

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM EDUCAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA
CURSO DE MESTRADO**

**O ÁTOMO DE BOHR NO NÍVEL MÉDIO: UMA ANÁLISE SOB O
REFERENCIAL LAKATOSIANO**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA COMO
REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM EDUCAÇÃO
CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA.

ORIENTADOR: LUIZ O.Q. PEDUZZI

ANDREZA CÁTIA BASSO

FLORIANÓPOLIS - SC

MARÇO - 2004

AGRADECIMENTOS

À minha família e amigos, pelo apoio e incentivo, principalmente nas horas mais difíceis.

Aos colegas do mestrado, Ilse, Ana Paula, Ana Carolina, Janice, Patrícia, Fábio, pela amizade, troca de experiências...

Aos colegas do doutorado, que sempre estiveram disponíveis, contribuindo de várias maneiras.

Aos professores do Ensino Médio que avaliaram o texto.

Aos autores de livros, F. Cabral, A. Lago e A. Gaspar, que concordaram em participar da pesquisa.

Aos professores Bernardo Buchweitz (*in memoriam*), Dalva Aldrigui Vergara (*in memoriam*) e Regina Calderipe Costa pelo incentivo inicial.

À secretária Sandra e aos professores do PPGECT pela disponibilidade e atenção.

À CAPES pelo apoio financeiro.

E, especialmente, ao professor Luiz O. Q. Peduzzi, que não foi apenas um orientador, pois participou ativamente de todas as etapas do trabalho, com dedicação, entusiasmo e paciência. A ele meus sinceros agradecimentos.

Enfim, agradeço a todos que de uma maneira ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

*Aos meus pais,
Antônio e Marilene.*

*Educai as crianças para
que não seja necessário
punir os adultos.
Pitágoras*

RESUMO

É quase unânime, entre professores e pesquisadores, que a Física Moderna e Contemporânea deve fazer parte das aulas de Física do nível médio. Como o átomo de Bohr é um dos assuntos da Física Moderna ele começa a ser contemplado em alguns livros didáticos deste nível. Neste sentido, passa a ser objeto de interesse para a pesquisa em Ensino de Física.

Tendo em vista que o livro didático ainda permanece sendo a principal fonte de consulta do professor, investigou-se como o modelo atômico de Bohr se apresenta (conteúdo e contexto histórico) em seis obras: cinco livros didáticos de Física e um projeto de ensino. Procurou-se analisar, entre outros aspectos, a possível disseminação da visão empirista-indutivista da ciência. Além disso, durante o desenvolvimento da pesquisa interagiu-se com autores visando esclarecer algumas dúvidas decorrentes da análise de suas respectivas obras, o que se mostrou bastante produtivo.

Com o intuito de contribuir para o ensino do átomo de Bohr no nível médio, elaborou-se um texto sobre o tema, de acordo com o referencial lakatosiano. O material instrucional foi avaliado por uma amostra de professores de Física do Ensino Médio. Os resultados obtidos mostram que a maioria dos professores se posicionou favorável à abordagem do texto, à contextualização dada ao assunto; e ainda, defende que deve haver mudança nos conteúdos de Física apresentados no Ensino Médio, embora apontem algumas dificuldades para esta implementação.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	1
------------------------	----------

CAPÍTULO 1 – SOBRE A FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA

1.1 – A Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio.....	7
1.2 – Três vertentes metodológicas para a introdução da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio.....	16

CAPÍTULO 2 – PARA UMA REPRESENTAÇÃO ADEQUADA DA CIÊNCIA E DO TRABALHO CIENTÍFICO

2.1 – As visões deformadas do conhecimento científico.....	22
2.2 – A concepção empirista-indutivista e ateórica	23
2.3 – A visão rígida, algorítmica, exata, infalível: caracterizando o método científico.....	39
2.4 – A visão ahistórica e a problemática.....	47
2.5 – A concepção de conhecimento acumulativo e linear.....	57
2.6 – As demais visões deformadas do conhecimento científico.....	64

CAPÍTULO 3 – LAKATOS E O MODELO ATÔMICO DE BOHR

3.1 – A metodologia dos programas de investigação científica	66
3.2 – A história da ciência e suas reconstruções racionais.....	69
3.3 – O artigo de Lakatos sobre o desenvolvimento do modelo atômico de Bohr.....	73

CAPÍTULO 4 – O ÁTOMO DE BOHR EM LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA

4.1 – Introdução.....	82
4.2 – A teoria de Bohr em livros do Ensino Médio.....	84
4.3 – Interagindo com autores de livros do Ensino Médio.....	104
4.4 – A teoria de Bohr em livros universitários.....	114

CAPÍTULO 5 - PARA O ENSINO DO ÁTOMO DE BOHR NO NÍVEL MÉDIO

5.1 – Introdução.....	129
5.2 – O átomo de Bohr sob o referencial lakatosiano: um texto para professores do Ensino médio.....	130
5.3 – A aplicação do texto: análise dos dados e discussão dos resultados.....	158
CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS.....	177
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	183

INTRODUÇÃO

A educação brasileira segue um rumo com vários aspectos polêmicos e questionadores. Muitos já falam que há uma crise na educação. E a escola, como é o principal espaço onde ocorre a educação de crianças e jovens, também procura soluções para seus problemas. Com a grande evasão de alunos e a falta de motivação e interesse da maioria dos que restam, ainda há uma busca para que o estudante aprenda a ser curioso e criativo, que ele se familiarize com o pensamento abstrato e questione os fatos que lhe são impostos. Ou seja, que o aluno não se concentre simplesmente na memorização dos fatos, mas em questões de julgamento e interpretação. Neste sentido, os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM) trazem alguns pontos a serem considerados no Ensino de Física.

“Espera-se que o ensino de Física, na escola média, contribua para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais, situando e dimensionando a interação do ser humano com a natureza como parte da própria natureza em transformação”. (Brasil,1999, p.229)

Outro aspecto salientado pelos PCNEM refere-se à utilização da História e Filosofia da Ciência em sala de aula. Com este tipo de abordagem objetiva-se que o processo de elaboração dos conhecimentos científicos seja visto como fruto de uma construção humana e que não se transmita uma visão incorreta sobre a natureza deste conhecimento.

“... é essencial que o conhecimento físico seja explicitado como um processo histórico, objeto de contínua transformação e associado a outras formas de expressão e produção humanas.... Ao propiciar esses conhecimentos o aprendizado da Física promove a articulação de toda uma visão de mundo, de uma compreensão dinâmica do universo, mais ampla do que o nosso entorno material imediato, capaz portanto de transcender nossos limites temporais e espaciais. Assim, ao lado de um caráter mais prático a Física revela também uma dimensão filosófica, com uma beleza e importância que não devem ser subestimadas no processo educativo.” (Brasil,1999, p.229)

Por outro lado, os Parâmetros Curriculares deixam claro que é preciso rediscutir a Física para que ela propicie uma melhor compreensão do mundo e uma formação para a cidadania mais adequada, porém indicam que não é necessário elaborar novas listas de tópicos de conteúdos, mas, sobretudo dar ao ensino de Física novas dimensões. O principal meio de acesso à universidade, o vestibular, está exigindo conhecimentos dos alunos acerca de alguns tópicos relacionados à Física Moderna e

Contemporânea (FMC). Como, teoricamente, o Ensino Médio deveria além de preparar os jovens para a vida capacitá-los para o ingresso na universidade, vem sentindo-se a necessidade de que esses assuntos comecem a fazer parte dos conteúdos de Física do Ensino Médio.

Além disso, a presença da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio faz-se necessária devido ao grande número de fenômenos do cotidiano que exigem o uso desses tópicos para serem explicados, como, por exemplo, o funcionamento da lâmpada fluorescente, o laser, o aparelho de microondas.

Também o avanço da tecnologia permite à maioria da população o fácil acesso aos meios de comunicação, computadores e à mídia em geral e, estes por sua vez, com o domínio da informação exercem grande influência sobre o comportamento dos indivíduos. Assim, ocorre através destes meios a divulgação de determinados assuntos como a teoria do Caos, o Big Bang, que despertam a curiosidade dos estudantes e exigem a Física Moderna e Contemporânea para esclarecer tais fatos. Complementando isso, referem-se os PCN's:

“Assim, o aprendizado de Física deve estimular os jovens a acompanhar as notícias científicas, orientando-os para a identificação sobre o assunto que está sendo tratado e promovendo meios para a interpretação de seus significados. Notícias sobre uma missão espacial, uma possível colisão de um asteroide com a terra, um novo método para extrair água do subsolo, uma nova técnica de diagnóstico médico envolvendo princípios físicos, o desenvolvimento da comunicação via satélite, a telefonia celular, são alguns exemplos de informações presentes nos jornais e programas de televisão que deveriam também ser tratados em sala de aula”. (Brasil,1999, p.235)

Outro aspecto a ser considerado é que o exercício da cidadania passa pelo conhecimento das formas contemporâneas de linguagem e o domínio dos princípios científicos e tecnológicos que atuam na produção moderna. Neste sentido, as escolas devem estar preparadas para enfrentar essas questões, cada vez mais presentes em sala de aula, pois por um lado os estudantes são atraídos e até mesmo "seduzidos" pela tecnologia e, por outro, os professores acabam encontrando dificuldades para acompanhar este processo evolutivo, principalmente frente à desatualização dos currículos e à escassez de material didático (e paradidático) atual necessário à preparação de suas aulas.

As novas Leis de Diretrizes e Bases da Educação Nacional não deixam dúvidas sobre a necessidade de uma ampla revisão dos conteúdos científicos escolares. Isso se mostra particularmente importante na área da Física, que contempla a abordagem de assuntos que raramente ultrapassam a metade do século XIX.

Pode-se ressaltar que há bastante tempo discussões sobre a inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio brasileiro vêm sendo realizadas por professores e pesquisadores em Ensino de Física, visto ser relevante o entendimento desse tema para a formação de indivíduos que devem atuar em uma sociedade repleta de avanços tecnológicos, provenientes das grandes descobertas científicas do século XX, os quais destacam-se tanto por seus benefícios como pelos prejuízos que causam.

Com o intuito de verificar quais tópicos de Física Moderna e Contemporânea deveriam ser incluídos no currículo de Física do Ensino Médio brasileiro, Ostermann (2000) realizou uma pesquisa com uma comunidade de Físicos, professores de Física e pesquisadores em Ensino de Física, delimitando em seu trabalho os seguintes itens: efeito fotoelétrico, átomo de Bohr, leis de conservação, radioatividade, forças fundamentais, dualidade onda – partícula, fissão e fusão nuclear, origem do universo, raios X, metais e isolantes, semicondutores, supercondutores, partículas elementares, relatividade restrita, Big Bang, estrutura molecular e fibras ópticas.

Este estudo não fez considerações sobre que tipo de concepção de ciência deveria nortear a apresentação desses conteúdos. No entanto, a visão empirista - indutivista é a que prevalece na maioria das vezes, o que demandaria uma análise mais detalhada a respeito de suas origens e conseqüências para o ensino.

Neste sentido, vários trabalhos têm mostrado que a concepção empirista está ainda muito presente no Ensino de Ciências (Köhnlein e Peduzzi, 2002; Bahia, 2001; Medeiros e Bezerra Filho, 2000). Grande parte dos livros didáticos de Física preservam e reproduzem idéias onde o método científico é exposto como uma seqüência rígida de passos a serem seguidos pelos cientistas (Ramalho, Ferraro e Soares, 1989; Kazuito, Fuke e Shigekiyo, 1989).

A maior parte das aulas de Física ministradas no Ensino Médio têm o livro didático como principal e às vezes única fonte de apoio para os professores na elaboração do material de ensino. Deste modo, a formação dos estudantes fica

submetida, basicamente, às concepções apresentadas por esse material, que também é objeto de estudo do aluno.

Variável importante e dinâmica neste quadro, o livro didático começa a apresentar alterações significativas. Até bem pouco tempo, este tipo de material não contemplava assuntos relacionados à Física Moderna e Contemporânea. Desse modo, acabava delimitando os próprios conteúdos a serem abordados e também a forma e o tratamento dado a cada um deles. Alguns autores em edições recentes (Gaspar 2001, Cabral e Lago 2002, Gualter, Newton & Helou, 2001) passaram a incorporar tópicos de Física Moderna e Contemporânea em seus livros, embora com uma abordagem ‘tímida’, não sendo a mesma dada a conteúdos tradicionais do conhecimento como Mecânica, Termologia e Eletricidade. Essa inovação talvez tenha ocorrido principalmente pela exigência da nova legislação em vigor que, como já mencionado, recomenda à educação que incorpore temas relacionados à ciência e a tecnologia em seus currículos.

Dentre os assuntos destacados na pesquisa de Ostermann (2000) sobre possíveis conteúdos de FMC a serem levados para o Ensino Médio está o átomo de Bohr, objeto de estudo da presente pesquisa que tem por objetivos:

Geral

Contribuir para o ensino do átomo de Bohr no nível médio através da elaboração de um texto para professores.

Específicos

- Examinar criticamente a abordagem dada ao átomo de Bohr em textos didáticos (conteúdo e contexto histórico)
- Investigar a possível disseminação da filosofia empirista – indutivista da ciência em textos sobre o átomo de Bohr
- Discutir a contribuição da História e da Filosofia da Ciência para o Ensino do átomo de Bohr
- Desenvolver um texto para professores do nível médio sobre o átomo de Bohr, com base no referencial lakatosiano

Entre os motivos que justificam a escolha do tema ‘átomo de Bohr’, para o desenvolvimento da pesquisa, destacam-se:

1. É um dos assuntos salientado em pesquisa para fazer parte dos conteúdos de Física Moderna do nível médio;
2. Começa a ser contemplado em alguns livros didáticos de Física do nível médio;
3. Desenvolveu-se sob fundamentos inconsistentes, ou seja, contrário à bem corroborada teoria de Maxwell para o eletromagnetismo e, também, ao corroborado modelo atômico de Rutherford (Lakatos, 1979);
4. É um dos assuntos que representa a transição entre a Física Clássica e a Física Quântica;
5. Sua abordagem pode desencadear a concepção empirista-indutivista da ciência, uma vez que já eram conhecidas empiricamente as séries da Balmer e Paschen antes de Bohr propor sua teoria (Lakatos, 1979).

Assim, serão abordados os seguintes aspectos neste trabalho:

No capítulo 1 apresenta-se uma discussão sobre a presença da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Procura-se enfatizar, entre outros pontos, principalmente, os que se referem direta ou indiretamente ao modelo atômico de Bohr.

No segundo capítulo, são analisadas e discutidas quatro das sete ‘visões deformadas do conhecimento científico’ segundo Gil Pèrez et al (2001), as quais se encontram amplamente disseminadas tanto em materiais didáticos quanto em professores e alunos de todos os níveis de ensino.

No capítulo 3 apresenta-se, sucintamente, a metodologia dos programas de investigação científica de Lakatos, bem como a sua discussão sobre o desenvolvimento do modelo atômico de Bohr.

O quarto capítulo contempla a análise de livros didáticos de Física do Ensino Médio. Apresenta as questões encaminhadas para os autores de duas obras e suas respectivas respostas, interpretadas. Em seguida, exhibe um delineamento de como os livros universitários chegam à expressão para a quantização da energia.

O quinto capítulo é composto por um texto, para professores do nível médio, sobre o átomo de Bohr, desenvolvido de acordo com o referencial lakatosiano; o qual além de mostrar os modelos M_1 , M_2 e M_3 de Bohr (Lakatos, 1979), inclui também uma

introdução sobre os assuntos que fazem parte do contexto histórico em que se inseriram as idéias de Bohr. Além disso, apresenta os resultados de uma avaliação do texto, realizada por uma amostra diferenciada de professores do Ensino Médio.

No último segmento da dissertação apresenta-se os pontos considerados relevantes na pesquisa e as possibilidades de desenvolvimento de novos trabalhos sobre o tema.

Capítulo 1 – SOBRE A FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA

1.1 – A FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NO ENSINO MÉDIO

Terrazzan (1994) discute quais as perspectivas para a inserção da Física moderna na escola média. Salienta que a Física neste nível de ensino deve ‘completar’, junto com as demais disciplinas científicas, a formação básica inicial do cidadão, em um estado intermediário entre a chamada ‘alfabetização científico-tecnológica’ e a especialização profissional daqueles que farão um curso universitário. No entanto, a formação dividida por disciplinas não deve transmitir uma visão fragmentada da ciência.

Quanto à presença da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, Terrazzan destaca que este nível é adequado não somente para o desenvolvimento de temas atualizados, mas também, para o debate das principais formulações teóricas ocorridas nos grandes momentos da história da humanidade. Acrescenta ainda que os “conteúdos de física moderna e contemporânea correspondem a uma necessidade vital de nossos currículos de física escolar” (p.34). Um dos motivos é devido à importância de seus temas na constituição da Física enquanto área de conhecimento, que se complementa pela necessidade da discussão do papel da Física na sociedade atual, uma vez que não é possível debater sobre algo, sem ter um mínimo de conhecimento. “*Não procedendo assim caminha-se para a dominação e mistificação*” (Terrazzan, 1994, p. 35).

Com base em Giddens, Terrazzan (1994) salienta que o importante para a vivência do indivíduo em um contexto pós-industrial está em manter um equilíbrio entre a quantidade de conhecimentos profundos necessários para a vida profissional e os conceitos abstratos mais amplos, imprescindíveis para sua inserção na sociedade e para o pleno exercício da cidadania. Neste sentido, a Física tem uma notável importância, pois ao mesmo tempo em que fornece ‘instrumentos de caráter utilitário’ para a vivência cotidiana, propicia esclarecimentos sobre princípios gerais presentes em fenômenos naturais e tecnológicos. Assevera que “*a Física ensinada na escola média deve permitir aos estudantes pensar e interpretar o mundo que os cerca*” (p.38), e o cotidiano desempenhar um papel fundamental na definição da forma de abordagem dos conteúdos. Terrazzan esclarece que o cotidiano a que se refere inclui, além da realidade

em que se vive, também a curiosidade inerente ao ser humano, que é estimulada pelos mais variados meios. Argumenta ainda que:

“a influência crescente dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea para o entendimento do mundo criado pelo homem atual, bem como, a inserção consciente, participativa e modificadora do cidadão neste mesmo mundo, definem por si só a necessidade de se debater e estabelecer as formas de abordar tais conteúdos na escola média.” (Terrazzan, 1994, p.43)

Por outro lado, sustenta que para que haja a inserção da Física Moderna e Contemporânea no nível médio, não é necessário uma etapa anterior, dedicada à produção de novos materiais didáticos específicos, pois já existem materiais produzidos no exterior de boa qualidade acerca desses assuntos. *“Talvez baste apenas um passo mais arrojado para se poder afirmar que a história da ciência é a porta principal da entrada da Física Moderna e Contemporânea na escola média”* (p. 70).

Pode-se afirmar que este posicionamento de Terrazzan é, no mínimo, questionável; quando salienta que não é necessário uma etapa de produção de material para a inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, parece estar considerando que deve haver, simplesmente, a importação de materiais didáticos que tratem do assunto, o que não é desejável, pois estes podem não atender às especificidades do ensino brasileiro.

Outro ponto mencionado refere-se à estrutura desta temática que deve, segundo Terrazzan, estar incorporada à apresentação e ao desenvolvimento das teorias clássicas, o que irá possibilitar ao aluno compreender a Física como um ‘corpo unitário’ de conhecimentos, que se formou de várias maneiras.

Ao refletir sobre as deficiências do ensino de Física, Zanetic (1989) menciona, entre outros pontos, o fato de que o conteúdo da Física presente nas escolas se restringe aos ‘consagrados ramos’ da Física Clássica, com total ausência dos desenvolvimentos da Física Contemporânea. Afirma que este não é um problema apenas brasileiro ou dos países subdesenvolvidos, pois se reflete em várias dimensões. No entanto, ressalta que é indiscutível que a escola, em qualquer um de seus níveis, nunca poderá oferecer um panorama completo e definitivo da visão de mundo, pois a educação é um processo permanente de estudo e reflexão. Por outro lado, salienta que o mínimo a ser feito, na

escola média, consiste em estruturar o conhecimento necessário para o indivíduo ‘auto educar-se’ após o término desta etapa, ou seja, preparar a pessoa para prosseguir nos estudos, e também, *“fornecer os elementos mínimos que lhe permitam participar da aventura do conhecimento genuíno”* (p.18).

Assim, sugere que para ser satisfatório, o ensino de Física deve atender várias condições, entre elas oferecer aos alunos uma visão da Física que aproxime a ‘Física escolar’ dos mais recentes avanços construídos pelos físicos contemporâneos. Desse modo, salienta que o conteúdo a ser abordado no nível médio não pode ficar restrito apenas à Física conhecida até fins do século XIX, *“sob pena de dar uma impressão totalmente falsa e incompleta da perspectiva de mundo oferecida atualmente”* (p.23). Esclarece ainda, que se deve dar ênfase para a nova concepção de mundo desvendada por esta Física mais recente, como por exemplo, o fato de que a mecânica newtoniana só é válida para dimensões macroscópicas e baixas velocidades, não sendo aplicável, portanto, ao micromundo e às velocidades próximas a da luz, o que a torna deficiente na explicação de determinados fenômenos eletromagnéticos, por exemplo.

Entretanto, Zanetic (1989) percebe que pode haver dificuldades para compreensão e difusão dos conhecimentos dos séculos XIX e XX, contudo acredita que a dificuldade será menor se o primeiro contato ocorrer ainda no Ensino Médio. Explicita que na pior das hipóteses a contribuição será no mínimo o despertar do imaginário, da fantasia e do espírito criador, os quais são, ao mesmo tempo, fundamentais para a educação. Assevera que

“Não é suficiente dizer-se que um ótimo aprendizado da Física Clássica prepara o terreno para a aprendizagem posterior, na auto-educação fora da escola, da Física Contemporânea, pois, a metodologia presente nesta é de outra qualidade, muito mais sofisticada e que rompe não apenas conceitualmente com as teorias anteriores”. (Zanetic, 1989, p.23)

De um modo mais geral, Zanetic destaca que a solução para o problema do ensino de Física não consiste apenas em introduzir tópicos de Física Moderna e Contemporânea nos currículos, ou contemplar aspectos do cotidiano e elementos da história da física. *“Se o caminho fosse este, estaríamos partindo da premissa de que a ‘Física escolar’ é apenas incompleta e o adjetivo ‘escolar’ seria sem sentido”* (p. 179). Declara necessário ter

“... uma Física que envolva as emoções, as idas e vindas das grandes idéias geradoras presentes nos problemas cruciais, o uso do discurso racional, o papel do discurso e conceituação tidos por mágicos, as idéias fantásticas dos pensadores científicos que construíram as grandes teorias que já dominaram ou ainda dominam o cotidiano dos físicos, enfim, toda essa Física incomparavelmente mais viva que a Física essencialmente formal, a-histórica, recheada de exercícios, distante, quer de uma cultura popular, quer de uma cultura científica, parte integrante da vida inteligente contemporânea. ‘A Física também é cultura’ poderia ser uma possível bandeira para uma educação em Física comprometida com a construção de uma sociedade voltada para o interesse e necessidade da maioria da população”. (Zanetic, 1989, p. 61)

A importância da presença da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio não exime de dificuldades, certamente, o processo de sua implementação no currículo. Nesse sentido, cabe à pesquisa um papel esclarecedor e orientador.

