



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DO ÁTOMO DE BOHR NO
ENSINO MÉDIO

Francisco Áureo Guerra Parente

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:

Antonio Carlos Fontes dos Santos

Rio de Janeiro

Janeiro de 2013

UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DO ÁTOMO DE BOHR NO
ENSINO MÉDIO

Francisco Áureo Guerra Parente

Orientador:
Antonio Carlos Fontes dos Santos

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Dr. Antonio Carlos Fontes dos Santos (Presidente)

Dr. Alexandre Carlos Tort

Dr. Vitor Luiz Bastos de Jesus

Rio de Janeiro
Janeiro de 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

P228 Parente, Francisco Áureo Guerra
Uma Proposta ao Ensino do Átomo de Bohr no Ensino
Médio / Francisco Áureo Guerra Parente - Rio de Janeiro: UFRJ /
IF, 2013.

x, 88 f.: il.;30cm.

Orientador: Antônio Carlos Fontes dos Santos

Dissertação (mestrado) – UFRJ / Instituto de Física /
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2013.

Referências Bibliográficas: f. 86-88.

1. Ensino de Física. 2. Modelo de Bohr. 3. Analogias. I.
Santos, Antonio Carlos Fontes dos. II. Universidade Federal do Rio
de Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em
Ensino de Física. III. Uma Proposta Para o Ensino do Átomo de
Bohr no Ensino Médio.

*Dedico esta tese a meu pai Francisco
Rodrigues Parente*

Agradecimentos

Concluir o mestrado profissional já é uma tarefa muito árdua, pois além de ter de comparecer às aulas e estudar conteúdos que não via há mais de 20 anos, tive de conciliar o tempo com o trabalho de mais 5 colégios (com carga horária semanal de mais de 70h).

Agradeço à minha família que teve de abrir mão da convivência nos finais de semana e férias. À minha filha por não poder recorrer em todos os momentos ao seu “professor” mesmo estando em seu ano de vestibular. À minha esposa por abrir mão do lazer para poder me ajudar a ter paz nesta escritura. À minha mãe que mesmo tendo a perda do meu pai durante este processo compreendeu minha “ausência”. A paciência e a compreensão por esta “ausência” foram fundamentais para a conclusão em tempo árduo.

Uma primeira dissertação já estava em andamento quando minha orientadora Prof. Susana Souza Barros faleceu e meu co-orientador Prof, João José Fernandes tentou dar continuidade mas devido ao acúmulo de tarefas, não pôde continuar. A tarefa de escrever esta dissertação em 6 meses só foi possível devido à extrema dedicação do Prof. Antônio Carlos Fontes dos Santos que estava sempre disposto tanto em seu horário de trabalho quanto em seu tempo pessoal em dar retorno a qualquer dúvida e a criticar sempre construtivamente o que estava sendo escrito. Se como professor eu já tinha por ele extrema admiração com sua metodologia de trabalho, como orientador, pude perceber toda a dedicação que tem por seus alunos e pela Física.

Aos professores Francisco Cordeiro Filho e Alexandre Carlos Tort por terem aceito fazer parte da banca julgadora e pela presteza em receber esta tese tendo que, para isto, sacrificar estas “pequenas férias” do período natalino e de fim de ano.

E à minha ex-aluna, atual amiga, Mariana Faria Brito Francisquini que sacrificou seus finais de semana e madrugadas para me acompanhar nesta escritura- seja presencialmente ou pelo Facebook. Teria sido impossível escrever “tão rápido” sem as constantes discussões e críticas ao meu trabalho.

RESUMO

UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DO ÁTOMO DE BOHR NO ENSINO MÉDIO

Francisco Áureo Guerra Parente

Orientador:

Antonio Carlos Fontes dos Santos

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Apesar de mais de um século da dramática quebra de paradigmas gerada pela introdução da Física Moderna e de seu impacto nos avanços tecnológicos e na economia, seu estudo no Ensino Médio só se tornou evidente a partir de 2007 com a introdução do PCN+. A resistência por parte dos professores a mudar o currículo a que estão acostumados a trabalhar - o mesmo que foi visto quando eram estudantes-, também dificulta sua introdução. No Rio de Janeiro esta inserção se mostra mais atrasada que em outros estados. Embora um estudo completo e profundo sobre o conhecimento atual do átomo baseada na mecânica quântica não seja apropriado no nível médio, o ensino do modelo de Bohr constitui um passo importante no processo de aprendizagem do estudante, seja como processo histórico e filosófico importante na evolução da nossa compreensão da matéria, seja para ajudar os estudantes a aprender sobre a construção de modelos. Assim, o presente trabalho elabora uma proposta para o entendimento do átomo de Bohr a partir de analogias, visto que nos livros pesquisados, a dedução - importante passo para o processo de aprendizado dos alunos- é feita utilizando conteúdos não contemplados nas obras do PNLEM.

Palavras-chave: ensino de Física, Física Moderna, átomo de Bohr.

ABSTRACT

A proposal to teach Bohr's atom in High School

Francisco áureo Guerra Parente

Supervisor:

Antonio Carlos Fontes dos Santos

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

Despite of more than one century of the dramatic changes in the scientific paradigm on matter generated by the advances in modern physics and its impact on technology and economy, its inclusion in the high school curricula became evident in 2007 with the introduction of the PCN+. The opposition from part of teachers to change the curriculum they are used to is also a barrier to the introduction of modern physics in the high-school. In the state of Rio de Janeiro this insertion is even later in comparison to the other states. Even though a full quantum mechanical study on the actual knowledge on the atomic theory is not appropriate in high-school, the teaching of the Bohr model constitutes an important step toward it, as an important historic and philosophical process, and as a tool to help students on model-building. Thus, this work proposes the teaching of the Bohr model using analogies, since that in high-school physics books, the deduction – an important step in the learning process – is done by using contents not covered in the PNLEM recommended books.

Keywords: physics education, Modern Physics, Bohr's atom.

Rio de Janeiro
January, 2013

Sumário

CAPÍTULO 1 Introdução	1
CAPÍTULO 2 Por que estudar física moderna	5
2.1 O que diz a lei.....	5
2.2 Aplicações indispensáveis da Física Moderna no cotidiano.....	6
2.2.1 A Física Moderna na área da saúde, na preservação do meio ambiente e na economia.....	7
CAPÍTULO 3 Análise dos livros de Ensino Médio	10
3.1 Sobre o PNLEM.....	10
3.2 A escolha dos livros.....	10
3.3 Análise dos livros.....	11
3.3.1 Livro 1.....	11
3.3.2 Livro 2.....	12
3.3.3 Livro 3.....	12
3.3.4 Livro 4.....	13
3.3.5 Livro 5.....	13
3.3.6 Livro 6.....	14
3.3.7 Livro 7.....	14
3.3.8 Livro 8.....	14
3.3.9 Livro 9.....	15
3.4 Resumo da análise dos livros.....	16
3.5 Problema encontrado.....	18
CAPÍTULO 4 A utilização da analogia no decorrer de uma aula de Física	19
4.1 O conceito de Analogia	19
4.2 Sobre as Vantagens e Dificuldades encontradas na utilização de analogias.....	20

4.3 Algumas conclusões sobre a exploração de analogias no ensino da Ciência.....	22
CAPÍTULO 5 Uma proposta à utilização da analogia no ensino do átomo de Bohr.....	24
5.1 O modelo de Bohr.....	24
5.2 Passo 1 do Método de Analogias de Glynn – Introdução do Conceito: Os postulados de Bohr.....	26
5..2.1 A hipótese de De Broglie.....	26
5.3 Passo 2 do Método de Analogias de Glynn – Lembrar o conceito análogo: Ondas estacionárias.....	29
5.4 Passo 3 do Método de Analogias de Glynn - Identificar as características entre os domínios - Analogia entre ondas estacionárias e comportamento do elétron no átomo de Hidrogênio ($Z=1$).....	30
5.5 Passo 4 do Método de Analogias de Glynn - Identificar as características relevantes entre os dois domínios e conectar (mapear) as similaridades entre os dois objetos.....	35
5.6 - Passo 5 do Método de Analogias de Glynn - Indicar onde a analogia falha.....	36
5.7 - Passo 6 do Método de Analogias de Glynn - Traçar as conclusões sobre o conceito alvo.....	36
5.8 – Conclusão.....	37
CAPÍTULO 6 Absorção seletiva – Uma Aplicação Transdisciplinar da Partícula em uma Caixa.....	38
6.1 Etapas da visão.....	40
6.2 Uma analogia entre a molécula de retinal e uma grade metálica.....	42
6.3 Uma aplicação para o átomo de Bohr - a visão humana.....	43
CAPÍTULO 7 Conclusões.....	48

APÊNDICE A – Algumas questões de vestibulares abordando o átomo de Bohr.....	50
APÊNDICE B – Deduções clássicas para o raio de Bohr, energia e velocidade dos elétrons	59
APÊNDICE C – Produto.....	64
APÊNDICE D – Crítica de como o modelo de Bohr é introduzido nos didáticos da Química.....	85
BIBLIOGRAFIA.....	86

Introdução

O estudo da Física Moderna no Ensino Médio é contestado por muitos devido à complexidade de alguns novos conceitos e à matemática envolvida. No Brasil, modelos atômicos são geralmente ensinados no primeiro ano do nível médio na disciplina de química geral. No entanto, não há um número elevado de estudos sobre o aprendizado de modelos atômicos. Os estudos geralmente tratam da controvérsia acerca do foco sobre o conhecimento atual ou de uma abordagem histórica e quais modelos são mais apropriados para o ensino.

No ensino de Química, frequentemente são utilizados conceitos de Física Moderna sem citá-la em alguma etapa do processo. Conceitos como nível quântico principal, nível quântico secundário e radiação são citados sem nenhuma dedução quando apresentados pela disciplina citada. A Física, como principal responsável pela explicação, possuía uma atitude passiva diante desta situação. Apesar da necessidade desta introdução, diversos estados do Brasil começaram este trabalho nas duas últimas décadas, como pode ser visto no apêndice A, ficando o Rio de Janeiro defasado em relação aos outros. Como professor do Colégio Pedro II, instituição responsável pela introdução do estudo da Física no Brasil [Moraes,2011], senti-me incomodado com esta situação.

A partir dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) e das Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+), sugere-se o estudo da Física Moderna no Ensino Médio. As obras aprovadas pelo Governo para o Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLEM) contemplam com um percentual significativo este estudo da Física. Como explicar aos alunos, então, que um terço do volume de uma obra de Física não será estudado? A quebra deste tabu deve ser feita de forma cuidadosa.

A teoria sobre a estrutura dos átomos é tanto bonita quanto útil para explicar o funcionamento de equipamentos modernos, como veremos adiante no capítulo 2. Além do mais, os modelos atômicos fornecem um bom contexto

para o ensino das habilidades de raciocínio científico tais como construção de modelos e de como fazer inferências a partir de observações. A evolução dos modelos atômicos fornece 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 são descartados, com base somente em algumas observações.

Muitos estudos definem e categorizam modelos de modos distintos, alguns explicitamente focam nos modelos históricos, outros nas concepções dos estudantes [McKagan, 2008]. Cada autor possui suas hipóteses próprias sobre o modelo atômico “correto”. Alguns supõem que a explicação correta para a estabilidade dos átomos é a energia de localização devido ao princípio da incerteza de Heisenberg. Outros autores supõem que é correto descrever uma nuvem eletrônica como “feita de elétrons que estão se movendo muito rapidamente em torno do núcleo” e que um modelo de “nuvem” é mais sofisticado do que um modelo de camadas (sem, no entanto, definir tais termos) [McKagan, 2008]. Entende-se por modelo científico *“Um sistema conceitual mapeado, dentro de um contexto e/ou comportamento de um conjunto de sistemas físicos de modo a representar com segurança o padrão em questão e serve a funções específicas a seu respeito”* [Halloun, 2004] ou *“modelos são esquemas tentativos ou estruturas que correspondem a objetos reais, eventos, ou classes de eventos, e que tem poder de explicação. Modelos ajudam cientistas e engenheiros a compreenderem como as coisas funcionam”* [National Academy, 1996]. Ambas as definições focam na utilidade ao invés da correção de um modelo, de modo que modelos diferentes podem ser apropriados em diferentes contextos.

Cientistas utilizam modelos e um escopo do ensino de ciências é ajudar os estudantes a aprender como utilizar modelos. *“Ciência é um corpo de conhecimentos, uma empreitada baseada em evidências e pela construção de modelos que se estendem continuamente, refinam-se, e reveem o conhecimento”* [National Academy, 1996].

Uma das questões mais controversas no ensino de modelos atômicos é “se” e “como” ensinar o modelo de Bohr. A U.S. National Standards afirma que “cada átomo possui um núcleo positivamente carregado envolto por elétrons negativamente carregados” [National Academy, 1996], mas não descreve as propriedades destes elétrons, permanecendo em silêncio sobre qual modelo utilizar.

Ao contrário de fazer uso exclusivo de um modelo avançado, os especialistas são capazes de utilizar vários modelos, reconhecendo as vantagens (simplicidade) e limitações de cada modelo. Não ensinar o modelo de Bohr nega aos estudantes o uso de uma ferramenta útil para a compreensão acerca do funcionamento de equipamentos do seu cotidiano.

Neste trabalho, é observado o estudo do átomo de hidrogênio em alguns livros didáticos utilizados no Ensino Médio, que poderão ser vistas no capítulo 3, aprovadas ou não pelo PNLEM¹. Em todas as 9 obras analisadas as deduções clássicas para a energia, velocidade e raio do átomo de Bohr, quando feitas, utilizam o 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 notamos é um tratamento idêntico feito, por exemplo, em livros universitários como o livro *Fundamentos da Física Moderna* [Eisberg, 1979] - esta dedução consta no apêndice B.

Diante deste problema, decidimos elaborar uma proposta de estudo por analogias, a qual é feita no capítulo 4, sendo este o objetivo da presente tese. A ideia de o elétron só poder descrever certas órbitas é feita através de uma analogia com os harmônicos de uma onda em uma corda com as extremidades fixas - conceito de fácil assimilação por parte dos alunos de Ensino Médio. Os conceitos de interferência, ressonância e estados estacionários surgem para os alunos de uma forma visível e concreta, sem utilizarmos o conceito de momento angular, o qual não é contemplado no Ensino Médio, como será mostrado no capítulo 5.

¹ Ver seção 3.1 - capítulo 3

A utilização da Física Moderna nos permite uma visão transdisciplinar² da natureza, como pode ser verificado no capítulo 6 de modo a aplicar os conceitos que permeiam a analogia entre os modos normais de vibração em uma corda na visão humana, envolvendo as disciplinas de Física, Química e Biologia. Esperamos que esta proposta facilite e desmitifique o ensino do átomo de Bohr no Ensino Médio.

² Ver capítulo 6

Capítulo 2

Por que Estudar Física Moderna?

2.1 O que diz a lei

De acordo com o PCN+ o ensino da Física deve ser feito de maneira a dar subsídios ao aluno para que este possa vir a se tornar um cidadão “contemporâneo, atuante e solidário” [PCN+,2007] de modo que tal aluno possa participar da sociedade na qual está inserido tendo instrumentos para compreendê-la.

*“Alguns aspectos da chamada Física Moderna serão indispensáveis para permitir aos jovens adquirir uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria, de forma a que tenham contato com diferentes e novos materiais, cristais líquidos e lasers presentes nos utensílios tecnológicos, ou com o desenvolvimento da eletrônica, dos circuitos integrados e dos microprocessadores. A compreensão dos modelos para a constituição da matéria deve, ainda, incluir as interações no núcleo dos átomos e os modelos que a ciência hoje propõe para um mundo povoado de partículas. Mas será também indispensável ir mais além, aprendendo a identificar, lidar e reconhecer as radiações e seus diferentes usos. Ou seja, o estudo da **matéria e radiação** indica um tema capaz de organizar as competências relacionadas à compreensão do mundo material microscópico.”*

Assim, o PCN+ defende que o conteúdo de Física Moderna deva ser dado de modo que os jovens possam compreender melhor as estruturas da matéria, de maneira que o desempenho dos objetos de complexo funcionamento do cotidiano destes esteja mais inteligível aos alunos.

Apesar do debate nos meios acadêmicos acerca da necessidade ou não da física moderna no ensino médio, a orientação governamental aponta para a sua inserção no currículo de ensino médio. Como veremos adiante, este conteúdo já está presente em todas as obras aprovadas pelo governo no PNLEM, observando que nenhuma obra é aprovada sem que a Física Moderna esteja presente.

2.2 Aplicações indispensáveis da Física Moderna no cotidiano

Tomando como referência o artigo *Atoms, molecules and light – AMO Science enabling the future* [National Academies Press, 2002] podemos falar da importância deste tema tão amplo.

Ouvir um CD-player, navegar na internet, utilizar um aparelho *GPS*, todas as situações citadas têm algo em comum: só foram possíveis através do avanço tecnológico e do nosso conhecimento em mecânica quântica, em particular, sobre o átomo.

Modelos atômicos constituem (ou deveriam constituir) uma parte importante do currículo de Física desde o ensino fundamental até a pós-graduação. Os alunos aprendem modelos simples sobre a constituição da matéria no ensino fundamental e gradualmente integram ideias cada vez mais complexas a estes modelos ao longo de sua educação. O estudo da natureza da matéria fornece uma base sólida para a compreensão dos avanços da tecnologia moderna.

Como dissera um dos maiores pensadores do séc. XX : *“Se em algum cataclisma, todo o conhecimento científico fosse destruído, e apenas uma sentença fosse passada para as próximas gerações de criaturas, que declaração conteria o máximo de informação no menor número de palavras? Eu acredito que a hipótese atômica (ou o fato atômico, ou como quiser chamá-la) que todas as coisas são feitas de átomos ... Nesta frase, você vai ver, há uma enorme quantidade de informações sobre o mundo, se apenas um pouco de imaginação e pensamento são aplicados.”* [Feynman, 1963].

Embora a Física Moderna não esteja aparentemente presente no cotidiano dos alunos do Ensino Médio, suas aplicações estão cada vez mais presentes nas tecnologias utilizadas pelos alunos no seu dia a dia dentro e fora da escola.

Muito foi obtido com os avanços tecnológicos neste ramo da Física com diversas aplicações em distintas áreas, como as áreas: da saúde, da preservação do meio ambiente e da economia.

2.2.1 A Física Moderna na área da saúde, na preservação do meio ambiente e na economia

O nosso conhecimento sobre a estrutura atômica é um dos motores pelos quais as riquezas materiais de nossa sociedade fluem. As tecnologias desenvolvidas a partir das inovações nas últimas décadas proporcionam mudanças dramáticas no modo com que os bens e serviços são produzidos. Descobertas e aplicações da ciência atômica influenciam investimentos em outras áreas das ciências, bem como nas engenharias e medicina.

A Física Moderna desempenha um papel fundamental na saúde e no crescimento da economia mundial. A internet e as comunicações óticas, a indústria eletrônica, e sistema de posicionamento global (GPS), nanociências e nanotecnologias têm sido alavancados por tecnologias derivadas das pesquisas em física moderna.

