

O átomo de Bohr no Ensino Médio

(Bohr's atom in the high school)

F.A.G. Parente¹, A.C.F. dos Santos², A.C. Tort²

¹Colégio Pedro II, Unidade Humaitá, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

²Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Recebido em 19/6/2013; Aceito em 19/7/2013; Publicado em 6/2/2014

Há cem anos o físico dinamarquês Niels Bohr publicava um dos mais importantes trabalhos da física do século 20, no qual pela primeira vez um modelo do átomo compatível com os fatos experimentais e com hipótese de quantização de energia de Max Planck era apresentado. Para muitos estudantes, o modelo de Bohr ainda é a porta de entrada para o mundo fascinante da estrutura interna da matéria. No presente trabalho discutimos um modo relativamente simples de introduzir o modelo de Bohr no Ensino Médio.

Palavras-chave: modelos atômicos, física atômica, mecânica quântica.

A hundred years ago the Danish physicist Niels Bohr published one of the most important set of papers of twentieth century physics. For the the first time an atomic model compatible with experimental facts and Planck's quantization hypothesis was presented. For many students, Bohr's model still is the entrance door to the fascinating world of the internal structure of matter. Here we propose a simple way of introducing Bohr's model at the high school level.

Keywords: atomic models, atomic physics, quantum mechanics.

1. Introdução

Há cem anos o físico dinamarquês Niels Bohr publicava um dos mais importantes trabalhos da física do século 20, *On the Constitution of Atoms and Molecules* [1], no qual pela primeira vez um modelo do átomo construído a partir dos fatos experimentais e da hipótese de quantização de energia de Max Planck era apresentado. Embora o modelo de Bohr e a sua extensão, que se deve principalmente a Sommerfeld, tenham sido suplantados pelas mecânicas quânticas de Heisenberg e Schrödinger, para muitos estudantes do Ensino Médio e universitário ele ainda é a porta de entrada ao mundo fascinante da estrutura interna da matéria [2]. O átomo de Bohr é discutido, por exemplo, nas Refs. [3,4]. Uma revisão recente do trabalho de Bohr é apresentada na Ref. [5]. Veja também na Ref. [6] para uma discussão crítica sobre a insuficiência dos fundamentos empíricos do modelo. No presente trabalho, discutiremos como o modelo é geralmente introduzido no ensino superior e apresentaremos um modo alternativo possível para a sua introdução no Ensino Médio.

²E-mail: tort@if.ufrj.br.

2. O modelo de Bohr no ensino universitário

A abordagem canonizada dos textos modernos no nível universitário, veja por exemplo, a Ref. [7], segue um caminho alternativo ao escolhido por Bohr originalmente [5]. Nessas abordagens, a quantização do momento angular é introduzida como um postulado e este fato, como comentaremos mais adiante, pode tornar-se um problema sério quando queremos introduzir o modelo de Bohr no Ensino Médio. No entanto, no nível do ensino universitário há exceções. Em língua portuguesa, por exemplo, no nível do ensino de física básica, encontramos o texto de Nussenzveig [3], e em um nível mais avançado, o texto de Caruso e Oguri [4]. Na maior parte dos textos de física moderna e química quântica, porém, a solução do problema da estabilidade dos átomos hidrogenóides começa pela introdução dos seguintes postulados:

- (i) O elétron nos átomos hidrogenóides move-se em uma órbita circular em torno do núcleo sob a ação da força de Coulomb entre cargas puntiformes e

obedece às leis da mecânica clássica (leis do movimento de Newton).

- (ii) O elétron pode descrever somente certas órbitas circulares (os estados estacionários) para as quais o momento angular é quantizado de acordo com

$$L = m_e v r = n \frac{h}{2\pi} = n \hbar,$$

onde $n = 1, 2, 3, \dots$, e h é a constante de Planck. A constante $\hbar = h/(2\pi)$ é chamada de constante de Planck reduzida.

- (iii) Nas órbitas circulares permitidas, não há perda de energia por emissão de radiação (isto está fundamentado no fato experimental de que os átomos existem e são, com exceções, estáveis).
- (iv) A radiação eletromagnética é emitida (ou absorvida) quando o elétron troca de órbita de forma descontínua (o salto quântico). A frequência da radiação emitida ou absorvida é proporcional à diferença da energia associada com cada órbita

$$E_f - E_i = h \nu.$$

Estes postulados são, essencialmente, os enunciados por Bohr no artigo de revisão de 1915 [8,9]. Este modo de apresentar o modelo de Bohr é perfeitamente válido e pedagogicamente mais apropriado no ensino básico universitário das diversas engenharias e cursos de física, matemática, química e das ciências da Terra. Mas tenhamos em mente que ao seguir esta abordagem estamos procedendo de modo inverso ao procedimento originalmente adotado por Bohr [5]. Convém mencionar que é possível substituir o postulado da quantização do momento angular pela introdução do conceito da dualidade e do comprimento de onda de de Broglie [10]. O procedimento original de Bohr nos parece mais apropriado para um segundo curso de física moderna quando em geral tratamos com alunos com um maior grau de maturidade intelectual.