Ustra, Strieder e Terrazan (1996) investigaram junto a professores de Física do Ensino Médio qual o nível de compreensão dos mesmos sobre conceitos relativos à Física Moderna e quais os fatores limitantes à sua abordagem em sala de aula. As dificuldades apontadas na inserção desses conteúdos foram as seguintes:

- A Física é caracterizada como uma disciplina excessivamente ‘abstrata’;
- A compreensão dos alunos sobre os conceitos é concebida como limitada ‘a priori’;
- A ausência de Física Moderna registrada oficialmente nos programas curriculares limita a possibilidade de seu tratamento em sala de aula;
- A carga horária da disciplina é considerada muito pequena, o que ‘impede’ o tratamento do tema em sala de aula;
- A compreensão da temática exige muitos pré-requisitos por parte dos alunos;

Um outro aspecto que merece atenção em uma reorganização curricular é o que diz respeito à abrangência e o grau de aprofundamento dos assuntos tratados, em função dos interesses do aluno egresso do Ensino Médio. Assim, como compatibilizar adequadamente perfis tão diversificados que vão desde o aluno para o qual a escola secundária se constituirá na etapa final de seus estudos (uma expressiva maioria) ao amplo leque de opções que dispõe o aluno universitário (Ciências Humanas, Ciências Sociais, Ciências Agrárias, Ciências Exatas)?

Após várias etapas de utilização da técnica Delphi, para a delimitação de quais tópicos de Física Moderna e Contemporânea deveriam ser ensinados na escola média, a fim de modernizar o currículo neste nível, Ostermann (2000) apresenta os resultados obtidos a partir das respostas de 61 físicos, professores de Física e pesquisadores em ensino de Física. O estudo evidenciou o seguinte consenso para assuntos de possível inclusão no Ensino Médio¹: efeito fotoelétrico, átomo de Bohr, leis de conservação, radioatividade, forças fundamentais, dualidade onda- partícula, fissão e fusão nuclear, origem do universo, raios X, metais e isolantes, semicondutores, laser, supercondutores, partículas elementares, relatividade restrita, Big Bang, estrutura molecular, fibras ópticas.

É importante salientar, para fins deste estudo, que o átomo de Bohr foi o segundo tema apontado, por ordem de prioridade, nos resultados finais da pesquisa, ‘perdendo’ apenas para o efeito fotoelétrico.

Um dos participantes da pesquisa de Ostermann (2000), ao ser solicitado a revisar algumas de suas posições ‘fora do consenso’, destaca um aspecto importante em relação ao modelo atômico de Bohr: inicialmente, contesta a grande aceitação que o tema ‘átomo de Bohr’ teve, mas, por outro lado, menciona que de acordo com sua visão este tópico só é aceitável se for mostrada sua importância histórica e salientado que este modelo não representa a imagem (ou descrição) para os sistemas atômicos em vigor.

Após um amplo leque de discussões e atividades relacionadas à Física Moderna e Contemporânea, e dos resultados obtidos nas várias etapas do trabalho de pesquisa desenvolvido por Ostermann (2000), esta conclui que:

1. Não há ainda um consenso acerca do que é a Física Contemporânea;
2. É fundamental o investimento na produção de material didático sobre temas de Física Moderna e Contemporânea que sejam acessíveis a professores e alunos de nível médio;
3. É preciso formar professores críticos em relação ao currículo de Física e fornecer-lhes ferramentas que os possibilitem enfrentar a questão da atualização curricular;
4. O ensino de Física Contemporânea no nível médio é viável, tanto no que diz respeito aos conceitos quanto às atitudes;

¹ Esta listagem está sendo novamente mencionada por necessidade de complementação.

5. Pesquisas na área são necessárias, principalmente as aplicadas em sala de aula para que haja contribuição na linha investigada;
6. Embora as aulas expositivas se mostrem adequadas para abordagem de conteúdos de Física Contemporânea, também podem ser utilizadas novas tecnologias no estudo de tais tópicos.

Em um estudo que teve por objetivo fazer um levantamento de concepções relacionadas às bases conceituais da Física Moderna sobre a natureza da luz e a estrutura do átomo entre estudantes do Ensino Médio, Paulo (1998) constatou a presença de concepções espontâneas entre os alunos. Segundo o autor, isso ocorre em virtude da explanação dos conteúdos não ser dada formalmente em sala de aula ou, quando abordada, reforçar concepções não coerentes com o pensamento científico atual. Para que haja mudança significativa na aprendizagem dos alunos, sugere que a introdução da Física Moderna no Ensino Médio deva vir após uma reestruturação do ensino da Física Clássica que vise uma transição suave entre os conceitos.

Pinto e Zanetic (1999) investigaram a possibilidade de inserção de tópicos de Física Quântica no Ensino Médio através de um mini-curso sobre a natureza dual da luz, embasado na história e na filosofia da ciência, tanto como conteúdo específico quanto como estratégia educacional. Denotaram que estas vão além de mero instrumento de ilustração ou motivação para os estudos, pois podem facilitar a construção conceitual e cultural da Física no Ensino Médio.

Ostermann e Ricci (2002) analisaram vários livros didáticos de Física do Ensino Médio com o intuito de detectar a presença de tópicos sobre a Relatividade Restrita, e verificaram que na maioria das obras este assunto não é abordado, ou quando o tema é tratado, muitas vezes a explanação feita é insatisfatória, uma vez que os textos não promovem a necessária ruptura com o senso comum que o entendimento da Relatividade Restrita exige e acabam por comprometer a correta aprendizagem dos conceitos envolvidos. A análise também mostrou o quanto é longo o caminho a ser trilhado até que os temas de Física do século XX sejam amplamente discutidos nos livros e se tornem compatíveis com as novas tendências curriculares.

De la Fuente et al. (2003) destacam que para despertar o interesse dos alunos em relação à ciência e mostrar uma visão mais clara e atualizada do trabalho científico deve-se incluir temas desenvolvidos pela física durante o século XX. Argumentam que

as pesquisas relacionadas com as idéias prévias sobre a Física Moderna têm sido poucas, quando comparadas com outros assuntos da Física Clássica, principalmente, com relação à evolução de certas idéias que são presentes em um período prolongado da vida dos estudantes. Afirmam que com referência ao ensino da estrutura atômica, percebe-se um razoável conjunto de investigações multidisciplinares que provém do ensino da química, no entanto, não são trabalhos destinados a detectar idéias prévias que se fazem presentes na estrutura cognitiva dos estudantes.

Com o propósito de estabelecer que idéias indivíduos de 13 e 14 anos têm acerca da estrutura da matéria, De la Fuente et al. questionaram 78 alunos do 8º ano da Educação Geral Básica (EGB), durante o ano de 2000. As perguntas foram elaboradas tomando por base entrevistas prévias de uma pequena amostra com perfil similar à amostra definitiva e levando em conta as conclusões de investigações prévias. Os alunos participantes da pesquisa haviam recebido, oportunamente, instrução acerca do átomo e das partículas que o constituem. O questionário foi composto por 15 itens, onde os 5 primeiros indagavam se o átomo é a parte menor que constitui as coisas, e como as forma. Nas questões 6 e 9 perguntavam sobre a diferença dos átomos, o movimento das partes que o compõem, a massa e o tamanho das partículas. As interações e as possibilidades de romper ou unir o núcleo do átomo foram tratadas nos itens 10 a 13. O item 14 indagava a respeito da origem da informação obtida pelos estudantes.

O resultado da pergunta 5, que solicitava aos alunos um desenho do átomo, mostra que todos os que tentaram fazer um esboço do mesmo, representaram o modelo de Bohr². Nenhum localizou os quarks. 4% dos alunos fizeram uma representação no plano identificando todas as partes e colocando corretamente as cargas. 13% fizeram o mesmo, no espaço. 33% apresentaram gráficos aceitáveis, mas com a ausência de partes ou cargas, contudo, manifestaram conhecer o modelo. 26% não responderam. O restante dos alunos realizou gráficos incompletos e uns 9%, desenhos confusos. No entanto, todos tentaram desenhar um sistema orbital.

Como conclusão geral do trabalho, De la Fuente et al (2003) expressam que os alunos não têm idéias claras acerca da estrutura da matéria. Afirmam que vários outros autores concordam que nesta idade os alunos não possuem uma estrutura cognitiva com

² Aqui, parece ser mais razoável identificar os resultados com o átomo de Rutherford e não com o de Bohr como fazem os autores.

os conceitos da teoria química, e suas respostas confirmam o que eles aprenderam memoristicamente. O modelo de átomo que a maioria dos alunos possui é o orbital, com o núcleo em repouso e os elétrons girando ao seu redor, indivisível e muito pequeno, embora não saibam por quê. As respostas dadas pelos alunos parecem ser provenientes de uma introdução dada pela escola e pela influência da mídia.

Os autores concluem que das três vertentes de enfoques metodológicos³ e, levando em conta o assinalado pelos alunos nas respostas do questionário, pode-se inferir que no ensino de Física Moderna deveriam ser utilizadas as considerações da primeira vertente: a apresentação dos sistemas clássicos para depois enfatizar sobre o caráter não linear do desenvolvimento científico, as dificuldades que geraram as crises da Física Clássica e as profundas diferenças conceituais entre a Física Clássica e a Moderna. *“Naturalmente, somente estamos em condições de afirmar que no caso da estrutura atômica, a apresentação do tema se realiza utilizando um sistema clássico mesmo quando não possuímos informações sobre o enfoque de tal apresentação”* (De la Fuente et al, 2003, p. 130).

Além disso, salientam que cada vez que se trata da problemática de ensinar Física Moderna, é possível perceber que as dificuldades se assentam em que as novas teorias são muito complicadas: na complexa ferramenta matemática para abordá-las, na necessidade de usar modelos que sejam anti-intuitivos, nas dificuldades para levar adiante experiências de laboratório, nos sérios problemas para encontrar aplicações no cotidiano dos conceitos de Física desenvolvidos e, finalmente, na enorme quantidade de conhecimentos prévios que se necessita para poder compreender os modelos da Física do século XX. A pesquisa indica que um dos inconvenientes mais importantes no ensino da Física do século XX, em geral, e no da estrutura atômica, em particular, é o bom manejo das idéias que são proporcionadas pela Física Clássica.

A observação de fenômenos clássicos modernos que contribuíram para grandes descobertas da Física Moderna, através do uso de recursos computacionais acessíveis na internet e de equipamentos disponíveis para o estudo da forma geométrica de diferentes alvos, foi o que Cavalcante, Piffer e Nakamura (2001) se dispuseram a investigar. O trabalho foi motivado por três razões básicas:

³ Essas vertentes metodológicas serão abordadas no item (1.2), a seguir.

1. Fazer uma interligação direta entre o experimento proposto sobre colisões, assunto abordado no âmbito da Física Clássica, e a descoberta do núcleo por Rutherford, fornecendo recursos computacionais para um melhor entendimento desta descoberta;
2. Contornar algumas dificuldades encontradas pelos alunos no entendimento da representação gráfica da curva de espalhamento e a identificação do alvo;
3. A inserção da Física desenvolvida no século XX na sala de aula.

O estudo indicou como é possível tratar o tema com a devida importância histórica e proporcionar ao aluno visualizar que a produção do conhecimento se faz através de um processo dinâmico.

Alveti (1999) avalia as possibilidades pedagógicas dos artigos da revista *Ciência Hoje*, para sua utilização na formação inicial e continuada de professores de Física, como forma de subsidiar a introdução da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Por meio de um banco de dados contendo registros sobre a divulgação científica para o ensino de Física, foram levantados os artigos utilizados na análise, que considerou aspectos da conceituação, linguagem e suas implicações para o uso pedagógico. Alveti conclui que se a meta for a de implantar disciplinas específicas para abordar a Física Moderna e Contemporânea nos cursos de formação de professores e no Ensino Médio, a utilização desse material parece ser uma boa alternativa.

Cavalcante e Tavolaro (2001) discutiram fundamentos de Física Moderna no Ensino Médio a partir de um estudo do comportamento dual da luz. Após uma intensa pesquisa, construíram materiais didáticos de baixo custo e os apresentaram a professores por meio da realização de oficinas. Os equipamentos produzidos permitiram a execução de uma série de experiências sobre os fenômenos de interferência, difração e comportamento corpuscular da radiação, que serviram de base para o entendimento adequado do princípio da dualidade e, conseqüentemente, para um amplo panorama da Física deste século. Os autores afirmam que, além dos conceitos relevantes para a formação de professores de Física, o trabalho permitiu uma melhor compreensão das formas contemporâneas de linguagem.

Coelho (1995) investigou a possibilidade de introduzir tópicos de mecânica quântica nos cursos secundários. Com os conteúdos organizados sistematicamente, de forma a serem compreensíveis a estudantes deste nível, pode perceber, por meio de um

curso destinado a um grupo de alunos que nunca haviam tido contato com tais assuntos, que a proposta é viável devido a “*um aceno favorável decorrente da receptividade e ressonância que obteve entre os estudantes que participaram das aulas*” (p.119). A pesquisa permitiu ao autor inferir que uma disciplina sobre mecânica quântica pode ser incluída no currículo escolar médio e que “*as teorias físicas contemporâneas podem ser tão populares como as antigas teorias clássicas*” (p.121).

1.2 – TRÊS VERTENTES METODOLÓGICAS PARA A INTRODUÇÃO DA FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NO ENSINO MÉDIO

Aqui, apresentam-se três vertentes representativas de abordagem metodológica para a introdução da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, classificadas por Terrazzan, (1994): 1) a exploração dos limites dos modelos clássicos; 2) a não utilização de referências aos modelos clássicos; 3) a escolha de tópicos essenciais.

1.2.1- Explorar os limites dos modelos clássicos

Neste tipo de abordagem para o ensino de temas de Física Moderna e Contemporânea, é sugerido, inicialmente, a apresentação e discussão dos limites dos modelos clássicos. A partir das restrições impostas pela Física Clássica, inserem-se os temas relativos à Física Moderna e Contemporânea.

Segundo Terrazzan (1994), Gil e Solbes - da Universidade de Valência, Espanha - compartilham dessa metodologia de ensino defendendo uma apresentação da Física Moderna em bases construtivistas, de forma que seja respeitada a evolução histórica dos conceitos físicos, e que estes sirvam de parâmetro para a elaboração de uma estratégia didática.

Após uma vasta análise de livros didáticos, utilizados no Ensino Médio da Espanha, foi detectado, pelo grupo de Gil, que a maioria dos textos não faz referência ao caráter não linear do desenvolvimento da Física ou às dificuldades que originaram as crises da Física Clássica, nem tampouco, às profundas diferenças conceituais entre esta e a Física Moderna.

Com o intuito de facilitar a abordagem da Física Moderna em sala de aula, foi proposto, pelo grupo de Gil, um programa de atividades baseado no trabalho coletivo de um grupo de alunos, os quais foram colocados frente a situações-problema para que através da busca de soluções para estas questões reconstruíssem o conhecimento científico e obtivessem informações sobre características do trabalho científico. Para a introdução ao estudo da Física Moderna, foram destacadas quatro atividades, concentradas basicamente em:

1. Relembrar as principais contribuições da Física Clássica;
2. Elaborar uma imagem do conceito de matéria compatível com a Física Clássica;
3. Admitir que a Física é construída como contraponto ao senso comum, que tem o seu poder explicativo limitado quanto à resolução de problemas relevantes.
4. Perceber a Física Clássica como um corpo coerente de conhecimento, que consegue explicar grande parte dos problemas da Física do século XIX.

De acordo com Terrazzan, é possível perceber que o trabalho desenvolvido pelo grupo de Gil deixa claro sua defesa em relação à exploração da Física Clássica antecedendo a abordagem da Física Moderna. A superação das pré-concepções dos alunos e das dificuldades na compreensão dos conceitos ocorre quando há uma explicitação da crise sofrida pela Física Clássica e quando é feita uma reconstrução histórica do esforço dos cientistas ao lançarem bases à nova concepção.

Neste sentido, Terrazzan complementa que *“pensar a inserção da Física Moderna e Contemporânea a partir da discussão dos limites das teorias da Física Clássica pode se constituir em uma forma adequada à nossa realidade escolar”* (p.75).

Além desse aspecto salientado por Terrazzan, com este tipo de abordagem é possível demonstrar a Física como um processo de investigação humana, onde as teorias são substituídas quando surgem outras que abordam uma maior dimensão de fenômenos ou os explique de uma forma mais precisa. Isso permite que sejam destacados os períodos de crise sofridos pelas teorias e sua superação, que pode ocorrer de várias maneiras, com pequenos ajustes ou até com a substituição da teoria. O caráter de ciência como construção humana é uma grande contribuição que pode ser obtida com esta forma de apresentação de conteúdos.

1.2.2– Evitar referências aos modelos clássicos

Esta forma de abordagem metodológica surge em contraposição a anterior. Nela sugere-se que os modelos e teorias da Física Moderna sejam apresentados sem mencionar explicitamente os conceitos e modelos clássicos ou semiclássicos que lhes antecederam.

Esta linha de investigação é sustentada, segundo Terrazzan (1994), por Fischler e Lichtfeldt – Universidade de Berlim, Alemanha - que intercedem a favor da idéia de que o uso didático dos conceitos e modelos clássicos ou semiclássicos interfere negativamente na conceituação da Física Moderna, na estrutura cognitiva dos estudantes. Para argumentar acerca de seus posicionamentos, Fischler e Lichtfeldt analisaram três textos didáticos com o intuito de verificar a forma como eles apresentam o modelo atômico de Bohr. Segundo os autores, há um certo ‘grau de obstaculização’ ao entendimento da Física Quântica quando o texto enfatiza e detalha o modelo de Bohr. Salientam que quanto maior a quantidade de detalhes do modelo de Bohr, mais difícil será a aprendizagem de conceitos quânticos. Após este estudo, sugerem cinco premissas básicas para a introdução da Física Moderna no nível secundário:

1. Evitar referências à Física Clássica;
2. Introduzir o estudo do efeito fotoelétrico a partir das características dos elétrons e não das dos fótons;
3. Utilizar a interpretação estatística dos fenômenos observados evitando usar descrições dualistas;
4. Abordar o princípio de Incerteza da Heisenberg nas etapas iniciais do estudo da Física Quântica;
5. Evitar o modelo atômico de Bohr no tratamento do átomo de hidrogênio.

Baseadas nestas premissas foram elaboradas 32 aulas para o ensino introdutório de Física Quântica, as quais apontaram resultados positivos em relação à aprendizagem. No entanto, como bem assinala Terrazzan, é necessário observar as condições em que esta experiência foi realizada; pois, os professores que utilizaram este tipo de estratégia tiveram uma formação prévia adequada acerca desses conceitos e ainda, foram treinados para isso.

Esta abordagem metodológica parte do fato de que os estudantes terão dificuldades para substituir ou converter as idéias clássicas, inseridas previamente, quando apresentados os conceitos quânticos. Para este aspecto, Terrazzan deixa o seguinte questionamento: será realmente desprezível o ensino do modelo atômico de Bohr, ou ele apenas deve ser desconsiderado momentaneamente como uma estratégia didática?

Embora já se tenha definido um posicionamento acerca desta questão, ela será devidamente esclarecida no decorrer do trabalho.

Ainda, com relação as cinco premissas citadas acima, Alvetti (1999) faz alguns questionamentos:

1. Como utilizar as características dos elétrons e não a dos fótons, sendo o efeito fotoelétrico um fenômeno tão importante na definição da corpuscularidade da luz?
2. De que forma utilizar a interpretação estatística dos fenômenos sem mencionar os conceitos dualistas?
3. Como introduzir incertezas sem referências a conceitos clássicos e/ou ondulatórios?

1.2.3 - Escolher entre tópicos essenciais

Uma posição intermediária entre as anteriores propõe que apenas alguns conteúdos de Física Moderna devem ser ensinados no nível secundário. Ela é defendida por Arons (citado em Terrazzan, 1994) – Universidade de Washington, Estados Unidos - que considera possível e desejável que em um ensino introdutório de Física Moderna os alunos obtenham algum ‘insight’ sobre conceitos como: elétrons, fótons, núcleos, estrutura atômica e talvez, os primeiros aspectos qualitativos da relatividade. Esta sugestão é dada devido a anos de observação sistemática e investigativa pelo autor acerca de alunos da escola secundária.

A argumentação de Arons explicita que caso se queira ensinar o átomo de Bohr deve-se primeiro identificar nos tópicos de mecânica, eletricidade e magnetismo os ‘tópicos essenciais’ que permitam o entendimento dos elétrons, núcleos atômicos e

fótons. Estes conteúdos, obrigatoriamente, devem compor a programação de apresentação do modelo atômico de Bohr. Terrazzan (1994) ressalta

“É uma idéia interessante, coerente, mas ao mesmo tempo perigosa. No limite desta argumentação pode-se facilmente entrar em defesa dos ‘pré-requisitos’ sem maiores críticas. Corre-se também o risco de produzir uma programação tipo ‘colcha de retalhos’, sem a unidade necessária já comentada”. (p.81)

Outro aspecto mencionado por Terrazzan (1994), para a adoção consciente da idéia de Arons, está ligado aos livros didáticos, que na maioria das vezes apresentam os resultados finais da produção científica ao invés de abordarem o processo histórico propriamente dito; assim, torna-se necessário um aprofundamento maior da temática, para que o estudo tenha uma abrangência adequada.

As observações feitas por Terrazzan quanto à cautela que se deve ter ao adotar esta forma de abordagem são perfeitamente pertinentes. Além disso, é preciso estabelecer critérios fidedignos para o estabelecimento de que tópicos serão contemplados e ter claro quais os objetivos que se pretende com o estudo.

Neste trabalho, será considerada a primeira vertente metodológica para a abordagem do átomo de Bohr no nível médio: a que sugere que deve haver a exploração dos limites impostos pelos modelos clássicos, para que a partir das limitações da física clássica seja destacada a necessidade de uma nova teoria para a explicação dos fenômenos.

Capítulo 2 – PARA UMA REPRESENTAÇÃO ADEQUADA DA CIÊNCIA E DO TRABALHO CIENTÍFICO

2.1 - AS VISÕES DEFORMADAS DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO

Gil Pérez et al. (2001) evidenciaram em uma pesquisa as possíveis deformações acerca da compreensão da natureza do trabalho científico que o ensino de ciências pode estar transmitindo explícita ou implicitamente.