Com o avanço da Medicina e da Física, hoje possuímos muitas técnicas que permitem aos profissionais de saúde tratar e diagnosticar doenças. Cada vez mais existe a necessidade de se utilizarem lasers em procedimentos operatórios devido à acurácia e à confiabilidade destes. Os médicos têm, hoje, a opção de escolher lasers cujos comprimentos de onda possam tratar especificamente cada tipo de doença e de tecido.

Para manter a terra habitável, precisamos melhorar nossa habilidade de monitorar a poluição induzida pelo homem e entender como os poluentes interagem entre si e como afetam diferentes partes da atmosfera. Existe a necessidade de usarmos um modelo para abranger os impactos sobre o ambiente de forma que possamos controlar a intervenção humana sobre este.

Modelos sobre a camada mais externa da atmosfera (mesosfera e termosfera), por exemplo, requerem conhecimento sobre a intensidade da radiação do sol em função do comprimento de onda, sobre as densidades dos constituintes das moléculas e átomos (principalmente N_2 , O_2 , O e He), sobre as probabilidades de átomos e moléculas de absorverem luz de um determinado comprimento de onda e sobre as taxas de colisão íon-molécula e elétron-

molécula. Medidas singulares de monitoração da poluição em várias regiões têm sido possíveis através do avanço das ferramentas de espectroscopia a laser como o “lidar” – light detection and ranging.

Hoje em dia há tecnologias a nossa disposição, como é o caso dos aparelhos GPS, da internet e até mesmo do telefone celular – tecnologias estas, primordiais para o desenvolvimento da economia de uma nação. Grande parcela do crescimento da indústria de comunicações é devido ao desenvolvimento da comunicação óptica, a qual fez da internet uma realidade. Esta é baseada em um conjunto de novas tecnologias como, por exemplo, o laser diodo o qual consiste em uma fonte - não maior do que um grão de sal – de luz extremamente brilhante que envia trilhões de pulsos a cada segundo através de redes de fibra óptica. Além disso, ressalta-se o aumento do alcance das comunicações ópticas através do uso de amplificadores que tornam possíveis comunicações intercontinentais, de modo que (com a utilização de um único amplificador) associado ao uso das fibras ópticas, centenas de raios laser coloridos possam ser transmitidos em uma única fibra.

Acompanhando o desenvolvimento das comunicações, o crescimento de computadores e de processamento de informações vem sendo cada vez mais comum e necessário já que estes estão intimamente interligados. Como exemplo do que pode ser feito hoje, um minúsculo componente de um transistor em um chip pode ser facilmente mostrado com o auxílio de um microscópio eletrônico, para se ter ideia sobre o tamanho do componente, este caberia facilmente em uma célula bacteriana. Com o avanço da tecnologia computacional, pode-se observar como resultado o aumento da velocidade dos computadores - tal resultado é obtido através da diminuição de tamanho dos componentes eletrônicos. Um fator limitante do tamanho de um chip e, assim, de sua velocidade é o comprimento de onda da luz utilizada para formar os padrões encontrados neste. As dimensões de transistores individuais estão diminuindo ao nível de átomos e moléculas de modo que se o presente decréscimo no tamanho dos transistores continuar, estima-se que estes terão de ser não maiores do que uma única molécula no ano de 2020. Nessa escala,

os processos que envolvem a mecânica quântica passam a ser primordiais de tal forma que, com o processamento quântico de informações, possam ser obtidas novas capacidades computacionais.

Existem muitas maneiras nas quais a ciência óptica, atômica e molecular têm contribuído com o desenvolvimento econômico de diversas nações e com nosso presente estilo de vida. Os avanços descritos aqui podem apenas nos dar uma ideia sobre o que podemos aguardar para as próximas décadas, sendo certo que velocidades computacionais e armazenamento de informações irão continuar a aumentar, requerendo completamente novas tecnologias para serem desenvolvidas a níveis atômicos e moleculares.

Capítulo 3

Análise dos livros utilizados no Ensino Médio – livros recomendados pelo PNLEM

3.1 Sobre o PNLEM

O Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio, mais conhecido como PNLEM, é um programa que visa à universalização da distribuição do livro didático a alunos de escolas públicas de todas as séries que compreendem o Ensino Médio brasileiro.

3.2 A escolha dos livros

Como exposto no capítulo 2, a indicação da inserção da Física Moderna no currículo do Ensino Médio fez com que os livros contivessem uma miscelânea de novos assuntos – como relatividade, átomo de Bohr, radiação do corpo negro –, de modo que a não-uniformidade na escolha dos conceitos por parte dos autores já seria assunto para outro trabalho. O que se pode destacar, contudo, é que o estudo do átomo de hidrogênio é abordado por praticamente todos os autores, com maior ênfase ou não, como veremos adiante.

No presente trabalho, foram escolhidas nove obras: 1) [Luz, 2011] - Física Contexto & Aplicações, 2) [Kantor, 2010] - Física - 3º Ano Coleção Quanta Física, 3) [Silva, 2010] - Física aula por aula: eletromagnetismo, ondulatória, física moderna, 4) [Sampaio, 2005] - Física: Volume Único, 5) [Biscuola, 2010] - Física Volume 3, 6) [Ramalho, 2007] - Os Fundamentos da Física, 7) [Sant'Anna, 2010] Conexões com a física, 8) [Fuke, 2010] - Física para o ensino médio, Volume 3 e 9) [Oliveira, 2010] - Física em contextos: Pessoal, Social e Histórica: eletricidade e magnetismo, ondas eletromagnéticas, radiação e matéria.

3.3 Análise dos livros

3.3.1 Livro 1

No livro 1, Física Contexto & Aplicações de Antônio Máximo Ribeiro da Luz e Beatriz Alvarenga, podemos notar a ênfase dada pelos autores à Física Moderna e Contemporânea. Aproximadamente um quarto da obra é dedicado a este tema, sendo apresentados e explorados inúmeros assuntos como: relatividade geral e restrita, física quântica, efeito fotoelétrico, fótons, átomo de Bohr, dualidade onda partícula – de Broglie, princípio da incerteza de Heisenberg e decaimento radioativo, em aproximadamente cem páginas.

Ateremo-nos ao estudo do átomo de hidrogênio, o qual é feito sem uma evolução histórica, não sendo apresentados os modelos de Thomson e Rutherford e suas respectivas falhas de modo que, com a exposição destas, o aluno possa ser levado a uma melhor compreensão de como é explicado o “mundo muito pequeno”. A obra parte da percepção por parte de Bohr de que a constante de Planck possuía dimensão de momento angular e, desta forma, poderia nos dar a ideia de uma rotação da partícula. A obra relaciona, também, o momento angular à quantização da radiação térmica de Planck e ao efeito fotoelétrico de Einstein, afirmando que o momento angular seria uma grandeza quantizada.

A dedução clássica é feita apresentando o modelo de Bohr e, em seguida, utilizando-se da força elétrica para estabelecer uma resultante centrípeta. Os autores, posteriormente, igualam o momento angular clássico a $\frac{n h}{2\pi}$ de modo a deduzir, assim, a expressão do raio de Bohr e, finalmente, apresenta as séries do espectro do hidrogênio. A sequência seguida pelos autores é idêntica à da mesma forma que é exposta em livros de terceiro grau como o livro “Fundamentos de Física Moderna” [Eisberg, 1979].

3.3.2 Livro 2

No livro 2, Física - 3º Ano (Coleção Quanta Física; V.1) – Kantor *et al*, é feita uma abordagem histórica dos modelos atômicos, sendo apresentados os modelos de Thomson e Rutherford. Como apresentação ao modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio, são utilizados os níveis de energia quantizados, não sendo feita a análise sobre a inconsistência da órbita eletrônica prevista pela física clássica para o modelo de Rutherford.

Não são feitas as demonstrações para o raio de Bohr ou para energias quantizadas através da utilização do momento angular, sendo apenas apresentado o diagrama de energia para o átomo de hidrogênio.

O livro faz uma abordagem de órbitas quantizadas através de uma análise direta das linhas de energia – os autores dedicaram uma página, somente, à apresentação dos modelos de Rutherford e Bohr para o átomo de Hidrogênio.

Apesar de o livro ter apresentado o conceito de momento angular em outro capítulo do mesmo volume, esta abordagem não é feita para explicar as órbitas quantizadas do elétron.

A física moderna está presente em todo o livro ao longo dos capítulos, seja como forma de capítulo ou como forma de leitura complementar. A unidade 1 - contendo quatro capítulos - é toda dedicada à física moderna, a qual permeia dois volumes da coleção.

3.3.3 Livro 3

O livro 3, Física aula por aula: eletromagnetismo, ondulatória, física moderna de Claudio Xavier da Silva, Benigno Barreto Filho, dedica aproximadamente 14% da obra à Física Moderna, apresentando em uma página uma descrição através de figuras sobre os modelos de Dalton, Thomson e Rutherford, não citando o modelo de Bohr e não apontando as inconsistências dos modelos citados.

3.3.4 Livro 4

No livro 4, Física: Volume ÚNICO de José Luiz Sampaio, Caio Sérgio Calçada. – 2. Ed., os autores dedicam aproximadamente 5% da obra à inserção da Física Moderna e, dentro deste tópico, o estudo do átomo de hidrogênio ganha certo destaque.

Os autores apresentam o modelo de Rutherford bem como a inconsistência prevista pela física clássica e, embora não seja feita uma análise histórica rigorosa dos modelos atômicos, os autores partem desta inconsistência para apresentar o modelo de Bohr. É feita a utilização da força elétrica como resultante centrípeta na órbita do elétron e, levando em consideração a energia cinética deste nesta órbita, é feita uma quantização orbital através da comparação da diferença de energias, igualando-a a hf .

A partir desta análise, são introduzidos os postulados de Bohr, sendo deduzidas as expressões para o raio de Bohr e para a energia quantizada, bem como é apresentado o diagrama de níveis de energia para o átomo de hidrogênio.

3.3.5 Livro 5

O livro 5, Física volume 3 Gualter José Biscuola, Newton Villas Bôas, Ricardo Helou Doca. – 1ª Ed., traz aproximadamente 14% da obra dedicada à Física Moderna. A análise dos modelos parte de Rutherford, não citando o modelo de Thomson ou o porquê da necessidade de outro modelo, ressaltando a inconsistência de tal modelo conjecturada pelo eletromagnetismo clássico.

O modelo de Bohr é apresentado juntamente com a utilização da dedução clássica do momento angular orbital associado à utilização da força elétrica como resultante centrípeta. São deduzidas, também, as expressões para o raio de Bohr e para a energia quantizada. Sendo apresentado, ainda, o diagrama de níveis de energia para o átomo de Bohr.

3.3.6 Livro 6

O livro 6, Os Fundamentos da Física de Francisco Ramalho Junior, Nicolau Gilberto Ferraro, Paulo Antônio de Toledo Soares – 9ª Ed., por sua vez, reservou aproximadamente 12% da obra à inserção da Física Moderna. Assim, quando abordado o átomo de hidrogênio, os autores escolhem fazer uma análise histórica começando pelo modelo de Rutherford, assinalando sua instabilidade do ponto de vista do eletromagnetismo clássico.

A solução para este problema é apresentada através do modelo de Bohr, através da exposição dos postulados de Bohr. Após tal exposição, são feitas as deduções clássicas relacionando a força elétrica à resultante centrípeta e, posteriormente, o momento angular à constante de Planck, chegando à dedução da energia por níveis – modelo Eisberg.

O autor – em nota de rodapé – formula o momento angular como sendo o produto entre a quantidade de movimento e o raio da órbita.

3.3.7 Livro 7

No livro 7, Conexões com a física de Blaidi Sant’Anna (*et. al.*) – 1ª Ed., a Física Moderna é trazida em 20% da obra. Os autores fazem uma análise histórica sucinta apresentando os modelos de Dalton, Thomson e Rutherford através de figuras, não trazendo as incoerências associadas a cada modelo.

O modelo de Bohr não é apresentado na obra e os autores, após apresentar os modelos citados, partem para uma análise de subpartículas e decaimento beta, de modo que podemos observar que as preocupações dos autores se tratavam em dividir a matéria em “pedaços cada vez menores”.

3.3.8 Livro 8

O livro 8, Física para o ensino médio, volume 3 de Luiz Felipe Fuke, Kazuhito Yamamoto – 1ª Ed., traz o conteúdo relativo à física Moderna em

aproximadamente 20% do volume. Embora o autor não cite os modelos de Thomson e Rutherford, ele apresenta a incongruência do modelo de Rutherford – sem dar nome ao modelo.

O autor parte para a ideia de órbitas nas quais não houvesse emissão de radiação e de que Bohr teria proposto que cada estado estacionário corresponderia a um diferente nível de energia. Sem deduções são descritos o estado fundamental e os estados excitados para o átomo de hidrogênio.

É formulada a expressão da energia quantizada relacionada à diferença entre estes níveis energéticos e apresentado o diagrama de níveis de energia para o átomo de hidrogênio.

3.3.9 Livro 9

O livro 9, Física em contextos: Pessoal, Social e Histórica: eletricidade e magnetismo, ondas eletromagnéticas, radiação e matéria – 1ª Ed.- Oliveira, Maurício Pietrocola, traz o conteúdo de Física Moderna em aproximadamente 30% do volume abordando diferentes tópicos.

Sobre o nosso objeto de estudo, é feita uma análise histórica detalhada a partir da Grécia antiga passando pelos modelos de Dalton, Thomson, Rutherford e, finalmente, Bohr. O autor cita, inclusive, o modelo “saturniano” de Nagaoka.

A falha de cada modelo é analisada, facilitando a compreensão da transição de um modelo para outro. Em um apêndice existem as deduções clássicas – como tratado no livro “Fundamentos de Física Moderna” [Eisberg,1979] - no qual é relacionada a força elétrica à resultante centrípeta e, posteriormente, o momento angular à constante de Planck. O raio de Bohr e a quantização da diferença de energias orbitais também são colocados neste apêndice. Dentre os livros trabalhados, este é o que traz o estudo mais completo desta parte.

3.4 Resumo da análise dos livros

De acordo com o exposto nesta breve análise dos capítulos de livros de ensino médio que abordam os assuntos da Física Moderna, podemos resumir tais dados em uma tabela de modo a tornar o presente capítulo mais inteligível ao leitor.

Os livros serão organizados na primeira linha da tabela conforme numeração já exposta anteriormente:

Livro 1) Luz, 2011] - Física Contexto & Aplicações;

Livro 2) [Kantor, 2010] - Física - 3º Ano Coleção Quanta Física;

Livro 3) [Silva, 2010] - Física aula por aula: eletromagnetismo, ondulatória, física moderna;

Livro 4) [Sampaio, 2005] - Física: Volume Único;

Livro 5) [Biscuola, 2010] - Física Volume 3;

Livro 6) [Ramalho, 2007] - Os Fundamentos da Física;

Livro 7) [Sant'Anna, 2010] Conexões com a física;

Livro 8) [Fuke, 2010] - Física para o ensino médio, Volume 3

Livro 9)) [Oliveira, 2010] - Física em contextos: Pessoal, Social e Histórica: eletricidade e magnetismo, ondas eletromagnéticas, radiação e matéria.

Assim, construímos a seguinte tabela, na qual os livros assinalados com X apresentam o conceito citado³:

Conceito ↓	Livro ⇨	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modelo de Thomson			X	X				X		X
Falha do Modelo de Thomson			X							X
Modelo de Rutherford			X	X	X	X	X	X		X
Inconsistência do Modelo de Rutherford					X	X	X		X	X
Modelo de Bohr		X	X		X	X	X		X	X
Iguala a força elétrica à resultante centrípeta		X			X	X	X			X
O momento angular clássico é igualado a $\frac{nh}{2\pi}$		X			X	X	X			X
Dedução da expressão do raio de Bohr		X			X	X	X			X
Dedução da expressão para a energia quantizada		X			X	X	X		X	X
Série do espectro do hidrogênio		X	X		X	X	X		X	X

Tabela 3.1: Resumo da análise dos livros

³ Os espaços em branco significam que o conteúdo não é apresentado na obra.

3.5 Problema encontrado

Apesar de a Física Moderna ser contemplada em todos os livros apresentados, apenas dois não abordam o modelo do átomo de Bohr. As sete obras que trazem o modelo citado se utilizam da dedução clássica (quase idêntica àquela encontrada no livro *Fundamentos da Física Moderna [Eisberg, 1979]* que pode ser encontrada no Apêndice B) para mostrar que a velocidade do elétron v , da mesma forma, o raio de sua órbita são quantizados. Dentre as nove obras pesquisadas, sete apresentam o modelo de Bohr e, dentre estas, cinco igualam o momento angular clássico a $n\hbar$, no intuito de chegar à quantização da velocidade do elétron e do raio de órbita deste. O problema em tal dedução é o fato de ser utilizado um conteúdo não abordado no Ensino Médio: o conceito de momento angular, tornando esta etapa da dedução abstrata demais aos estudantes secundários. Como poderíamos contornar este obstáculo sem introduzir mais um conteúdo no já abarrotado programa do Ensino Médio? Nossa proposta é realizar este ponto utilizando uma analogia com as Ondas Estacionárias – conceito de fácil assimilação por parte dos alunos – em detrimento da omissão desta etapa, como os autores dos livros analisados procedem.

Capítulo 4

A utilização da analogia no decorrer de uma aula de Física

4.1 O Conceito de Analogia

A importância da utilização da analogia no ensino de ciências, mais especificamente no ensino de Física, tem sido acentuada por diversos autores, especialmente quando é necessária a abordagem de conceitos mais abstratos. Iremos destacar a valiosa contribuição que esta ferramenta nos proporciona, além de alguns empecilhos associados frequentemente à exploração deste recurso nas aulas de ciências.

Muitos professores fazem uso de analogias em suas aulas sem ao menos perceberem isto. Uma analogia, por sua vez, pode ser definida como uma similaridade entre conceitos, ou seja, uma comparação explícita entre objetos – um conhecido e outro desconhecido- de dois conjuntos diferentes de maneira que possamos, a partir do objeto conhecido, imaginar o desconhecido. Faz-se necessário ressaltar que a analogia não pressupõe a necessidade de existência de uma igualdade simétrica entre os dois assuntos comparados.

A exploração das analogias no ensino de Física facilita o aprendizado de alunos já que estas fornecem um subsídio de um significativo *modelo mental* [Glynn,2007] através da correlação entre o familiar e o desconhecido, o qual pode ser um sistema com partes que interagem entre si, sendo mais difícil a sua compreensão/imaginação por parte dos estudantes. Com o desenvolvimento cognitivo destes e de sua aprendizagem, estas simples comparações entre objetos poderão evoluir propiciando os alunos a adotar outros modelos mentais ainda mais significativos.

Frequentemente, utiliza-se o termo “analogia” como um sinônimo de outros termos como “exemplo” ou “metáfora”, de tal forma que seja necessário fazermos a distinção destes termos de acordo com a literatura a respeito. A metáfora acentua aspectos ou características não presentes nos dois domínios,

sendo, assim, uma comparação implícita entre estes, segundo Vosniadou & Ortony⁴. O exemplo, por sua vez, difere-se da analogia por não instaurar comparações entre aspectos semelhantes de dois conceitos, citados na obra de Duit⁵.