3. O modelo de Bohr no Ensino Médio: o problema do momento angular

O estudo da física moderna no Ensino Médio é contestado por muitos devido à complexidade de alguns conceitos novos e à matemática envolvida. No entanto, os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) e as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+), sugerem o estudo da física moderna no Ensino Médio. As obras didáticas aprovadas pelo Governo para o Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLEM) concedem um espaço considerável ao estudo desta parte da física. Modelos atômicos são geralmente ensinados no primeiro ano do nível médio na disciplina de química geral. Nesta disciplina, frequentemente são

utilizados conceitos de física moderna. Conceitos como nível quântico principal, nível quântico secundário e radiação são apresentados sem nenhuma dedução quando apresentados pela disciplina citada. Não há, porém, um número significativo de estudos sobre o aprendizado de modelos atômicos. Os poucos estudos que existem geralmente tratam da controvérsia sobre se a ênfase deve ser dada ao conhecimento atual ou a uma abordagem histórica e quais modelos são mais apropriados para o ensino. Modelos atômicos podem ser de grande valia no ensino das habilidades de raciocínio científico tais como construção de modelos e inferências a partir de observações. A evolução dos modelos atômicos é uma aventura na qual os alunos podem ser levados a uma rede complexa de raciocínio sobre como os novos modelos são construídos, e os modelos antigos descartados com base em observações experimentais.

Como o modelo atômico de Bohr é apresentado nos textos destinados ao Ensino Médio? Em todas as nove obras analisadas por um dos presentes autores, ver a Ref. [11] e as referências ali citadas, as deduções clássicas da energia, velocidade e raio do átomo de Bohr, quando feitas, fazem uso do conceito de conservação do momento angular. *Como utilizar um conceito em uma dedução que não é apresentado na própria obra que o utiliza?* Nos livros estudados, o que se pode constatar é um tratamento idêntico ao feito nos livros universitários [7], veja também a Ref. [11] e referências ali citadas.

Diante deste problema, os presentes autores defendem uma proposta de estudo do modelo de Bohr por meio de analogias como proposto por Glynn em [12]. A exploração das analogias no ensino de ciências, e da física em particular, facilita o aprendizado de alunos já que fornecem os subsídios de um modelo mental significativo por meio da correlação entre o familiar e o desconhecido, [12]. À medida que o desenvolvimento cognitivo dos alunos e de sua aprendizagem acontece, as simples comparações entre objetos podem evoluir permitindo que os alunos adotem outros modelos mentais ainda mais significativos. Das inúmeras contribuições que a utilização da analogia no ensino de física, destacam-se as seguintes:

- (a) os alunos podem, por meio da organização do pensamento análogo, desenvolver habilidades cognitivas como por exemplo, a criatividade;
- (b) os professores podem utilizá-las como ferramenta para avaliação dos alunos;
- (c) permitem aos professores a facilitação da compreensão de evoluções conceituais;
- (d) facilita a compreensão de conceitos abstratos, tornando o conhecimento científico mais acessível aos alunos.

No entanto, é preciso chamar a atenção para alguns perigos que podem ser encontrados pelo professor se este decide explorar esta ferramenta em suas aulas:

- (a) a analogia pode ser confundida com o conceito em si, ou seja, apenas os detalhes mais marcantes são retidos pelos alunos e o fim desejado não é alcançado;
- (b) os alunos podem negligenciar suas limitações, extrapolando conceitos;
- (c) analogia pode não ficar suficientemente clara para os alunos, de maneira que o porquê de sua utilização não é percebido;
- (d) os alunos podem ter dificuldades intrínsecas com pensamento análogo, dificultando o entendimento da analogia escolhida pelo professor.