Por meio de *workshops*, sobre a natureza do ensino das ciências e seu papel, colocaram grupos de docentes em situação de investigação para analisar criticamente as concepções dos próprios professores a respeito do trabalho científico. Para isso, solicitaram aos grupos que enumerassem as possíveis deformações que poderiam estar ocorrendo no ensino de ciências por ação ou omissão.

Outra estratégia utilizada para conhecer as deformações sobre a natureza da ciência consistiu em analisar artigos sobre a educação científica/didática das ciências, e neles procurar referências a possíveis erros e simplificações na forma como o ensino os apresenta.

Os resultados da vasta análise bibliográfica foram coincidentes com as ‘conjecturas’ formuladas pelo grupo de professores, tanto com relação às deformações quanto à frequência com que surgem.

Foram enumeradas e caracterizadas sete visões deformadas do conhecimento científico:

1. Concepção empírico-indutivista e ateórica;
2. Visão rígida, algorítmica, exata, infalível;
3. Visão aproblemática e ahistórica;
4. Visão acumulativa de crescimento linear;
5. Visão exclusivamente analítica;
6. Visão individualista e elitista;
7. Imagem descontextualizada e socialmente neutra da ciência;

Optou-se por utilizar o artigo de Gil Pérez et al, em primeiro lugar, por que ele se adequa relativamente bem aos objetivos da pesquisa e, em segundo, porque as visões deformadas enunciadas foram detectadas, além de nas atividades com professores, por meio da análise de várias referências, as quais serviram como suporte à classificação e, de certa forma, embasaram todo o trabalho.

Como parte do desenvolvimento do referencial teórico da presente dissertação de mestrado, são analisadas, a seguir, quatro dessas visões deformadas do conhecimento científico, à luz da filosofia da ciência. Decidiu-se por estudar a concepção empirista-indutivista e ateórica, a visão rígida, algorítmica, exata, infalível, a visão ahistórica e aproblemática e a concepção de conhecimento acumulativo e linear, devido à sua compatibilidade e pertinência para os objetivos deste trabalho. As demais visões serão apenas enunciadas, por não serem do interesse específico da pesquisa.

2.2 - A CONCEPÇÃO EMPIRISTA –INDUTIVISTA E ATEÓRICA

2.2.1 – Sob uma explanação e caracterização de acordo com Aristóteles, Bacon e o indutivismo

A concepção empirista tem como base segura a observação, sendo que esta possui um papel neutro, ou seja, não é influenciada pelas idéias ‘a priori’ nem pelas teorias disponíveis e necessárias para orientar todo o processo de construção do conhecimento. Conforme o empirismo, todas as idéias são provenientes de percepções sensoriais.

Aristóteles já afirmara: “*nada há no intelecto que antes não tenha estado nos órgãos dos sentidos*”. Ele, como Platão, atribui ao conhecimento padrões elevados e estritos, distinguindo-o da mera opinião. No entanto, surge uma dificuldade para Aristóteles, pois ele adota simultaneamente com este ideal uma postura empirista, na qual defende que conhecimento tem sua fonte nos sentidos; enquanto que para Platão este tem sua origem na razão.

Ao mesmo tempo em que acredita que o conhecimento parta do sensível, Aristóteles confere à ciência a investigação do **por quê** das coisas. Destaca que ela deve se distinguir do comum, pois visa a um conhecimento das causas e dos princípios (Abrantes, 1998).

Para Aristóteles as leis mais gerais da ciência e as definições que estipulam o significado dos atributos próprios dessa ciência são indemonstráveis. Considera que na ciência empírica pode haver muita variação enquanto que a matemática pura é

invariável. Para ele, o conhecimento científico genuíno tem *status* de verdade necessária. Essa sua visão a respeito das leis científicas possui influências e se propaga até hoje.

No século XIII houve algumas assimilações, um tanto conturbadas, inicialmente, das teses aristotélicas. A Igreja condenou a tentativa de limitar o poder divino. Determinados princípios de ordem natural seriam descobertos somente pela razão ou por Aristóteles em sua filosofia natural: Deus só poderia criar um mundo no qual se verificassem os princípios da cosmologia e da Física Aristotélica.

Alberto Magno e Tomás de Aquino contribuíram para um conhecimento mais completo da Física aristotélica e para uma atitude mais aberta frente a suas afirmações. Magno sempre esteve disposto a corrigir ou descartar doutrinas aristotélicas que considerava falsas e, a introduzir partes da verdade encontradas em outro lugar. Tomás de Aquino continuou seu trabalho, na assimilação e difusão da filosofia de Aristóteles e, assim como Alberto, esperava resolver o problema da fé e da razão, definindo a relação apropriada entre o saber pagão e a teologia cristã (Lindberg, 2002).

Bacon, em sua obra “*Novum Organum*”, publicada em 1620, explicita a sistematização da filosofia empirista e passa a ser considerado um representante autêntico dessa tradição. Para ele, a observação dos fenômenos era a base pela qual seria construído o conhecimento via indução. Atribuiu as explicações da ciência e sua eficácia às cuidadosas e rigorosas observações dos fenômenos:

“Resta-nos um único e simples método de emitirmos nossas opiniões: levar os homens aos particulares e às suas séries e ordens regulares a fim de que os homens se sintam obrigados a renunciar às suas noções e comecem a adquirir a familiaridade com as coisas”. (Bacon, 1979 aforismo 36)

Para tanto, a mente humana, segundo Bacon, deve estar livre de elementos que obstruam as percepções ou impeçam o acesso à verdade, ou seja, é desejada uma atividade observacional pura, pois as caracterizações prévias dos fatos e os conceitos enraizados podem levar a visões deformadas do que se quer identificar.

Bacon reconhece quatro fontes ‘tipológicas de ilusão cognitiva’ capazes de impedir o fidedigno exercício das atividades observacionais: são os *Ídolos da Tribo*; *Ídolos da Caverna*; *Ídolos do Foro* e *Ídolos do Teatro*.

Os *Ídolos da Tribo* são os que estão fundados na própria natureza humana, na peculiar tribo e são influenciados por prenoções e interpretações típicas da mente humana. Os *Ídolos da Caverna* dizem respeito aos homens enquanto indivíduos. Eles podem ser influenciados pelas experiências vivenciais de cada um, suas peculiaridades, seus costumes ou pela sua educação. Os *Ídolos do Foro* são provenientes da associação recíproca dos indivíduos do gênero humano entre si. Podem ser distinguidos pelo mau uso da língua, sendo que se as palavras forem impostas de maneira imprópria ou inepta, podem bloquear espantosamente o intelecto. E, os *Ídolos do Teatro* que apresentam suas características baseadas no espírito tomado por dogmas filosóficos e também pelas regras viciosas de demonstração, reproduzindo e inventando figuras de mundos fictícios e teatrais.

Segundo Bacon, o intelecto deve ser liberado e expurgado de todos os Ídolos e seus aparatos, de tal modo que o acesso do homem sobre as ciências possa parecer semelhante ao acesso ao reino dos céus, ao qual não se permite entrar senão sob a figura de criança.

Neste sentido, também enumera três tipos de falsas filosofias: a sofística, a empírica e a supersticiosa. Diz que os filósofos metafísicos tradicionais são vistos como aranhas: forjam teias de grande engenhosidade e perfeição formal a partir de seus próprios corpos, deixando de manter contato com o real.

Assim, se as fontes de ilusão cognitiva forem combatidas, a atividade observacional torna-se digna de confiança.

Bacon critica Aristóteles dizendo que na dialética aristotélica não ressoam mais do que vozes. Segundo Bacon, Aristóteles tornava a experiência uma 'escrava' para confirmar suas opiniões, pois estabelecia conclusões sem consultar devidamente os experimentos.

A concepção baconiana também inclui o método indutivo e suas características. Nessa perspectiva, o método é considerado como o adequado para uma investigação quando for constituído por um número significativo de observações. Sendo que destas, serão originadas as teorias. Com o aumento das observações chega-se às teorias mais gerais – princípio fundamental das coisas.

O processo indutivo, de acordo com Bacon, só é confiável se garantir transições seguras dos casos particulares para os mais gerais:

“Só há e só pode haver duas vias para a investigação e descoberta da verdade. Uma consiste no saltar apressadamente dos sentidos e dos particulares para os axiomas mais gerais e, a partir deles, entendidos como princípios com sua suposta verdade indisputável, deriva e descobre os axiomas intermediários. A outra constrói seus axiomas a partir dos sentidos e dos particulares, ascendendo contínua e gradualmente até finalmente alcançar os axiomas de máxima generalidade. Este é o verdadeiro caminho que, porém, ainda não foi empreendido. Tanto uma como outra via partem dos sentidos e dos particulares e terminam em formulações da mais elevada generalidade. Mas são extremamente diferentes. Enquanto uma passa açodadamente pela experiência e pelos particulares, a outra aí se detém de forma ordenada. A primeira, desde o início, estabelece certas generalidades abstratas e inúteis; a segunda se eleva gradualmente até chegar aos princípios, que são realmente os mais comuns na natureza”.(Bacon,1979, aforismos 19 e 22)

Em contraponto a essas informações, Edgar Allan Poe, em um suposto manuscrito datado de 2848, tece importantes constatações a respeito deste tipo de idéia metodológica:

“... os metafísicos consentiram em libertar o povo da estranha fantasia de que existiam apenas duas estradas praticáveis, conduzindo à verdade... os sábios contentaram-se em proscrever todos os outros competidores, passados, presentes e futuros, pondo fim a toda uma controvérsia sobre o assunto... em virtude da qual os caminhos aristotélico e baconiano são, e por direito devem ser, as únicas e possíveis avenidas, que levam ao conhecimento... essas antigas idéias limitaram sua investigação ao rastejar, e não necessito sugerir-lhe que rastejar, entre outros meios diversos de locomoção, é um dos principais; mas, pelo fato de estar firme a tartaruga nos seus pés, deveremos cortar as asas das águias?” (Poe citado em Zanetic, 1989, p.80)

Segundo Chalmers (1993), a objetividade da ciência indutivista deriva do fato de que tanto a observação como o raciocínio indutivo são eles mesmos objetivos. A confiabilidade das proposições é segura porque pode ser averiguada pelo uso direto dos sentidos. Além disso, se as condições de confiabilidade estiverem satisfeitas, elas podem ser transmitidas para as leis e teorias. A garantia obtida pelos indutivistas ingênuos é de que a base da ciência é formada pelo princípio da indução.

De acordo com o indutivista ingênuo, a ciência começa com a observação. Esta permite a formação de uma base sólida para a construção do conhecimento científico, que é obtido, por indução, a partir de proposições observadas.

O princípio da indução não é justificado através do uso da lógica ou da experiência. Os argumentos lógicos partem do fato que se a premissa do argumento é verdadeira, então a conclusão deve ser verdadeira.

Para ilustrar, sugere-se o seguinte exemplo: suponhamos que até hoje, considerando uma ampla variedade de leites, todos os que eu tenha observado, são brancos. Com base nisto concluo que ‘todo leite puro é branco’, independente de quem o produz, de qual alimentação é ingerida pelo animal produtor, de sua raça ou espécie... A premissa é verdadeira, mas a conclusão não pode ser considerada como necessariamente verdadeira, pois não há garantia lógica nenhuma de que o próximo leite puro a ser observado não será cor-de-vinho.

Bertrand Russell é muito citado neste aspecto, por ter elaborado uma história de um peru indutivista:

“Esse peru descobriu que, em sua primeira manhã na fazenda de perus, ele fora alimentado às 9h da manhã. Na segunda manhã também às 9h e assim foi sucessivamente por toda a semana. Contudo, sendo um bom indutivista, ele não tirou conclusões apressadas. Esperou até recolher um grande número de observações do fato que era alimentado às 9h da manhã, e fez essas observações sob uma ampla variedade de circunstâncias. Observou as segundas e terças feiras, aos sábados e domingos, em dias quentes e dias frios, em dias secos e em dias chuvosos. A cada dia acrescentava uma outra proposição à sua lista. Após um grande apanhado de observações, sua consciência de indutivista ficou satisfeita e o levou a concluir: “ eu sou alimentado sempre às 9h da manhã”. Mas, no dia seguinte, como era véspera de natal ao invés de ele ser alimentado ele foi degolado. Logo, sua inferência indutiva com premissas verdadeiras o levava a uma conclusão falsa”. (Chalmers, 1993; p.37)

2.2.2 - Com Hume e sua crítica à indução

David Hume foi um filósofo cuja conclusão lógica da filosofia empírica deu-lhe destaque em virtude de ser coerente consigo mesma. Além de sua filosofia ser

caracterizada como empirista, ela também é considerada cética em virtude dos limites que estabelece para as várias formas de conhecimento, inclusive para o próprio conhecimento experimental.

Neste sentido, Hume apresenta uma característica um pouco diferente, pois ao mesmo tempo em que ele privilegia a experiência, considerando-a como a única fonte legítima de conhecimento, afirma que não há como provar que o conhecimento que provém dela seja verdadeiro ou definitivo.

Para Hume, a causa ou efeito nunca podem ser estabelecidos a priori, ou seja, sem a experiência não somos capazes de saber as conseqüências que determinados fatos podem nos trazer. A associação entre dois fenômenos como causa e efeito depende da experiência repetida, embora essa mesma experiência nem sempre nos dê a relação causal.

Para ilustrar essa idéia, Coelho (2000) destaca que só se acredita que um objeto qualquer cairá quando é solto de uma determinada altura em relação a um referencial, devido às experiências passadas com outros objetos. Mas se não houvesse nenhuma outra experiência anterior análoga, qualquer predição acerca da direção que o objeto tomaria seria arbitrária.

No entanto, mesmo depois de uma série de resultados semelhantes não é possível ter certeza que no próximo evento isso tornará a ocorrer. Assim, Hume salienta que:

“Mesmo depois de averiguarmos que num caso ou experimento um evento específico acompanha o outro, não julgamos lícito formular uma regra geral ou predizer o que ocorrerá em situações análogas, pois seria temeridade imperdoável julgar de todo o curso da natureza, partindo de um único experimento, por mais exato e seguro que fosse. Mas quando determinada espécie de eventos se mostra sempre e em todas as situações conjuntada a outra, não sentimos escrúpulos em predizer um ao surgir o outro, utilizando-nos, pois, do único tipo de raciocínio que pode assegurar sobre as questões de fato e de existência”. (Hume citado em Coelho 2000, p. 143)

De acordo com Hume, o estabelecimento da conexão causal além de depender da repetição da experiência depende da atividade de um ‘princípio da natureza humana’: o costume ou hábito.

Como exemplo, expõe que o espírito, devido a ter encontrado em vários casos a conjunção entre a chama e o calor, a neve e o frio, é levado pelos sentidos a acreditar haver uma conjunção entre esses elementos.

A proposição “*o que começa tem que ter uma causa*”, não tem certeza intuitiva como as proposições de lógica, e não há nenhum objeto que implique a existência de outro, se os objetos forem considerados por si mesmos:

“não temos outra noção de causa e efeito que a de certos objetos, que sempre estiveram associados... os objetos não têm entre si relação alguma verificável; não é de qualquer outro princípio, senão do costume agindo sobre a imaginação, que tiramos toda a inferência, indo do aparecimento de um à experiência de outro”.(Hume citado em Russell, 1969, p.207)

Para exemplificar a prova de que as impressões primeiras derivam da experiência, Russell, com base em Hume, menciona que um homem que nasce cego não tem idéia das cores. Explicita que as idéias gerais são particulares somente quando a elas forem relacionados certos termos que lhes proporcionam significado. Esclarece que quando temos idéia de um homem, esta tem todas as particularidades que a impressão de um homem tem, não podendo a mente formar noção alguma de quantidade ou qualidade sem ter uma idéia precisa dos graus de cada uma.

“Efetivamente, o conhecimento não é inato, isto é, aprendemos ao viver, mas há uma base inata sem a qual não poderíamos sequer aprender. O conhecimento não é redutível a sensações e percepções, mas também não pode ser captado exclusivamente por intuição intelectual da clareza e distinção, pois o real não é nem tão claro nem tão distinto. A complexidade nem sempre é removível. Em muitos casos ela é até inerente”.(Freire e Bastos Filho, 1995, p.90)

Apesar de as idéias de Hume assegurarem que não se tem nenhum acesso aos poderes, nem às forças que governam a natureza, bem como, não ser provável nenhuma garantia das conexões causais estabelecidas com relação às expectativas para o futuro, elas apresentam um aspecto positivo relacionado ao hábito: ele é ‘*o grande guia da vida humana*’, ou ainda, ‘*o único guia da vida humana*’, sendo o responsável por tornar a experiência útil para o futuro (Coelho, 2000).

Ainda, Hume diz que a experiência é o único guia no raciocínio sobre as questões; através dela é possível falar em probabilidade ou prova, ou seja, ela permite os

vários graus de certeza. Por isso, deve ser tomada como referência fundamental, tanto para o conhecimento prático do cotidiano quanto para a ciência.

Coelho (2000) destaca que o alcance da crítica de Hume à metafísica, bem como a preocupação de distingui-la das formas legítimas de conhecimento, é revelada nas últimas linhas de sua obra *“Investigações acerca do Entendimento Humano”*:

“Se examinarmos, por exemplo, um volume de teologia ou de metafísica escolástica e indagarmos: contém algum raciocínio abstrato acerca da quantidade ou número? Não. Contém algum raciocínio experimental a respeito das questões de fato e existência? Não. Portanto, lançai-o ao fogo, pois não contém senão sofismas e ilusões”.(Hume citado em Coelho, 2000, p. 149)

Russel (1969) explica que a filosofia de Hume começa como a de Locke, com a intenção de ser razoável e empírica, sem confiar em nada, mas procurando obter toda a instrução que lhe fosse possível da experiência e da observação; mas, como Hume tinha um poder mais agudo de análise e um intelecto melhor, chega à desastrosa conclusão de que nada há a aprender da experiência ou da observação *“se acreditarmos que o fogo aquece ou que a água refresca, isto é só porque nos custa muito trabalho pensar de outra maneira”* (Russel, 1969). Afirma que não se pode deixar de crer, mas nenhuma crença pode basear-se na razão; e nem uma linha de pesquisa pode ser melhor que a outra, uma vez que elas são igualmente baseadas em convicções irracionais.

De acordo com Russel, até determinado ponto, Hume provou que o empirismo puro não constitui uma base suficiente para a ciência. Mas se este princípio pode ser admitido, o restante pode proceder de acordo com a teoria de que o conhecimento é baseado na experiência. Os argumentos de Hume provam que a indução não pode ser inferida nem através da experiência e nem por meios lógicos. Sem este princípio é impossível a ciência.

2.2.3 – De encontro à visão poperiana

Karl Popper foi um célebre filósofo que se ocupou primordialmente com questões relativas à teoria do conhecimento e a epistemologia. Defendeu a concepção de que todo conhecimento é falível e deve ser corrigido, ou seja, é provisório. Seu pensamento chegou a atingir a esfera da política e da sociedade.

Popper diz que se aproximou do problema da indução através de Hume, pois considerava correta a afirmação de que a indução não poderia ser justificada logicamente.

“... mesmo após observar freqüentemente a constante conjunção de objetos, não temos razão para tirar qualquer inferência concernente a qualquer outro objeto que não aqueles com que tivemos experiência... Que o sol não há de se levantar amanhã, não é uma proposição menos inteligível e não implica maior contradição, do que a afirmação de que ele se levantará”. (Hume citado em Silveira e Ostermann 2002, p. 13)

Com relação ao problema indutivo, Popper afirma estar longe de ser óbvio, de um ponto de vista lógico, haver justificativa para inferir enunciados universais a partir de enunciados singulares. Independente do número de confirmações que uma teoria tenha obtido, não há nada que garanta que no futuro ela seja confirmada.

No entanto, Popper esteve convencido de que a psicologia de Hume ou a psicologia popular estavam erradas em pelo menos três pontos: (a) o resultado típico da repetição; (b) a gênese dos hábitos; e especialmente (c) o caráter das experiências e tipos de comportamentos, como os de ‘acreditar em uma lei’, ou esperar uma ‘sucessão ordenada de eventos’.

Neste sentido, observa que para explicar a origem de nossas crenças é preciso substituir a idéia de eventos que **são** semelhantes pela idéia de eventos aos quais reagimos **interpretando-os** como semelhantes, ou seja, tentamos identificar as similaridades e interpretá-las de acordo com nossas leis.

Ele acredita que o problema lógico da indução pode ser solucionado pela proposição de um método hipotético-dedutivo de explicação, calcado em procedimentos falsificacionistas. Para Karl Popper,

“toda observação implica alguma interpretação, à luz do nosso conhecimento teórico, ou que o conhecimento baseado puramente na observação, sem a influência de qualquer teoria, seria de todo infértil e fútil – caso fosse possível... a crença de que podemos começar exclusivamente com observações, sem qualquer teoria, é um absurdo... uma anedota que nos deveria mostrar que podemos colecionar com vantagem insetos, por exemplo, mas não observações”. (Popper, 1982, p. 51 e 76)

Popper salienta que todo conhecimento é impregnado de teoria, inclusive as observações, pois não existem dados puros nem fatos neutros ou livres de teoria. De acordo com sua concepção, “*não há órgãos de sentido em que não se achem incorporadas geneticamente teorias antecipadoras*”.

Silveira (1996) exemplifica a discussão acima utilizando a mecânica newtoniana: para determinar a posição de uma órbita planetária é necessário confrontar posições previstas para o planeta com observações realizadas a partir da terra. Esses fatos são resultantes de um processo de observação astronômica e de interpretações a partir de diversas teorias, demonstrando que mesmo os fatos que são baseados apenas em nossa percepção também estão impregnados de teorias.

Neste sentido, Feyerabend (1977) também enfatiza que a observação neutra e sem teoria não existe:

“A experiência aparece acompanhada de pressupostos teóricos e não antes deles; e a experiência sem a teoria é tão incompreensível quanto (supostamente) a teoria sem a experiência: eliminemos parte do conhecimento teórico de um ser senciente e teremos a pessoa completamente desorientada e incapaz de realizar a mais simples das ações. Eliminemos maior porção de conhecimento e o mundo sensorial dessa pessoa (sua linguagem de observação) começará a desintegrar-se, desaparecerão a sensação de cor e outras sensações simples, até que a pessoa venha a achar-se em estágio mais primitivo que o de um bebê”.
(Feyerabend, 1977, p.263)

Para ilustrar essas idéias, Popper comenta o que Katz escreveu: “*um animal faminto divide o ambiente em objetos comestíveis e não comestíveis. Um animal que foge enxerga caminhos para fuga e esconderijos... De modo geral, os objetos mudam... de acordo com as necessidades do animal*”. Para ele, somente desta forma – relacionando interesses e necessidades – os objetos podem ser classificados, assemelhados ou diferenciados. Esta regra serve também para os cientistas, pois em analogia com o animal, quem orienta o cientista são seus interesses teóricos, o problema que está investigando, suas conjecturas, antecipações, as teorias que aceita como pano de fundo, ou seja, seu ‘horizonte de expectativas’.