4.2 Sobre as Vantagens e Dificuldades encontradas na utilização de analogias

Acerca das inúmeras contribuições que a utilização da analogia no ensino de Física, destacam-se:

- Os alunos podem, através da organização do pensamento análogo, desenvolver habilidades cognitivas como a criatividade;
- Os professores podem utilizá-las como ferramenta para avaliação dos alunos;
- Propiciam aos professores a facilitar a compreensão de evoluções conceituais;
- Facilita a compreensão de conceitos abstratos, tornando o conhecimento científico mais acessível aos alunos.

Além das contribuições supracitadas, podemos enumerar alguns obstáculos que podem ser encontrados por parte dos profissionais de educação quando dispostos a explorar esta ferramenta em suas aulas:

- A analogia pode ser confundida com o conceito em si, ou seja, apenas os detalhes mais marcantes podem ficar retidos nos alunos de forma que não se atinja o fim desejado;
- Os alunos podem negligenciar suas limitações, extrapolando conceitos;

⁴, ¹⁰ 2005 apud DUARTE, Maria da Conceição. Analogias na educação em ciências - Contributos e desafios. Investigações em Ensino de Ciências – v10 (1), pp.7-29.

- A analogia pode não ficar clara para os alunos, de maneira que não fique visível o porquê de sua utilização;
- Os alunos podem não ter um pensamento análogo, dificultando o entendimento da mesma.

Defende-se a ideia de que o emprego das analogias no cotidiano da sala de aula não deva ser instintivo, mas baseado em um processo criterioso que estabeleça previamente quais práticas serão adotadas. Assim, uma série de modelos baseados neste mecanismo de ensino foi criada a fim de proporcionar ao professor uma estratégia a seguir quando disposto a trabalhar com a utilização de analogias. Podemos classificá-los em: modelo de ensino baseado no aluno, modelo de ensino baseado no professor e no aluno e o modelo de ensino baseado no professor.

Iremos nos aprofundar no modelo de ensino baseado no professor, não podendo deixar de mencionar, contudo, o modelo centrado no aluno e o modelo centrado no professor e no aluno.

O primeiro consiste em estimular os próprios alunos a criar e avaliar suas próprias analogias acerca do tema abordado, em detrimento de uma postura passiva em que estes seriam apenas ouvintes das analogias oriundas do professor. Este modelo, apesar de possuir vantagens, dispõe de uma dificuldade cuja superação seja incerta: os alunos se deparam com suas próprias limitações na hora de criar as analogias, seja pela falta de conhecimento do objeto desconhecido ou apenas pela dificuldade em selecionar um objeto conhecido que possa ser usado como referência.

O segundo modelo consiste em estimular os alunos na participação conjunta da formação do conceito análogo, isto é, após apresentado o conceito a ser estudado, estes irão construir junto com o professor a analogia apontando as semelhanças entre os domínios diferentes. O modelo citado, como todos, apresenta suas vantagens e limitações. Limitações estas que se tornam mais recorrentes quando se tratam de assuntos científicos mais complexos.

Iremos abordar, finalmente, o modelo centrado no professor nos aprofundando no trabalho “The Teaching-With-Analogies Model” [Glynn, 2007] ou, abreviadamente, TWA.

O autor chama a atenção, primeiramente, ao fato de que nem todos os alunos podem ter conhecimento acerca do domínio utilizado para explicar a analogia. Assim, o mesmo esclarece que deva ser feita uma confirmação de que todos os alunos estejam familiarizados com o conceito análogo. Glynn defende, também, que o professor deva explicar aos alunos o que é e no que consiste uma analogia de modo que todos saibam que esta é apenas uma comparação feita para facilitar o processo de aprendizagem e o mesmo oferece seis etapas para utilizá-la:

- 1) Introduzir o conceito-alvo;
- 2) Lembrar aos alunos o que estes sabem sobre o conceito análogo;
- 3) Identificar as características relevantes entre os dois domínios;
- 4) Conectar (mapear) as similaridades entre os dois objetos;
- 5) Indicar onde a analogia falha;
- 6) Traçar as conclusões sobre o conceito alvo.

4.3 Algumas conclusões sobre a exploração de analogias no ensino da Ciência

Uma das implicações deste modelo desenvolvido por Glynn é o fato de os professores terem de selecionar objetos análogos que compartilhem muitas características semelhantes com o conceito alvo. Desta forma, quanto mais características compartilhadas, mais bem sucedida será a analogia. Outra implicação do TWA é que os professores devem verificar cautelosamente se os alunos não cometeram nenhum equívoco durante o processo – esta etapa pode ser verificada através de perguntas sobre características que não são compartilhadas entre o objeto análogo e o conceito alvo.

É importante ressaltar que a analogia funciona como um “modelo mental” conectando um conhecimento anterior com um novo conhecimento ao serem abordados novos conceitos abstratos e o método de Glynn nos serve como guia para utilizá-la de modo que os alunos possam compreender conceitos-chave em ciência. Já que as analogias estão presentes nos livros usados pelos estudantes, então os professores podem e devem explorá-las para se certificarem de que estas são eficazes, tornando o conceito-alvo familiar e significativo aos alunos.

Capítulo 5

Uma Proposta à Utilização da Analogia no Ensino do Átomo de Bohr

Embora as evidências sejam fracas, alguns pesquisadores afirmam que não deveríamos ensinar o modelo de Bohr para o átomo porque acarretaria na inibição da habilidade de aprender a verdadeira natureza quântica dos elétrons em átomos. Esta afirmação possui implicações profundas no modo de introduzir a Física Atômica desde o ensino fundamental até a pós-graduação. McKagan, Perkins e Wieman realizaram um estudo [McKagan, 2008] com alunos de engenharia com o intuito de testar a afirmação acima através do desenvolvimento de um currículo sobre modelos atômicos, incluindo o modelo de Bohr e o modelo de Schrödinger. Os autores examinaram as descrições dos alunos nos exames finais de disciplinas de física moderna utilizando várias versões daquele currículo. É reportado que, se o currículo não inclui conexões suficientes entre modelos distintos, muitos estudantes ainda mantêm uma visão do modelo de Bohr ao invés do modelo de Schrödinger. No entanto, com um currículo que privilegia o desenvolvimento de habilidades de construção de modelos e com uma melhor integração entre os modelos, é possível reverter este quadro. Os autores verificaram que a comparação entre os vários modelos é a chave que ajuda aos alunos irem além do modelo de Bohr e adotar a visão de Schrödinger. Os autores relatam também que a compreensão das razões para o desenvolvimento de modelos é muito mais difícil para os alunos do que a compreensão dos modelos em si.

5.1 O Modelo de Bohr

O modelo de Rutherford atribuía carga e massa ao núcleo, mas nada falava a respeito da carga e massa do elétron. Bohr estabeleceu um modelo no qual os elétrons estariam girando em torno do núcleo e este modelo seria utilizado para explicar a posição das linhas do espectro de hidrogênio.

Este modelo era inviável pela Física Clássica, apesar de ser estável pela mecânica, onde a força coulombiana desempenharia o papel de resultante centrípeta:

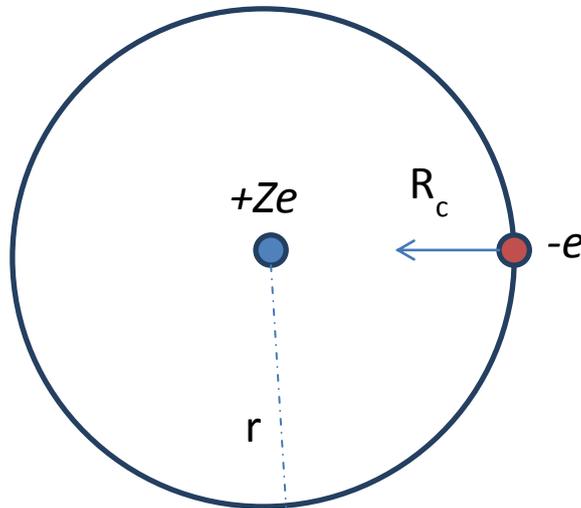


Fig. 5.1 – Representação do modelo de Bohr para o átomo de Hidrogênio

$$F_{el} = Res_c \quad (5.1)$$

$$F_{el} = \frac{KZe^2}{r^2} \quad (5.2)$$

onde Ze = carga do núcleo, e

$$Res_c = \frac{mv^2}{r} \quad (5.3)$$

Entretanto o modelo era instável eletricamente, pois cargas elétricas em movimento acelerado irradiam ondas eletromagnéticas. Por conseguinte, de acordo com a Física Clássica, o elétron emitiria radiação, perdendo energia e fazendo com que o raio de sua órbita diminuísse cada vez mais; aumentando, assim, a frequência de revolução do elétron, fazendo com que o mesmo se chocasse com o núcleo em um tempo de aproximadamente um microssegundo, provocando o colapso do átomo.

5.2 Passo 1 do Método de Analogias de Glynn – Introdução do Conceito: Os postulados de Bohr

Para que seu modelo tivesse validade, seria necessário que este explicasse onde os modelos antigos falharam. Bohr, para isso, postulou as seguintes ideias:

- 1) O elétron se move em certas órbitas sem irradiar energia (órbitas de estados estacionários) e nestas obedeceriam os resultados da Física Clássica.
- 2) O elétron só emite ou absorve energia (ondas eletromagnéticas) ao mudar de órbita.

5.2.1 A Hipótese de De Broglie⁶:

No início do estudo da estrutura da matéria na primeira metade do século XX, os físicos estavam familiarizados com duas coisas: ondas e partículas. Partículas são muito familiares a nós. Estão localizadas em uma região específica do espaço, podendo se mover de um ponto a outro de modo que tal movimento pode ser descrito em termos de sua posição e velocidade. Ondas também nos são familiares. Ao contrário de partículas, não estão localizadas em uma região específica do espaço. A onda pode ser mover com uma determinada velocidade, mas sua extensão espacial não é localizada. Para descrevermos uma onda é necessário conhecermos uma característica denominada *comprimento de onda*. Devido às diferenças em suas naturezas, partículas e ondas se comportam de modos distintos. Assim, no início do estudo das partículas que constituem a matéria, os físicos faziam a seguinte pergunta: o elétron é uma partícula ou uma onda? Ao tentar estudar o comportamento de elétrons em átomos, ficava claro para de Broglie que as propriedades dos elétrons não eram sempre aquelas de uma partícula. De modo a caracterizar os estados estacionários dos elétrons atômicos, seria

⁶ Assunto previamente contemplado em 8 das 9 obras. A única obra que não apresenta tal tópico é o livro [Silva, 2010] - Física aula por aula: eletromagnetismo, ondulatória, física moderna, obra esta que sequer contempla o átomo de Bohr. Logo partiremos da hipótese de que este assunto já fora previamente introduzido conforme consta nos livros trabalhados.

admissível pensar que as condições de quantização levariam a introduzir o aspecto ondulatório dos elétrons atômicos. Uma tarefa produtiva e urgente seria o esforço de atribuir ao elétron ou, mais geralmente, a todas as partículas uma natureza dual análoga à do fóton, dotando-o com aspectos de onda e de corpúsculo relacionados entre si pela constante de Planck.

Utilizando argumentos baseados em princípios gerais da teoria da relatividade, de Broglie foi levado ao seguinte resultado: a frequência da onda associada é igual ao quociente da energia do corpúsculo pela constante de Planck:

$$f = \frac{E}{h}.$$

O comprimento de onda da onda associada é igual ao quociente da constante de Planck pelo momento da partícula, podendo ser escrito da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (5.4)$$

Esta conexão entre partícula e sua onda associada tinha a grande vantagem de ser exatamente igual a que Einstein utilizou ao associar o fóton com ondas de luz. Observemos o seguinte experimento:

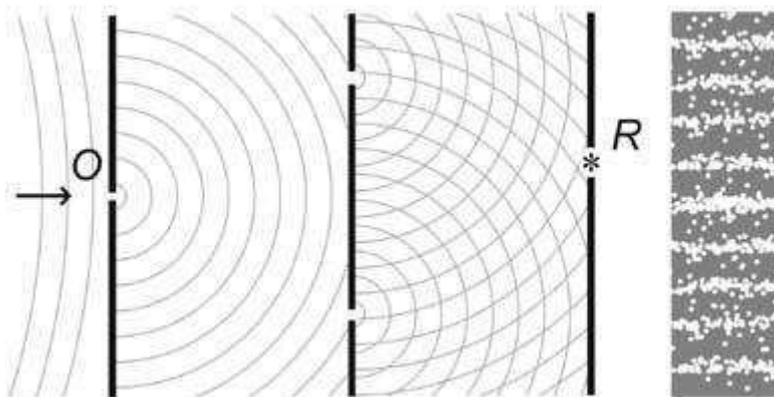


Fig. 5.2 – extraída de www2.uol.com.br/vyaestelar/figuras/vyaop-16-fig3.jpg em 06 /10/2012

Ao incidir um feixe de elétrons em uma fenda dupla, observamos várias franjas/marcações no filme fotográfico. Se tratássemos o elétron como

partícula, só veríamos duas franjas no filme. No entanto, ao observarmos essa sequência, só poderíamos explicá-la pelos fenômenos de difração e interferência, características de uma onda.

Logo, certos fenômenos podem ser explicados ao tratarmos o elétron como partícula e outros são explicados se o tratarmos como uma onda. Esta duplicidade de comportamento é chamada de *dualidade ondapartícula*.

Em 1924, Louis de Broglie estudou este caráter ondulatório dos elétrons elaborando propostas para quantificar comprimento de onda e frequências do elétron. A relação de De Broglie nos fornece um meio de calcular o comprimento de onda associado ao comportamento ondulatório da matéria. De Broglie propôs que a relação $\lambda = \frac{h}{mv}$ fosse geral para qualquer partícula. Assim, qualquer partícula material poderia possuir uma natureza ondulatória com um comprimento de onda de De Broglie associada a esta partícula.

Logo, podemos discutir elétrons usando duas linguagens: onda ou partícula. Vamos utilizar a seguinte analogia: suponha que tenhamos que viajar ao Canadá. Deste modo, estudamos francês, pois no Canadá se fala o francês. Mas você terá uma surpresa ao chegar naquele país. Muitos canadenses falam o inglês e se recusam a falar no idioma francês e vice-versa. Como o inglês adotou algumas palavras do francês, você ficaria intrigado, pois os canadenses pareceriam ora estar falando inglês ora francês. O problema é que fizemos a suposição errada de que no Canadá apenas se fala o francês. O inglês é uma língua distinta, mas que possui similaridades com o francês. Em física é similar. Assim como as línguas faladas em diferentes partes da Terra são diferentes, as leis que governam alguns aspectos da física também utilizam linguagens diferentes. Nenhuma lei obriga que a realidade física seja descrita por uma única linguagem. Podemos buscar por esta linguagem única, mas a natureza é indiferente aos nossos sonhos. Geralmente assumimos que tudo que encontramos têm que se comportar como as coisas que já conhecemos. Assim, encontramos algo que não se ajustava no nosso antigo esquema conceitual. Como escolhemos qual linguagem usar? A resposta é *simplicidade*.

Bragg chegou a escrever: "Os elétrons se comportam como partículas às segundas, quartas e sextas e como ondas às terças, quintas e sábados. Aos domingos, os físicos descansariam do esforço de tentar compartilhar os dois comportamentos". Assim o termo dualidade onda-partícula foi cunhado para expressar esta característica dos elétrons e fótons.

Logo, a órbita eletrônica, antes circular, teria uma representação (com um número inteiro de comprimentos de onda) como feita abaixo:

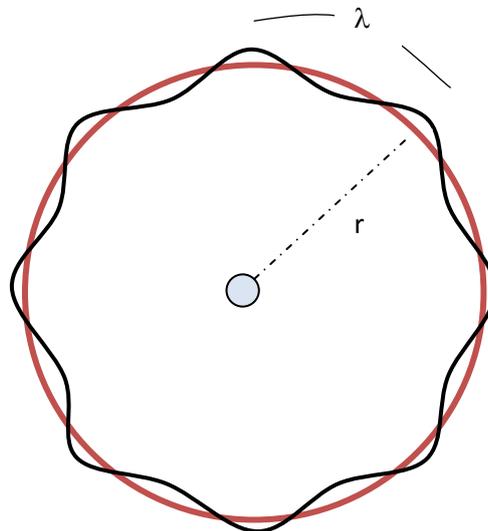
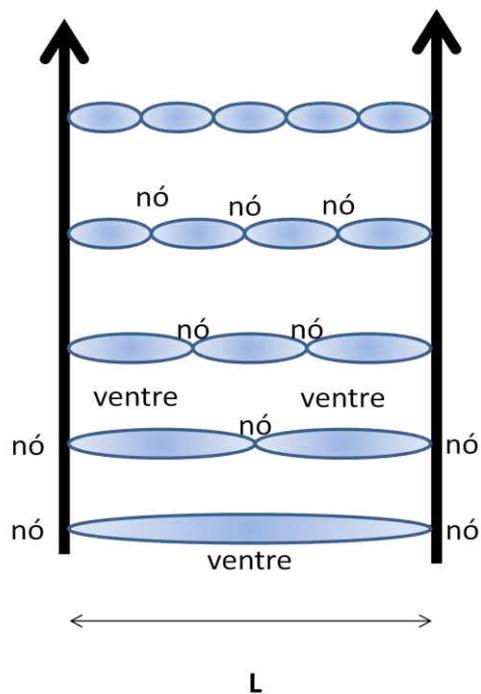


Fig. 5.3 - Representação do comportamento ondulatório do elétron

5.3 Passo 2 do Método de Analogias de Glynn – Lembrar o conceito análogo: ondas estacionárias em uma corda

Lembrando que ondas estacionárias em cordas adotam o seguinte padrão:



- 5º harmônico (n=5)
 $\lambda = 2L/5$
- 4º harmônico (n=4)
 $\lambda = 2L/4$
- 3º harmônico (n=3)
 $\lambda = 2L/3$
- 2º harmônico (n=2)
 $\lambda = L$
- Modo fundamental ou 1º harmônico (n=1)
 $\lambda = 2L$

Temos que:

$$v = \lambda f \quad (5.5)$$

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad (5.6)$$

5.4 Passo 3 do Método de Analogias de Glynn - Identificar as características entre os domínios - Analogia entre ondas estacionárias e comportamento do elétron no átomo de Hidrogênio (Z=1)

Igualando as equações (5.6) e (5.4) temos:

$$\frac{2L}{n} = \frac{h}{m v}$$

Então,

$$2L = \frac{nh}{mv}.$$

Tomando $2\pi r$ como maior comprimento de onda do elétron, temos:

$$2\pi r_n = \frac{nh}{mv}.$$

Como o raio da órbita depende do número quântico n , passaremos a indicá-lo com o índice n . Obtemos, então, a velocidade do elétron:

$$v = \frac{nh}{2m\pi r_n}. \quad (5.7)$$

Igualando as equações (5.2) e (5.3):

$$\frac{KZe^2}{r_n^2} = \frac{mv^2}{r_n} \quad (5.8)$$

substituindo a eq. (5.7) em (5.8), obtemos:

$$\frac{Ke^2}{r_n^2} = \frac{m}{r_n} \left(\frac{nh}{2m\pi r_n} \right)^2. \quad (5.9)$$

Obtemos o raio da órbita do elétron isolando o termo r_n :

$$r_n = \frac{n^2 h^2}{m 4 \pi^2 K e^2} \quad n = 1, 2, 3... \quad (5.10)$$

Para $n=1$ obtemos o raio do estado fundamental do átomo de hidrogênio, conhecido também por raio de Bohr ($a_0 = r_1$) :

$$a_0 = \frac{h^2}{4m\pi^2 K e^2} = 5,3 \times 10^{-11} m.$$

Como o núcleo atômico possui dimensões da ordem de 10^{-15} m, podemos verificar que um átomo é constituído principalmente de espaços vazios. As dimensões da órbita do elétron em um átomo de hidrogênio é 10^5

vezes o tamanho do núcleo. Se um próton tivesse as dimensões de uma moeda de cinco centavos de reais (~1 cm), o elétron ligado mais próximo estaria 1 km afastado.

