o entendimento do motivo que levou Planck a propor uma relação que, além de não estar de acordo com as teorias conhecidas até então, ele mesmo não aceitava como verdadeira.

Após citar os postulados de Bohr, há no texto uma analogia para explicar o conceito de quantização da energia, necessário para o entendimento deste modelo atômico. Utilizando uma analogia com uma escada, o texto relata que “Os níveis de energia do elétron no átomo de hidrogênio corresponderiam aos degraus de uma escada. Ao subirmos ou descermos uma escada, só podemos parar nos degraus; não há como ficar entre dois degraus.” (MACHADO; MORTIMER, 2010, v.1, p. 168). Prosseguindo, os autores ainda acrescentam que “Quando fornecemos energia ao átomo de hidrogênio, os elétrons podem saltar para níveis de maior energia. Ao retornarem ao estado fundamental, eles emitirão essa energia.” (MACHADO; MORTIMER, 2010, v.1, p. 168). Vemos aqui que a analogia com a escada é simples e eficaz para o entendimento dos alunos sobre o que é uma variação descontínua de energia. Porém, entendemos que a utilização do conceito de *quantum* deveria ter sido feita nesse momento, a fim de facilitar a compreensão dos alunos tanto sobre o que representa o *quantum* de energia, quanto para explicar a absorção e emissão de energia em nível subatômico.

No prosseguimento do capítulo, há uma descrição de algumas propriedades periódicas com base no modelo de Bohr, mas não se utiliza a noção de *quantum* para explicá-las. Ao se referir ao modelo atômico atual, os autores partem das noções de comportamento dual do elétron, incerteza e orbital para descrevê-lo, não mais citando a quantização da energia.

A noção de dualidade para o comportamento da luz e da matéria aparece brevemente no texto em que se descreve o modelo atômico atual, quando os autores afirmam que “Na época em que Bohr propôs seu modelo já se admitia a natureza dual para a luz. Segundo essa ideia, a luz se comportaria tanto como onda quanto como partícula.” (MACHADO; MORTIMER, 2010, v.1, p. 176). Explicando esse comportamento para a luz, o texto indica a utilização do modelo ondulatório para explicar alguns fenômenos e a utilização do modelo corpuscular para explicar outros fenômenos luminosos.

Prosseguindo, o texto relata que a idéia de comportamento dual para a luz se tornou tão forte que Louis de Broglie propôs o mesmo comportamento ao elétron e que tal associação levou posteriormente ao início da Mecânica Quântica, quando Schrödinger atribuiu equações de onda para o comportamento do elétron.

Notamos que neste relato falta a relação matemática utilizada por de Broglie para fundamentar sua teoria o que, acreditamos, facilitaria sua compreensão pelos estudantes.

Livro 05 (FONSECA, 2010): Nesta coleção, as palavras-chave relativas ao ensino da quantização da energia aparecem apenas no primeiro volume, no capítulo 12: *A evolução dos modelos atômicos*. O modelo quântico do átomo não é citado, sendo o modelo atômico de Bohr apresentado como o mais recente.

Iniciando o capítulo, a autora faz uma pequena introdução sobre como os modelos são utilizados na ciência para explicar fenômenos e resultados experimentais. A seguir, relata brevemente que os diferentes modelos atômicos foram elaborados paralelamente a grandes descobertas científicas, a fim de ilustrá-las. Essa discussão poderia ser mais bem elaborada, talvez com uma pequena discussão sobre o que são modelos e como são utilizados na ciência. Além dos modelos atômicos, outros exemplos poderiam ser citados, a fim de esclarecer que esta não é a única aplicação de modelos na Química.

A palavra-chave *quantum* aparece pela primeira vez no texto como se tivesse sido definida por Planck da seguinte forma: “Os corpos aquecidos emitem radiação não sob a forma de ondas, mas sob a forma de pequenos ‘pacotes’ de energia denominados **quantum**, ou seja, a energia é descontínua.” (FONSECA, 2010, v.1, p. 208). Percebemos aqui a atribuição a Planck de uma afirmação que os relatos históricos não confirmam que ele tenha feito. Além disso, o conceito de *quantum* como um pacote de energia aparece de forma inadequada, não sendo suficiente para caracterizar o comportamento descontínuo da luz.

A seguir, o texto repete as mesmas considerações sobre o *quantum*: “equivale a uma quantidade definida de energia, proporcional à frequência da radiação”, “a energia não se propaga num fluxo contínuo, mas na forma de ‘quanta’ ou ‘pacotes de energia’”. Há também uma referência a Einstein neste subtópico do capítulo ao se afirmar que “Einstein utilizou a hipótese dos *quanta* de Planck para explicar a transmissão da radiação do vácuo e afirmou que a absorção de energia pelos corpos é feita um *quantum* por vez.” (FONSECA, 2010, v.1, p. 209). Da forma em que aparece no texto, esta frase não acrescenta qualquer detalhamento sobre a importância e a participação de Einstein na formulação da teoria quântica.