De acordo com a perspectiva popperiana, o método empírico correto expõe constantemente uma possibilidade de ser falsificado.

Segundo Popper, é sempre possível o acordo entre um sistema e o ponto de vista observacional. Se uma certa evidência é inconsistente com as conseqüências da teoria, podem ser utilizadas estratégias para ‘salvar’ a teoria através da modificação das hipóteses auxiliares; mas estas devem aumentar o grau de falsificabilidade da teoria. Ou seja, todas as regras devem ser concebidas de tal forma que permitam aos enunciados da ciência serem projetados contra a falsidade. Assim, insistir que as interpretações científicas sejam continuamente expostas à possibilidade de falsificação é promover o progresso científico.

Um problema da Filosofia da Ciência também foi enfatizado por Popper: distinguir as teorias das ciências empíricas das especulações pseudocientíficas ou metacientíficas. Na visão positivista, a ciência é caracterizada com base na observação e através do método indutivo enquanto que a pseudociência e a metafísica se caracterizam pelo método especulativo.

Além disso, para os positivistas as teorias científicas eram resultantes dos fatos e poderiam ser verificadas por eles. Entretanto, Popper acredita que as teorias científicas não podem ser verificadas, apenas podem ser corroboradas algumas conclusões obtidas com o auxílio de condições específicas.

Com relação às teorias metafísicas, considera que apesar da falta de testabilidade e conteúdo empírico elas não são totalmente desprovidas de sentido, pois em alguns casos podem favorecer o avanço da ciência.

2.2.4 – Em estudos e trabalhos publicados

“É possível pensar sem teoria? O que veria um suposto tábula rasa teórico?” foram as questões propostas como título e objeto de estudo em trabalho desenvolvido por Freire e Bastos Filho (1995).

Com o intuito de esclarecer essas questões, os autores propuseram responder três perguntas aparentemente simples para mostrar que mesmo as indagações mais comuns estão impregnadas de teoria.

Os exemplos que serviram de base para seus argumentos foram as respostas dadas às seguintes perguntas: (i) Qual é o raio da terra? (ii) Qual é a massa de Júpiter? (iii) Qual é a massa do elétron?

Uma conclusão imediata, tirada a partir dos três exemplos escolhidos para a discussão, foi de que mesmo essas perguntas ‘aparentemente inocentes’ são fortemente carregadas de teoria e, torna-se absolutamente impossível pensá-las no vazio, ou sem um referencial teórico adequado.

Após verificarem que suas perguntas não constituíam casos de descobertas casuais, os autores mostram que definitivamente a teoria é essencial para a construção e leitura das perguntas e que um suposto *tábula rasa* olharia para o mundo, mas nada veria.

Medeiros e Monteiro (2002) investigaram a “*Invisibilidade dos pressupostos e das limitações da teoria copernicana nos livros didáticos de Física*”.

Foram analisados trinta e um livros didáticos de Física do Ensino Médio em língua portuguesa, através de um contexto histórico dos pressupostos e das limitações da teoria copernicana. O estudo mostrou graves omissões e distorções introduzidas por tais textos na apresentação desta teoria.

Entre as categorias identificadas nos livros encontra-se a que menciona a realização de observações imprecisas como fonte de dificuldades de aceitação da teoria copernicana: a simplificação do papel das observações, como desprovidas de carga teórica, é encontrada e demonstra um certo indutivismo ingênuo por parte dos autores. Esta linha é evidenciada por Paraná (1993), Calçada e Sampaio (1990) e Ramalho et al (1993). Esses autores ao invés de destacarem a carga teórica presente nas observações astronômicas, atribuem os desacordos apenas a questões ligadas à precisão das observações efetuadas. Isto se torna uma validação empírica direta e inquestionável da referida teoria.

Segundo Medeiros e Monteiro, os resultados da análise apontam, de um modo geral, para um completo descaso dos livros-textos em relação aos pressupostos da teoria copernicana e às críticas levantadas contra a mesma. A teoria não é vista em sua provisoriedade e temporalidade históricas e sim, como o produto de uma ‘feliz

descoberta'. Mesmo as omissões contribuem para encaixar esta teoria em uma tradição de encarar o desenvolvimento científico como algo linear, conferindo uma abordagem inadequada nas relações entre observação e teoria.

Em um outro trabalho, Medeiros e Bezerra Filho (2000), examinaram, em um relato, as convicções epistemológicas de alguns professores da disciplina de 'Instrumentação para o Ensino da Física'.

Foram entrevistados dois grupos de professores, de duas universidades federais, e professores do nível médio que, embora nunca tivessem lecionado tal disciplina, haviam estudado a mesma e tinham idéia de como ela deveria ser ensinada.

Através da síntese das principais posições filosóficas no tocante à produção do conhecimento científico, obteve-se como pontos principais resultantes da pesquisa: as posturas sintonizadas com o realismo e indutivismo ingênuo; e como contraste àquelas outras mais próximas de um realismo crítico.

A posição do realismo ingênuo é bem ousada, pois sustenta que não apenas a realidade existe independente de nossa cognição, mas que, igualmente, 'as afirmações da ciência são descrições fiéis da realidade como ela é', ou seja, têm status de 'verdades inquestionáveis'. Tais posturas, segundo os autores, são muito semelhantes a declarações contidas nos livros-texto de Física que parecem inspirar e alimentar essas convicções ingênuas.

Ainda, denotaram que os entrevistados utilizam a palavra 'comprovação' se referindo à verificação experimental como um critério de demarcação entre ciência e não ciência. "*Os experimentos parecem continuar a exercer nos corações e nas mentes daqueles professores, um certo papel de revelador da verdade*". (Medeiros e Bezerra Filho, 2000, p. 115)

Salientam que as alternativas falsificacionistas clássicas como as de Popper, de ser a meta do cientista substituir a busca da comprovação experimental por uma tentativa de simples corroboração através do falseamento das teorias, não foram contempladas entre os sujeitos da pesquisa. Da mesma forma, teses lakatosianas, dotadas de um falsificacionismo estruturalista, não apareceram nos discursos dos entrevistados. Não foram igualmente registradas posturas próximas de um anarquismo

epistemológico, nem ao menos, grandes destaques para a interconexão da filosofia da ciência com fatores sociológicos mais gerais.

Posicionamentos mais identificados com um realismo crítico também foram denotados em alguns indivíduos, os quais destacaram que as observações são carregadas de teorias, que as situações experimentais se aproximam de um modelo e que a ciência compara-se a uma construção metafórica.

Segundo os autores, poucas questões parecem mais importantes que uma boa compreensão, principalmente por parte do professor, da relação complexa e sutil que existe entre teoria e experimento na produção das idéias da ciência: *“tentar enfocar a produção científica fora dos padrões tradicionais do indutivismo ingênuo é um desafio para o qual nem todos aqueles filosoficamente aptos podem estar psicologicamente preparados e socialmente motivados”* (Medeiros e Bezerra Filho, 2000, p. 109).

Köhnlein e Peduzzi (2002) em um trabalho de investigação “Sobre a concepção empirista-indutivista no ensino de ciências” propuseram a um grupo de estudantes da 3ª série do nível médio a construção de uma pequena história em quadrinhos na qual os alunos deveriam demonstrar de que forma eles concebiam o trabalho de um cientista.

Foram desenvolvidas três pequenas histórias pelos grupos após três aulas de discussões entre os participantes de cada equipe. As representações elaboradas demonstram que os estudantes centram o trabalho do cientista no laboratório; desenvolvendo experiências e realizando observações. Além disso, características como atenção ao observar a natureza, falta de cuidado com a aparência e pouca interação com outras pessoas foram transmitidas pelos desenhos.

Os autores perceberam ainda, que a maior parte das representações foram inspiradas em programas transmitidos por meios de comunicação. Explicitaram uma certa preocupação com esses resultados, em virtude de que, se o livro didático e o professor se associarem acriticamente à visão de ciência transmitida por esses canais *“o resultado será uma visão muito parcial do trabalho científico, para dizer o mínimo”* (Köhnlein e Peduzzi, 2002, p.11).

Teixeira, El-Hani e Freire Jr. (2001) realizaram uma pesquisa a respeito de concepções de estudantes de Física sobre a natureza da ciência e sua transformação por uma abordagem contextual do ensino de Ciências.

Com o intuito de averiguar a hipótese de que o ensino de Física torna-se mais eficaz quando realizada uma abordagem contextualizada histórica e filosoficamente, foi feita uma pesquisa de natureza quali-quantitativa, com uma turma inicial do curso de Física da Universidade Estadual de Feira de Santana. Esta investigação se deu através da análise das concepções prévias dos alunos sobre a natureza da ciência e as mudanças em tais concepções produzidas por uma disciplina do curso, que fez uso de uma abordagem contextual para o ensino da mecânica clássica.

A metodologia utilizada constou da aplicação, no começo e no final da disciplina, de um mesmo questionário composto por dez perguntas abertas.

Através da análise das respostas, evolução nas categorias encontradas e, considerando a influência da disciplina, mudanças nas concepções dos estudantes foram reveladas com o amadurecimento das respostas dadas pelos alunos. Entretanto, foi possível perceber que algumas dessas idéias estão fortemente enraizadas na visão epistemológica dos estudantes que, de acordo com os autores, mesmo com uma abordagem contextual, são difíceis de serem rompidas completamente, pois são amplamente difundidas por cientistas e divulgadores da ciência. Este aspecto observado se refere essencialmente à visão empirista-indutivista.

É interessante destacar que essa concepção apresentou-se mais acentuada nas seguintes questões:

1) O que é um experimento? As respostas obtidas nessa questão antes das aulas foram compostas basicamente por uma visão ingênua, própria do indutivismo que entende o experimento como uma forma de validação do conhecimento, acentuando o princípio verificacionista. Outro aspecto que apareceu, segundo os autores, é a concepção de que o experimento serve como teste que pode manter ou derrubar teorias. Os autores consideram que após as aulas houve uma evolução em função de terem surgido novas categorias. No entanto, prevaleceu a visão ingênua típica do indutivismo.

2) O desenvolvimento do conhecimento científico requer experimentos? Na resposta da maioria dos estudantes (75%) consta que o experimento é necessário para o desenvolvimento científico, por tratar-se de um critério de validação deste conhecimento. Após a abordagem em aula este percentual se manteve constante. Os autores afirmam que em todas as categorias a idéia de conhecimento científico construído a partir de experimentos se mantém dominante.

3) Qual o grau de certeza que os cientistas têm a respeito da estrutura do átomo? Que evidência específica, ou tipos de evidência, você pensa que os cientistas utilizaram para determinar com que um átomo se parece? Nas respostas dos alunos, várias categorias foram encontradas, mas os autores acreditam que elas podem ser reduzidas em duas idéias básicas: a primeira cujo núcleo central reconhece o modelo como fiel espelho da realidade em função de sua base empírica, somando 53% das opiniões. A outra, é a apresentação do modelo do sistema solar como evidência para o modelo atômico de Bohr⁴ que, segundo os autores, se trata de uma visão inadequada que é disseminada amplamente em salas de aula e até em alguns textos dos níveis fundamental e médio.

Através da pesquisa os autores inferem que a visão indutivista da confiabilidade na ciência em função dos dados observacionais permanece consideravelmente superior à visão cautelosa que reconhece as limitações dos modelos.

“Esta visão é tão fortemente enraizada em estudantes de Física de um modo geral que, mesmo diminuindo em algumas questões, volta aparecer em outras... mesmo uma disciplina com a natureza da que foi ministrada apresenta dificuldades para romper com a visão indutivista ingênua que parece ser usualmente encontrada entre os estudantes de Física”.
(Teixeira, El-Hani, Freire Jr.,2001, p. 120)

Bahia (2001) analisou a concepção empirista em alguns livros didáticos de Física do Ensino Médio. Dos quatro livros selecionados, dois deles apresentaram explicitamente o empirismo como visão de ciência, em virtude do caráter que reservaram para a observação, experimentação e ao método experimental. No terceiro livro, o autor deixou transparecer a concepção empírica quando fez referências ao

⁴ Parece que os resultados a que os autores se referem identificam-se com o modelo atômico de Rutherford, ao invés de Bohr.

método de trabalho de Galileu. Apenas um dos livros analisados mostrou uma visão da Física um pouco mais coerente com os estudos históricos e filosóficos.

2.3 - A VISÃO RÍGIDA, ALGORÍTMICA, EXATA, INFALÍVEL: CARACTERIZANDO O MÉTODO CIENTÍFICO

A aprendizagem do método científico é amplamente disseminada por professores e livros de todos os níveis. Este método enfatiza que a construção do conhecimento científico se concretiza com a realização de várias etapas de trabalho, como: observar, medir, controlar variáveis e tirar conclusões sobre o fenômeno a partir dos dados obtidos e das relações estabelecidas. Assim, é difundida a idéia de que se o método for seguido, adequadamente, é possível construir conhecimento e descobrir regularidades, leis. No entanto, na maioria das vezes não é salientado que o método científico não é uma seqüência linear de passos e, não consiste em uma maneira segura de se chegar a resultados ou descobertas.

Neste sentido, a concepção baconiana serve como exemplo, pois segue determinadas regras que são consideradas como normas de procedimentos que guiam para o verdadeiro conhecimento científico; a observação de um grande número de fatos e experimentos, a elaboração das hipóteses e a comprovação experimental ensejam a formulação de leis e teorias.

Materiais didáticos divulgam a concepção de que o método científico é um procedimento definido, testado e confiável para se chegar ao conhecimento científico. Esse método começa na observação, é um procedimento lógico, algorítmico e rígido que através da indução leva à produção do conhecimento, que por sua vez, é algo cumulativo, linear e definitivo. Sendo que todo trabalho desenvolvido pelo cientista deve seguir cuidadosamente o método.

Essa é uma visão didaticamente incorreta da produção do conhecimento científico. O método científico não começa na observação, pois observar implica dirigir a atenção a determinados fatos, os quais são previamente definidos. Além disso, toda observação está impregnada de teorias, de expectativas, de algo definido a priori. Não é um procedimento lógico, algorítmico ou rígido, ou seja, não é uma seqüência linear de passos que, necessariamente, conduz a um resultado. A produção do conhecimento

científico não é cumulativa e linear e não se infere a partir da indução, isto é, a partir de um conjunto de fatos não se chega a leis universais. Além disso, o conhecimento científico não é definitivo, pois faz parte de um processo evolutivo: é uma construção.

A atividade científica deve ser considerada uma atividade essencialmente humana, como as demais. É importante lembrar que é necessário criatividade, persistência e conhecimento, que muitas vezes surgem dúvidas e que as teorias passam por reformulações e adaptações, sendo que o produto final é fruto de muito esforço e dedicação de pessoas ‘normais’.

Neste sentido, os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio salientam que o Ensino de Ciências deve proporcionar uma visão atual sobre a natureza da ciência. Além de contribuir para criar no aluno competências e habilidades deve *“permitir ao educando compreender as ciências como construções humanas, entendendo como elas se desenvolveram por acumulação, continuidade ou ruptura de paradigmas, relacionando o desenvolvimento científico com a transformação da sociedade”* (p. 107).

Zanetic (1989) salienta que a maioria dos livros didáticos, quando mencionam explicitamente ‘O Método Científico’, passam a imagem de uma metodologia estabelecida segundo regras rígidas de procedimento; esclarece que isso também ocorre nas atividades práticas de laboratório, nas quais a seqüência do método tem um ‘papel predominante’. Em relação a isto, elabora o seguinte questionamento: *“Será que não é essa mesma descrição metodológica que está escondida na prática cotidiana da maioria dos trabalhos científicos e mesmo nos artigos publicados?”* (p.64).

Freire-Maia (1991) destaca o papel do ‘acaso’ nas descobertas científicas, no entanto, esclarece que o ‘acaso’ só ajuda as mentes preparadas para captá-lo e que determinados procedimentos podem facilitar a eclosão de uma idéia ‘casual’ na mente de um cientista. Expõe, com base em Beveridge (1981), três classes de ‘acaso’ presentes no processo de investigação científica:

1. **Justaposição casual de idéias:** é uma idéia que surge na mente do pesquisador, capaz de solucionar o problema. O cientista tem uma iluminação, um lampejo de elucidação, uma intuição, em um processo inteiramente mental.

2. **Intuição do tipo eureka:** o cientista observa o fato e, de repente, descobre uma analogia ou percebe uma explicação. A ‘iluminação’ resulta da interação entre a mente e o fato verificado.
3. **Serendipidade:** o cientista constata um fato raro, a coincidência rara de fatos relativamente comuns ou um resultado inesperado para uma experiência. Em suma, o cientista encontra algo que não estava em suas previsões e, assim, descobre coisa nova. O processo é essencialmente exterior ao pesquisador.

Zanetic (1989) explicita a visão de Rui Barbosa sobre ciência. Este, afirma que ciência é toda a observação, exatidão ou verificação experimental; é discernir relações, comparar analogias e diferenças. Menciona que os métodos e programas educativos ao invés de focar tais aspectos enfatizam o contrário.

“Em vez de educar no estudante os sentidos, de incentivá-lo a pensar, a escola e o liceu entre nós ocupam-se exclusivamente em criar e desenvolver nele os hábitos mecânicos de decorar e repetir. A ciência e o sopro científico não passam por nós” (Rui Barbosa citado em Zanetic, 1989, p. 181).

Popper (1982) defende que as teorias científicas são invenções, construções humanas que *“podem ser vistas como livres criações da nossa mente, o resultado de uma criação quase poética, da tentativa de compreender intuitivamente as leis da natureza”* (p.218). Considera ainda que não existem ‘fontes últimas’ do conhecimento e que todas as fontes devem estar abertas a sugestões e a exame crítico, *“exceto no campo da história, examinamos ordinariamente os próprios fatos em vez de examinar as fontes da nossa informação”* (p.55).

Quando Popper discute a questão de como distinguir as teorias científicas das especulações pseudocientíficas ou metacientíficas, denota que a solução geralmente aceita está relacionada com o método, pois a ciência se caracteriza por sua base na observação e pelo método indutivo, enquanto que a pseudociência e a metafísica se distinguem pelo método especulativo.

Ao se referir ao problema da demarcação⁵, assinala que o critério da refutabilidade⁶ é a solução para este problema. Justifica que para que as ‘assertativas’ sejam classificadas como científicas elas devem ser capazes de entrar em conflito com as observações. Assevera que “*o método da ciência é a crítica, isto é, as tentativas de refutação*” (Popper, 1982, p.82).

Com relação às fontes de conhecimento, Popper admite que a experimentação pode contribuir para a aquisição de conhecimento, no entanto, ressalta que ela não se constitui na fonte última. Destaca ainda, que um erro fundamental da teoria filosófica está na não distinção da origem da validade do conhecimento. Assevera que

“não testamos a validade de uma assertativa ou de uma informação procurando identificar sua fonte ou sua origem e sim, de forma muito mais direta, examinando criticamente o que foi afirmado – o conteúdo da própria assertativa... fontes ideais não existem – da mesma forma como não existem governantes ideais -, todas as nossas fontes podem, em certas ocasiões, induzir-nos em erro.” (Popper, 1982, p.53)

Ao abordar a questão da origem das fontes do nosso conhecimento, Popper esclarece que não existem fontes puras e nem absolutamente seguras. Todas as fontes estão sujeitas a questionamentos e a modificações. Chama a atenção para o fato de que não é adequado confundir a origem e pureza do conhecimento com sua validade ou veracidade. Menciona Xenófanes que sabia que “*o conhecimento não passa de opinião, ou conjectura, doxa e não episteme*”. Afirma que esse aspecto de Xenófanes pode ser observado em seus versos:

*“Os deuses não nos revelam desde o princípio
Todas as coisas; mas, com o tempo,
Se buscarmos poderemos aprender, conhecê-las melhor.
A verdade certa, contudo, ninguém jamais a conheceu
Nem a conhecerá: a dos deuses
Ou a de todas as outras coisas.
Mesmo se por acaso alguém pronunciasse o nome
Da verdade última, não poderia reconhecê-la
Nessa rede tecida de opiniões”.* (Xenófanes, citado em Popper, 1982, p.54)

⁵ O critério da demarcação de Popper é composto pela testabilidade, refutabilidade e falsificabilidade das teorias científicas.

⁶ É uma propriedade estritamente lógica das teorias científicas, as quais são, em princípio, falsificáveis.

Popper expõe que ao ser questionado sobre quais fontes de conhecimento utiliza em uma certa afirmativa científica responderá: “*não sei, minha afirmativa é simplesmente uma opinião*” (p.55), esclarece que a fonte não importa em virtude de serem muitas e, algumas, até desconhecidas.

Um outro aspecto salientado por Popper é com relação à verdade. Neste sentido, afirma que não existem critérios de verdade a nossa disposição, mas ressalta que com um pouco de sorte é possível reconhecer o erro e a falsidade:

*“A clareza e a distinção não constituem critérios de verdade, mas a obscuridade e a confusão **podem** indicar o erro. Da mesma forma, a coerência não pode por si mesma estabelecer a verdade, mas a incoerência e a inconsistência revelam a falsidade”.*(Popper, 1982, p.56)

As idéias de Popper sobre a verdade das teorias, as fontes de conhecimento e a construção do conhecimento podem ser aplicadas à discussão sobre o método científico, pois apresentam argumentos firmes e esclarecedores. Além disso, seu critério implica uma provisoriedade de todo o conhecimento científico e possibilidade de mudança contínua.

Zanetic (1989) resume a proposta de desenvolvimento científico de Popper da seguinte forma:

1. Existência de um problema a ser resolvido;
2. Procura de soluções para o problema; elaboração de várias teorias tentativas e escolha de uma delas seguindo a maior probabilidade de refutação;
3. Dedução de conseqüências dessa teoria;
4. Teste da teoria, isto é, tentativa de refutá-la através do uso de contra-exemplos significativos. Se houver refutação, têm-se um novo problema, ou seja, propor teorias tentativas;
5. Escolha entre teorias rivais
6. Nova teoria

Para completar este quadro, Zanetic menciona que Popper condiciona que se deve preservar ao máximo o conjunto de dados observacionais acumulados ao longo das investigações científicas.

Feyerabend (1977) afirma que a idéia de conduzir a ciência com o auxílio de um método com características bem definidas como, princípios firmes, imutáveis e incondicionalmente obrigatórios passa por dificuldades quando posta em confronto com os resultados da pesquisa histórica. Assim, verifica-se que “*não há uma só regra, embora plausível e bem fundada na epistemologia, que deixe de ser violada em algum momento*” (p.29). O autor esclarece que alguns acontecimentos, como a teoria copernicana, o surgimento do moderno atomismo e o aparecimento gradual da teoria ondulatória só ocorreram porque alguns pensadores não se deixaram guiar por, ou violaram, regras metodológicas. Salienta ainda que “*dada uma regra qualquer, por ‘fundamental’ e ‘necessária’ que se afigure para a ciência, sempre haverá circunstâncias em que se torna conveniente não apenas ignorá-la como adotar a regra oposta*” (Feyerabend, 1977, p.30).