Para obtermos a velocidade, igualamos as equações (5.2) e (5.3):

$$\frac{K e^2}{r^2} = \frac{m v^2}{r},$$

$$r = \frac{K e^2}{m v^2} \Rightarrow v^2 = \frac{K e^2}{m r},$$

mas, da equação (5.10):

$$v^2 = \frac{K^2}{m} \cdot \frac{4 \pi^2 m}{n^2 h^2} e^4,$$

$$v = \frac{2 \pi e^2 K}{n h}. \quad (5.11)$$

A energia total do elétron deve ser conservada:

$$E_t = E_c + E_p.$$

Tomando o potencial eletrostático como nulo no infinito, temos:

$$E_t = \frac{m v^2}{2} + \left(-\frac{K Z e^2}{r} \right) \quad (5.12)$$

Pela Eq. 5.12 vemos que a energia potencial é maior em módulo que a energia cinética, descrevendo assim, um estado ligado. Substituindo (5.8) em (5.12), obtemos:

$$E_t = \left(\frac{K Z e^2}{2 r} \right) - \left(\frac{K Z e^2}{r} \right) = \left(-\frac{K Z e^2}{2 r} \right)$$

A energia total do elétron também é quantizada devido ao fato de o raio ser quantizado, de modo que para Z=1:

$$E_n = \left(-\frac{K e^2}{2 r_n} \right)$$

e
$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m K e^2} ,$$

$$E_n = \left(-\frac{m K^2 e^4}{2 n^2 \hbar^2} \right) = \frac{-R_\infty}{n^2} \quad n = 1, 2, 3.. \quad (5.13)$$

onde $R_\infty = \frac{m K^2 e^4}{2 \hbar^2} = 13,6 \text{ eV} = 2,18 \times 10^{-18} \text{ J}$ é a constante de Rydberg.

Percebemos que a diferença da energia do elétron entre duas órbitas é quantizada, como podemos ver abaixo:

$$E_{mi} - E_{mf} = \left(-\frac{R_\infty}{n_i} \right) - \left(-\frac{R_\infty}{n_f} \right)$$

De acordo com o postulado de Bohr, esta é a energia absorvida ou emitida pelo elétron ao mudar de órbita.

Experimentalmente observamos que esta energia é igual ao produto da frequência do fóton emitido/ absorvido pelo elétron pela constante de Planck, chegando à seguinte relação:

$$E_{mi} - E_{mf} = \left(-\frac{R_\infty}{n_i} \right) - \left(-\frac{R_\infty}{n_f} \right) = hf \quad (5.14)$$

Logo, a frequência do fóton emitido/absorvido é:

$$f = \left(\frac{R_\infty}{h} \right) \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right),$$

O que nos possibilita o entendimento do diagrama de energia a seguir no qual temos linhas bem definidas, caracterizando saltos quantizados :

Devido ao seu diminuto tamanho, não podemos observar diretamente a estrutura interna de um átomo. Esta estrutura é revelada indiretamente por fenômenos observáveis que são consequências de seu arranjo interno. Entre estes fenômenos estão os espectros de luz emitidos pelos átomos excitados. Estes espectros constituem uma “impressão digital” do átomo que os emitiu.

Em 1835, o filósofo francês Auguste Comte, afirmou que não seríamos capazes de compreender a composição química das estrelas. Ele estava errado! Na segunda metade do século XIX, os astrônomos começaram a utilizar as técnicas de espectroscopia e fotografia. Assim, estas técnicas ajudaram a produzir uma revolução da nossa compreensão sobre o universo, sendo possível estudar, pela primeira vez, a constituição do universo. Fraunhofer utilizou um prisma montado na frente da lente da objetiva de um telescópio. Ele verificou que quando a luz do sol e as estrelas brilhantes eram analisadas, havia linhas de absorção características no espectro produzido. Fraunhofer, porém, morreu antes que ele pudesse estudar este fenômeno de forma mais completa.

Os espectros de emissão correspondem a eventos que acontecem no interior do átomo e nos fornecem informações acerca de sua estrutura. Antes de Bohr sugerir o seu modelo, já se sabia que era possível separar as linhas do espectro de emissão em famílias ou séries. Os padrões dos espectros de emissão de diferentes átomos possuem uma grande analogia entre si. Em 1885, Balmer foi capaz de encontrar uma equação que descrevia todas as frequências das linhas que formavam o espectro visível do átomo de hidrogênio e que formavam a série que levou o seu nome. A exploração do espectro do átomo de hidrogênio além da região do visível revelou a existência uma série no ultravioleta (série de Lyman) e séries no infravermelho (séries de Paschen, Brackett e Pfund). Em cada uma destas séries, as frequências das linhas obedeciam a equações análogas à série de Balmer. Sobre estas séries, Poincaré escreveu em 1905: “...*As leis são mais simples, mas elas são de uma natureza totalmente diferente... da qual, nós não percebemos, e eu acredito que sejam um dos segredos mais importantes da natureza*” . Esta frase foi escrita anos antes da teoria de Bohr.

Temos, então, o seguinte diagrama de energia :

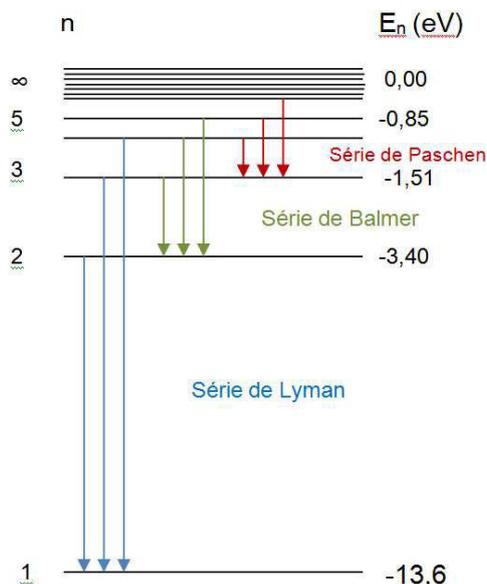


Figura 5.5: diagrama de níveis de energia

As fórmulas de Balmer e suas análogas apresentam uma constante numericamente bem conhecida e que os espectroscopistas chamavam de constante de Rydberg. O modelo de Bohr não só prevê o valor desta constante, mas também a descreve em termos de grandezas fundamentais como a carga e a massa do elétron e a constante de Planck. A este acordo quantitativo foi atribuído o grande sucesso do modelo de Bohr.

5.5 – Passo 4 do Método de Analogias de Glynn - Identificar as características relevantes entre os dois domínios e conectar (mapear) as similaridades entre os dois objetos:

Na figura 5.5 estão presentes 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.

Identificando as características relevantes entre os dois domínios e mapeando as similaridades entre os dois objetos:

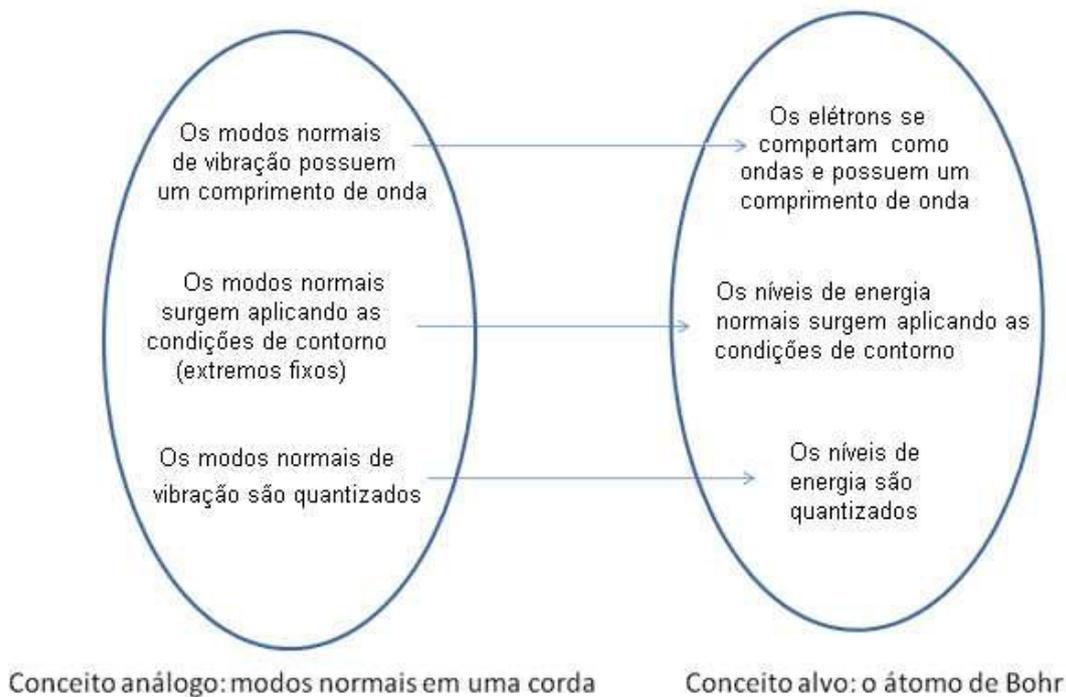


Fig. 5.6 – mapeando os conceitos alvo e análogo no modelo de Bohr.

5.6 - Passo 5 do Método de Analogias de Glynn - Indicar onde a analogia falha:

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.

5.7 - Passo 6 do Método de Analogias de Glynn - Traçar as conclusões sobre o conceito alvo:

Assim como nas ondas estacionárias pode haver uma interferência construtiva, o mesmo ocorre nas órbitas dos elétrons.

5.8 - Conclusão

A grande utilidade da aplicação de tal analogia é a de chegarmos às expressões quantizadas para a velocidade e raio do elétron utilizando um conceito de fácil assimilação por parte dos alunos – o conceito de ondas estacionárias. Diversas são as simulações que podem ser feitas em sala de aula com o auxílio de programas como o *PhET – Physics Education Technology, programa de simulações da Universidade do Colorado-*, de modo que o aluno possa ver os padrões de interferência construtiva e/ou destrutiva. Assim, através da visualização do fenômeno, o aluno é transportado do mundo micro para o mundo macro, gerando uma melhor compreensão sobre o assunto. No próximo capítulo, mostramos que pode ser feita uma analogia para explicar o fenômeno da visão de maneira transdisciplinar relacionando o átomo de Bohr com conteúdos de outros domínios, como a Química e a Biologia

Capítulo 6

Absorção seletiva – Uma Aplicação Transdisciplinar da Partícula em uma Caixa

O principal objetivo da educação é a unificação do conhecimento existente em diferentes ramos da aprendizagem, de acordo com o PCN+:

“Nessa nova compreensão do ensino médio e da educação básica, a organização do aprendizado não seria conduzida de forma solitária pelo professor de cada disciplina, pois as escolhas pedagógicas feitas numa disciplina não seriam independentes do tratamento dado às demais, uma vez que é uma ação de cunho interdisciplinar que articula o trabalho das disciplinas, no sentido de promover competências.”

Para alcançar tal unificação, um esforço consciente tem de ser feito pelos professores que lecionam as diversas disciplinas que compõem o currículo do Ensino Médio. É só por uma empreitada em conjunto que vamos conseguir atingir a meta de unificação do conhecimento e desfazer o fosso que separam as disciplinas. Nenhum conteúdo deve ser trabalhado de forma isolada. No caso do ensino de física, para uma aprendizagem eficaz, devemos usar como vantagem as correlações e aplicações desta, da matemática e da química. Além da correlação entre química e física com outras disciplinas escolares e da vida cotidiana, diversas correlações são possíveis com outros temas científicos, entre eles a biologia.

A divisão artificial da ciência em vários ramos do saber é uma questão de conveniência e não de necessidade. Com base nesta premissa, muitos educadores defendem a implementação currículos com base em temas correlacionados. Esses currículos têm o potencial de dar mais sentido à nossa instrução em sala de aula. Vários assuntos em química e física têm contribuído muito para o avanço social e para o bem estar de nossa sociedade. A Química e Física têm contribuído muito para o desenvolvimento de alguns de outras áreas do conhecimento.

“O novo ensino médio deve estar atento para superar contradições reais ou aparentes entre conhecimentos e competências. Para quem possa temer que se estejam violando os limites disciplinares, quando estes se compõem com conhecimentos e competências, vale lembrar que as próprias formas de organização do conhecimento, as disciplinas, têm passado por contínuos rearranjos. Muitas disciplinas acadêmicas e muitos campos da cultura resultam de processos recentes de sistematização de conhecimentos práticos ou teóricos, reunindo elementos que, em outras épocas, estavam dispersos em distintas especialidades’.(PCN+)

Citemos três tipos de correlação importantes: correlação com a vida diária, a correlação entre as várias disciplinas científicas e correlação com outros assuntos. A relação com a vida: apesar de um objetivo importante da ciência seja dar um treinamento em métodos científicos, o estudo da ciência também tem como objetivo fornecer uma visão sobre muitos de fenômenos naturais e também nos ensina os vários princípios que estão na base de muitas regras simples de vida. Cada princípio da ciência tem alguma aplicação útil na vida diária e é dever do professor salientar estes ao ensinar o princípio. Assim, o professor torna a sua aula mais interessante, estimulante e realista. O professor é livre para incluir aqueles fenômenos que estão presentes no cotidiano do aluno, mesmo que estes não sejam prescritos no currículo. O professor deve fazer um esforço consciente para despertar o interesse de seus alunos em tais aplicações das ciências na vida cotidiana.

Relação entre as ciências: não é didaticamente aconselhável dividir o estudo da ciência em compartimentos estanques de física, química, biologia, etc. Há muitos conteúdos que são comuns às diferentes disciplinas científicas, tais como Bio- química, Bio-Física, Físico-química.

“A articulação entre as áreas é uma clara sinalização para o projeto pedagógico da escola. Envolve uma sintonia de tratamentos metodológicos e, no presente caso, pressupõe a composição do aprendizado de conhecimentos disciplinares com o desenvolvimento de competências gerais. Só em parte essa integração de metas formativas exige, para sua realização, projetos interdisciplinares,

concentrados em determinados períodos, nos quais diferentes disciplinas tratem ao mesmo tempo de temas afins. Mais importante do que isso é o estabelecimento de metas comuns envolvendo cada uma das disciplinas de todas as áreas, a serviço do desenvolvimento humano dos alunos e também dos professores.” (PCN+).

Assim, podemos ver que o professor de física pode correlacionar sua lição com qualquer outro ramo da ciência através de exemplos adequados. Há uma abundância de temas que são comuns a dois ou mais ramos da ciência. Por exemplo, durante o estudo da física moderna, podemos dizer aos alunos sobre os efeitos da luz sobre a saúde e podemos discutir temas como irradiação de alimentos, germicidas, luz e vitaminas, banho de sol, visão etc. conhecimento é usado enquanto ensinando certos ramos da ciência.

No presente capítulo, basearemos-nos no trabalho *The first steps in vision in the classroom - Etapas iniciais para a visão na sala de aula* – [Santos, 2010] a fim de explicar uma aplicação imediata do ensino através de analogias que pode ser feita em sala de aula, inclusive utilizando outras disciplinas em tal contextualização - como a Biologia e a Química.

6.1 Etapas da visão

Sabemos que somos capazes de ver objetos devido ao espalhamento dos raios de luz que incidem sobre estes e depois chegam aos nossos olhos. Mas como, exatamente, se dá o fenômeno da visão e como podemos contextualizá-lo com a Física? É fato conhecido que, no interior dos olhos, mais especificamente no interior da retina, temos células específicas responsáveis por diferentes etapas do processo da visão: os cones e os bastonetes.

Os cones são células responsáveis pela “notoriedade” das cores. Neles estão contidos três tipos diferentes de fotopigmentos sensíveis a determinados comprimentos de onda: os fotopigmentos vermelhos, azuis e verdes, de modo que, através destes fotopigmentos, podemos identificar as cores ao nosso redor. Há indivíduos que apresentam certa dificuldade quando confrontadas com a percepção de certas cores, isto ocorre em pessoas que apresentam certo tipo de deficiência nos fotopigmentos contidos nos cones, o que causa

uma condição conhecida como “daltonismo”, a qual é uma condição genética e não possui cura.

Os bastonetes, por sua vez, são células contidas na retina responsáveis pela visão em preto-e-branco em condições de baixa luminosidade. Nos bastonetes podemos encontrar uma proteína chamada rodopsina que é responsável pela detecção da luz.

Existem organismos vivos que não possuem cones ou bastonetes. Os pombos, por exemplo, enxergam apenas quando está claro, isto é explicado pelo fato de estes apenas possuírem cones, de modo que embora consigam distinguir cores, estes não conseguem enxergar à noite. As corujas, por outro lado, famosas pela habilidade de enxergar em ambientes pouco iluminados, possuem apenas bastonetes em suas retinas, não estando presentes os cones. Desta forma, podemos afirmar que estas não são capazes de diferenciar cores.

Podemos dividir o processo de visão em etapas de modo a torná-lo mais inteligível ao aluno:

1. A luz espalhada por um objeto penetra no olho de uma pessoa;
2. Tal luz é concentrada na retina;
3. O fóton é detectado pela rodopsina contida nos bastonetes;
4. Após a absorção do fóton pela rodopsina, este é convertido -através de uma série de processos químicos- em um impulso elétrico;
5. O impulso elétrico é transmitido ao cérebro através do nervo óptico;
6. O cérebro faz a interpretação do sinal enviado, de modo que o indivíduo tenha a sensação da visão.

Com a penetração da luz na retina, os fótons absorvidos nos bastonetes e detectados pela rodopsina são convertidos em moléculas de retinal – uma das formas da vitamina A. Assim, este passa para uma outra configuração, este processo no qual um composto se transforma em outro com a mesma fórmula molecular é chamado de “isomerização”, que funciona como ferramenta no processo de detecção de luz.

Os fótons visíveis possuem frequências entre as cores vermelha e violeta do espectro eletromagnético, da mesma forma que muitas moléculas orgânicas possuem frequências de ressonância na parte visível do espectro, como é o caso da hemoglobina - proteína presente no sangue de alguns seres vivos, sendo o pigmento responsável pela coloração avermelhada do sangue- e da clorofila – pigmento que dá a cor verde às plantas.