É preciso levar em conta, porém, que nem todos os alunos podem ter os conhecimentos prévios necessários que serão utilizados para estabelecer a analogia. Assim, deve ser feita uma verificação prévia para que o professor certifique-se de que todos os alunos estejam suficientemente familiarizados com o conceito análogo. Glynn [12] propõe também que o professor explique aos alunos o conceito de analogia para que todos saibam que esta é apenas uma comparação feita para facilitar o processo de aprendizagem. É recomendado também que o professor siga a seguinte sequência de etapas na implementação do processo:

- (a) introduzir o conceito-alvo;
- (b) relembrar com os alunos o que estes sabem sobre o conceito análogo;
- (c) identificar as características relevantes entre o conceito análogo e o conceito alvo;
- (d) conectar (mapear) as similaridades entre os dois objetos;
- (e) indicar onde a analogia falha;
- (f) realçar as conclusões sobre o conceito alvo.

No caso do modelo de Bohr, a noção de o elétron só pode descrever certas órbitas pode ser apresentada por meio de uma analogia com os harmônicos de uma onda em uma corda com as extremidades fixas - conceito que é de fácil assimilação por parte dos alunos de Ensino Médio. Os conceitos de interferência, ressonância e estados estacionários são introduzidos de uma forma visível e concreta, sem a utilização do conceito de momento angular, o qual, deve ser mais uma vez enfatizado, não é contemplado no Ensino Médio. Uma sequência possível é a apresentação em primeiro lugar da dualidade onda-partícula que pode ser feita de modo descritivo e com o apoio dos resultados de experimentos modernos de interferência e difração de elétrons. A isto se seguiria a introdução da relação de de Broglie que conecta as propriedades de onda e partícula da matéria e da radiação. Uma vez apresentadas estes conceitos iniciais, a analogia entre ondas estacionárias em uma corda e onda de de Broglie associada com um elétron em uma órbita fechada poderia ser feita.

A seguir discutimos passo-a-passo, uma proposta de introdução ao átomo de Bohr utilizando o método das analogias.

- (a) Introduzir o conceito-alvo. Como não podemos explorar o interior de um átomo, sua estrutura apenas pode ser revelada através de fenômenos observáveis em nossa escala, como os espectros de emissão e absorção que constituem uma assinatura ou impressão digital de cada átomo. Bohr baseou seu modelo de um átomo planetário. Para que seu modelo tivesse validade, seria necessário que este explicasse onde os modelos antigos falharam. Bohr, para isso, postulou as seguintes ideias: i) O elétron se move em certas órbitas sem irradiar energia (órbitas de estados estacionários) e estas obedeceriam aos resultados da física clássica e ii) O elétron só emite ou absorve energia (ondas eletromagnéticas) ao mudar de órbita. Nesta etapa o professor deve introduzir o postulado de de Broglie, $\lambda = h/mv$.
- (b) Lembrar o conceito análogo: ondas estacionárias. Como apontado por Tavares e cols. [13], as cordas vibrantes constituem um porta de entrada importante para os conceitos quânticos. Um dos postulados da mecânica quântica específica que a evolução temporal do estado do sistema é descrito pela equação de Schrödinger. Esta equação possui solução análoga à equação de onda que descreve a propagação de ondas em uma corda vibrante com extremidades fixas. É um fato familiar que a corda pode vibrar em um dos estados estacionários descrito pelos modos normais de vibração. Os comprimentos de onda possíveis para os modos normais de vibração são expressos por $\lambda_n = \frac{2L}{n}$, onde L é o comprimento da corda e n é um número inteiro igual ao número de ventres. As ondas estacionárias são formadas por duas ondas propagando-se em sentidos oposto com velocidade $v = \lambda f$, após reflexões nas extremidades fixas da corda.
- (c) Identificar as características relevantes entre o conceito análogo e o conceito alvo.
- (d) Conectar (mapear) as similaridades entre os dois objetos. Na Tabela 1, as características relevantes entre os modos normais de vibração em uma corda (conceito análogo) com extremos fixos e as órbitas no átomo de Bohr (conceito alvo). Apontamos que as ondas estacionárias em cordas e as órbitas dos elétrons no átomo de hidrogênio só se estabelecem para determinadas relações entre comprimentos de onda e a comprimento da corda/trajetória da órbita.
- (e) Indicar onde a analogia falha. Esta etapa envolve examinar a credibilidade do mapeamento realizado acima, indicando suas falhas e limitações. Vários conceitos podem ser transmitidos de modo mais eficiente utilizando múltiplas analogias [12] e uma li-

mitação nesta proposta é que somente uma analogia é apresentada aos alunos. No entanto, a utilização de várias analogias não necessariamente leva a um melhor entendimento por parte do estudante, porque se uma segunda analogia não é corretamente escolhida poderia prejudicar os benefícios da primeira. Para as ondas estacionárias, o fator ocorre para comprimentos de onda iguais a $2L$, enquanto o comprimento da órbita do elétron está diretamente ligado ao comprimento de onda associado ao elétron.