Conclui, afirmando que a idéia de um método estático faz parte de uma concepção ingênua do homem e de sua circunstância social.

“A idéia de que a ciência pode e deve ser elaborada com obediência a regras fixas e universais é, a um tempo, quimérica e perniciosa. É quimérica pois implica visão demasiado simplista das capacidades do homem e das circunstâncias que lhe estimulam ou provocam o desenvolvimento. E é perniciosa porque a tentativa de emprestar vigência às regras conduz a acentuar nossas qualificações profissionais em detrimento de nossa humanidade”. (Feyerabend, 1977, p. 449)

Peduzzi (2000) exemplifica a presença **do** método com a explanação da abordagem dada por um livro de Ciências Biológicas. O livro enfatiza que o pesquisador trabalha com uma série de procedimentos de forma hierárquica e sequencial, através do uso **do** método científico, que direciona e ordena o seu trabalho,

“o método científico cumpre o seguinte roteiro:

Observação do fato: Um fato é qualquer acontecimento ou fenômeno observável ou ocorrido. A análise deste fato provoca algumas perguntas: como e por que ocorre? Quais suas causas e conseqüências?

Tais aspectos constituem o problema.

Levantamento de hipóteses: o cientista começa a levantar idéias que talvez possam explicar os fatos. As hipóteses têm também a função de prever possíveis resultados para o mesmo problema sob outras condições ainda não observadas.

Experimentação: é o meio pelo qual o cientista testa suas hipóteses...

Análise dos resultados e conclusões: os resultados deverão ser analisados para a confirmação ou não da hipótese. Em caso de não confirmação, a hipótese deverá ser reformulada ou até mesmo rejeitada.

*Não havendo argumentos que contradigam a hipótese, ela passará a ser considerada uma **teoria**. Caso os princípios estabelecidos por esta teoria venham a ser observados com uniformidade, sem variações em condições idênticas, tal formulação será reconhecida como uma lei*". (Marczewski e Vélez, 1999 citado em Peduzzi, 2000, p.3)

Moreira e Ostermann (1993), em um trabalho sobre o ensino **do** método científico, analisaram livros didáticos que veiculam uma visão bastante rígida sobre este método. Apresentam características atribuídas, **ao** método científico, por dois livros de Ciências do Ensino Fundamental e, por três livros de Física do Ensino Médio. Como exemplo, relativo ao nível médio, citam a obra "*Os alicerces da Física*" (Kazuito, Fuke e Shigekiyo, 1989), que no capítulo 1 faz o seguinte esclarecimento:

"os cientistas, cada qual com os métodos de pesquisa da época e do lugar, observam sistematicamente os fenômenos da natureza, tomam dados sobre grandezas físicas envolvidas e induzem as leis ou os princípios. Eles procuram estabelecer regras gerais para a explicação dos acontecimentos naturais." (Moreira e Ostermann, 1983, p. 112)

Outro exemplo é o do livro "*Os fundamentos de Física*" (Ramalho, Ferraro e Soares, 1989):

"A Física estuda determinados fenômenos que ocorrem no Universo. O método que utiliza para conhecer esses fenômenos é simplificadaamente o seguinte: observar repetidas vezes o fenômeno destacando fatos notáveis. Utilizando aparelhos de medida, desde o relógio para medir o tempo e a fita métrica para medir comprimentos, até instrumentos mais sofisticados, determina a medida das principais grandezas presentes no fenômeno. Com essas medidas procura alguma relação existente no fenômeno tentando descobrir alguma lei ou princípio que o rege... Em resumo, o método da apreensão do conhecimento da Física é o seguinte: a) observação dos fenômenos, b) medida de suas grandezas, c) indução ou conclusão de leis ou princípios que regem os fenômenos. Esse método de conhecimento é denominado 'método experimental'". (Moreira e Ostermann, 1983, p. 111)

A partir dessas análises, discutem algumas concepções errôneas sobre o método científico e sugerem uma visão esquemática do processo de produção do conhecimento científico, a qual se caracteriza por uma interação permanente entre pensar, sentir e fazer:

"O pensar se refere ao domínio conceitual da pesquisa, a sua fundamentação teórica, sendo guia da determinação dos acontecimentos a serem estudados e orientação para as observações a serem feitas. O

fazer corresponde ao domínio metodológico da investigação. O sentir é o aspecto mais negligenciado ao se falar na produção do conhecimento científico”.(Moreira e Ostermann, 1993, p. 116)

Campanario et al (2001), ao refletir sobre o papel ocupado pela ciência, de um modo geral, afirma que o conhecimento científico passou a ser um paradigma de conhecimento rigoroso, confiável e exato; que serve como modelo para outras disciplinas incorporarem o ‘adjetivo’ científico aos seus métodos e conclusões.

Com base em vários trabalhos de outros autores, salienta que os estudantes universitários mantêm crenças exageradas sobre a ciência e o conhecimento científico, ou mais pontualmente, concebem a ciência como superior a outras classes de conhecimento. Esclarece que esta superioridade deriva do suposto método que se utilizaria na obtenção do conhecimento científico e, às vezes, está associada à imagem de que a ciência é uma atividade misteriosa, fora da capacidade de compreensão humana normal e, portanto, fora do alcance de toda crítica séria. Alerta ainda para o fato de que o caráter provisional das teorias científicas nem sempre é exposto explicitamente aos alunos. Às vezes o conhecimento científico se apresenta como algo acabado e fora de qualquer dúvida. Explicita que através de análises de livros americanos de ciências foram denotadas afirmações que retratam a ciência como uma atividade que contém verdades fixas e inalteradas. Além disso, assevera que muitos professores de ciências também mantêm visões inadequadas sobre a natureza da ciência e provavelmente a transmitem a seus alunos.

Freire-Maia (1991) apresenta em seu livro alguns conceitos de Claude Bernard sobre o trabalho científico. Em relação ao método científico Bernard salienta que “*A idéia é a semente; o método é o solo que lhe fornece as condições de se desenvolver, de prosperar, e de dar os melhores frutos segundo a sua natureza. (...) O método por si mesmo não produz coisa alguma (...)*” (Freire-Maia, 1991, p.147).

Além disso, Bernard afirma que o cientista deve sempre conservar liberdade total sobre as dúvidas metodológicas, no entanto, destaca que ele precisa crer na ciência, no determinismo, no relacionamento absoluto e necessário das coisas, nos fenômenos próprios dos seres vivos e também nos outros fenômenos, mas é preciso que esteja, ao mesmo tempo, convencido de que as teorias que se possui estão longe de representar verdades imutáveis.

Outro aspecto mencionado por Bernard é que tanto o metafísico e o escolástico como o cientista, tomam como ponto de partida uma idéia a priori, contudo, o cientista propõe sua idéia como uma pergunta ou uma interpretação antecipada da natureza, submetendo-a ao teste da experiência, não pretendendo, desta forma, obter a verdade absoluta. Por outro lado, afirma que o método experimental tem por objetivo transformar a concepção *a priori*, fundada sobre uma intuição ou um sentimento vago das coisas, em interpretação *a posteriori* que é estabelecida sobre o estudo experimental dos fenômenos.

2.4 – A VISÃO AHISTÓRICA E APROBLEMÁTICA

Só se pode entender a essência das coisas quando
se conhece sua origem e desenvolvimento⁷

A concepção de ciência ahistórica e aproblemática é também considerada como dogmática e fechada, ou seja, é algo que não admite discussão. Nela se transmitem os conhecimentos já elaborados; sem mostrar o processo em que se desenvolveram, sem considerar os problemas que lhe deram origem ou as dificuldades encontradas em sua evolução. Assim, perde-se de vista que “*todo conhecimento é resposta a uma pergunta*” como afirma Bachelard (1986).

Na maioria das vezes essa concepção é reforçada ‘por omissão’ no ensino da ciência (Gil Pérez et.al. 2001). Essa omissão se deve ao fato de que grande parte dos materiais didáticos não aborda a história do desenvolvimento dos conteúdos ou, quando o fazem, não transmitem uma visão adequada para o aluno. Incorrem implicitamente em uma visão de ciência aproblemática, empirista, indutivista, rígida, imutável e infalível.

Em contraposição, alguns aspectos do conhecimento histórico vêm para romper com a idéia de que o conhecimento científico é algo pronto e imutável e explicar como os fatos foram se desenvolvendo. A história da ciência pode mostrar alguns momentos de transformação profunda da ciência e indicar quais foram as relações sociais, econômicas e políticas que estavam presentes no momento em que ocorreram tais

⁷ Heráclito citado em Zanetic, 1989.

mudanças; as resistências enfrentadas e os setores que tentaram impedir essas transformações.

Esta análise histórica pode dar ferramentas conceituais para que o aluno compreenda a situação atual da ciência, sua ideologia dominante e os setores que controlam e se beneficiam da atividade científica.

Assim, o enfoque dado à história não deve ser para o aluno um conteúdo a mais ou uma mera narração de acontecimentos, mas converter-se em um poderoso estímulo para a reflexão.

Em relação aos professores, a história e a filosofia também oferecem muitas contribuições: um pouco de história da ciência pode preparar, por exemplo, os professores para compreenderem um resultado inesperado em um experimento simples a ser demonstrado em sala de aula e, um pouco de filosofia da ciência pode auxiliar os professores a interpretar esses resultados para os alunos.

2.4.1 - História e Filosofia da ciência: discussões e tendências atuais

Quando se inicia uma discussão sobre a pertinência ou não da história no ensino de ciências depara-se com vários questionamentos: ela é necessária para a ruptura do conhecimento habitual e na construção do conhecimento científico? Ela realmente representa como os fatos se desenvolveram? ‘História da Física ou histórias da Física’? Como saber qual a abordagem ideal? E os arremedos de história apresentados pela maioria dos livros? São significativos? Devem ser excluídos? As influências externas ao historiador (formação profissional, posição política), como fazer para identificá-las e optar por repassá-las ou não aos alunos? Que tipo de história deve ser apresentada aos alunos? Neutra, factual, uma ‘reconstrução racional’? A história da ciência deve ou não ser ensinada com os conceitos científicos? E a filosofia, que não pode ser separada da história? Essas são apenas algumas das questões que podem surgir com relação à utilização didática da história da ciência.

Snyders (1988) acredita que a utilização da história da ciência auxilia na construção do conhecimento científico em virtude de ‘as concepções novas’ terem sido

arrancadas de representações habituais, que se enraizaram por muitos séculos. Segundo Zanetic (1989), “*Snyders inseriria a história das ciências como elemento vital na passagem, na explicitação pedagógica da ruptura entre cultura primeira e cultura elaborada*” (p.105).⁸

No entanto, a forma como em geral é apresentada a história da ciência em textos didáticos, tanto de cursos superiores como do Ensino Médio, é por demais simplificada. Apresentam-se seqüências cronológicas de datas de invenções, nascimento e morte de cientistas famosos, de grandes descobertas e, normalmente, ilustrações que representam os personagens e seus feitos. Zanetic classifica este tipo de informação como ‘arremedos de história’.

Quando se trata da forma como o conteúdo do fato histórico é abordado, cabe lembrar que este passa por muitas influências. O historiador, como uma pessoa normal, tem sua concepção de mundo, sua ideologia, formação profissional ou posição política que poderão estar evidenciados em sua obra. Quando se pensa que simplesmente os dados organizados adequadamente forneceriam a verdade do fenômeno histórico, incorre-se na visão empirista da formação do conhecimento.

Neste sentido, destaca-se o filósofo Imre Lakatos que defende a utilização de uma história que procura estabelecer uma ‘reconstrução racional’ do passado, isto é, que apresente somente a seqüência de idéias, fenômenos e teorias que tiveram alguma contribuição na formação das teorias atualmente aceitas pela comunidade científica.

Lakatos sugere que seja desconsiderado tudo o que pode parecer ‘irracional’ à luz de sua concepção de ciência. Ou seja, que a história da ciência seja reescrita como se os cientistas tivessem trabalhado somente com base na racionalidade.

Thomas Kuhn discorda dessa posição de Lakatos. Argumenta que não se pode avaliar o sucesso de uma posição filosófica quando se faz seleção e interpretação de resultados científicos com base nessa mesma posição filosófica.

Em sua obra *A estrutura das revoluções científicas* Kuhn (1996) afirma que os cientistas do passado deveriam ser apresentados em sala de aula como se desfrutassem dos mesmos problemas que os cientistas modernos. Essa visão poderia ser propiciada

⁸ Entende-se, com base em Snyders, que a cultura primeira é aquela constituída a partir do senso comum

pela distorção da história da ciência. Isso faria com que o cientista em formação se sentisse como parte integrante de uma tradição bem sucedida na busca da verdade.

Por outro lado, Kuhn admite que a exposição à história da ciência enfraquece as convicções científicas necessárias para as conclusões bem sucedidas da aprendizagem da ciência.

Assim como Kuhn, Brush sugere que a história da ciência pode ter uma influência negativa sobre os estudantes, pois ela exime as certezas do dogma científico, as quais são úteis para a motivação do iniciante. Para ele, apenas um público maduro deveria ter acesso à história (Matthews, 1995).

Lombardi (1997) utiliza-se de Martin Klein para destacar as críticas feitas à introdução da história das ciências no Ensino de Ciências. Klein sustenta que apresentar os conteúdos científicos com uma perspectiva histórica implica “*selecionar, organizar e apresentar estes materiais históricos não historicamente, talvez até anti-historicamente*”⁹ Destaca que existe uma diferença essencial entre a perspectiva do Físico e a do Historiador, por isso, torna-se difícil imaginar uma combinação entre a rica complexidade de fatos que o historiador almeja com a versão simples e precisa que o físico busca. Após essas considerações, Klein conclui que a introdução da história no ensino de Ciências só poderá ocorrer se for feito o uso de uma história simplificada e recortada. Admite, então, que é melhor evitar o uso da história do que utilizar uma história de má qualidade.

Neste sentido, Lombardi (1997) complementa que

“Todo relato histórico orientado ao ensino deve necessariamente selecionar alguns fatos considerados relevantes à luz do sentido que se deseja contemplar em tal relato. Se se pretender que os alunos abordem a história com a profundidade e o detalhe do historiador, seguramente será impossível avançar mais além do primeiro conteúdo apresentado na classe. Em outras palavras, se a exaustividade da consideração dos fatos do passado fosse realmente um requisito indispensável para se obter uma ‘boa história’, estaríamos sempre ensinando uma ‘má história’”. (Lombardi, 1997, p.344)

Segundo Matthews (1995) Whitaker analisou, em um ensaio intitulado “História e quasi-história no ensino de Física”, que ficção histórica prevalecia em livros

e, a cultura elaborada é a associada aos conhecimentos sistematizados, científicos ou apoiados em teorias.

- textos a fim de identificar a visão de ciência dos autores. Observou que uma história de má qualidade era bastante freqüente nos textos e passou a caracterizar a quasi-história como o “*resultado de muitos e muitos livros cujos autores sentiram a necessidade de dar vida aos registros desses episódios usando um pouco de história, mas que, de fato, acabavam re-escrevendo a história de tal forma que ela segue lado a lado com a Física*” (Whitaker, 1979, citado em Matthews, 1995, p.173).

Matthews explica que a quasi-história é um assunto muito complexo, que abrange muitas coisas:

“Não é apenas o que Klein chama de pseudo-história, ou história simplificada, onde erros podem acontecer devido a omissões, ou onde a história pode ficar aquém do alto padrão de ‘verdade, toda a verdade, nada mais do que a verdade’. Na quasi-história tem-se uma falsificação da história com um aspecto de história genuína, semelhante ao que Lakatos chamava de ‘reconstruções racionais’ da história (1978), onde a história é escrita para sustentar uma determinada versão de metodologia científica e onde as figuras históricas são retratadas à luz da metodologia ortodoxa atual”. (Matthews, 1995, p.174)

Complementa destacando que a objetividade em história é de certo modo, impossível.

“A história não se apresenta simplesmente aos olhos do espectador; ela tem que ser fabricada. Fontes e materiais têm que ser selecionados; perguntas devem ser construídas; decisões sobre a relevância das contribuições de fatores internos e externos para a mudança científica devem ser tomadas. Todas essas questões, por sua vez, sofrem influência das visões sociais, nacionais, psicológicas e religiosas do historiador. Num grau ainda maior, sofrem influência da teoria da ciência, ou da filosofia da ciência, em que o historiador acredita”. (Matthews, 1995, p.174)

Matthews ressalta, ainda, que as críticas de Klein e Kuhn são relevantes, mas seus pontos principais podem ser resolvidos sem que seja necessário excluir a história dos cursos de ciências. E, o fato de a história ser simplificada não se torna um argumento decisivo contra ela em virtude de se ter em conta a faixa etária dos alunos e todo o currículo a ser desenvolvido.

Com relação ao problema hermenêutico de interpretação, diz que este pode tornar-se um bom motivo para que os alunos sejam apresentados a questões de como lemos e interpretamos os fatos. Sugere, para exemplificar, que se parta de fatos do dia a

⁹ Klein, 1972 citado em Lombardi, 1997, p. 344.

dia onde as pessoas vêem coisas iguais de formas diferentes. A partir disso, conclui que a *“história da ciência constitui-se num veículo natural para se demonstrar como esta subjetividade afeta a própria ciência”* (Matthews, 1995, p. 177).

Bastos, citado em Zanetic (1989), diz que os enfoques da história têm como objetivo contribuir para que o aluno construa concepções mais elaboradas e realistas acerca da ciência e dos cientistas, concepções essas que podem subsidiar o exercício de uma cidadania consciente e atuante.

Peduzzi (2001) explicita algumas das razões para que se utilize a história da Ciência no ensino de Física. De acordo com o autor a história pode:

- Contribuir para o desenvolvimento do pensamento crítico dos estudantes;
- Incrementar a cultural geral do aluno na compreensão de certos episódios fundamentais que ocorreram na história do pensamento científico;
- Dar uma formação crítica para a compreensão da construção do conhecimento e não apenas os sucessos alcançados;
- Mostrar como o pensamento científico se modifica com o tempo, evidenciando que as teorias científicas não são definitivas e irrevogáveis, mas objeto de constante revisão;
- Contribuir para um melhor entendimento das relações da ciência com a tecnologia e a sociedade;
- Desmistificar o método científico, dando ao aluno subsídios necessários para que ele tenha um melhor entendimento do trabalho do cientista;
- Propiciar novas maneiras de ensinar determinados conteúdos;
- Levar o aluno a se interessar mais pelo ensino de Física, despertando a curiosidade e a motivação;
- Dar subsídios para o entendimento da presença das concepções alternativas;
- Auxiliar na formação de professores através do desenvolvimento de uma epistemologia da ciência mais rica e mais autêntica;
- Tornar as aulas de Física mais desafiadoras e reflexivas;
- Humanizar as ciências e aproximá-las dos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos;
- Melhorar o relacionamento professor – aluno;

- Proporcionar o desenvolvimento de relações cognitivas e afetivas;

Martins (1988) afirma que o cientista tem que saber como a ciência é construída e não apenas seu resultado final. Esclarece que o conhecimento histórico auxilia o professor de Física a ensinar melhor o conteúdo que está no livro texto.

Após várias discussões Zanetic (1989) apresenta motivos que o levam a defender a utilização da história da Física no ensino de Física e destaca que

“de tudo o que foi argumentado fica clara a necessidade de se alterar a educação universitária pela inclusão de elementos de história da física e filosofia da ciência de maneira sistemática e não, como acontece nos cursos brasileiros, como um apêndice superficial incluído em geral no último ano de curso” (p. 122).

Peduzzi (2001) relata uma experiência de utilização didática da história da ciência realizada com alunos da disciplina de Física Geral I, do curso de bacharelado em Física da Universidade Federal de Santa Catarina. O texto principal utilizado no estudo propiciou uma reflexão concreta do desenvolvimento do conhecimento, possibilitou o contraste de opiniões e o aprofundamento de questões específicas sobre o tema força e movimento.

Após o estudo os alunos foram solicitados a fazer uma análise crítica sobre a presença da história na disciplina. Dos 48 alunos que responderam o questionário, nenhum deles se pronunciou totalmente contrário à presença da história da ciência/mecânica na disciplina de Física Geral I. No entanto, quatro alunos tiveram algum tipo de manifestação contrária ao uso (cansativa (1), não gosto (1) reduz o tempo de exploração de conteúdos mais importantes (2)).

A compreensão do conteúdo, o grau de maturidade e redação das respostas dadas pelos alunos surpreenderam o autor. Além disso, permitiram concluir que em virtude desses alunos recém terem ingressado na universidade, eles dispunham das mesmas deficiências dos estudantes do nível médio, que por sua vez, poderiam apresentar resultados semelhantes na realização da atividade.

“A (Im) Pertinência da História ao Aprendizado de Física (um estudo de caso)” foi o título dado por Dias (2001) a um de seus trabalhos. Nele, a autora utiliza-se da história para desenvolver uma análise conceitual da teoria do calor. Com este tipo de

abordagem acredita que as leis tornam-se menos ‘mágicas’: “a história coloca em evidência a ‘operação mental’ que leva do ‘Laboratório da Natureza’ à lei geral” (p. 232).

De acordo com a perspectiva de Dias (2001) a história é onde a análise conceitual pode ser desenvolvida. Ela permite, através da revisão e crítica, recuperar os conceitos e entendê-los à luz de novas teorias. Assim torna-se “o instrumento da formação intelectual e da assimilação de conceitos” ou ainda, “a História é o instrumento da formação de uma mente disciplinadamente indisciplinada na crítica dos conceitos científicos” (p.226).

Além disso, a autora argumenta que a história mostra o porquê de os conceitos terem sido criados, as questões, a função e os significados deles nas teorias.

“A História revive os elementos do pensar de uma época, revelando, pois, os ingredientes com que o pensamento poderia ter contado na época em que determinada conquista foi feita. Ela desvenda a lógica da construção conceitual; nesse esforço, ela revela, também, os ‘buracos lógicos’ que o conceito preenche, revivendo o próprio ato intelectual da criação científica”. (Dias, 2001, p. 227)

Magalhães et al. (2002) trabalhou com o pressuposto de que a história da Física se insere na abordagem de Ausubel, que tem por conceito básico de sua teoria a ‘aprendizagem significativa’.

A aprendizagem significativa ocorre quando “uma nova informação se relaciona com um aspecto relevante da estrutura do conhecimento do indivíduo... Ausubel recomenda que sejam utilizados organizadores prévios¹⁰ que sirvam de âncora para a nova aprendizagem” (Moreira e Masini, 1982, citados em Magalhães et al., 2002).

Neste sentido, Magalhães et al. afirmam que a história da Física é um legítimo organizador prévio, pois revela significados e se ajusta à tarefa de superar o limite entre o que o aluno já sabe e o que ele deve aprender. “Ao clarificar conceitos a história da física contribui para a clarificação da ‘significatividade lógica’ de conceitos. É essa a qualidade que a torna um organizador prévio em potencial” (Magalhães et al. p. 491).