6.2 Uma analogia entre a molécula de retinal e uma grade metálica

Quando fazemos um feixe de microondas incidir em uma grade metálica, as microondas são absorvidas pela grade de modo que os elétrons livres presentes nela se movimentem para cima e para baixo repetidamente devido à presença da componente do campo elétrico paralela à grade, situação esta muito similar ao funcionamento de uma antena. As microondas absorvidas pela grade são convertidas em calor devido ao Efeito Joule.

No caso da visão, um feixe de luz incide sobre a molécula de retinal de modo que os elétrons π desta molécula absorvam a radiação incidente de maneira análoga ao modo com que a grade absorve as microondas. Enquanto na grade a radiação absorvida é convertida em calor, na molécula de retinal a radiação absorvida é convertida em um impulso elétrico no nervo óptico pelas unidades que contêm as moléculas de rodopsina. Tal molécula de retinal não pode ser produzida pelo ser humano, esta deve ser ingerida na forma de vitamina A e a ausência desta vitamina provoca um fenômeno visual conhecido como cegueira noturna.

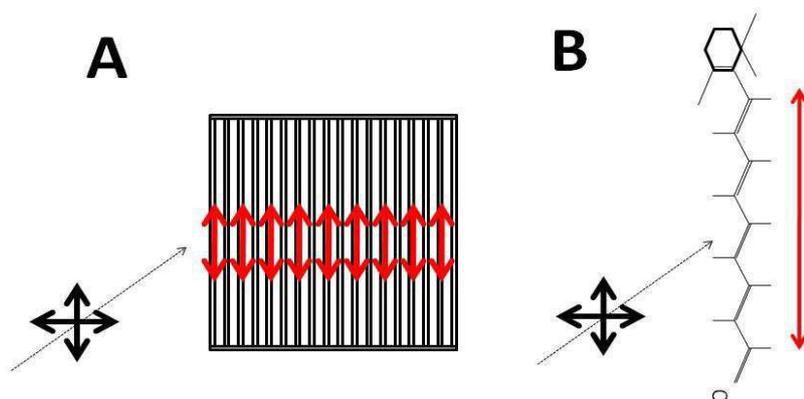


Fig.6.1 – A) Onda eletromagnética incidindo em uma grelha metálica. A grelha funciona como uma antena ou polarizador absorvendo uma componente do campo elétrico.
B) Analogia com a molécula retinol.

6.3 Uma aplicação para a visão humana

A luz solar é necessária em vários processos importantes à vida na Terra como, por exemplo, a fotossíntese e a visão. Tais processos químicos fundamentais acontecem devido a fotorreceptores. Entre estes, está a molécula do retinol. Esta consiste de uma longa cadeia linear de comprimento L com elétrons deslocalizados, ou seja, ligações duplas conjugadas responsáveis pela absorção da luz, funcionando como uma antena de luz. Assim, pela molécula do retinol:

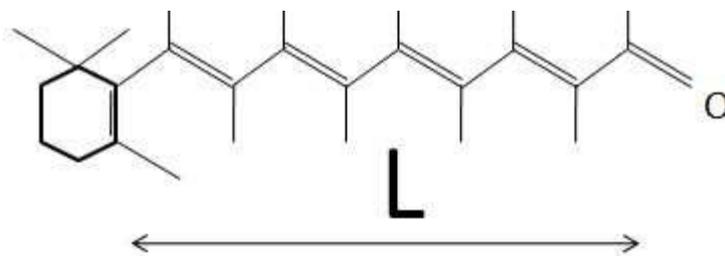


Fig.6.2 – A molécula do retinol.

Se há X elétrons deslocalizados, cada um proveniente de uma ligação π , e cada átomo de carbono possui uma ligação de comprimento d, então o comprimento da molécula é:

$$L = X \cdot d \quad (6.1)$$

Estes elétrons π podem ser modelados como estando em uma caixa de comprimento L com paredes infinitas (potencial infinito), formando um padrão de ondas estacionárias. Como, pelo Princípio de Exclusão de Pauli, sabemos que cada orbital só comporta 2 elétrons, temos então:

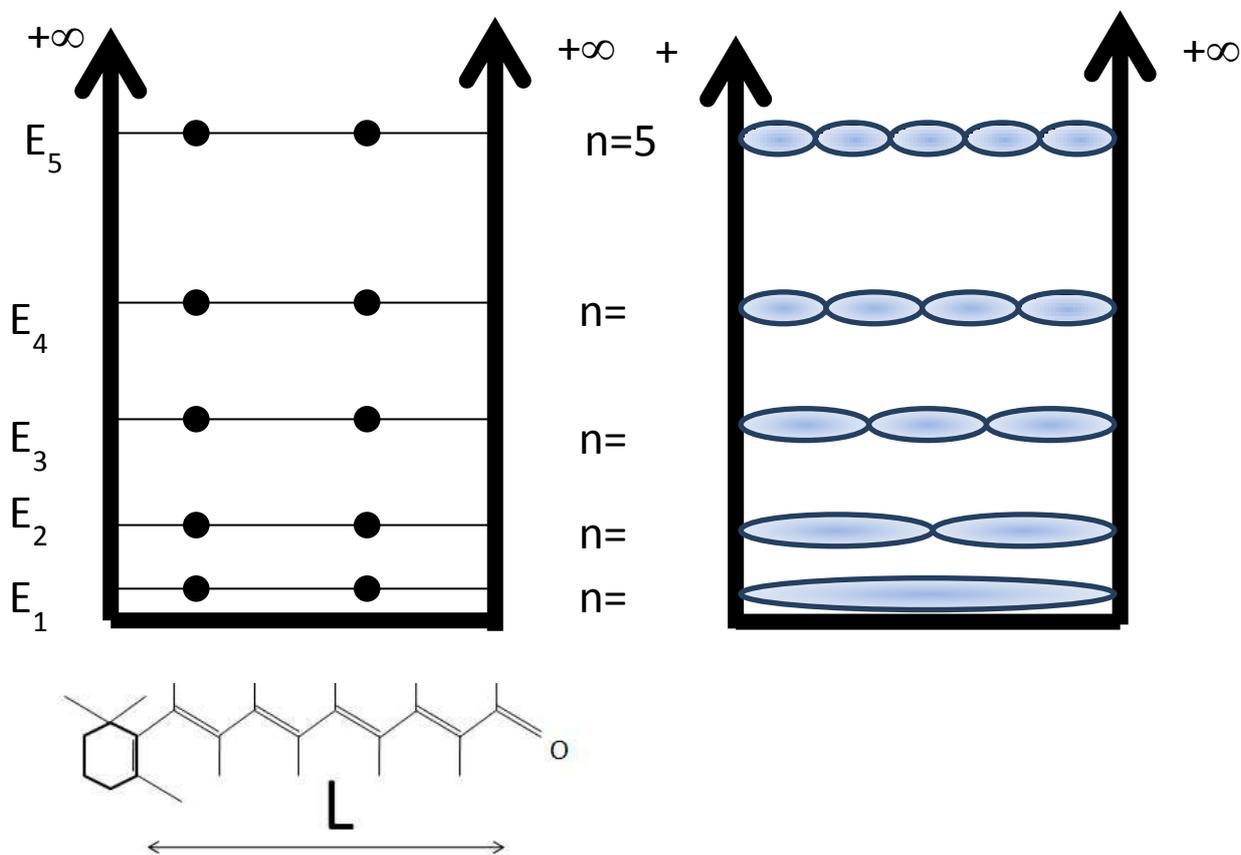


Fig.6.3 – Níveis de energia de uma partícula em poço de potencial infinito e os seus harmônicos correspondentes.

Para cada orbital, teremos no máximo um par de elétrons

$$\text{Número de níveis} = \frac{X}{2} \quad (\text{Pauli})$$

$$n = \frac{X}{2} = \text{número de harmônicos}$$

X = número de elétrons livres ou número de átomos de carbono

Tomando $L = X d$ onde X é o número de átomos de carbono e d a distância entre eles.

Como vimos anteriormente:

$$\lambda = \frac{2L}{n} . \quad (6.2)$$

Além disso, sabemos que :

$$p = m \cdot v \quad (6.3)$$

e

$$E_c = \frac{m \cdot v^2}{2} . \quad (6.4)$$

Substituindo (6.3) em (6.4), temos:

$$E_c = \frac{p^2}{2 m} . \quad (6.5)$$

Além disso, de (5.4) sabemos que:

$$\lambda = \frac{h}{mv} .$$

Então:

$$m v = \frac{h}{\lambda} , \quad (6.6)$$

Mas:

$$\lambda = \frac{2L}{n} . \quad (6.7)$$

Assim, se substituirmos (6.2) na relação (5.4) temos:

$$p = \frac{h n}{2 L} . \quad (6.8)$$

E, finalmente, se substituirmos (6.6) na relação (6.5) obtemos:

$$E_c = \frac{h^2 n^2}{8 m L^2} \quad (6.9)$$

O que representa os níveis de energia de uma partícula em uma caixa.

Usando as relações:

Número de níveis = $X / 2$ (Pauli)

$n = X/2$ = número de harmônicos

X = número de elétrons livres ou número de átomos de carbono

Tomando $L = X d$ onde X é o número de átomos de carbono e d a distância entre eles.

Temos:

$$E_n = \frac{h^2 \left(\frac{X^2}{4}\right)}{8 m (N - 1)^2 d^2}$$

$$E_n = \frac{h^2 n^2}{8 m (N - 1)^2 d^2}$$

$$\Delta E = E_{n+1} - E_n$$

$$= \frac{h^2 (n + 1)^2}{8 m L^2} - \frac{h^2 n^2}{8 m L^2}$$

$$\Delta E = \frac{h^2 (2n + 1)}{8 m L^2} = \frac{h^2 \left[2 \left(\frac{X}{2}\right) + 1 \right]}{8 m (n - 1)^2 d^2}$$

$$\Delta E = \frac{h^2 [X+1]}{8 m (n-1)^2 d^2} \quad (6.10)$$

Logo, substituindo os valores seguintes na relação (6.10):

$$h^2 = (6,62 \cdot 10^{-34})^2 \text{ J}^2\text{s}^2$$

$$m = (9,1 \cdot 10^{-31}) \text{ kg}$$

$$\frac{n^2}{L^2} = \frac{10}{81}$$

$$E_C = \frac{(6,62)^2 \cdot 10^{-68} \cdot 10}{8 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (1,4)^2 \cdot 10^{-20}} \approx 0,038 \cdot 10^{-17} \text{ J}$$

Convertendo o valor acima para eV (1J = 6,24. 10¹⁸ eV), temos:

$$E_C = 0,038 \cdot 10^{-17} \cdot 6,24 \cdot 10^{18} \text{ eV} = 2,37 \text{ eV}$$

$\Delta E(\text{eV}) = 2,37 \text{ eV}$, o que corresponde à frequência do verde.

Capítulo 7

Conclusões

O currículo do ensino médio consiste em uma série de assuntos separados que possuem pouca ou nenhuma correlação entre si. Isso se deve, em grande parte, à formação recebida pelos professores e aos sistemas de avaliações de larga escala (vestibulares). O Ministério da Educação propôs uma reformulação do Exame Nacional do Ensino Médio (Enem), bem como a sua utilização como forma de seleção unificada nos processos seletivos das universidades públicas federais. A proposta tem como principais objetivos induzir a reestruturação dos currículos do Ensino Médio, democratizar o acesso às vagas federais de ensino superior e possibilitar a mobilidade acadêmica.

O professor de ciências pode encontrar muitas aplicações da ciência na vida diária e que seria muito melhor se ele cita exemplos com fundo rural em escolas rurais e exemplos com fundo urbano em escolas urbanas. Para correlacionar a ciência com a vida cotidiana, um esforço deve ser feito para utilizarmos recursos disponíveis na comunidade. Por exemplo, seria viável planejar uma visita a uma estação de energia hidroelétrica ao ensinar a geração de corrente elétrica.

Em Estudos Sociais, por exemplo, há correlação entre ciência e estudos sociais. O conhecimento da ciência produz um grande impacto sobre nosso estilo de vida, forma de pensar e sobre nosso comportamento. A grande mudança ocorre em nossa perspectiva devido às influências do conhecimento científico. A Ciência revolucionou a civilização e o avanço da tecnologia e de tal ciência trouxe uma enorme mudança em nosso comportamento social.

O desafio da introdução da Física Moderna no Ensino Médio deve ser enfrentado sem utilizar a visão clássica de certas abordagens. A possibilidade de explicar os fenômenos do cotidiano sempre foi um fator de motivação por parte dos professores e cientistas acerca do estudo da Física. As constantes perguntas acerca deste tema e até mesmo as colocações do personagem

Sheldon Cooper⁷ torna o estudo mais atraente aos alunos.

Para viabilizar a dedução dos estados estacionários, teríamos de introduzir o estudo do momento angular e de sua conservação dentro de um currículo já abarrotado para o ensino médio. Neste trabalho, fazemos uma proposta do estudo por analogias, poderosa ferramenta do ensino, para contornar uma dedução incompreensível - por falta de embasamento teórico por parte dos alunos.

O estudo da Física deve ser pautado na coerência dos conceitos, nas observações e explicações dos fenômenos da natureza. Sempre que certos passos nas explicações são pulados, tornando incompreensível uma sequência lógica, uma Física “mágica” passa a girar sobre novos conceitos.

Esperamos que este trabalho motive os professores e os autores de livros para uma prática de ensino viável da Física Moderna no Ensino Médio.

⁷ Personagem da Série Big Bang Theory – Warner Channel

Apêndice A

Algumas questões de vestibulares abordando o átomo de Bohr

Foram selecionadas, neste apêndice, questões de vestibulares de Universidades brasileiras de diferentes estados que abordassem o tema do átomo de Bohr. Podemos observar que muitas Universidades já inseriram este tema da Física Moderna em seus exames de seleção.

1) (UFRGS) Dentre as afirmações apresentadas, qual é correta?

- a) A energia de um elétron ligado ao átomo não pode assumir um valor qualquer.
- b) A carga do elétron depende da órbita em que ele se encontra.
- c) As órbitas ocupadas pelos elétrons são as mesmas em todos os átomos.
- d) O núcleo de um átomo é composto de prótons, nêutrons e elétrons.
- e) Em todos os átomos o número de elétrons é igual à soma dos prótons e dos nêutrons

2) (UFRGS) Considere as seguintes afirmações sobre a estrutura do átomo:

I – A energia de um elétron ligado a um átomo não pode assumir qualquer valor.

II – Para separar um elétron de um átomo é necessária uma energia bem maior do que para arrancar um próton do núcleo.

III – O volume do núcleo de um átomo é aproximadamente igual à metade do volume do átomo todo.

Quais estão corretas?

- a) Apenas I
- b) Apenas II
- c) Apenas I e III Apenas II e III
- d) I, II e III

3) (PUCRS) Um átomo excitado emite energia, muitas vezes em forma de luz visível, porque:

- a) Um de seus elétrons foi arrancado do átomo.
- b) Um dos elétrons desloca-se para níveis de energia mais baixos, aproximando-se do núcleo.
- c) Um dos elétrons desloca-se para níveis de energia mais altos, afastando-se do núcleo.
- d) Os elétrons permanecem estacionários em seus níveis de energia.
- e) Os elétrons se transformam em luz, segundo Einstein.

4) (UFMG 99) .No modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio, a energia do átomo:

- a) Pode ter qualquer valor.
- b) Tem um único valor fixo.
- c) Independe da órbita do elétron.
- d) Tem alguns valores possíveis.

5) (PUC MG 99). Escolha, entre os modelos atômicos citados nas opções, aquele (aqueles) que, na sua descrição, incluiu (incluíram) o conceito de fóton:

- a) Modelo atômico de Thomson.
- b) Modelo atômico de Rutherford.
- c) Modelo atômico de Bohr.
- d) Modelos atômicos de Rutherford e de Bohr.
- e) Modelos atômicos de Thomson e de Rutherford.

6) (UFJF 2001) A presença de um elemento atômico em um gás pode ser determinada verificando-se as energias dos fótons que são emitidos pelo gás, quando este é aquecido.

No modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio, as energias dos dois

níveis de menor energia são:

$$E_1 = - 13,6 \text{ eV}$$

$$E_2 = - 3,40 \text{ eV.}$$

Considerando-se essas informações, um valor possível para a energia dos fótons emitidos pelo hidrogênio aquecido é

a) - 17,0 eV.

b) - 3,40 eV.

c) 8,50 eV.

d) 10,2 eV.

7) (UEM/PR-2011.1) Considerando a proposta de Rutherford sobre o modelo atômico, assinale o que for correto.

01) Esse modelo não é adequado porque o elétron cairia no núcleo, devido à força centrípeta dada pela atração entre o elétron e o núcleo.

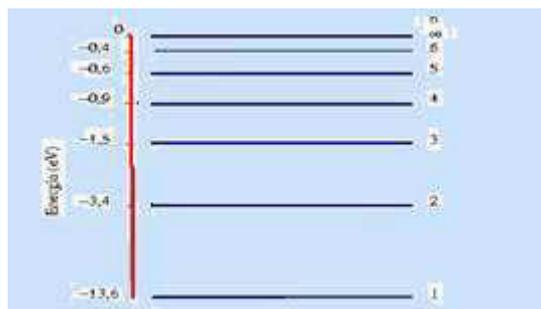
02) Esse modelo foi substituído pelo modelo de Thomson.

04) Esse modelo surgiu de observações experimentais realizadas por Rutherford, utilizando partículas alfa que colidiam com a folha de ouro.

08) Baseado na proposta de Rutherford, Bohr sugeriu que os elétrons, em algumas órbitas bem definidas, chamadas estacionárias, não emitem nem absorvem energia (denominado modelo de Rutherford-Bohr).

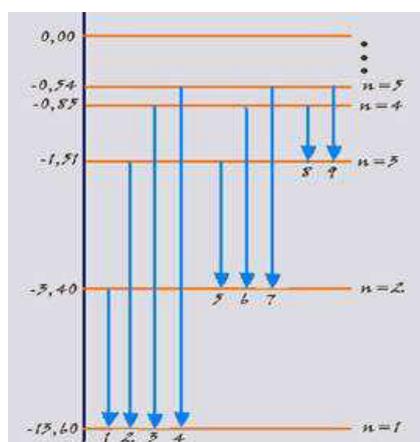
16) Considerando o modelo de Rutherford-Bohr, ao saltar de uma órbita para outra, o elétron emite ou absorve uma quantidade de energia bem definida, chamada quantum de energia

8) (UFJF-MG) A figura abaixo mostra os níveis de energia do átomo de hidrogênio. Se inicialmente o elétron está no estado quântico fundamental (de menor energia), qual a sua energia cinética após o átomo ter sido ionizado por um fóton de energia 20 eV ?



- a) 33,6 eV
- b) 13,6 eV
- c) 6,4 eV
- d) 10,2 eV.