- (f) Realçar as conclusões sobre o conceito alvo. Assim como nas ondas estacionárias pode haver uma interferência construtiva, o mesmo pode ocorrer para as órbitas dos elétrons. Os níveis de energia de um átomo são quantizados do mesmo modo que os modos normais de vibração de um corda esticada com os extremos fixos.

Tabela 1 - Identificando as características relevantes entre os dois domínios e conectando as similaridades entre os dois objetos.

Conceito análogo: modos normais em uma corda	Conceito-alvo: o átomo de Bohr
Os modos normais têm λ bem definido	Os elétrons comportam-se como ondas com λ bem definido
Os modos normais surgem das condições de contorno impostas	Os níveis de energia surgem das condições de contorno impostas
Os modos normais de vibração são quantizados	Os níveis de energia são quantizados

4. Observações finais

A importância de uma discussão do átomo de Bohr no Ensino Médio foi enfatizada anteriormente por Peduzzi e Basso que chamam a atenção sobre as omissões e inadequações dos livros-textos utilizados em nosso país, e apresentam uma análise crítica do tema a partir de uma perspectiva mais abrangente [14]. Nosso objetivo aqui é o de propor um modo prático, factível, de introduzir os conceitos iniciais, provisórios, sobre a estrutura da matéria por meio do modelo de Bohr. Como enfatizado por Aron [15], a apresentação do modelo de Bohr deve ser precedida por uma discussão do experimento de Thomson para que a sua relevância física faça sentido. Em particular, Aron chama nossa atenção para o fato que, para os alunos, a regra de quantização do momento angular, supondo que este conceito tenha sido discutido previamente, parece arbitrária, algo mais próximo da magia do que da ciência [15]. A abordagem proposta aqui procura evitar que isto aconteça. Para finalizar, convém salientar que a leitura de textos complementares sobre Bohr e suas idéias, acessíveis ao

aluno do Ensino Médio, também são de grande valia e, felizmente, há textos em língua portuguesa que podem auxiliar o professor, veja, por exemplo, a Ref. [16].

Agradecimentos

Os autores agradecem aos árbitros pela leitura do manuscrito original e pelas sugestões.

Referências

- [1] N. Bohr, *Philos. Mag.* **26**, 1 (1913); N. Bohr, *Philos. Mag.* **26**, 476 (1913); N. Bohr, *Philos. Mag.* **26**, 857 (1913). Veja também a versão em português que reúne os três artigos: N. Bohr, *Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas* (Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1969).
- [2] B.L. Haendler, *J. Chem. Edu.* **5**, 372 (1982).
- [3] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica* (Edgard Blücher, São Paulo, 1998), v. 4.
- [4] F. Caruso e V. Oguri *Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos* (Elsevier, Rio de Janeiro, 2006).
- [5] F.A.G. Parente, A.C.F. dos Santos e A.C. Tort, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **35**, 4301 (2013).
- [6] F.L. da Silveira e L.O.Q. Peduzzi, *Cad. Bras. En. Fís.* **23**, 1 (2006).
- [7] R.M. Eisberg, *Fundamentals of Modern Physics* (John Wiley, New York, 1961); ver também R.M. Eisberg e R. Resnick, *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles* (John Wiley, New York, 1985); A. Beiser, *Concepts of Modern Physics* (McGraw-Hill, New York, 1995), 5th ed.; P.A. Tipler e R.A. Llewellyn, *Física Moderna* (LTC, Rio de Janeiro, 2001), 3ª ed.
- [8] N. Bohr, *Philos. Mag.* **30**, 394 (1915).
- [9] H. Kragh, *Niels Bohr and the Quantum Atom* (OUP, Oxford, 2012).
- [10] A. Beiser, *Concepts of Modern Physics* (McGraw-Hill, New York, 1995), 5th ed.
- [11] F.A.G. Parente, *Uma Proposta para o Ensino do Átomo de Bohr no Ensino Médio*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [12] S.M. Glynn, *Science and Children* **44**, 52 (2007).
- [13] A.D. Tavares, A.J. Santiago, C.A. de Azevedo e R.A. Gonçalves Ledo, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **11**, 49 (1989).
- [14] L.O.Q. Peduzzi e A.C. Basso, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**, 545 (2005).
- [15] A.B. Arnolds, *Teaching Introductory Physics* (Wiley, New York, 1997).
- [16] M.C.B. Abdalla, *Bohr: O Arquiteto do Átomo* (Odysseus, São Paulo, 2003). Ver também V. Pleitez, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**, 250 (2003).