¹⁰ Organizadores prévios são materiais introdutórios apresentados antes do próprio material a ser aprendido. A principal função do organizador prévio é a de servir de ponte entre o que o aprendiz já sabe e o que ele deve saber (Moreira e Masini, 1982)

Por outro lado, Sandoval e Cudmani (1993), com base em vários estudos, discutem a utilização da epistemologia e da história da Física na formação de professores de Física. De acordo com sua concepção, uma adequada formação em epistemologia e história da Física:

1. Favorece uma compreensão mais profunda da disciplina, pois não é possível entender o conteúdo do conhecimento físico sem entender a natureza desse conhecimento;
2. Ajuda a desencadear, através dos critérios específicos empregados nos diversos momentos e circunstâncias, algumas pautas metodológicas científicas amplas e globais de elaboração, experimentação, explicação;
3. Colabora com a compreensão que a criação científica não é redutível meramente a um problema lógico, mas sim, o resultado de um complexo processo histórico, e da interação com o meio social de cada época;
4. Permite adquirir um entendimento mais rico e profundo sobre a estrutura da Física e sobre seus conteúdos e ganhar clareza sobre os aspectos metodológicos, ontológicos, axiológicos, de sua prática e do conhecimento científico;
5. Facilita que o professor compreenda, aprofunde, organize e evolua o conhecimento físico, e o estimula a encarar o ensino com maior profundidade e responsabilidade.

Após essas considerações Sandoval e Cudmani citam benefícios - baseados em Bunge, 1980 e Matthews, 1992 - que um professor com formação em epistemologia e em história da Física pode obter em sua prática diária:

- a) Tomar consciência que sua formação em Física e sua atividade docente podem estar pautadas por uma filosofia incoerente e adotada irreflexivamente;
- b) Transmitir uma visão mais realista e humana da Física, e favorecer o aumento do interesse e compromisso dos estudantes com a disciplina;

- c) Não confundir o que se postula com o que se deduz; a convenção com o dado; a coisa com suas qualidades; o objeto com seu conhecimento; a verdade com seu critério, etc.;
- d) Promover uma melhor compreensão dos conceitos científicos nos estudantes e, por exemplo, ter claro os limites da validade e exatidão dos contextos sintáticos e substanciais que lhes outorgam significados;
- e) Prevenir o dogmatismo no conhecimento científico, incentivando a capacidade de análise crítica de seus alunos;
- f) Favorecer que os estudantes compreendam a complexa natureza da metodologia científica e da relação teoria-realidade;
- g) Deslocar a atenção do resultado ao problema, da receita à explicação, da lei empírica à teórica;
- h) Tornar patente para os alunos que o avanço da ciência não é semelhante a um desenvolvimento meramente aditivo e mostrá-lo como um processo em que cada solução planta novos problemas; velhas hipóteses podem cobrar novos interesses e hipóteses atualizadas podem ser questionadas na raiz; cada problema tem vários níveis de solução; nunca está dita a última palavra;
- i) Favorecer, em síntese, que na aula, no laboratório, os alunos construam o conhecimento científico com uma metodologia de acordo com a empregada pela comunidade científica.

Além disso, Sandoval e Cudmani destacam que as reflexões histórico – epistemológicas podem ajudar os docentes a entender as possíveis causas de alguns problemas enfrentados em sua prática: por exemplo, as concepções intuitivas em mecânica que estão fortemente enraizadas nos alunos.

Para explicitar a importância do aspecto histórico e epistemológico, os autores sugerem algumas questões que não ficam claras quando se aprende Física com estratégias tradicionais. Por exemplo:

- Limites de validade de leis e teorias (quando e por que, passar da ótica do modelo de raio ao modelo de onda monocromática, ou deste ao pacote de ondas?);
- Relações epistemológicas (e não meramente lógicas) entre teoria e modelos, e entre modelos e campos de aplicação (quais são os critérios com que se pode controlar a adequação de uma dada conceituação a uma situação real?)
- Estreita dependência entre o significado dos termos e os contextos em que eles se inserem (o conceito de massa é o mesmo na mecânica newtoniana e na mecânica relativista?)
- Natureza analítica ou sintética de uma dada proposição segundo o contexto em que se enquadra a solução do problema (na relação $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ uma definição de B?)
- Diferentes tipos de leis e suas características similares e distintas (a que lei se aplica quando se decide que são invariantes frente a uma mudança de sistema de referência?).

2.5 - A CONCEPÇÃO DE CONHECIMENTO ACUMULATIVO E LINEAR

A visão acumulativa e de crescimento linear do desenvolvimento científico ignora as crises e modificações profundas sofridas pelas teorias durante seu período de elaboração. Segundo Gil Pèrez et al (2001), é uma interpretação simplista da evolução dos conhecimentos científicos, que é acentuada no ensino por meio da apresentação do produto final do conhecimento, ou seja, sem demonstrar a maneira como eles foram elaborados, não mencionando os possíveis confrontos entre teorias rivais, as controvérsias científicas, nem tampouco os difíceis processos de mudança na ciência. Segundo os autores, esta visão é pouco citada entre os professores e a literatura; e, a visão rígida, algorítmica e exata pode reforçar uma interpretação acumulativa e linear do desenvolvimento científico.

Como forma de contrapor ou, pelo menos, minimizar essa concepção Gil Pèrez et al afirmam que é fundamental repassar a idéia de que os problemas científicos se estabelecem, inicialmente, a partir de ‘situações problemáticas’ confusas, onde, geralmente, o problema não é dado ou carece de formulações precisas; estas situações podem ser melhoradas através da modelagem da situação, clarificação do objetivo, da metodologia.

Nessa visão acumulativa, a física é concebida como um processo de construção contínua, que se inicia com a formulação das leis. Desta forma, a ciência, como um todo, corresponderia a um processo onde o número de leis aumentaria constantemente, e as teorias seriam cada vez mais gerais.

De acordo com Kuhn, o desenvolvimento científico ocorre como uma seqüência de períodos de ciência normal¹¹, que são interrompidos por revoluções científicas¹² originadas por crises e anomalias no paradigma¹³ dominante. Nesse ciclo, a comunidade científica adere a um paradigma, que sofre crises, as quais são evidenciadas quando as teorias falham repetidas vezes. *“Ao reconhecer que algo está fundamentalmente errado na teoria com que trabalham, os cientistas tentarão articulações da teoria mais fundamentais do que as que eram admitidas antes”* (Kuhn, 1974, p.76).

Quando a situação de crise ocorre, ao invés de serem encarados como ‘quebra cabeças’¹⁴, os problemas passam a ser considerados anomalias (Zylbersztajn, 1991). Assim, quanto melhor for o paradigma em termos de precisão e alcance, menor será a quantidade de anomalias e mais dificilmente ocorrerá mudança de paradigma.

Kuhn salienta que os cientistas não abandonam os paradigmas simplesmente porque eles possuem anomalias; após uma teoria científica adquirir ‘status’ de paradigma, ela somente será substituída quando houver uma alternativa melhor. Desta forma, optar por abandonar um paradigma implica acolher outro, concomitantemente.

¹¹ A ciência normal caracteriza-se pela tentativa de encaixar a natureza dentro dos limites estabelecidos pelo paradigma, ou seja, ela busca delinear a solução de novos problemas de acordo com os problemas ‘exemplares’.

¹² Segundo Kuhn, as revoluções científicas são episódios de progresso não acumulativo, nos quais um paradigma antigo é parcial ou totalmente substituído por um novo, inconsistente com o anterior.

¹³ Paradigma, em seu sentido mais geral, é usado para designar todo o conjunto de atividades de pesquisa de uma comunidade científica.

Para esclarecer, Kuhn cita alguns acontecimentos da história da Física onde ocorreram crises e emergências de novos paradigmas. Entre eles, o insucesso do paradigma ptolomaico e sua substituição pelo paradigma copernicano; o fracasso do paradigma newtoniano e o aparecimento do paradigma relativístico. Contudo, salienta que uma revolução científica não se caracteriza por um processo acumulativo obtido por meio do encadeamento das idéias atuais com as do antigo paradigma. É sim, uma reconstrução da área de estudos que origina novas razões, altera generalizações especulativas, procedimentos e aplicações (Ostermann, 1996).

Segundo Kuhn (1996), o surgimento de um novo paradigma pode ocorrer subitamente, uma vez que a crise se faz presente na imaginação de quem está envolvido no processo. No entanto, no período de transição, o antigo e novo paradigma passam a competir, visando o favoritismo dos participantes da comunidade científica. Geralmente, uma teoria científica é considerada como superior a suas predecessoras porque, além de ser um instrumento mais aperfeiçoado para encontrar e resolver quebra-cabeças, ela também apresenta uma visão mais correta do que é realmente a natureza. Desta forma, Kuhn assevera que o conhecimento científico é procedente e está fundado na teoria e nas regras, as quais se tornam hábeis através do surgimento de problemas.

Para exemplificar que as novas teorias são incompatíveis com suas predecessoras, Kuhn menciona a revolução científica que substituiu o paradigma newtoniano pelo relativístico. Salienta que esta transição ilustra que a revolução científica é um deslocamento da rede conceitual através da qual os cientistas vêem o mundo. De acordo com Kuhn, a concepção de que a dinâmica newtoniana pode ser derivada da relativística é uma idéia que deve ser subjugada, pois os referentes físicos dos conceitos einstenianos não possuem semelhança alguma com os dos newtonianos, como, por exemplo, a questão da massa, que é conservada de acordo com Newton, mas pode se transformar em energia segundo a teoria de Einstein.

Para Ostermann (1996)

“as idéias kuhnianas representam um importante referencial para o trabalho em sala de aula. A visão de ciência transmitida nas aulas e nos livros didáticos, as estratégias de ensino utilizadas podem ser fundamentadas no modelo de Kuhn sobre o desenvolvimento

¹⁴ Os cientistas tendem a resolver quebra-cabeças modelando-os de acordo com soluções anteriores e utilizando-se minimamente de ‘generalizações simbólicas’.

científico...Adotando esta postura epistemológica, estaremos questionando a imagem que os cientistas e leigos têm da atividade científica, que disfarça a existência e o significado das revoluções nas ciências”.(Ostermann, 1996, p.194)

Neste sentido, pode-se salientar, em acordo com Ostermann, que a teoria de Kuhn ajuda a desmistificar a concepção de que o desenvolvimento científico é um processo acumulativo e linear, fato bastante ressaltado nos livros e, conseqüentemente, difundido nas salas de aula.

Com o intuito de explicitar o caráter não cumulativo da ciência, Kuhn (1996) argumenta que se a ciência é constituída por um agrupamento de fatos, teorias e métodos apresentados nos livros atuais, então os cientistas são homens que se empenharam para contribuir com os elementos que formam esta ‘constelação específica’; e o desenvolvimento aparece como um processo gradativo através do qual esses itens acrescentados, de forma isolada ou combinada e, passaram a constituir o conhecimento e a técnica científica. No entanto, se a ciência for expressa de tal forma ela sofre implicações profundas no que diz respeito à sua natureza, pois para Kuhn o conhecimento científico não se desenvolve por acumulação de descobertas e invenções individuais.

Zylbersztajn (1991), expõe que uma das proposições fundamentais de Kuhn é que as revoluções científicas com suas descontinuidades são, literalmente, expressas de forma amena nos materiais didáticos e nas propostas da historiografia tradicional, uma vez que a história é escrita de acordo com o paradigma dominante. *“Assim, o conhecimento passado é apresentado como um esforço na direção do paradigma existente e englobado por ele, ou como não científico, levando a uma imagem de progresso científico linear e contínuo* (Zylbersztajn, 1991, p.53).

Por outro lado, Freire-Maia (1991) afirma que é simplista a proposição de que o percurso evolutivo das ciências se dá por meio de um processo lógico de eliminação de erros e de aceitação de paradigmas corroborados. Destaca que a história pode revelar diversas situações, entre elas a que Max Planck observou: um dos elementos importantes para a mudança das teorias ao longo do tempo é a morte dos cientistas mais velhos, uma vez que estes relutam em abandonar o campo conceitual em que trabalham, e a sobrevivência dos cientistas mais moços, que são adeptos às teorias mais recentes.

Cita, como exemplo, Galileu Galilei que com sua nova perspectiva sobre a queda dos corpos não conseguiu converter os aristotélicos, os quais estavam absolutamente seguros de suas idéias. Neste sentido, ressalta que os elementos sociais, ou seja, não científicos também podem ser considerados como fatores atuantes no desenvolvimento e aceitação de uma teoria.

Com o intuito de reforçar essa sua opinião, Freire-Maia faz referência a Stephen Toulmin, o qual afirma que se convive em uma ‘ecologia intelectual’, na qual o entendimento coletivo gera ‘situações epistêmicas’ em diversos momentos históricos. Além disso, menciona que as idéias de uma sociedade são, geralmente, as idéias de sua classe dominante, que dirige o desenvolvimento de tudo o quanto pode, inclusive da ciência. A teoria heliocêntrica é posta como exemplo, pois segundo o autor, esta foi vigorosamente combatida e teve sua aceitação atrasada por contrariar as teses dominantes nos meios católicos e protestantes da época.

Este aspecto destacado por Freire-Maia pode sim ter desempenhado fortes influências no desenvolvimento científico, no entanto, acredita-se que ele esteja sendo gradativamente amenizado com o passar dos anos, pois já há uma certa independência do meio científico com relação ao que a sociedade, ou pelo menos, ao que religião sugere. Contudo, pode haver outros como os econômicos, políticos que, mesmo implicitamente, com certeza influenciam o desenvolvimento da ciência.

Segundo Lopes (1996), que apresenta e discute as idéias do filósofo Gaston Bachelard, o entendimento de que o conhecimento científico é um conhecimento comum refinado e de que existe uma continuidade entre ambos ainda se mantém dominante. *“Uma manifestação clara dessa marca continuísta é a tentativa constante da escola de fazer do conhecimento escolar a ponte capaz de mascarar a ruptura entre conhecimento comum e conhecimento científico (Lopes, 1996, p.255)”*.

Ao tratar do chamado caráter ‘continuísta’ do progresso do saber, Bachelard salienta que como o progresso científico é muito vagaroso, os continuístas interpretam que os conhecimentos comuns, após lentas transformações, originam os conhecimentos científicos. Alerta que quanto mais devagar ocorrem as transformações, mais disfarçadas ficam as rupturas do conhecimento, enfatizando assim, a idéia de continuidade. Bachelard infere que uma outra forma de defender a continuidade está no

argumento que o mérito do progresso científico é devido a uma multidão de trabalhadores anônimos; restando como contribuição do cientista genial apenas o *insight* daquilo que já estava indicado. Assim, quando essa interpretação for vista ao longo da história ela traduzirá a marca do continuísmo (Lopes, 1996).

Lopes (1996) afirma que outro exemplo representativo da visão continuísta é a concepção de que os atomistas gregos foram precursores das formulações feitas pelos atomistas modernos, neste caso a clara ruptura de racionalidade entre as proposições de Demócrito e de Dalton, não é reconhecida.

“Em síntese, os continuístas não analisam o pensamento filosófico inserido em sua cultura, com pressupostos e visões próprias de mundo, porque interpretam a cultura como um todo monolítico, história cumulativamente contada, na qual há formulações de infância e de vida adulta. Insistem em ver todo o acontecimento do passado como uma preparação dos acontecimentos do presente” (Lopes, 1996, p.256)

Bachelard (1996) salienta ainda que é extremamente necessário valorizar o pensamento científico abstrato e que a experiência imediata pode representar um obstáculo no desenvolvimento dessa abstração. *“a observação primeira é sempre um obstáculo inicial para a cultura científica...se apresenta repleta de imagens; é pitoresca, concreta, natural, fácil...parece que a compreendemos”*(p.25), contudo, a observação primeira é um obstáculo a ser superado através de rupturas e da demonstração de que não há continuidade entre a observação e a experimentação.

O autor assevera que as rupturas no conhecimento científico não ocorrem somente em relação ao conhecimento comum, mas também no decorrer do próprio desenvolvimento científico, ou seja, a história do conhecimento científico não é contínua racionalmente. As rupturas ocorrem constantemente, tanto na sucessividade de teorias quanto na simultaneidade temporal (Lopes,1996).

“Caracterizar o espírito científico como um espírito canalizado no dogmatismo de uma verdade indiscutida é fazer a psicologia de uma caricatura obsoleta. O tecido da história da ciência contemporânea é o tecido temporal da discussão. Os argumentos que nele se cruzam são outras tantas ocasiões de descontinuidade”.(Bachelard, 1971, p.196)

Para Bachelard, o progresso da ciência ocorre através de uma ‘perspectiva descontinuísta’, ou seja, não progride de maneira linear e unívoca. Destaca que o antes e

o depois do conhecimento científico são irreduzíveis um ao outro e, por esse motivo, tornam-se distintos.

*“Quando se procuram as condições psicológicas do progresso da ciência, logo se chega à convicção de que é **em termos de obstáculos que o problema do conhecimento científico deve ser colocado**. E não se trata de considerar obstáculos externos, como a complexidade e a fugacidade dos fenômenos, nem de incriminar a fragilidade dos sentidos e do espírito humano: é no âmago do próprio ato de conhecer que aparecem, por uma espécie de imperativo funcional, lentidões e conflitos. É aí que mostraremos causas de estagnação e até de regressão, detectaremos causas de inércia às quais daremos o nome de obstáculos epistemológicos”.* (Bachelard, 1996, p.17)

Segundo Santos (1991), as idéias de Bachelard se apresentam contrárias a um positivismo que defenda a complexificação progressiva e contínua do saber, assim como, à suposição de que a ciência emerge através de um processo de evolução lenta. Para ele, o passado da ciência não perspectiva o futuro e a ciência não aglutina descobertas, mas sim as retifica e reorganiza. O pensamento científico não percorre linear e harmoniosamente de uma descoberta a outra, e os pontos em comum entre as antigas e as novas teorias não são mecânicos, sendo que muitas dessas ligações são determinadas apenas a ‘posteriori’.

Além disso, Bachelard infere que o progresso da ciência é dialético, descontínuo e inacabado. Neste sentido, a ciência apresenta-se por revoluções e não evoluções; avança com descontinuidade e rupturas, as quais negam um passado de erros (Santos, 1991). *“Com efeito, as crises de crescimento do pensamento implicam uma reorganização total do sistema de saber. A cabeça bem feita precisa então ser refeita. Ela muda de espécie”* (Bachelard, 1996, p. 20).

De acordo com Robilotta (1988) o formalismo matemático que dá sustentação à lógica de uma lei física constitui-se em fonte de problemas para o ensino e a compreensão dos conceitos. Diz que de um lado é preciso encher o formalismo de significado, de realidade, com todas as dificuldades práticas e filosóficas que isso acarreta e, de outro, é comum que sobre o fascínio da lógica seja feito um esforço de modo a linearizar a forma e o conteúdo da física, eliminando as contradições que marcaram seu desenvolvimento. Isto faz com que surja uma ciência falsamente mística, na qual não há disputas nem descontinuidades. Menciona ainda que esta física

demasiadamente lógica, cristalina e límpida é precisamente falsa, pois ao se distinguir o produto ao processo esta se afastando o estudante dela.” *A apologia da lógica torna a ciência sobre-humana aos olhos dos estudantes, superior aos olhos dos mortais*” (Robilotta, 1988, p. 17).

Robilotta destaca que existem tarefas urgentes de serem enfrentadas no ensino de Física, dentre elas a necessidade de se recuperar a noção de que a física é um processo onde o confronto de idéias está sempre presente. Isso pode ser feito através do estudo da história da física e de sua epistemologia: *“no estudo combinado dessas duas disciplinas repousa a possibilidade de se compreender o processo de construção do conhecimento”* (Robilotta, 1988, p.17).

Salienta, ainda, que a história pode oferecer visões alternativas sobre o universo permitindo ao aluno optar; o que promove o desenvolvimento de uma postura crítica e leva a um posicionamento menos passivo frente ao conhecimento.

“A história ensina a ‘relativizar’, demole mitos, exhibe a construção do conhecimento, insere os indivíduos num processo, numa tradição. Além disso, ela pode trazer de volta o fazer da ciência para a esfera das atividades humanas. No ensino, entretanto, é preciso tomar cuidado com a história linearizada, ufanista. De nada adianta apresentar a ciência como um produto a ser venerado, admirado à distância, de modo a fazer com que os estudantes adquiram um sentimento de inferioridade. Quando se promove deste modo o triunfo da ciência, a nossa humanidade sai perdendo”. (Robilotta, 1988, p.18)

2.6 – AS DEMAIS VISÕES DEFORMADAS DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO

A Visão Exclusivamente Analítica

A visão exclusivamente analítica é a que destaca a necessária divisão parcelar dos estudos, o seu caráter limitado, simplificador. Não menciona os esforços de unificação e de construção de corpos coerentes de conhecimento; ou o tratamento de ‘problemas-ponte’ entre os diferentes campos de conhecimento, que podem se unificar. Essa desvalorização e esquecimento dos processos de unificação dos conhecimentos científicos constitui um obstáculo na educação científica. Como exemplo, observa-se, nos livros, a não menção à unificação que supõe a síntese newtoniana das mecânicas

celeste e terrestre, recusada por mais de um século com a condenação das obras de Copérnico e de Galileu. (Gil Pèrez et al., 2001).

A Visão Elitista e Individualista

Nesta concepção, os conhecimentos científicos aparecem como obras de gênios isolados, ignorando-se o papel do trabalho coletivo e cooperativo, dos intercâmbios entre equipes... Em particular faz-se crer que os resultados obtidos por um só cientista ou equipe podem ser suficientes para verificar, confirmando ou refutando, uma hipótese ou toda uma teoria (Gil Pèrez, et al., 2001).

A Imagem Descontextualizada e Socialmente Neutra da Ciência

Nesta imagem, esquecem-se as complexas relações entre ciência, tecnologia e sociedade e proporciona-se uma representação deformada dos cientistas que aparecem como seres ‘acima do bem e do mal’ fechados em torres de marfim e alheios à necessidade de fazer opções. Não é salientado, por exemplo, os problemas causados ao meio ambiente por determinados desenvolvimentos científicos (Gil Pèrez, et al., 2001).

Capítulo 3 – LAKATOS E O MODELO ATÔMICO DE BOHR

3.1 – A METODOLOGIA DOS PROGRAMAS DE INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA

A epistemologia de Imre Lakatos constitui-se em uma das importantes reflexões na filosofia da ciência do século XX. Lakatos expõe, quase aos quarenta anos de idade, que quando teve contato com a filosofia de Karl Popper sua vida foi modificada através do rompimento, de forma definitiva, com a perspectiva hegeliana que ele havia mantido por quase vinte anos. Além disso, afirma que a filosofia de Popper lhe forneceu um conjunto muito fértil de problemas, um autêntico programa de pesquisa.