9) (UFC-CE) Na figura, as flechas numeradas de 1 até 9 representam transições possíveis de ocorrer entre alguns níveis de energia do átomo de hidrogênio de acordo com o modelo de Bohr.



Para ocorrer a transição, o átomo emite (ou absorve) um fóton cuja energia $|\Delta E| = hc/\lambda$ (h é a constante de Planck, λ é o comprimento de onda do fóton e ΔE é a diferença de energia entre os dois níveis envolvidos na transição).

Suponha que o átomo emite os fótons X e Y, cujos comprimentos de onda são, respectivamente, $\lambda_x = 1,03 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ e $\lambda_y = 4,85 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.

As transições corretamente associadas às emissões desses dois fótons

são (use $h=4,13 \cdot 10^{-15}$ eV.s e $c=3,0 \cdot 10^8$ m/s).

- a) 4 e 8
- b) 2 e 6
- c) 3 e 9
- d) 5 e 7
- e) 1 e 7

10) (UFPI) Um átomo de hidrogênio está em um estado excitado com $n = 2$, com uma energia $E_2 = -3,4$ eV. Ocorre uma transição para o estado $n = 1$, com energia $E_1 = -13,6$ eV, e um fóton é emitido. A frequência da radiação emitida, em Hz, vale aproximadamente:

(Dados: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J; $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js.)

- a) $2,5 \cdot 10^{15}$
- b) $2,0 \cdot 10^{15}$
- c) $1,5 \cdot 10^{15}$
- d) $1,0 \cdot 10^{15}$
- e) $5,0 \cdot 10^{14}$

11) (PUC-MG) No modelo atômico de BOHR para o átomo de hidrogênio, o elétron gira em órbita circular em volta do próton central. Supõe-se que o próton esteja em repouso em um referencial inercial. Essa hipótese da imobilidade do próton pode ser justificada porque o próton tem:

- a) carga elétrica de sinal oposto à do elétron.
- b) carga elétrica infinitamente maior que a do elétron.
- c) massa igual à do elétron.
- d) massa muito maior que a do elétron.

12) (UFRS-RS) Um átomo de hidrogênio tem sua energia quantizada em níveis de energia, cujo valor genérico é dado pela expressão $E_n = -E_0/n^2$, sendo n igual a 1, 2, 3, ... e E_0 igual à energia do estado fundamental (que corresponde a $n = 1$). Supondo-se que o átomo passe do estado fundamental para o terceiro nível excitado ($n = 4$), a energia do fóton necessário para provocar essa transição é:

- a) $1/16 E_0$.
- b) $1/4 E_0$.
- c) $1/2 E_0$.
- d) $15/16 E_0$.
- e) $17/16 E_0$.

13) (UFPR-PR- 09) Segundo o modelo atômico de Niels Bohr, proposto em 1913, é correto afirmar:

- a) No átomo, somente é permitido ao elétron estar em certos estados estacionários, e cada um desses estados possui uma energia fixa e definida.
- b) Quando um elétron passa de um estado estacionário de baixa energia para um de alta energia, há a emissão de radiação (energia).
- c) O elétron pode assumir qualquer estado estacionário permitido sem absorver ou emitir radiação.
- d) No átomo, a separação energética entre dois estados estacionários consecutivos é sempre a mesma.
- e) No átomo, o elétron pode assumir qualquer valor de energia.

14) (UFU-MG-010) Um átomo excitado emite energia, muitas vezes em forma de luz visível, porque:

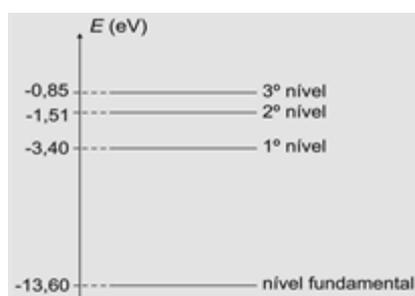
- a) um dos elétrons decai para níveis de energia mais baixos, aproximando-se do núcleo.
- b) um dos elétrons foi arrancado do átomo.
- c) um dos elétrons desloca-se para níveis de energia mais altos, afastando-se

do núcleo.

d) os elétrons permanecem estacionários em seus níveis de energia.

15) (UFRN-RN-010) Sobre um átomo de hidrogênio no estado fundamental, incidem três fótons, cujas energias, em eletrovolt (eV), são, respectivamente, 13,20; 12,09 e 10,20. Uma vez num estado excitado, o átomo de hidrogênio decairá, emitindo energia na forma de fótons.

Na figura abaixo, estão representadas as energias dos quatro primeiros níveis de energia do átomo de hidrogênio.



A partir dessas informações:

a) determine quais desses fótons incidentes podem ser absorvidos pelo átomo de hidrogênio no estado fundamental e explicita qual o estado final do átomo em cada caso;

b) represente, na figura localizada no Espaço destinado à Resposta, as possíveis transições dos elétrons que se encontram nos níveis excitados, após a emissão dos respectivos fótons;

c) determine as energias dos fótons emitidos.

16) (UFMG-MG-010) O espectro de emissão de luz do átomo de hidrogênio é discreto, ou seja, são emitidas apenas ondas eletromagnéticas de determinadas frequências, que, por sua vez, fornecem informações sobre os níveis de energia desse átomo.

Na figura abaixo, está representado o diagrama de níveis de energia do átomo de hidrogênio.



1. No século XIX, já se sabia que cada frequência do espectro de emissão do hidrogênio é igual à soma ou à diferença de duas outras frequências desse espectro. Explique por que isso ocorre.

2. Sabe-se que o espectro do átomo de hidrogênio contém as frequências $2,7 \cdot 10^{14}$ Hz e $4,6 \cdot 10^{14}$ Hz.

A partir desses dados, DETERMINE outra frequência desse espectro que corresponde a uma luz emitida na região do visível.

17) (UNIR-RO-010) No início do século XX, Niels Bohr apresentou um modelo atômico cujos postulados fundamentais descrevem que os elétrons de um átomo situam-se:

- a) sobre órbitas elípticas com o núcleo atômico ocupando um dos focos e emitindo energia ao completar cada órbita.
- b) sobre órbitas estacionárias, emitindo radiação somente quando passam de uma órbita para outra de menor energia.
- c) sobre órbitas estacionárias, mantendo-se sempre em níveis energéticos nulos.
- d) em orbitais tipo s, p, d e f e emitem energia quando ascendem do orbital s

para o p, do p para o d e do d para o f.

e) em cascas esféricas concêntricas de raios iguais a nl , em que l é o raio atômico e n é um número inteiro ou semi-inteiro.

Apêndice B

Deduções clássicas para o Raio de Bohr, energia e velocidade dos elétrons

Trazemos, neste apêndice, os passos listados por Eisberg em sua obra *Fundamentos da Física Moderna*. O autor inicia o capítulo 5 – *A teoria de Bohr para a Estrutura Atômica* – falando do espectro da radiação eletromagnética emitida por alguns átomos, evitando fazer uma análise mais profunda, adiando os detalhes desta discussão para depois de ser desenvolvida a teoria quântica.

Eisberg atém-se a explicar o espectro do hidrogênio já que este - por conter apenas um elétron - é o átomo mais simples que existe, de modo a destacar que o espaçamento entre linhas adjacentes deste espectro decresce continuamente. O autor destaca que tal padrão no espectro do hidrogênio fez com que muitas pessoas procurassem uma fórmula empírica para descrever o fenômeno, citando Balmer - que o fez em 1885 -, passando por Rydberg até apresentar os comprimentos de onda e fórmulas para as séries do hidrogênio.

A seguir, o autor explica a necessidade de uma teoria atômica explicar as características dos espectros atômicos, apresentando o trabalho de Bohr no qual foram feitos os seguintes postulados:

1. *Um elétron num átomo se move numa órbita circular em torno do núcleo sob a influência da atração coulombiana entre o elétron e o núcleo, obedecendo às leis da mecânica clássica.*

2. *Mas, ao invés da infinidade de órbitas que seriam possíveis em mecânica clássica, é possível para um elétron mover-se somente numa órbita para a qual seu momento angular L seja um múltiplo inteiro da constante de Planck h , dividida por 2π .*

3. *Apesar do fato de estar constantemente acelerado, um elétron movendo-se em tal órbita permitida não irradia energia eletromagnética. Portanto, sua energia total E permanece constante.*

4. *Radiação eletromagnética é emitida se um elétron, inicialmente movendo-se numa órbita de energia total E_i muda descontinuamente seu movimento, de modo que passa a*

mover-se numa órbita de energia total E_i . A frequência da radiação emitida ν é igual à quantidade $(E_i - E_f)$ dividida pela constante de Planck h . [Eisberg, 1979]

Assim, através do segundo postulado, é estabelecida a quantização do momento angular:

$$L = \frac{nh}{2\pi} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{A.1})$$

Para explicar a teoria de Bohr do átomo de um elétron, o autor considera um átomo cujo núcleo possui massa M e carga $+Ze$ e um elétron de carga $-e$ e massa m , tendo como hipótese que o elétron gira em torno do núcleo em uma trajetória circular. Assim:

$$F_{el} = R_c$$

$$\frac{Ze^2}{r^2} = \frac{m v^2}{r}$$

Supõe-se que o momento angular orbital seja constante já que a força atuando sobre o elétron é radial, assim:

$$L = m v r \quad (\text{A.2})$$

E aplicando a quantização de Bohr do momento angular, temos que:

$$m v r = \frac{nh}{2\pi} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Mas $\frac{h}{2\pi} = \hbar$, então:

$$m v r = n \hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{A.3})$$

Fazendo $Z.e^2 = m v^2 r$ e isolando a velocidade da equação 3 temos:

$$v = \frac{n \hbar}{m r} \quad (\text{A.4})$$

Aplicando (A.4) em (A.3):

$$Z.e^2 = m.r.v^2 = m.r.\frac{n^2\hbar^2}{m^2r^2}$$

$$Z.e^2 = \frac{n^2\hbar^2}{m r} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (\text{A.5})$$

Isolando r , temos:

$$r = \frac{n^2\hbar^2}{m Z e^2} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (\text{A.6})$$

Substituindo a equação 7 em 5, obtém-se:

$$v = \frac{n \hbar}{m} \cdot \frac{m Z e^2}{n^2 \hbar^2} = \frac{Z e^2}{n \hbar} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (\text{A.7})$$

A equação (A.7) nos mostra o porquê de Bohr não ter permitido o valor $n = 0$ para o número quântico n , diferentemente da quantização de Planck.

A seguir, o autor calcula o raio de Bohr – menor raio que o elétron pode ter – tomando $n=1$ e calcula a velocidade do elétron na menor órbita, isto é, a maior velocidade possível para o elétron e justifica o fato de utilizarmos a mecânica clássica em detrimento da relativística para descrever os fenômenos atômicos abordados (a maior velocidade que o elétron pode assumir corresponde a menos de 1% da velocidade da luz).

Em seguida, calcula-se a energia total de um elétron que se move nas órbitas permitidas:

$$E = E_C + E_{pot} \quad (\text{A.8})$$

Em que

$$E_C = \frac{m v^2}{2} \quad (\text{A.9})$$

Mas, temos que:

$$E_C = \frac{Z e^2}{2 r} \quad (\text{A.10})$$

E

$$E_{pot} = -\frac{Z e^2}{r} \quad (\text{A.11})$$

O sinal de menos na equação (A.11) se deve ao fato de a força coulombiana ser atrativa.

Desta forma:

$$E_{total} = E_C + E_{pot} = -\frac{Z e^2}{2 r} = -E_C \quad (\text{A.12})$$

Assim, substituindo a equação (A.6) em (A.12), temos:

$$E_{total} = -\frac{Z e^2}{2} \cdot \frac{m Z e^2}{n^2 \hbar^2} = -\frac{m Z^2 e^4}{2 n^2 \hbar^2} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (\text{A.13})$$

Logo, a quantização do momento angular orbital do elétron nos leva à quantização da energia total. O livro, após tais demonstrações, apresenta o diagrama de níveis de energia e, em seguida, calcula a frequência ν da radiação quando o elétron faz o salto quântico:

$$\vartheta = \frac{E_i - E_f}{h} = \frac{m Z^2 e^4}{4 \pi \hbar^3} \cdot \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (\text{A.14})$$

Fazendo $k = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$, então:

$$k = \frac{m e^4 Z^2}{4 \pi c \hbar^3} \cdot \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (\text{A.15})$$

ou

$$k = R_\infty \cdot Z^2 \cdot \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (\text{A.16})$$

Onde $R_\infty = \frac{m e^4}{4 \pi c \hbar^3}$.

Apêndice C – Produto

C.1 A evolução do conceito de matéria (átomo) através dos tempos

C.1.1- Origens

Na literatura ocidental, os primeiros conceitos partiram da Grécia. Filósofos como Tales de Mileto (624 a.C - 547 a.C.), Anaximandro (610 a.C - 546 a.C), Heráclito (535 a.C. – 475 a.C.), Empédocles (490 a.C. – 430 a.C.) entre outros trabalharam o conceito de matéria dividindo-a em elementos básicos chegando a uma conclusão de que a matéria seria constituída por quatro elementos: terra, água, ar e fogo.

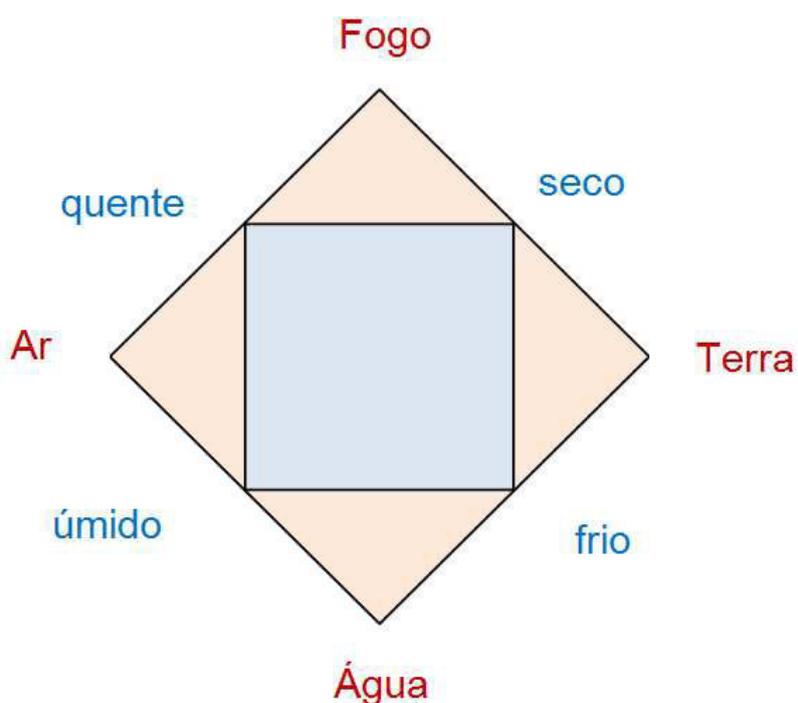


Figura C.1: divisão da matéria em elementos

Aristóteles (384 a.C. – 322 a.C.) foi o primeiro a criar um conceito com uma base filosófica sólida, este introduziu um quinto elemento, o éter, e seu

conceito de matéria, para ele ύλη (hyle ou hule)⁸, seria algo composto ou sendo processado. A matéria estaria sempre sofrendo mudança de substâncias.

“Por exemplo, um cavalo come grama: o cavalo muda a grama para si; a grama como tal não persiste no cavalo, mas algum aspecto dela - sua matéria - persiste. A matéria não é especificamente descrita (por exemplo, como átomos), mas consiste de qualquer coisa que persista na mudança da substância de grama para cavalo. A matéria, nesta forma de compreender, não existe de forma independente (isto é, como uma substância), mas existe interdependente (isto é, como um "princípio") com forma e somente na medida em que sofre mudanças. Pode ser útil conceber o relacionamento de matéria e forma como muito similar ao relacionamento entre as partes e o todo. Para Aristóteles, a matéria como tal só pode receber realidade da forma; ela não possui atividade ou realidade por si, semelhante à maneira que as partes como tal só tem sua existência dentro de um todo (de outra forma elas seriam todos independentes).”⁹

É provável que esta discussão tenha vindo do oriente. Encontramos, na China, a teoria dos cinco elementos – madeira, fogo, terra, metal e água-, na qual estes são estados de mutação matéria-energia e na Índia a teoria dos três humores: vento, fogo e terra.

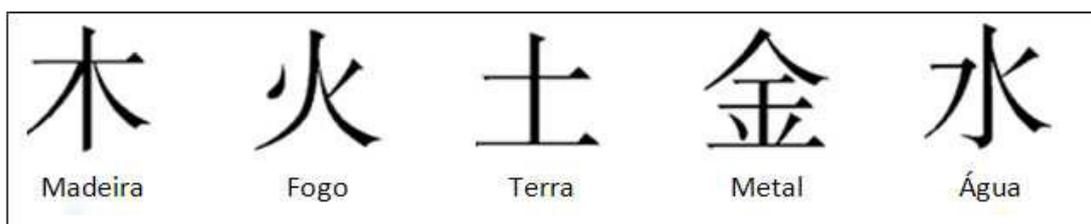


Figura C.2: Representação da teoria dos cinco elementos¹⁰

⁸ Visto em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9ria>

⁹, ¹⁶ Visto em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9ria>

No oriente, mais importante do que discutir o conceito de matéria, era a utilização deste conceito para explicar a natureza. Estes cinco elementos são relacionados a ciclos e entre si.

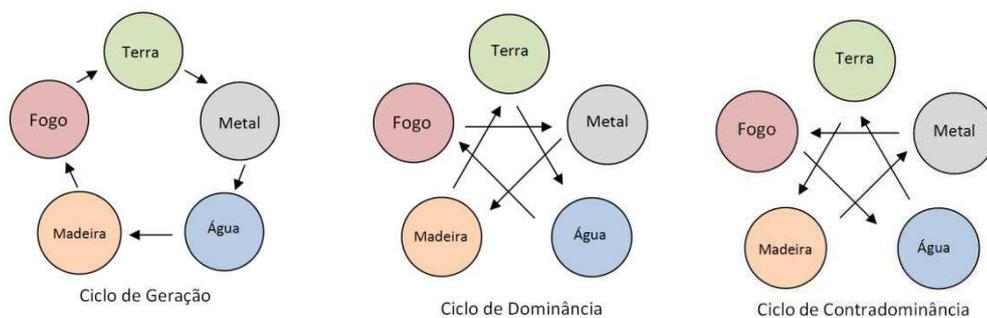


Fig. C.3 diagrama com os cinco elementos – teoria chinesa

Através destas relações explicam-se os mais variados assuntos: estações do ano, emoções, cores e tem na medicina sua culminância.