A utilização do termo “quantizada” aparece posteriormente no capítulo, ao se falar sobre o modelo atômico de Bohr, a fim de explicar o espectro descontínuo dos elementos químicos.

A questão da dualidade aparece brevemente logo após a descrição da autora sobre o que ela chama de teoria de Max Planck. Ao longo de três breves parágrafos a autora responde à questão relacionada a qual dos dois modelos para a luz (ondulatório ou corpuscular) deve ser utilizado, ao afirmar que “[...] a teoria ondulatória permite explicar certas observações experimentais, mas não todas elas. A teoria corpuscular da luz explica outras observações. Usadas separadamente, as duas teorias são insuficientes; é preciso, portanto, usar as duas.” (FONSECA, 2010, v.1, p. 209). Concordamos com tal afirmação, mesmo porque o advento da teoria quântica não subverteu a teoria eletromagnética, sendo ambas utilizadas na física para explicar o comportamento da radiação, porém, em escalas diferentes.

Assim, observamos que a discussão sobre a dualidade (onda-partícula) da energia e da matéria não é enfatizada pela autora, uma vez que, o modelo quântico do átomo nem mesmo é citado, sendo desnecessário aprofundar neste assunto. Vale salientar que não consideramos essa uma abordagem adequada, pois o modelo quântico do átomo é o mais atual e o que apresenta maior aplicação para explicar certos fenômenos e até mesmo algumas tecnologias utilizadas no nosso cotidiano. Portanto, a discussão sobre o comportamento dual da energia e da matéria é necessária ao se introduzir este modelo, não devendo ser suprimida ou demasiadamente abreviada.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados citados anteriormente podemos concluir que, embora as coleções de livros didáticos selecionadas apresentem pelo menos um dos dois aspectos considerados em nossa questão de pesquisa, foi possível identificar falhas na elaboração do texto em todas as abordagens analisadas. Nestes textos percebemos que as insuficiências estão relacionadas principalmente à utilização de alguns dos conceitos da teoria quântica sem clareza ou sem articulação com outras informações apresentadas anteriormente no próprio texto. Também foi possível observar que em três destas coleções o modelo quântico do átomo nem mesmo é citado como o mais atual e em apenas uma das coleções os modelos atômicos, em especial o modelo atômico quântico, são abordados nos três volumes.

De um modo geral, avaliamos a forma como o modelo quântico do átomo vem sendo ensinado nos livros didáticos de Química como sendo insuficiente para que os estudantes tenham uma visão correta deste modelo e de como foi elaborado. Um fato notável é que em nenhum dos casos os autores utilizam o modelo quântico do átomo em outros capítulos, como para explicar a formação das ligações químicas ou algumas das propriedades periódicas dos elementos químicos, por exemplo, a energia de ionização.

No que diz respeito ao ensino da noção de *quantum* de uma grandeza, sugerimos que a referência ao problema do corpo negro seja substituída pela explicação para o efeito fotoelétrico. O modelo do corpo negro, para que seja bem aplicado, requer uma base teórica do eletromagnetismo e um relato histórico detalhado sobre como se chegou a tal consideração. Por outro lado, o efeito fotoelétrico se refere a um exemplo real, de fácil explicação, com base nos conceitos da teoria quântica. Desta forma, por meio de uma articulação entre teorias e resultados experimentais, mediada por uma discussão sobre a distinção entre modelos e realidade, é possível tornar a noção de *quantum* mais compreensível aos estudantes do ensino médio sem ter que recorrer explicações muito complexas.

Quanto à abordagem sobre o comportamento dual da energia e da matéria, observamos que tal aspecto não é citado em duas das coleções analisadas e que apenas uma das coleções apresenta uma descrição que se aproxima do que consideramos ideal, contendo um breve relato histórico e relacionando a elaboração deste conceito com os resultados obtidos para o efeito fotoelétrico. No que diz respeito às demais coleções, verificamos que apresentam uma descrição superficial, insuficiente para que os estudantes compreendam a importância da elaboração de um novo modelo que explicasse propriedades da luz que até certo momento não pareciam ter uma explicação razoável.

Portanto, confirmamos em tal trabalho que ainda hoje os livros didáticos que estão sendo utilizados nas escolas públicas brasileiras ainda apresentam falhas nas suas abordagens sobre o modelo quântico do átomo. Sugerimos que a utilização de um

relato histórico conciso, mas não incompleto, e a escolha por descrever alguns dos experimentos que levaram à implementação da teoria quântica, sejam possibilidades para um ensino mais eficaz sobre estes dois aspectos tão importantes para a compreensão do modelo atômico quântico. Além disso, notamos que a introdução de uma discussão sobre a utilização de modelos na ciência pode ser útil para facilitar o entendimento dos estudantes sobre a superação de um modelo atômico por outro mais abrangente, como é o caso do modelo quântico.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Orientações Curriculares para o Ensino Médio: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Volume 2. Brasília: Ministério da Educação, Secretaria da Educação Básica, 2006.

BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. São as regras da transposição didática aplicáveis aos conceitos de física moderna?. **Investigação em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v.10, n. 3, 2005.

Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID136/v10_n3_a2005.pdf>. Acesso em: 15 Outubro 2011.

BROCKINGTON, G. **A realidade escondida**: A dualidade onda-partícula para estudantes do Ensino Médio. 2005. 268 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

Disponível em: <<http://www.nupic.fe.usp.br/Publicacoes/teses/mestradoqui.pdf>>. Acesso em: 24 Março 2012.

DIONÍSIO, P. H. Albert Einstein e a física quântica. **Cadernos Brasileiros de Ensino de Física**, Santa Catarina, v.22, n. 2, 2005.

Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6382/13263>>. Acesso em: 15 Outubro 2011.

EINSTEIN, A.; INFELD, L. **A Evolução da Física**. Tradução de Giasone Rebuá. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1976. 245 p. Título Original: The Evolution of Physics

FONSECA, M. R. M. da; **Química**: Meio Ambiente, Cidadania, Tecnologia. 1. ed. São Paulo: FTD, 2010. 3 v.

GRECA, I. M. ; MOREIRA, M. A. ; HERSCOVITZ, V. E. Uma proposta para o ensino de Mecânica Quântica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Porto Alegre, v. 23, n. 4, 2001.

Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v23_444.pdf>. Acesso em: 20 Outubro 2011.

LISBOA, J. C. F.; **Química**. Coleção Ser Protagonista. 1 ed. São Paulo: Edições SM, 2010. 3 v.

MACHADO, A. H.; MORTIMER, E. F. **Química**. 1 ed. São Paulo: Scipione, 2010. 3 v.

OSTERMANN, F., CAVALCANTI, C. J. H. Física moderna e contemporânea no ensino médio: Elaboração de material didático, em forma de pôster, sobre partículas elementares e interações fundamentais. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Santa Catarina, v. 16, n. 3, 1999.

Disponível em: <<http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6795/6275>>. Acesso em: 12 Outubro 2011.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A.M. - Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa "Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio". **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v.5, n.1, 2000.

Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/revista.htm>> Acesso em 2 Novembro 2011.

Pessoa Jr., O. . **O Início da Física Quântica e seus Caminhos Possíveis**. In: Maurício Pietrocola; Olival Freire Jr.. (Org.). Filosofia, Ciência e História: Michel Paty e o Brasil uma homenagem aos 40 anos de colaboração. São Paulo: Discurso, 2005. p. 87-113.

PEREIRA, A. P.; CAVALCANTI, C. J. H.; OSTERMANN, F. Concepções relativas à dualidade onda-partícula: uma investigação na formação de professores de Física. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v.8, n.1, 2009.

Disponível em: < http://www.saum.uvigo.es/reec/volumenes/volumen8/ART5_Vol8_N1.pdf >. Acesso em: 12 Outubro 2012.

PEREIRA, A. P. ; OSTERMANN, F. . Sobre o ensino de Física Moderna e Contemporânea: uma revisão da produção acadêmica recente. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 14, n. 3, 2009.

Disponível em: < http://www.if.ufrgs.br/ienci/artigos/Artigo_ID224/v14_n3_a2009.pdf >. Acesso em: 2 Novembro 2011.

RIBEIRO FILHO, A. **Os Quanta e a Física Moderna**. In: José Fernando Moura Rocha. (Org.). Origens e Evolução das Idéias da Física. 1 ed. Salvador: EDUFBA, 2002, v. 1, p. 301-372.

ROSA, Pedro Sérgio. **Louis de Broglie e as ondas de matéria**. 2004. 190 f. Dissertação (Mestrado em Física), Unicamp, Campinas, 2004

Disponível em: <<http://webbif.ifi.unicamp.br/teses/apresentacao.php?filename=IF717> >. Acesso em: 20 Janeiro 2012.

SANTOS, W. L. P.; MOL, G. S.; **Química Cidadã**. 1 ed. São Paulo: Editora Nova Geração, 2010. 3 v.

SILVA, J. L. P. B.; CUNHA, M. B. M. Para compreender o modelo atômico quântico. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENSINO DE QUÍMICA, 14., 2008, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR/SBQ, 2008. CD-ROM.

_____. O modelo atômico quântico em livros didáticos de química para o ensino médio. In: VII ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISADORES EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 7., 2009, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABRAPEC, 2009. CD-ROM.

STUDART, Nelson. A invenção do conceito de *quantum* segundo Planck. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Porto Alegre, v.22, n.4, 2000.

Disponível em: < http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_523.pdf >. Acesso em: 24 Março 2012.