De acordo com Lakatos, a metodologia que oferece uma nova reconstrução racional da ciência é composta pelos programas de investigação que constituem os grandes alcances científicos. Estes podem ser avaliados ao final das transformações progressivas e regressivas de um problema.

“A própria ciência como um todo pode ser considerada um imenso programa de pesquisa com a suprema regra de Popper: ‘arquitetar conjecturas que tenham maior conteúdo empírico do que suas predecessoras’” (Lakatos, 1979 citado em Silveira, 1996, p. 220).

Segundo a concepção de Lakatos, as revoluções científicas ocorrem quando um programa de investigação supera progressivamente a outro. Insiste em que, do ponto de vista lógico, não existem experimentos cruciais, ou seja, experimentos ou observações que possam instantaneamente acabar com um programa de pesquisa ou decidir entre programas rivais.

Lakatos sugere que a unidade básica para a avaliação do crescimento do conhecimento científico não deve ser uma teoria isolada ou uma conjunção de teorias, mas sim, um ‘programa de investigação’ composto por um ‘núcleo firme’ convencionalmente aceito e, portanto, ‘irrefutável’ por decisão provisória, e por uma ‘heurística positiva’ que define os problemas, esboça a construção de um cinturão de hipóteses auxiliares (ou cinturão protetor), prevê anomalias e vitoriosamente as transforma em exemplos, segundo o plano preconcebido.

O núcleo firme de um programa de pesquisa consiste de uma teoria ou uma conjunção de hipóteses contra a qual não é aplicada a ‘retransmissão da falsidade’. Mesmo que as hipóteses deste núcleo apresentem fatores problemáticos, elas não são descartadas pelo programa.

O cinturão protetor é constituído por hipóteses e teorias auxiliares; sobre ele, incidirá a falsidade em caso problemático de refutação ou anomalia; ou seja, ele funciona como um protetor do núcleo firme, é constantemente modificado, expandido, complicado (Silveira, 1996).

A heurística positiva orienta os cientistas para as modificações que devem ser feitas no cinturão protetor quando estes se deparam com algum fato incompatível com as previsões teóricas, como refutações ou anomalias.

“Como os programas de pesquisa têm desde o início um ‘oceano de anomalias’, a heurística positiva impede que os cientistas se confundam, indicando caminhos que poderão, lentamente, explicá-las e transformá-las em corroborações”. (Silveira, 1996, p. 222)

Assim, Lakatos infere que a seleção dos problemas dos programas de investigação está fundamentalmente ditada pela heurística positiva do programa e não pelas anomalias. As anomalias somente serão consideradas quando a heurística positiva tiver sua força impulsora debilitada. Além disso, os programas de investigação incluem modelos, os quais procuram estar cada vez mais próximos daquilo que efetivamente existe, sendo que

“um modelo é um conjunto de condições iniciais (possivelmente em conjunção com algumas teorias observacionais) que se sabe que deve ser substituído no desenvolvimento ulterior do programa, e que se sabe, inclusive, como deve ser substituído (em maior ou menor medida)”. (Lakatos, 1979, p.70)

Por outro lado, a heurística negativa proíbe, frente a qualquer caso problemático, que o ‘núcleo firme’ seja declarado falso; a falsidade deverá incidir sobre as hipóteses auxiliares do ‘cinturão protetor’.

Deste modo, a metodologia dos programas de investigação pode explicar a grande autonomia da ciência teórica, o que é impossível para as ingênuas e as desconexas seqüências de conjecturas e refutações dos falsificacionistas.

Em sua metodologia, Lakatos afirma oferecer critérios de progresso e de estagnação, e também, regras para a eliminação de um programa. Isto se torna necessário para saber se um programa progride ou degenera, ou se está superando outro. Assim, um programa de investigação progride enquanto seu crescimento teórico se antecipa ao seu crescimento empírico; isto é, até que ele continue predizendo fatos novos com algum êxito e, pelo menos, algumas dessas predições sejam corroboradas. Por outro lado, um programa é regressivo se seu crescimento teórico se atrasa em relação ao crescimento empírico: se somente oferece explicações *post-hoc* de descobrimentos casuais ou de fatos antecipados e descobertos no núcleo de um programa rival. “*Se um programa explica de forma progressiva mais fatos que um programa rival, ‘supera’ a este último que pode ser eliminado (ou arquivado, se se prefere)*” (Lakatos, 1983, p.147).

Para Lakatos, no interior de um programa, uma teoria somente pode ser substituída por outra teoria melhor; ou seja, por uma que tenha um excesso de conteúdo empírico - que deve, em parte, ser confirmado posteriormente - com relação às suas predecessoras. Portanto, segundo a metodologia lakatosiana, “*o progresso é assinalado por incidências verificadoras do conteúdo adicional, e não por casos de falsificação; a ‘falsificação’ empírica e a ‘rejeição’ efetiva tornam-se independentes*” (Lakatos 1978, p. 33). Assim, antes de uma teoria ser modificada, não é possível saber de que forma haveria sido refutada, sendo que algumas das modificações mais interessantes são mais motivadas pela heurística positiva do programa de investigação do que pelas anomalias.

De acordo com a perspectiva lakatosiana, não se deve exigir a existência de progresso para cada passo dado, entretanto, isto implica uma tarefa difícil: a de decidir quando um programa de investigação está degenerando ou, quando um dos programas rivais conseguiu uma vantagem decisiva sobre o outro. “*Nesta metodologia nem a prova lógica de inconsistência nem o veredicto de anomalia emitido pelo cientista experimental podem derrotar de um só golpe um programa de investigação. Somente ex-post podemos ser ‘sábios’*” (Lakatos, 1983, p. 148).

A metodologia dos programas de investigação insiste na resistente rivalidade técnica e empírica dos principais programas de investigação, nos deslocamentos progressivos ou regressivos das problemáticas e na vitória, que emerge lentamente, de um programa sobre o outro. À luz dessa metodologia, algumas disputas como saber qual

programa primeiro antecipou um fato novo e qual o acomodou posteriormente assume uma importância extrema para a apreciação racional. Às vezes, as disputas podem ser explicadas por interesse racional e não simplesmente por orgulho e ambição de fama. Lakatos exemplifica que a teoria de Tycho somente conseguiu explicar post-hoc a distância e as fases observadas de Vênus, que originalmente foram antecipadas com precisão pelos copernicanos, e que a teoria óptica newtoniana explicou post-hoc muitos fenômenos que foram antecipados e observados pela primeira vez pelos huyghensianos.

3.2 - A HISTÓRIA DA CIÊNCIA E SUAS RECONSTRUÇÕES RACIONAIS

Após parafrasear Kant, “*a filosofia da ciência sem a história da ciência é vazia; a história da ciência sem a filosofia da ciência é cega*”, Lakatos salienta que tem por objetivo explicar como se deveria aprender a historiografia da ciência da filosofia da ciência, e vice-versa. Explicita sua defesa de que a filosofia da ciência fornece metodologias normativas para o historiador da ciência reconstruir a ‘história interna’, oferecendo, deste modo, uma explicação racional do crescimento do conhecimento objetivo.

De acordo com Lakatos, as teorias historiográficas internas e externas determinam, conjuntamente, e em grande medida, a eleição dos problemas para o historiador. Alguns dos problemas mais importantes da história externa somente podem ser formulados em termos de uma metodologia aceita; por isso, a história interna é o principal e a história externa, o secundário. “*Realmente, em vista da autonomia da história interna, a história externa é irrelevante para a compreensão da ciência*” (Lakatos, 1983, p. 135).

A história externa fornece explicações não racionais de ritmo, localização e seletividade dos acontecimentos históricos, interpretados de acordo com a história interna ou explica empiricamente a divergência entre a história e sua reconstrução racional, quando ambas diferem. “*Seja qual for o problema que o historiador da ciência pretende resolver, é-lhe necessário em primeiro lugar reconstruir a parte concernente do desenvolvimento do conhecimento científico objetivo, isto é, a parte concernente da história interna*” (Lakatos, 1978, p. 40). Isto indica que a filosofia da

ciência desempenha um papel indispensável na reconstrução da história da ciência, já a sociologia e a psicologia, têm papéis secundários.

Segundo Lakatos, a maior parte das teorias sobre o desenvolvimento do conhecimento é acerca de um conhecimento não articulado: que um experimento seja crucial ou não, que uma hipótese é muito provável à luz de uma evidência disponível ou não, que a mudança de uma problemática seja progressiva ou não, são temas que não dependem, em absoluto, das crenças, da personalidade ou autoridade do científico. Estes fatores subjetivos não despertam interesse para a história interna.

Portanto, ao construir a história interna, o historiador deverá ser muito seletivo; *“omitirá tudo o que é irracional à luz de sua teoria da racionalidade”* (p.41). Contudo, essa seleção normativa ainda não chega a ser uma reconstrução racional completa. Assim, a história interna não é somente uma seleção de fatos interpretados metodologicamente; em determinadas ocasiões, pode ser uma versão deles radicalmente melhorada. Para exemplificar, Lakatos menciona um aspecto da teoria de Bohr:

“Bohr, em 1913, pode até não ter pensado na possibilidade da rotação do elétron. Mesmo sem a rotação do elétron, ele já não tinha mãos a medir. Contudo, o historiador, ao descrever retrospectivamente o programa bohriano, deveria incluir a rotação do elétron, visto que a rotação do elétron se ajusta naturalmente à idéia geral original do programa. Bohr podia ter-lhe feito referência em 1913. Porque não o fez, é um problema interessante que merece ser indicado numa nota de pé de página.” (Lakatos, 1978, p.41)

Uma forma, sugerida por Lakatos, de indicar as discrepâncias entre a história e sua reconstrução racional é relatar a história interna no texto e indicar nas notas os ‘desajustes’ da história real com relação a sua reconstrução racional.

Um dos problemas mais interessantes da história externa consiste em especificar as condições psicológicas e também sociais que são necessárias (embora naturalmente nunca suficientes) para o progresso científico; porém, mesmo na formulação deste problema externo é preciso a presença de alguma teoria metodológica ou definição da ciência. *“Os próprios problemas do historiador são determinados pela sua metodologia”* (Lakatos, 1978, p. 104) e, mesmo os que adotam a metodologia dos programas de investigação científica não podem explicar a aceitação ou rejeição de uma teoria sem apresentarem hipóteses psicológicas adicionais.

Lakatos afirma que à luz da maioria das teorias justificacionistas da racionalidade, a história da ciência é a história da iniciação pré-científica de alguma história futura da ciência. E, tendo como referência as melhores reconstruções racionais da ciência sempre é possível reconstruir como racional uma parte maior da ciência real.

3.2.1 – Lakatos e o falsificacionismo de Popper como um meta-critério

Após discutir as idéias falsificacionistas de Popper, Lakatos questiona até que ponto as considerações falsificacionistas podem funcionar como um guia para o historiador da ciência. Salienta que Popper, o principal falsificacionista, nunca escreveu história da ciência. Atribui a isso o fato de que ele era ‘demasiado sensível’ às opiniões dos grandes científicos, e por isso, não corromperia a história com o enfoque de sua teoria.

Segundo Lakatos, quando Popper se aventura em fazer observações superficiais sobre a falsificabilidade das principais teorias científicas, ou ele comete algum erro lógico ou distorce a história para que concorde com sua teoria da racionalidade. Destaca ainda que Popper, em suas incursões históricas, tende a converter as anomalias em ‘experimentos cruciais’ e a exagerar seu impacto imediato na história da ciência.

De acordo com Lakatos, a interpretação de Popper é de que os grandes científicos aceitam facilmente as refutações, que são a fonte principal dos problemas que abordam. Afirmam, por exemplo, que o experimento de Michelson – Morley destruiu decisivamente a teoria clássica sobre o éter; e exageram o papel deste experimento no aparecimento da teoria da relatividade de Einstein.

Para Popper, o trabalho desenvolvido em um sistema inconsistente é irracional e deve ser rejeitado, porque não é informativo. Contudo, alguns dos mais importantes programas de investigação científica progrediram com base em fundamentos inconsistentes. A metodologia antipopperina assegurou uma pausa e um novo alento para o cálculo infinitesimal e para a teoria ingênua dos conjuntos, quando estas se encontraram confundidas por paradoxos lógicos. Se a ciência obedecesse às regras de Popper, o ensaio de Bohr nunca teria sido publicado porque estava inconsistentemente

enxertado na teoria de Maxwell, assim como as funções delta de Dirac teriam sido suprimidas até Schwartz. Além disso, era irracional reter e continuar elaborando a teoria gravitacional de Newton depois do descobrimento do periélio anômalo de mercúrio. Do ponto de vista de Lakatos, trata-se de desenvolvimentos perfeitamente racionais.

Lakatos infere que para Popper poder reconstruir racionalmente a aceitação provisória de teorias, ele é obrigado a ignorar o fato histórico de que as teorias mais importantes nascem refutadas e de que algumas leis são reelaboradas e não rechaçadas, apesar dos contra – exemplos. *“Portanto, a historiografia falsificacionista está falseada”*. (Lakatos, 1983, p. 167). No entanto, Lakatos admite que sua metodologia também pode ser falseada *“pela simples razão de que nenhum conjunto de opiniões humanas é completamente racional e, por conseguinte, nenhuma reconstrução racional pode alguma vez coincidir com a história real”* (Lakatos, 1978, p.53).

A opção por trabalhar com Lakatos na pesquisa foi motivada, de uma maneira geral, pela adequação da metodologia dos programas de investigação científica ao estudo do modelo atômico de Bohr. Além disso, um artigo específico, escrito por Lakatos, descreve e caracteriza o desenvolvimento da teoria de Bohr segundo esta metodologia.

A adoção foi feita, mas não de forma irrestrita; concorda-se em geral com as idéias de Lakatos no que tange aos programas de pesquisa, revoluções científicas, sistemas de avaliação para verificação de progresso ou superação de programas. Contudo, é preciso ser crítico à reconstrução racional de Lakatos, quando ele propõe que a história da ciência deve ser reescrita de ‘forma racional’, e as possíveis discrepâncias entre a história real e a reconstrução racional expostas em notas de rodapé.

Como exemplo desta reconstrução, Lakatos salienta, em relação ao modelo atômico de Bohr que, embora Bohr não tivesse considerado a rotação do elétron, o historiador, ao expor o programa bohriano deveria incluir essa rotação por ela se ajustar naturalmente à idéia do programa. Ressalta ainda que o motivo que levou Bohr a não considerar este giro, merece ser mostrado em uma nota de rodapé.

Este fato exemplifica uma parte da teoria de Lakatos com a qual se discorda, devido ao fato de que a reconstrução racional enfatizada por ele permite ao historiador

manipular a suposta história real da maneira que ele achar apropriado ou, de acordo com a sua racionalidade. Neste sentido, a história pode ser apresentada sem nenhuma conformidade com o real ou, com muitas divergências.

3.3 - O ARTIGO DE LAKATOS SOBRE O DESENVOLVIMENTO DO MODELO ATÔMICO DE BOHR

No livro “A crítica e o desenvolvimento do conhecimento” (Lakatos & Musgrave, 1979) há uma seção em que Lakatos acompanha como se desenvolve o programa de pesquisa de Bohr que se intitula: “Bohr: um programa de pesquisa que progride sobre fundamentos inconsistentes”.

Inicialmente, em nota de rodapé, Lakatos alerta para o fato de que a apresentação do texto pode impressionar o historiador mais como caricatura do que como esboço. Menciona que alguns enunciados devem ser tomados não como uma pitada de sal, mas como toneladas.

De acordo com esta perspectiva, a história do programa de pesquisa de Bohr pode ser caracterizada por:

1. Seu problema inicial;
2. Sua heurística negativa e sua heurística positiva;
3. Os problemas que ele tentou resolver no decurso de seu desenvolvimento;
4. Seu ponto de degeneração;
5. O programa pelo qual foi ultrapassado.

Lakatos esclarece que o problema básico de Bohr era o enigma de como os átomos de Rutherford – minúsculos sistemas planetários com elétrons que descrevem órbitas em torno de um núcleo positivo - podem permanecer estáveis; pois, de acordo com a bem corroborada teoria de Maxwell-Lorentz do eletromagnetismo, eles deviam desintegrar-se. No entanto, salienta que a teoria de Rutherford também era bem corroborada. Infere que *“a sugestão de Bohr consistia em ignorar por ora a incongruência e desenvolver conscientemente um programa de pesquisa cujas versões*

‘refutáveis’ fossem incompatíveis com a teoria de Maxwell-Lorentz” (Lakatos, 1979, p. 173).

Em seguida, apresenta os cinco postulados que compõem o núcleo do programa de pesquisa de Bohr.

1. Que a radiação de energia, no interior do átomo, não é emitida nem absorvida de forma contínua, como supõe a eletrodinâmica clássica. Isto ocorre apenas quando o sistema passa de um estado estacionário a outro.
2. Que nos estados estacionários, o equilíbrio dinâmico de um sistema é regido pelas leis da mecânica clássica. Porém, estas leis não são válidas nas transições entre diferentes estados.
3. A radiação emitida durante a transição de um sistema entre dois estados estacionários é homogênea. E a relação entre a frequência ν , e a energia emitida E , é $E = h \nu$, onde h é a constante de Planck.
4. Os diferentes estados estacionários de um sistema simples, como o de um elétron que gira em torno de um núcleo positivo, são determinados pela condição de que o momento angular do elétron é um múltiplo inteiro de $h/2\pi$.
5. O estado ‘permanente’ de um sistema atômico, isto é, o estado no qual a energia emitida é máxima, é determinado pela condição de que o momento angular de cada elétron em torno do centro de sua órbita seja igual a $h/2\pi$.

Ao analisar a diferença metodológica entre a incompatibilidade do programa de Prout e a do programa de Bohr, Lakatos afirma que Prout declarou guerra à química analítica de seu tempo e que a heurística positiva de seu programa destinava-se a derrubá-la ou a substituí-la. Já o programa de Bohr não tinha intenção semelhante; sua heurística positiva (os átomos análogos a sistemas planetários e o ‘princípio da correspondência’, utilizado, posteriormente, na solução de alguns problemas com modelos mais sofisticados), embora bem sucedida, deixara sem solução a incompatibilidade com a teoria de Maxwell – Lorentz. Em nota de rodapé, Lakatos afirma que nesta época Bohr sustentava que a teoria de Maxwell e Lorentz teria de ser ‘finalmente’ substituída, devido aos indicativos da teoria de Einstein.

Einstein achou inaceitável e rejeitou a idéia do programa de Bohr. Lakatos argumenta que alguns dos mais importantes programas de pesquisa da história da ciência foram enxertados em programas mais antigos com os quais eram francamente incompatíveis. Como exemplo, menciona que a teoria copernicana foi ‘enxertada’ na física aristotélica, assim como, o programa de Bohr foi enxertado no de Maxwell. Explica que tais enxertos são irracionais para o justificacionista e para o falsificacionista ingênuo, pois nenhum dos dois aprova o crescimento sobre fundamentos incompatíveis, os quais normalmente são omitidos por ‘estratagemas’ *ad hoc*. “*À medida que o jovem programa enxertado se fortalece, a coexistência pacífica chega ao fim, a simbiose competitiva e os defensores do novo programa tentam substituir completamente o velho programa*” (p. 174).

Lakatos afirma que Bohr, mais tarde, foi induzido erroneamente, devido ao sucesso do enxerto de seu programa, pois passou a acreditar que os programas de pesquisa incompatíveis podem e devem ser tolerados **em princípio** por não apresentarem nenhum problema sério. Em 1922, Bohr manifesta que “*o máximo que se pode exigir de uma teoria [isto é, programa] é que a classificação [que ela estabelece] seja empurrada tão longe que possa contribuir para o desenvolvimento do campo de observação pela predição de novos fenômenos*” (Lakatos, 1979, p. 175). Lakatos comenta que na realidade todos tinham consciência dessa ‘malformação’, apenas ignoravam, mais ou menos, durante a fase progressiva do programa. Afirma: “*nossa metodologia de programas de pesquisa mostra a racionalidade dessa atitude, mas também mostra a irracionalidade da defesa de tais ‘malformações’ depois de encerrada a fase progressiva*” (p.175).

A compatibilidade entre teorias deve continuar a ser um princípio regulador importante e as inconsistências devem ser vistas como problemas, pois

“se a ciência visa à verdade, deve visar à consistência; se ela renuncia à consistência, renuncia à verdade... afirmar que ‘devemos ser modestos em nossas exigências’, que devemos resignar-nos às inconsistências - fracas ou fortes - continua a ser um vício metodológico” (p. 176).

Por outro lado, explicita que a descoberta de uma anomalia ou inconsistência não deve deter o desenvolvimento de um programa. “*O que pode ser feito é colocar a*

inconsistência em quarentena temporária, ad hoc, e prosseguir com a heurística positiva do programa” (p. 176).

Como exemplo, cita que o princípio da correspondência de Bohr desempenhou um duplo papel, em virtude de por um lado sugerir inúmeras hipóteses científicas importantes (mormente no campo da intensidade das linhas dos espectros) e por outro, funcionar como um mecanismo de defesa (quando utilizou os conceitos da teoria clássica e da eletrodinâmica mesmo em contraste com o quantum de ação) em vez de enfatizar a urgência de um programa unificado. Ou seja, reduziu o grau de problematicidade do programa.

Lakatos menciona que não há dúvida de que o programa de pesquisa da teoria quântica como um todo, foi um programa enxertado e fez-se repugnar pelos físicos de posições conservadoras como Planck. As posições relacionadas aos programas enxertados são:

1. **A posição conservadora:** consiste na interrupção do novo programa até que a incompatibilidade como o velho, seja ajustada: **é irracional trabalhar sobre fundamentos inconsistentes**. Os conservadores concentram seus esforços para eliminar a incompatibilidade; a partir do postulado do velho programa, explicam o novo: *“parece-lhes irracional continuar com o novo programa sem uma redução bem sucedida do gênero bem mencionado”*. (p.177)
2. **A posição anárquica:** louva a anarquia nos fundamentos como virtude e considera a incompatibilidade como uma propriedade básica da natureza ou limitação final do conhecimento humano.

As posições 1 e 2 devido a serem extremas são consideradas, igualmente, irracionais.

3. **A posição racional:** abrange os que trabalham não só na heurística positiva por deter êxito, mas também em programas reducionistas sem êxito. Em relação aos programas enxertados, a posição racional, explora-lhes a força heurística sem se resignar ao caos fundamental em que ela está crescendo (exemplo: teoria de Bohr). Encontra-se entre as duas posições anteriores:

não despreza a incompatibilidade enaltecendo a anarquia, nem abandona o programa simplesmente porque ele possui inconsistências. Segundo Lakatos, a posição racional prevaleceu, de modo geral, até 1925. Após essa data, a posição anarquista foi assumida e passou a dominar a física quântica moderna.