	Madeira	Fogo	Terra	Metal	Água
Estações	Primavera	Verão	Nenhuma *	Outono	Inverno
Sabores	Ácido	Amargo	Doce	Picante	Salgado
Transformações	Germinação	Crescimento	Transformação	Colheita	Estocar
Cores	Verde	Vermelho	Amarelo	Branco	Preto
Sabores	Azedo	Amargo	Doce	Picante	Salgado
Estados	Vento	Calor	Umidade	Secura	Frio
Sistemas Yin (Zang)	Fígado (Gan)	Coração (Xin)	Baço (Pi)	Pulmão (Fei)	Rim (Shen)
Sistemas Yang (Fu)	Vesícula Biliar (Dan)	Intestino Delgado (Xiaochang)	Estômago (Wei)	Intestino Grosso (Dachang)	Bexiga (Panguang)
Órgãos dos Sentidos	Olhos	Língua	Boca	Nariz	Ouvidos
Tecidos	Tendões	Vasos	Músculos	Pele	Ossos
Emoções	Fúria	Alegria	Preocupação	Tristeza	Medo
Direções	Leste	Sul	Centro	Oeste	Norte
Notas Musicais	jue2 角 (mi)	zhi3 徵 (sol)	gong1 宮 (dó)	shang1 商 (ré)	yu3 羽 (lá)

Tabela C.1¹¹

¹¹ Adaptada de <http://medicinatc.blogspot.com.br/2011/07/teoria-dos-cinco-elementos-wu-xing.html> acesso em 15/09/12

Como vemos, mais importante do que a discussão do conceito de matéria é a analogia destes ciclos e dominâncias com os mais diversos processos que estão presentes nas vidas dos seres humanos.

C.2 – O átomo

Demócrito e Leucipo introduziram uma filosofia chamada atomismo, na qual tudo seria composto por corpos minúsculos, invisíveis e indivisíveis (originando a palavra átomo que significa “sem divisão”).

Estas ideias rivalizavam com as de Aristóteles apesar de serem menos aceitas. Com certeza, Demócrito estava mais próximo das concepções que surgiram posteriormente, de modo que esta ideia só evoluiu, com a introdução do método científico. A sistematização de como obter conhecimento foi fundamental para a modernização do conceito de átomo. O primeiro passo foi dado por Dalton¹² ao utilizar estudos de Pierre Gassendi (1592-1655) e Antoine Lavoisier (1743-1794) nos quais os elementos eram compostos por associações de átomos (moléculas) ele estabeleceu experimentos nos quais observava diferentes “tipos” de átomos com massas e propriedades diferentes.

Uma evolução natural foi a criação de uma tabela periódica com 63 elementos [Pietrocolla, 2010] relacionando peso atômico com suas propriedades. Uma misteriosa sequência 2, 8, 8, 18, 18, 36 relacionava elementos e propriedades.

A ideia de que este átomo não seria indivisível surgiu com experimentos

(*) segundo o CLASSIC OF CATEGORIES [BING,1624], a Terra é pertencente ao Centro, não sendo associada a nenhuma estação específica, sendo associada apenas ao final de cada estação.

¹² Os principais postulados da teoria de Dalton são:

1. “Toda matéria é composta por minúsculas partículas chamadas átomos”.
2. “Os átomos de um determinado elemento são idênticos em massa e apresentam as mesmas propriedades químicas”.
3. “Átomos de diferentes elementos apresentam massa e propriedades diferentes”.
4. “Átomos são permanentes e indivisíveis, não podendo ser criados e nem destruídos”.
5. “As reações químicas correspondem a uma reorganização de átomos”.
6. “Os compostos são formados pela combinação de átomos de elementos diferentes em proporções fixas”.

envolvendo eletricidade e eletromagnetismo, a explicação para as cargas elétricas (positivas e negativas) foram essenciais para se criar uma nova estrutura. Experimentos de André Ampère (1775-1836) Michael Faraday (1791-1867) e culminando com William Crookes, com o tubo de Crookes, levaram Thomson, em 1897, a elaborar um novo modelo.

C.3 Espectroscopia

O estudo dos fenômenos nos faz elaborar modelos. Newton, por exemplo, utilizou a dispersão da luz em um prisma para estudá-la, de modo que quando um feixe luminoso incidisse sobre tal prisma, este produziria em um anteparo um ‘rastro’ de luzes coloridas – violeta em uma extremidade, vermelha na outra em uma graduação contínua de cores entre estas. A tal padrão de cores, Newton atribuiu o nome “espectro”.



Figura C4: Newton estudando a dispersão da luz em um prisma – retirado de <http://isaacnewtonjv.blogspot.com.br/> em 2/12/12

Fraunhofer utilizou a mesma técnica de análise e pôde observar linhas escuras no espectro luminoso – a estas linhas escuras, deu-se o nome de *espectro de Fraunhofer*. Este método de análise recebeu o nome de *espectroscopia* e pode ser utilizado para análise de estruturas muito

pequenas, nos levando a conhecer pequenas partes da matéria a partir de seus espectros, como veremos adiante.

C.4 Evolução histórica dos modelos atômicos

C.4.1 O modelo de Thomson – “*Pudim de Ameixas*”

Sabemos que elétrons excitados vibram em torno de uma posição de equilíbrio. Assim, a teoria eletromagnética prevê que um átomo cujos elétrons estejam excitados emite radiação eletromagnética. Apesar de tal modelo resolver alguns problemas químicos, ele foi desacreditado pela espectrografia, não resistindo, decisivamente, ao experimento do espalhamento das partículas alfa.

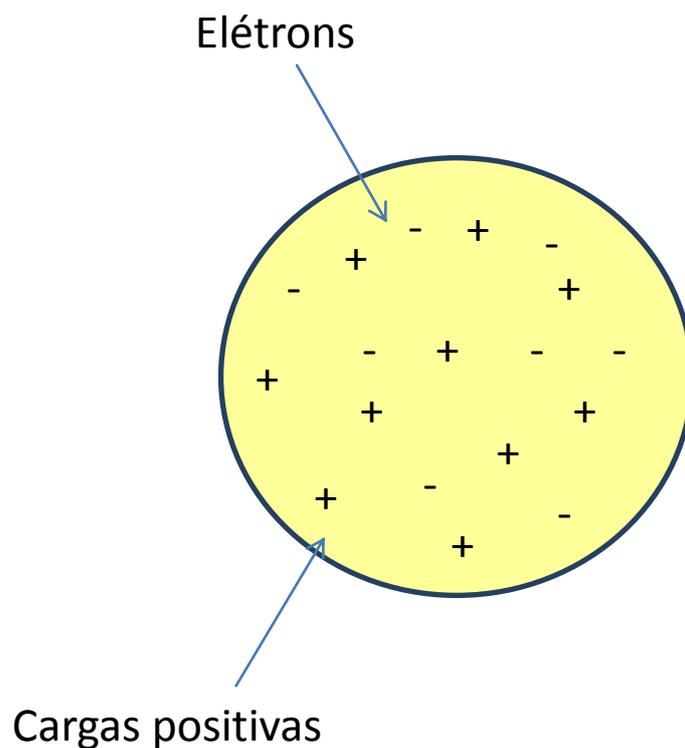


Figura C.5: o átomo da visão de Thomson.

C.4.2 Experimento do espalhamento das partículas alfa.

Becquerel e Mme. Curie (1896-1898) elaboraram o seguinte experimento:

A radiação emitida por alguns elementos radioativos passaria por um colimador e, em seguida, seria exposta a um campo magnético. Como resultado, foram observadas três regiões distintas sobre um anteparo que correspondem a um feixe defletido para a esquerda, outro feixe defletido para a direita e um que não sofreu deflexão (não carregado). Atribuíram-se aos feixes, cujas deflexões puderam ser observadas, cargas positivas (partículas alfa) e cargas negativas (partículas beta).

Utilizando a razão m/q , concluiu-se que o feixe de cargas positivas representaria íons de Hélio (He^{++}) já que a razão dessas grandezas era numericamente duas vezes menor que a mesma razão para o próton. Assim, chegou-se ao He^{++} .

C.4.3 Predições do modelo de Thomson

Como a velocidade das partículas alfa foi medida, correspondendo a $1/20$ da velocidade da luz, podemos analisar o espalhamento destas partículas utilizando a Mecânica Clássica. A ação de pequenas colisões e de forças coulombianas geraria um espalhamento muito pequeno (10^{-4} rad).

Geiger e Marsden (1909), em seu experimento, encontraram ângulos de espalhamento da ordem de 2×10^{-4} rad. Entretanto, um pequeno grupo de partículas estava em desacordo com o modelo, sendo o ângulo de espalhamento muito grande em relação ao primeiro (inexplicável pelo modelo de Thomson para o átomo), indo contra a previsão de Thomson do “espalhamento múltiplo de pequenos ângulos”.

C.4.4 O Modelo de Rutherford

Rutherford estabeleceu um modelo em que as cargas positivas e a massa se concentravam em uma única região do espaço (núcleo). A explicação encontrada por Rutherford para o grande desvio que existia para aquelas poucas partículas era a concentração da massa e das cargas positivas no núcleo. Para calcular o espalhamento das partículas alfa, utilizaram-se átomos

pesados (massa do núcleo muito maior em relação à massa da partícula alfa) para que estas não recuassem em uma colisão.

Já que a partícula alfa não penetra no núcleo, ela pode ser tratada como partícula em relação às forças coulombianas e pelo fato de o núcleo não recuar, a energia cinética desta não muda.

A explicação para o grande espalhamento de algumas poucas partículas consiste na colisão destas com os núcleos, de modo que Rutherford escrevesse o seguinte sobre o fenômeno:

“Foi tão inacreditável como se você atirasse um obus (peça de artilharia semelhante a um morteiro comprido) de 15 toneladas sobre um pedaço de papel de seda e ele atingisse e voltasse” [Macedo, 2004]

C.4.5 O Modelo de Bohr

O modelo de Rutherford atribuía carga e massa ao núcleo, mas nada falava a respeito da carga e massa do elétron. Bohr estabeleceu um modelo no qual os elétrons estariam girando em torno do núcleo e este modelo seria utilizado para explicar a posição das linhas do espectro de hidrogênio.

Este modelo era inviável pela Física Clássica, apesar de ser estável pela mecânica, onde a força coulombiana desempenharia o papel de resultante centrípeta:

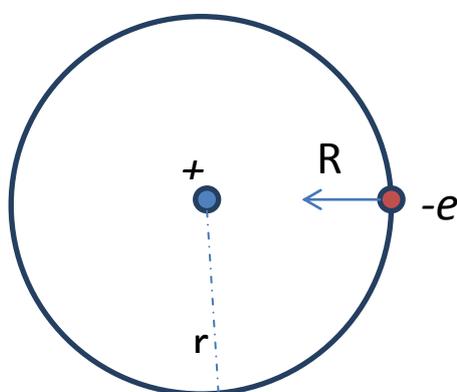


Fig. C.6 – Representação do comportamento ondulatório do elétron

$$F_{el} = Res_c \quad (C.1)$$

$$F_{el} = \frac{KZe^2}{r^2} \quad (C.2)$$

onde Ze = carga do núcleo, e

$$R_c = \frac{mv^2}{r} \quad (C.3)$$

Entretanto o modelo era instável eletricamente, pois cargas elétricas em movimento acelerado irradiam ondas eletromagnéticas. Por conseguinte, de acordo com a Física Clássica, o elétron emitiria radiação, perdendo energia e fazendo com que o raio de sua órbita diminuísse cada vez mais; aumentando, assim, a frequência de revolução do elétron, fazendo com que o mesmo se chocasse com o núcleo em um tempo de aproximadamente 1 microssegundo, provocando o colapso do átomo.

C.4.6.a Passo 1- Introdução do conceito: Os postulados de Bohr

Para que seu modelo tivesse validade, seria necessário que este explicasse onde os modelos antigos falharam. Bohr, para isso, postulou as seguintes ideias:

- 1) O elétron se move em certas órbitas sem irradiar energia (órbitas de estados estacionários) e nestas obedeceriam os resultados da Física Clássica.
- 2) O elétron só emite ou absorve energia (ondas eletromagnéticas) ao mudar de órbita.

C. 5 A Hipótese de De Broglie

No início do estudo da estrutura da matéria na primeira metade do século XX, os físicos estavam familiarizados com duas coisas: ondas e partículas. Partículas são muito familiares a nós. Estão localizadas em uma região específica do espaço, podendo se mover de um ponto a outro de modo que tal movimento pode ser descrito em termos de sua posição e velocidade. Ondas também nos são familiares. Ao contrário de partículas, não estão localizadas

em uma região específica do espaço. A onda pode ser mover com uma determinada velocidade, mas sua extensão espacial não é localizada. Para descrevermos uma onda é necessário conhecermos uma característica denominada *comprimento de onda*. Devido às diferenças em suas naturezas, partículas e ondas se comportam de modos distintos. Assim, no início do estudo das partículas que constituem a matéria, os físicos faziam a seguinte pergunta: o elétron é uma partícula ou uma onda? Ao tentar estudar o comportamento de elétrons em átomos, ficava claro para de Broglie que as propriedades dos elétrons não eram sempre aquelas de uma partícula. De modo a caracterizar os estados estacionários dos elétrons atômicos, seria admissível pensar que as condições de quantização levariam a introduzir o aspecto ondulatório dos elétrons atômicos. Uma tarefa produtiva e urgente seria o esforço de atribuir ao elétron ou, mais geralmente, a todas as partículas uma natureza dual análoga à do fóton, dotando-o com aspectos de onda e de corpúsculo relacionados entre si pela constante de Planck.

Utilizando argumentos baseados em princípios gerais da teoria da relatividade, de Broglie foi levado ao seguinte resultado: a frequência da onda associada é igual ao quociente da energia do corpúsculo pela constante de Planck:

$$f = \frac{E}{h}.$$

O comprimento de onda da onda associada é igual ao quociente da constante de Planck pelo momento da partícula, podendo ser escrito da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \tag{C.4}$$

Esta conexão entre partícula e sua onda associada tinha a grande vantagem de ser exatamente igual a que Einstein utilizou ao associar o fóton com ondas de luz. Observemos o seguinte experimento:

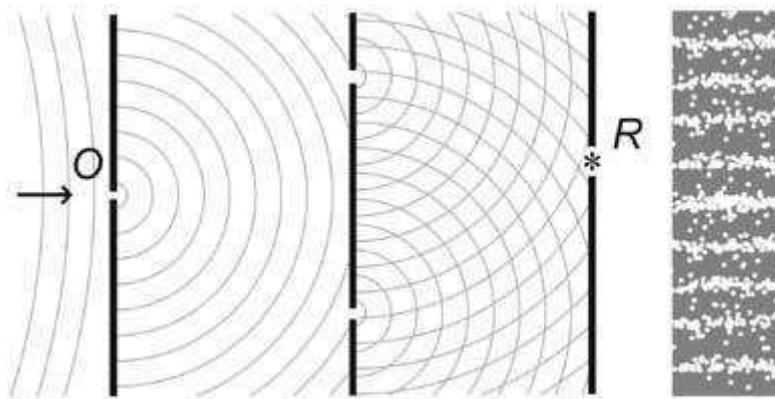


Fig. 5.2 – extraída de www2.uol.com.br/vyaestelar/figuras/vyaop-16-fig3.jpg em 06 /10/2012

Ao incidir um feixe de elétrons em uma fenda dupla, observamos várias franjas/marcações no filme fotográfico. Se tratássemos o elétron como partícula, só veríamos duas franjas no filme. No entanto, ao observarmos essa sequência, só poderíamos explicá-la pelos fenômenos de difração e interferência, características de uma onda.

Logo, certos fenômenos podem ser explicados ao tratarmos o elétron como partícula e outros são explicados se o tratarmos como uma onda. Esta duplicidade de comportamento é chamada de *dualidade onda-partícula*.

Em 1924, Louis de Broglie estudou este caráter ondulatório dos elétrons elaborando propostas para quantificar comprimento de onda e frequências do elétron. A relação de De Broglie nos fornece um meio de calcular o comprimento de onda associado ao comportamento ondulatório da matéria. De Broglie propôs que a relação $\lambda = \frac{h}{mv}$ fosse geral para qualquer partícula. Assim, qualquer partícula material poderia possuir uma natureza ondulatória com um comprimento de onda de De Broglie associada a esta partícula.

Logo, podemos discutir elétrons usando duas linguagens: onda ou partícula. Vamos utilizar a seguinte analogia: suponha que tenhamos que viajar ao Canadá. Deste modo, estudamos francês, pois no Canadá se fala o francês. Mas você terá uma surpresa ao chegar naquele país. Muitos canadenses falam o inglês e se recusam a falar no idioma francês e vice-versa. Como o inglês

adotou algumas palavras do francês, você ficaria intrigado, pois os canadenses pareceriam ora estar falando inglês ora francês. O problema é que fizemos a suposição errada de que no Canadá apenas se fala o francês. O inglês é uma língua distinta, mas que possui similaridades com o francês. Em física é similar. Assim como as línguas faladas em diferentes partes da Terra são diferentes, as leis que governam alguns aspectos da física também utilizam linguagens diferentes. Nenhuma lei obriga que a realidade física seja descrita por uma única linguagem. Podemos buscar por esta linguagem única, mas a natureza é indiferente aos nossos sonhos. Geralmente assumimos que tudo que encontramos têm que se comportar como as coisas que já conhecemos. Assim, encontramos algo que não se ajustava no nosso antigo esquema conceitual. Como escolhemos qual linguagem usar? A resposta é *simplicidade*. Bragg chegou a escrever: "Os elétrons se comportam como partículas às segundas, quartas e sextas e como ondas às terças, quintas e sábados. Aos domingos, os físicos descansariam do esforço de tentar compartilhar os dois comportamentos". Assim o termo dualidade onda-partícula foi cunhado para expressar esta característica dos elétrons e fótons.

Logo, a órbita eletrônica, antes circular, teria uma representação (com um número inteiro de comprimentos de onda) como feita abaixo:

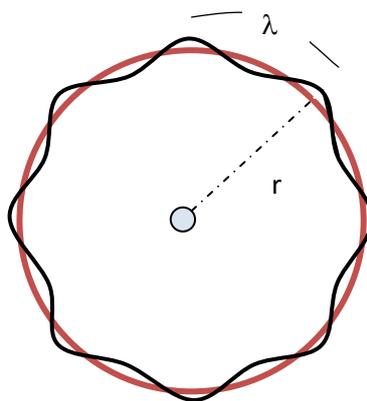


Fig. C.8 – Nova representação da órbita eletrônica

C. 6 Passo 2 – Lembrar o conceito análogo: Ondas estacionárias

Lembramos aos alunos que ondas estacionárias em cordas adotam o padrão abaixo:

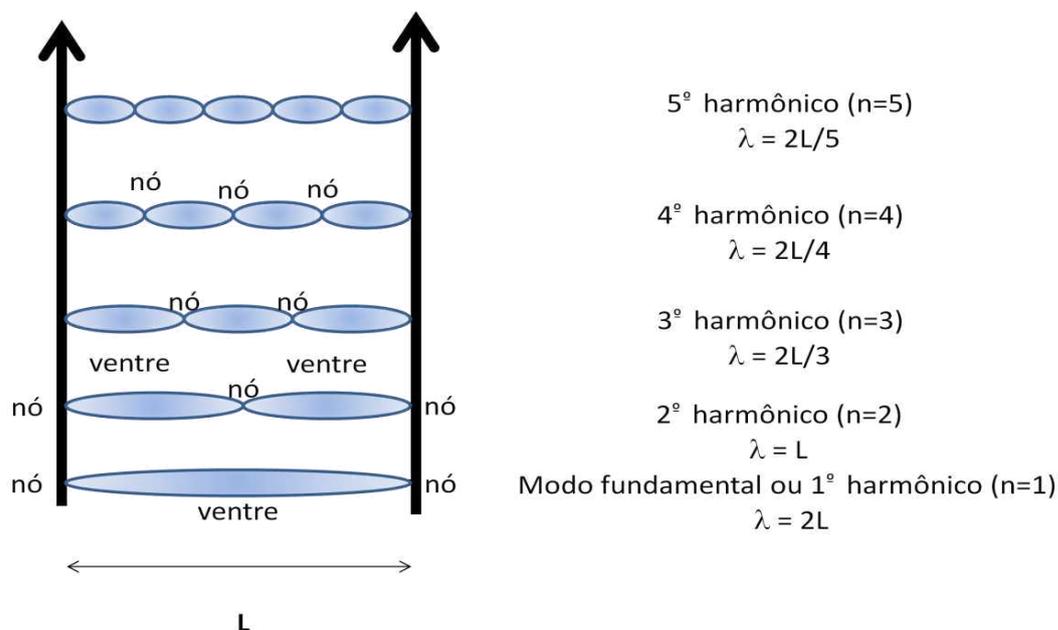


Figura C.9 – Representação das órbitas estacionárias em cordas

Temos que:

$$v = \lambda f \quad (C.5)$$

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad (C.6)$$

C.7 Passo 3 do Método de Analogias de Glynn - Identificar as características entre os domínios - Analogia entre ondas estacionárias e comportamento do elétron no átomo de Hidrogênio (Z=1)

Igualando as equações (C.6) e (C.4) temos:

$$\frac{2L}{n} = \frac{h}{m v} .$$

Então,

$$2L = \frac{nh}{mv}.$$

Tomando $2 \pi r$ como maior comprimento de onda do elétron, temos:

$$2 \pi r_n = \frac{nh}{mv}.$$

Como o raio da órbita depende do número quântico n , passaremos a indicá-lo com o índice n . Obtemos, então, a velocidade do elétron:

$$v = \frac{nh}{2 m \pi r_n} \quad (\text{C.7})$$

Igualando as equações (C.2) e (C.3):

$$\frac{K Z e^2}{r_n^2} = \frac{mv^2}{r_n} \quad (\text{C.8})$$

substituindo a eq. (C.7) em (C.8), obtemos:

$$\frac{K e^2}{r_n^2} = \frac{m}{r_n} \left(\frac{nh}{2 m \pi r_n} \right)^2 \quad (\text{C.9})$$

Obtemos o raio da órbita do elétron isolando o termo r_n :

$$r_n = \frac{n^2 h^2}{m 4 \pi^2 K e^2} \quad n = 1, 2, 3.. \quad (\text{C.10})$$

Para $n=1$ obtemos o raio do estado fundamental do átomo de hidrogênio, conhecido também por raio de Bohr ($a_0 = r_1$) :

$$a_0 = \frac{h^2}{4 m \pi^2 K e^2} = 5,3 \times 10^{-11} m.$$

Como o núcleo atômico possui dimensões da ordem de 10^{-15} m, podemos verificar que um átomo é constituído principalmente de espaços vazios. As dimensões da órbita do elétron em um átomo de hidrogênio é 10^5 vezes o

tamanho do núcleo. Se um próton tivesse as dimensões de uma moeda de cinco centavos de reais (~1 cm), o elétron ligado mais próximo estaria 1 km afastado.

Para obtermos a velocidade, igualamos as equações (C.2) e (C.3):

$$\frac{K e^2}{r^2} = \frac{m v^2}{r},$$

$$r = \frac{K e^2}{m v^2} \Rightarrow v^2 = \frac{K e^2}{m r},$$

mas, da equação (C.10):

$$v^2 = \frac{K^2}{m} \cdot \frac{4 \pi^2 m}{n^2 h^2} e^4,$$

$$v = \frac{2 \pi e^2 K}{n h}. \quad (\text{C.11})$$

A energia total do elétron deve ser conservada:

$$E_t = E_c + E_p$$

Tomando o potencial eletrostático como nulo no infinito, temos:

$$E_t = \frac{m v^2}{2} + \left(-\frac{K Z e^2}{r} \right) \quad (\text{C.12})$$

Substituindo (5.8) em (5.12), obtemos:

$$E_t = \left(\frac{K Z e^2}{2 r} \right) - \left(\frac{K Z e^2}{r} \right) = \left(-\frac{K Z e^2}{2 r} \right)$$

A energia total do elétron também é quantizada devido ao fato de o raio ser quantizado, de modo que para Z=1:

$$E_n = \left(-\frac{K e^2}{2 r_n} \right)$$

e
$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m K e^2}$$

$$E_n = \left(-\frac{m K^2 e^4}{2 n^2 \hbar^2} \right) = \frac{-R_\infty}{n^2} \quad n = 1, 2, 3... \quad (\text{C.13})$$

onde $R_\infty = \frac{m K^2 e^4}{2 \hbar^2} = 13,6 \text{ eV} = 2,18 \times 10^{-18} \text{ J}$ é a constante de Rydberg.

Percebemos que a diferença da energia do elétron entre duas órbitas é quantizada, como podemos ver abaixo:

$$E_{mi} - E_{mf} = \left(-\frac{R_\infty}{n_i} \right) - \left(-\frac{R_\infty}{n_f} \right)$$

De acordo com o postulado de Bohr, esta é a energia absorvida ou emitida pelo elétron ao mudar de órbita.

Experimentalmente observamos que esta energia é igual ao produto da frequência do fóton emitido/ absorvido pelo elétron pela constante de Planck, chegando à seguinte relação:

$$E_{mi} - E_{mf} = \left(-\frac{R_\infty}{n_i} \right) - \left(-\frac{R_\infty}{n_f} \right) = hf \quad (\text{C.14})$$

Logo, a frequência do fóton emitido/absorvido é:

$$f = \left(\frac{R_\infty}{h} \right) \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right),$$

O que nos possibilita o entendimento do diagrama de energia a seguir no qual temos linhas bem definidas, caracterizando saltos quantizados :

Devido ao seu diminuto tamanho, não podemos observar diretamente a estrutura interna de um átomo. Esta estrutura é revelada indiretamente por fenômenos observáveis que são consequências de seu arranjo interno. Entre estes fenômenos estão os espectros de luz emitidos pelos átomos excitados. Estes espectros constituem uma “impressão digital” do átomo que os emitiu.

Em 1835, o filósofo francês Auguste Comte, afirmou que não seríamos capazes de compreender a composição química das estrelas. Ele estava errado! Na segunda metade do século XIX, os astrônomos começaram a utilizar as técnicas de espectroscopia e fotografia. Assim, estas técnicas ajudaram a produzir uma revolução da nossa compreensão sobre o universo, sendo possível estudar, pela primeira vez, a constituição do universo. Fraunhofer utilizou um prisma montado na frente da lente da objetiva de um telescópio. Ele verificou que quando a luz do sol e as estrelas brilhantes eram analisadas, havia linhas de absorção características no espectro produzido. Fraunhofer, porém, morreu antes que ele pudesse estudar este fenômeno de forma mais completa.

Os espectros de emissão correspondem a eventos que acontecem no interior do átomo e nos fornecem informações acerca de sua estrutura. Antes de Bohr sugerir o seu modelo, já se sabia que era possível separar as linhas do espectro de emissão em famílias ou séries. Os padrões dos espectros de emissão de diferentes átomos possuem uma grande analogia entre si. Em 1885 Balmer foi capaz de encontrar uma equação que descrevia todas as frequências das linhas que formavam o espectro visível do átomo de hidrogênio e que formavam a série que levou o seu nome. A exploração do espectro do átomo de hidrogênio além da região do visível revelou a existência uma série no ultravioleta (série de Lyman) e séries no infravermelho (séries de Paschen, Brackett e Pfund). Em cada uma destas séries, as frequências das linhas obedeciam a equações análogas à série de Balmer. Sobre estas séries, Poincaré escreveu em 1905: “...*As leis são mais simples, mas elas são de uma natureza totalmente diferente... da qual, nós não percebemos, e eu acredito que sejam um dos segredos mais importantes da natureza*” . Esta frase foi escrita anos antes da teoria de Bohr.

Temos, então, o seguinte diagrama de energia :

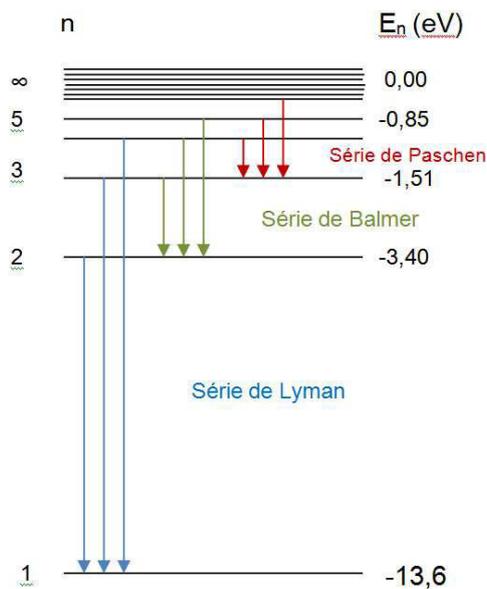


Figura C.10: diagrama de níveis de energia

As fórmulas de Balmer e suas análogas apresentam uma constante numericamente bem conhecida e que os espectroscopistas chamavam de constante de Rydberg. O modelo de Bohr não só prevê o valor desta constante, mas também a descreve em termos de grandezas fundamentais como a carga e a massa do elétron e a constante de Planck. A este acordo quantitativo foi atribuído o grande sucesso do modelo de Bohr.

C.8 – Passo 4 do Método de Analogias de Glynn - Identificar as características relevantes entre os dois domínios e conectar (mapear) as similaridades entre os dois objetos:

Na figura C.5 estão presentes 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.

Identificando as características relevantes entre os dois domínios e mapeando as similaridades entre os dois objetos:

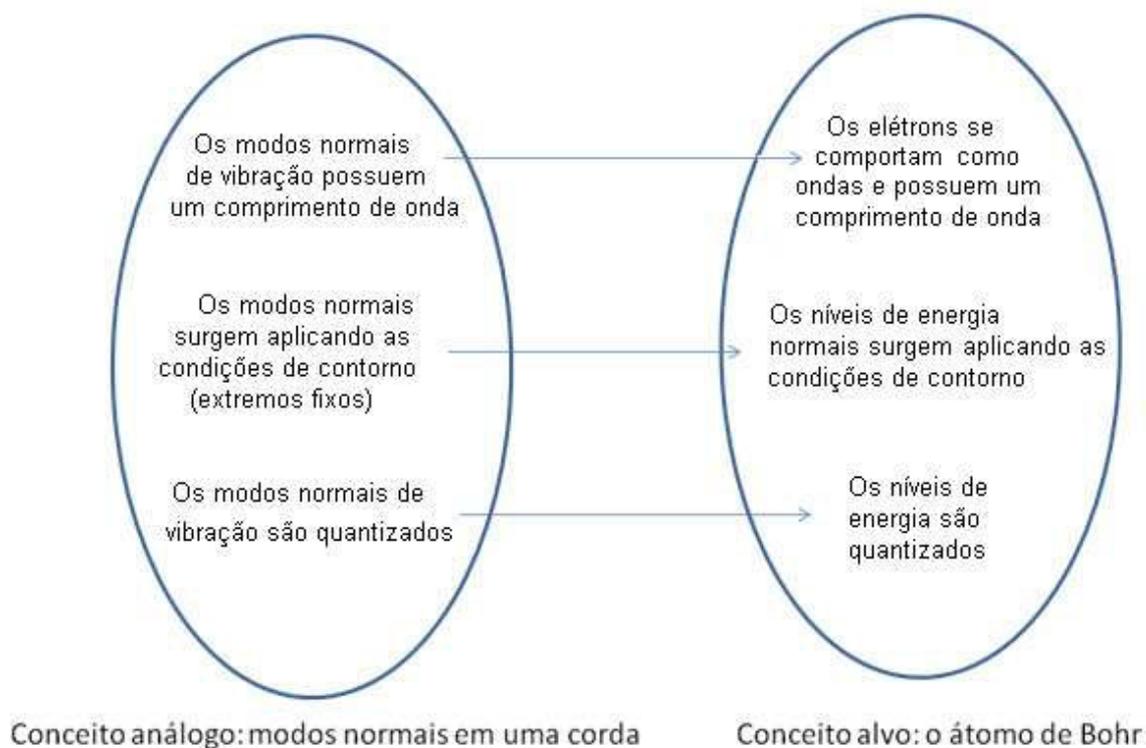


Figura C.11 – mapeamento entre os conceitos alvo e análogo .

C.9 - Passo 5 do Método de Analogias de Glynn - Indicar onde a analogia falha:

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.

C.10 - Passo 6 do Método de Analogias de Glynn - Traçar as conclusões sobre o conceito alvo:

Assim como nas ondas estacionárias pode haver uma interferência construtiva, o mesmo ocorre nas órbitas dos elétrons.

Apêndice D

**Crítica de como o modelo de Schroendiger é
introduzido nos didáticos da Química**

D.1 Evolução da teoria de Bohr

Com o refinamento do estudo do espectro de linhas, foi verificado que estas linhas na verdade seriam “raias”. Era necessário explicar como elétrons com a mesma distância do núcleo -na Química, com mesmo número quântico principal (n)-, tinham diferentes níveis de energia. Para diferenciá-los foram inseridos novos “estados”. Uma primeira diferenciação seria admitir órbitas elípticas de diferentes excentricidades. Esta nova diferenciação foi chamada de número quântico azimutal -na Química, número quântico secundário (l)- os valores de l variam de 0 até $(n-1)$ onde quanto maior o valor de l , maior seria a energia do elétron e, assim, menos excêntrica seria a elipse.

Outras diferenciações se fizeram necessárias e foram introduzidas também o momento magnético para o elétron (m_l) que teria valores de $-l$ até $+l$ e por último, o número quântico de spin (m_s).

O número quântico azimutal (l), apesar de em alguns livros ser claramente colocado como ligado à excentricidade da trajetória elíptica, também chamado de momento angular do elétron. Ao se atribuir arbitrariamente valores de l a partir de 0, pode levar a uma associação direta, por parte dos alunos, de que o momento angular do elétron pode ser 0, o que não é dito nem evidenciado/discutido.

Atualmente, os livros de Química não se aprofundam nesta discussão, sendo explicados apenas o nível quântico principal e o aluno aprende a distribuição de Linus Pauling de forma mecânica sem maiores discussões.

Bibliografia

[Arons 1997] A. B. ARONS. **Teaching Introductory Physics** – Washington: John Wiley & Sons, 1997.

[Biscuola 2010] BISCUOLA. *et al.* **Física 3.** – 1.ed – São Paulo: Saraiva, 2010.

[Duarte 2005] DUARTE, Maria da Conceição. Analogias na Educação em Ciências. Contributos e desafios. **Investigações em Ensino de Ciências** – v. 10(1), pp. 7-29, 2005.

[Eisberg 1979] EISBERG, Robert Martin. **Fundamentos da Física Moderna** – 1. Ed. –Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1979.

[Eisberg 1974] EISBERG, Robert Martin, RESNICK, Robert. **Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles.** United States of American: John Wiley & Sons, 1923.

[Feltre,1928] Feltre, Ricardo / Yoshinaga, Setsuo – 1928
_____. **Atomística: teoria e exercícios** - São Paulo, Ed. Moderna, 1974.

[Feynman, 1963] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, **The Feynmann Lectures on Physics**, Addison-Wesley Publishing Company, inc., Reading, Massachussets, Paolo Alton, London, Vol. 1 (1963).

[Fuke 2010] FUKU, Luiz Felipe; KAZUHITO, Yamamoto. **Física para o Ensino Médio** – v.3 – 1. ed. –São Paulo: Saraiva, 2010.

[Glynn 2007] GLYNN, Shawn. **The Teaching with Analogies Model - Build conceptual bridges with mental models**, 2007.

[Halliday 1996] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; KRANE, Kenneth S. **Física IV** – 4. ed. – Rio de Janeiro: Editora LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996.

[Halloun, 2004] - I. A. Halloun, ***Modeling Theory in Science Education***, Kluwer Academic, Dordrecht, (2004)

[Kantor 2010] KANTOR, Carlos A. *et al.* **Física, 3º Ano**: Ensino Médio: Livro do Professor. (Coleção Quanta Física; v.1) – 1. Ed – São Paulo: Editora PD, 2010. – Vários autores.

[Luz 2011] LUZ, Antônio Máximo Ribeiro da; ALVARENGA, Beatriz. **Física Contexto & Aplicações**. Coleção Física Contexto & Aplicações – v. 3 – 1.ed - São Paulo: Scipione, 2011.

[McKagan, 2008] S. B. McKagan, K. K. Perkins e C. E. Wieman, Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res. **4**, 010103 (2008).

[Moraes, 2011] J. U. P. Moraes, **O Livro Didático de Física e o Ensino de Física: suas relações e origens**, 2008.

[Mortimer, 2012] Eduardo Fleury Mortimer, Andréa Horta Machado – **Projeto VOAZ Química**- 1. Ed. São Paulo: Scipione, 2012. (Coleção Projeto VOAZ).

[National Academy, 1996] National Research Council, ***National Science Education Standards***, National Academy, Washington, DC, (1996).

[Oliveira 2010] OLIVEIRA, Maurício Pietrocola Pinto de. *et al.* **Física em contextos: Pessoal, Social e Histórica: eletricidade e magnetismo, ondas eletromagnéticas, radiação e matéria** (Coleção Física em contextos: Pessoal, Social e Histórico; v. 3) – 1. ed. – São Paulo: FTD, 2010.

[Sampaio 2005] SAMPAIO, José Luiz; CALÇADA, Caio Sérgio. **Física: Volume Único**. (Coleção Ensino Médio Atual) – 2. Ed. – São Paulo: Atual, 2005.

[Sant'Anna 2010] SANT'ANNA, Blaidi. *et al.* **Conexões com a física.** – 1. Ed – São Paulo: Moderna, 2010.

[Santos, 2010] SANTOS, Antônio Carlos Fontes dos. **The first steps in vision in the classroom - Etapas iniciais para a visão na sala de aula.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v.32, n. 2, 2010.

[Silva 2010] SILVA, Claudio Xavier da; FILHO, Benigno Barreto. **Física aula por aula: eletromagnetismo, ondulatória, física moderna.** (Coleção Física aula por aula; v.3) 1. ed. – São Paulo: FTD, 2010.

[Ramalho 2007] RAMALHO JR, Francisco. *et al.* **Os fundamentos da Física.** – 9.ed. – São Paulo: Moderna, 2007

[Tipler, 2001] Tipler, Paul A.; Llewellyn, Ralph A. **Física Moderna** – LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A., 2001

[Usberco, 2011] **Conecte Química**, 1/ João Usberco, Edgard Salvador- São Paulo: Saraiva, 2011