Lakatos continua, explicitando sua heurística positiva, que estava planejada desde o começo: a idéia de átomos análogos a sistemas planetários; a qual renunciou um longo e difícil programa, mas indicou claramente a política da pesquisa. Nessa época, 1913, poderia ter-se dito que, após muito tempo e paciência, os enigmas dos espectros foram finalmente desvendados.

Assevera que o primeiro famoso ensaio de Bohr, em 1913, continha o passo inicial de seu programa de pesquisa: seu primeiro modelo (M_1); que predizia fatos não preditos por nenhuma teoria anterior: os comprimentos de onda das linhas do espectro de emissão do hidrogênio.

Embora alguns desses resultados já fossem conhecidos antes de 1913, - a série de Balmer (1885) e a série de Paschen (1908) – a teoria de Bohr previa muito mais que as duas séries conhecidas. As novas séries de Lyman em 1914, de Brackett em 1922 e de Pfund em 1924 corroboravam o conteúdo previsto pelo M_1 de Bohr.

Como as séries de Balmer e Paschen eram conhecidas antes de 1913, alguns historiadores apresentam a história do modelo atômico de Bohr como um exemplo de ‘ascensão indutiva’ baconiana, delimitada por:

1. O caos das linhas do espectro;
2. Uma lei empírica (Balmer);
3. A explicação teórica (Bohr).

Neste sentido, Lakatos destaca que na reconstrução racional da ciência há escassa recompensa para os trabalhos dos descobridores de ‘conjecturas ingênuas’ e que

“O progresso da ciência pouco se teria atrasado se nos faltassem os louváveis ensaios e erros do engenhoso mestre-escola suíço: a linha principal especulativa da ciência, levada adiante pelas ousadas especulações de Planck, Rutherford, Einstein e Bohr, teria produzido dedutivamente os resultados de Balmer, como enunciados testes de sua

teoria sem o chamado 'pioneirismo' de Balmer". (Lakatos, 1979, p. 181)

Lakatos salienta que, na verdade, o problema de Bohr não consistia em explicar as séries de Balmer e Paschen, mas em esclarecer a estabilidade paradoxal do átomo de Rutherford e que Bohr nem sequer ouvira falar em tais resultados antes de escrever a primeira versão de seu trabalho.

Na seqüência, esclarece que nem todo o conteúdo do primeiro modelo de Bohr foi corroborado, uma vez que este afirmava predizer todas as séries do espectro de emissão do hidrogênio, no entanto, a experiência denotava a presença de uma série anômala: a série ultravioleta de Pickering – Fowler.

Segundo Lakatos, Pickering descobriu essa série em 1896 no espectro da estrela Pupis; e Fowler, depois de haver descoberto sua primeira linha no sol, produziu toda a série num tubo de descarga que continha hidrogênio e hélio. Embora pudesse ser argumentado que esse resultado nada tinha a ver com o hidrogênio, uma vez que, a estrela e o sol contêm muitos gases e o tubo continha hélio, a técnica possuía uma base teórica plausível - apesar de nunca testada - e conduzia a uma hipótese falseadora da lei de Balmer. A série deles continha o mesmo número de convergência da série de Balmer, por isso, foi considerada como uma série do hidrogênio; e ainda, Fowler deu uma explicação plausível da razão por que o hélio não poderia ser o responsável pela produção das séries. A forma como essa explicação é justificada serviu para Lakatos confirmar sua tese favorita de que *“a maioria dos cientistas tende a entender um pouco mais de ciência do que os peixes de hidrodinâmica”* (p. 182).

Bohr não ficou muito impressionado com Pickering e Fowler; não contradisse a observação experimental nem a validade de suas observações, mas contestou-lhes a teoria observacional. Para propor uma alternativa, elaborou um novo modelo (M_2) ou, o modelo do hélio ionizado - composto por um próton duplo em torno do qual um elétron descreve órbita - que prediz uma série ultravioleta no espectro do hélio que coincide com a série de Pickering – Fowler. Como, supostamente, M_2 seria uma teoria rival de M_1 , sugeriu-se uma ‘experiência crucial’: Bohr predisse que a série de Fowler poderia ser reproduzida em um tubo cheio de uma mistura de hélio e cloro. Explicou aos experimentadores os papéis do hélio e do cloro na experiência por ele indicada e, transformou a aparente primeira derrota de seu programa, em uma ‘vitória retumbante’.

Contudo, Fowler assinalou que o ‘ajustamento – monstro’¹⁵ de Bohr falhava, pois os valores dos comprimentos de ondas na série de Fowler diferiam significativamente dos valores preditos pela M_2 de Bohr. “*Desse modo, a série, embora não refute M_1 , ainda refuta M_2 e, mercê da íntima conexão entre M_1 e M_2 , solapa M_1 !* (Fowler citado em Lakatos, 1979, p.183).

Bohr rejeitou o argumento de Fowler embora nunca pretendia que M_2 fosse levado muito a sério, pois seus valores foram obtidos por um ‘cálculo tosco’ com base em um elétron descrevendo órbita em torno de um núcleo fixo. Bohr sabia que a órbita descrita pelo elétron devia ser em torno de um centro comum de gravidade e que a massa teria de ser substituída pela massa reduzida. Essas modificações constituíram o modelo M_3 de Bohr. E, Fowler teve que admitir outra vez que Bohr tinha razão.

Desta forma, a aparente refutação de M_2 converteu-se em uma vitória para M_3 ; sendo que M_2 e M_3 foram desenvolvidos dentro do programa de pesquisa de acordo com sua heurística. Nesta época, Einstein declara se referindo a teoria de Bohr: “*É uma das maiores descobertas*” (Lakatos, 1979, p. 184).

O passo seguinte foi dado por Sommerfeld em 1915, que calculou as órbitas elípticas e, com correções relativísticas da massa, conseguiu um novo conjunto de níveis de energia, e assim, a ‘estrutura fina’ do espectro, incompatível com as primeiras versões de Bohr. No entanto, as experiências da estrutura fina com as ‘velhas observações corrigidas’ forneceram a prova crucial em favor do modelo de Bohr, e as aparentes derrotas de seu programa se transformaram em vitórias.

Lakatos comenta que Bohr, assim como Einstein - que susteve sua marcha no meio do progresso espetacular da física quântica, em 1913 - também se aborreceu e moderou seu curso por volta de 1916, o que proporcionou a Sommerfeld tomar sua iniciativa.

Esclarece que o esboço desenvolvido pelo texto até o momento mostra que uma transferência progressiva de problemas pode oferecer credibilidade e base lógica a um programa inconsistente. E ainda, direciona para o fato de que as hipóteses utilizadas como bases das leis de ação no modelo de Bohr, sem dúvida, teriam sido categoricamente rejeitadas por todos os físicos da geração anterior. Aceitar que dentro

¹⁵ Ajustamento – monstro: transformar um exemplo contrário, à luz de uma nova teoria.

do átomo certas órbitas são quantizadas, é bem mais fácil do que consentir a suposição de que os elétrons se movem em órbitas curvilíneas, aceleradamente, sem irradiar energia. Já para um teórico educado na escola clássica, seria ‘monstruoso’ e inconcebível que a frequência do quantum de luz emitida seja diferente da frequência do quantum emissor. Assim, as transferências progressivas de problemas passaram a conquistar uma posição segura e a assumir a ofensiva, a ponto de mandar pelos ‘ares’ o velho sistema.

Lakatos chama a atenção para o fato de que uma das coisas mais importantes que se aprende com programas de pesquisa é que poucas experiências são realmente importantes, pois a heurística positiva do programa o impele para frente de qualquer maneira. *“De mais a mais, dar uma severa ‘interpretação refutável’ à versão incipiente de um programa é uma perigosa crueldade metodológica”* (p. 186). Desta forma, a dialética dos programas de pesquisa não é necessariamente uma série alternada de conjecturas especulativas e refutações empíricas, pois a interação entre desenvolvimento do programa e as verificações empíricas podem ser muito variadas e dependem do acidente histórico.

Ressalta que não é sua intenção apresentar um relato circunstanciado do desenvolvimento do programa de Bohr, mas afirma que o seu estudo pormenorizado do ponto de vista metodológico ‘é uma verdadeira mina de ouro’:

“Seu progresso maravilhosamente rápido – sobre fundamentos inconsistentes! – foi emocionante, a beleza, a originalidade e o sucesso empírico de suas hipóteses auxiliares...não tiveram precedente na história da física”.(p.188)

Às vezes, o programa exigia algum ajuste trivial, como substituir a massa pela massa reduzida ou, uma melhora na matemática. Contudo, até esse programa chegou a um ponto que sua heurística positiva se esgotou, com a multiplicação das hipóteses *ad hoc* e as refutações. *“Anomalias não-digeridas inundavam o campo”* (p.189). As inconsistências não colhiam novas recompensas e o programa começara a entrar em sua fase degenerativa. Imediatamente, surgiu um programa de pesquisa rival: a mecânica ondulatória que, além de explicar as situações quânticas de Planck e Bohr, também orientava para um novo fato: a experiência de Davisson-Germer, a qual demonstrava que os elétrons apresentam difração quando são espalhados por cristais cujos átomos se

encontram adequadamente espaçados. Além disso, em suas versões posteriores, ofereceu soluções para problemas que estiveram fora do alcance da teoria de Bohr. “A *mecânica ondulatória* não tardou a alcançar, vencer e substituir o programa de Bohr” (p. 190).

A reconstrução racional de Lakatos, basicamente, está de acordo com o apresentado por Bohr em “Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas” (Bohr, 1989), pelo menos, no que se refere aos modelos M_1 e M_2 de Bohr.

Capítulo 4 - O ÁTOMO DE BOHR EM LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA

4.1 – INTRODUÇÃO

O livro didático é, certamente, o material mais utilizado por professores na elaboração de suas aulas e por alunos em seus estudos.

Contudo, o livro não deve ser considerado necessariamente uma autoridade nem, tampouco, uma referência que apresenta a verdade dos fatos. Por isso, é preciso, antes de qualquer coisa, analisá-lo criticamente e verificar as condições e vantagens que ele pode proporcionar para o ensino e a aprendizagem. Desta forma, cabe ao professor avaliar, conscientemente e com responsabilidade, a qualidade dos livros que utiliza, porque quando expostos a obras pouco estimuladoras, os alunos podem perder o gosto pelos estudos. Além disso, problemas de conteúdo uma vez aprendidos significativamente estão sujeitos a se enraizarem e, se conceitualmente errados, serem de difícil remoção.

Apesar da cautela que se deve ter em relação à abordagem dada aos conteúdos pelos livros didáticos, sabe-se que no ensino brasileiro eles desempenham um papel muito importante; assim, como seria a educação brasileira sem o livro didático? Segundo Freitag et al (1993), sem o livro didático o ensino, simplesmente, ‘desmoronaria’, uma vez que tudo se calca nele: o estabelecimento do trabalho para o ano letivo; a definição das atividades de sala de aula; a realização de tarefas escolares pelos alunos. Afirma que *“Defensores e críticos, políticos e cientistas, professores e alunos são, no momento, unânimes em relação ao livro didático: ele deixa muito a desejar, mas é indispensável em sala de aula”* (Freitag et al, 1993, p. 128).

Para garantir a qualidade dos livros didáticos distribuídos no país, o Ministério da Educação criou o Programa Nacional do Livro Didático. Este programa está, por enquanto, examinando apenas os livros do Ensino Fundamental. Contudo, há uma meta de que para o ano de 2005 já se tenha os resultados da avaliação, também, dos livros do nível médio.

Há um consenso de que os estudos acerca dos livros didáticos deveriam ser intensificados, pois a pesquisa, nesta área, no Brasil ainda não é suficiente. A presente pesquisa visa contribuir neste sentido, investigando como se apresenta o modelo atômico de Bohr em livros de Física do nível médio. Todavia, esse é um assunto que ainda não está presente em muitos livros didáticos, entre eles:

1. Física para o Ensino Médio – Gonçalves e Toscano, 2002.
2. Física – Gualter e André, 2002.
3. Física: Série Novo Ensino Médio – Paraná, 2002.
4. Universo da Física 3 – Sampaio e Calçada, 2001.
5. Física Completa – Bonjorno, 2001.
6. Física: Coleção Novos Tempos – Chiquetto, 2000.
7. Curso de Física – Máximo e Alvarenga, 2000.
8. Os Fundamentos da Física – Ramalho, Nicolau e Toledo, 1999.
9. Física para o Ensino Médio – Paraná, 1999.
10. Física Fundamental – Bonjorno, 1999.
11. Física Básica – Nicolau e Toledo, 1998.
12. Física Clássica – Calçada e Sampaio, 1998.
13. Física e Realidade – Gonçalves e Toscano, 1997.

As tabelas a seguir, Gonçalves (2003), apresentam os livros didáticos de Física mais vendidos no país nos anos de 2000, 2001 e 2002, respectivamente. No entanto, nenhum deles contempla o modelo atômico de Bohr.

2000					
	Livro	Autores	# Volumes	Editora	%
1	Os fundamentos da Física	Ramalho / Nicolau / Toledo	3	Moderna	21,8%
2	Física fundamental	Bonjorno / Regina e Valter	1	FTD	12,5%
3	Física	Beatriz Alvarenga / Máximo	1	Scipione	9,3%
4	Coleção Horizontes	Ivan Gonçalves	1	Ibep/Nacional	5,9%
5	As faces da Física	Wilson Caron / Oswaldo Guimarães	1	Moderna	5,3%
Total					54,8%

2001					
------	--	--	--	--	--

	Livro	Autores	# Volumes	Editora	%
1	Os fundamentos da Física	Ramalho / Nicolau / Toledo	3	Moderna	20,0%
2	Física	Beatriz Alvarenga / Máximo	1	Scipione	10,7%
3	Série Novo ensino médio	Paraná	1	Ática	9,6%
4	Física fundamental	Bonjorno / Regina e Valter	1	FTD	8,0%
5	Física básica	Nicolau / Toledo	1	Atual	7,3%
Total					55,6%

2002					
	Livro	Autores	# Volumes	Editora	%
1	Os fundamentos da Física	Ramalho / Nicolau / Toledo	3	Moderna	16,1%
2	Série Novo ensino médio	Paraná	1	Ática	14,0%
3	Curso de Física	Beatriz Alvarenga / Máximo	3	Scipione	10,0%
4	Física	Bonjorno / Clinton	3	FTD	9,6%
5	Física básica	Nicolau / Toledo	1	Atual	7,9%
Total					57,6%

Desta forma, apesar de se ter considerado apenas o modelo de Bohr na análise, parece claro que estes livros estão desatualizados, pois não consideram um dos importantes tópicos da Física Moderna e Contemporânea.

4.2 – A TEORIA DE BOHR EM LIVROS DO ENSINO MÉDIO¹⁶

Nesta seção faz-se uma análise detalhada da apresentação da teoria de Bohr em cinco livros didáticos de Física do nível médio e em um projeto de ensino, o GREF (Grupo de Reelaboração do Ensino da Física). O critério para escolha da amostra foi, em primeiro lugar, a presença do assunto, o que restringiu bastante as opções. Em segundo, procurou-se investigar obras recentes (últimos sete anos) que fossem, relativamente, conhecidas.

Vários aspectos foram contemplados na investigação, entre eles: o contexto histórico em que o tema está inserido, características gerais do texto (quadros, lembretes), exercícios, ilustrações e a abordagem dada ao assunto, visando identificar uma possível disseminação da concepção empirista.

Para examinar se o contexto histórico em que o tema está inserido nos livros analisados é adequado, considerou-se que o quadro teórico e experimental em que

estavam inseridas as idéias de Bohr era composto pelos estudos de Planck sobre a radiação do corpo negro, pela teoria de Einstein do efeito fotoelétrico, pelas experiências e o modelo atômico de Rutherford e por resultados empíricos sobre os espectros de emissão de vários elementos químicos¹⁷.

4.2.1 – Temas de Física 3 (Bonjorno & Clinton, 1997)

O livro **Temas de Física 3** (Bonjorno e Clinton, 1997) é dividido em quatro unidades: “Eletrostática”, “Eletrodinâmica”, “Eletromagnetismo” e “Física Moderna”. “A teoria da relatividade especial” e “As idéias da física quântica” são os dois capítulos que compõem a última unidade.

O átomo de Bohr é parte da seguinte seqüência de conteúdos, dispostos em apenas cinco páginas: 1. A radiação do corpo negro; 2. A constante de Planck; 3. Efeito fotoelétrico; 4. Dualidade onda-partícula; 5. Princípio da incerteza; 6. Modelo atômico de Bohr; 7. Mecânica quântica.

Ao se avaliar o contexto de apresentação do átomo de Bohr, percebe-se que:

- Não há qualquer referência a resultados empíricos sobre os espectros de elementos químicos. Isto é, não é feita nenhuma menção às séries de Balmer e de Paschen para o espectro do hidrogênio, que já eram conhecidas antes de Bohr propor o seu modelo; o que faz com que a contextualização do assunto seja deficiente.
- A radiação do corpo negro, os estudos de Planck e o efeito fotoelétrico são conteúdos essenciais para a contextualização do átomo de Bohr. No entanto, é a dualidade onda-partícula e o princípio da incerteza que dão seqüência a esses assuntos e não o átomo de Bohr. A presença destes dois tópicos interrompe, aparentemente sem um propósito específico, uma ordem cronológica que, até então, parecia estar sendo seguida pelos autores.

¹⁶ Baseada nas referências (Basso e Peduzzi, 2003a e Basso e Peduzzi, 2003b)

¹⁷ Conforme sugere Peduzzi, 2002.

- O texto não deixa claro qual foi o problema de Bohr ao iniciar o seu estudo, ou seja, o que o levou a desenvolver um programa de pesquisa acerca do átomo.

Com relação à explanação do conteúdo foram denotados alguns aspectos relevantes.

Ao iniciar a abordagem do modelo atômico de Bohr os autores fazem apenas uma rápida menção ao modelo atômico de Rutherford. Ou seja, propõem o estudo do modelo de Bohr sem deixar claro as experiências e o modelo de Rutherford; em seguida, afirmam que Bohr propôs um modelo atômico baseado em ‘dois postulados’:

“o primeiro postulado diz que os elétrons só podem girar ao redor do núcleo em determinadas órbitas e, enquanto permanecerem nessas órbitas não ocorrerá variação energética, isto é, não haverá nem irradiação nem absorção de energia. O segundo postulado estabelece que a energia radiante emitida ou absorvida por um átomo equivale a um número inteiro de quanta, cada um deles com energia hf , sendo f a frequência e h a constante de Planck”. (p.317)

Esta informação, sobre o número de postulados, não está correta, pois foram cinco e não dois os postulados que fizeram parte do núcleo duro do programa de pesquisa de Bohr¹⁸. Portanto, mesmo que a essência dos cinco postulados possa eventualmente estar agrupada em um número menor, para fins didáticos, os autores deveriam ter evitado dizer que foram apenas dois os postulados enunciados por Bohr.

Após estas considerações é apresentada a expressão $hf = E_e - E_i$, onde E_e é a energia da órbita mais externa, de maior energia e E_i a energia da órbita mais interna, de menor energia.

Os autores afirmam que quando um átomo de hidrogênio em seu estado normal absorve um fóton com a quantidade de energia necessária, o seu elétron salta de uma órbita mais interna para uma mais externa. Caracterizam esse caso como um estado excitado. Segundo o livro, *“de acordo com Bohr a energia do fóton somente pode ser absorvida se a sua frequência for igual àquela correspondente à variação de energia*

do átomo, dada por: $f = \frac{E_e - E_i}{h}$ ”.

¹⁸ Seguindo o sentido que Lakatos atribuiu a este termo

Observa-se que não há menção aos estados estacionários; não é apresentada a expressão fundamental para a energia associada a cada estado, nem para os raios das órbitas permitidas para o elétron.

Denota-se ainda, que ao final de cada capítulo do livro os autores sugerem ao aluno a resolução de questões e problemas. No capítulo relativo à Física Moderna isso não ocorre. Assim, cabe indagar sobre os motivos que levaram os autores a alterar uma praxe seguida no restante do livro. Será que isso não estaria refletindo a insuficiência da abordagem dos conteúdos relativos à Física Moderna?

4.2.2 – Física 3 (Gaspar, 2001)

O livro **Física 3** (Gaspar, 2001) é composto por 14 capítulos: “Introdução à eletricidade”, “Campo elétrico”, “Potencial elétrico”, “Potencial elétrico e capacidade”, “Corrente elétrica”, “Resistividade e geradores químicos”, “Circuitos elétricos”, “O campo magnético”, “Campo magnético e corrente elétrica”, “Indução eletromagnética”, “Das ondas eletromagnéticas aos fótons”, “Relatividade”, “Dos raios X aos quarks-I”, “Dos raios X aos quarks-II”. Em sua primeira página, há um destaque ressaltando que o texto está de acordo com as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio.

O capítulo 13, “Dos Raios X aos quarks I”, é o que contempla o estudo sobre o átomo de Bohr. Ele é composto por 11 seções:

1. Introdução
2. Os raios X e a radioatividade
3. Raios catódicos, raios beta e o elétron
4. Radiação térmica
5. O enigma do espectro da radiação térmica
6. O quantum de ação
7. O átomo de Rutherford
8. O espectro do átomo de hidrogênio
9. O átomo de Bohr
10. A experiência de Frank – Hertz
11. A difração dos raios X.

O contexto em que se apresenta o modelo atômico de Bohr está de acordo com aquele considerado como adequado para este estudo: são discutidas as idéias de Planck para a radiação; estudado o espectro de emissão do corpo negro e introduzido o conceito do quantum de radiação. Em seguida, encontram-se o átomo e as experiências de Thomson e Rutherford e é feito um estudo do espectro do átomo de hidrogênio. Ainda, são exibidas as expressões empíricas para as séries espectrais deste elemento e destacado que esse resultado do trabalho empírico foi equivalente à resolução de um quebra cabeça. Na seqüência, o livro traz o modelo atômico de Bohr, mas não deixa explícito qual foi realmente o problema de Bohr ao formular o seu modelo.

No que tange as séries conhecidas antes de 1913, há uma discordância entre o que menciona o autor e o que afirma Lakatos (Lakatos, 1979). Para Lakatos, a série de Lyman foi descoberta em 1914; já Gaspar data esta série de 1908, não deixando claro a sua fonte.

Analisando a estratégia de apresentação dos conteúdos propostos neste capítulo, observa-se uma abordagem diferente da dos demais. Assim, na introdução, o autor enfatiza que será dada prioridade ao processo em que se desenvolveram as idéias e descobertas que revolucionaram a Física no final do século XIX e início do século XX.

Em um dos parágrafos introdutórios, o autor explicita que não havia teoria para explicar os resultados empíricos para as séries que mais tarde foram compreendidas através do modelo atômico de Bohr: *“embora houvesse uma expressão matemática empírica para o espectro do hidrogênio que permitia calcular os valores das diferentes frequências, ou comprimentos de onda correspondentes a cada raia, não havia nenhuma fundamentação teórica que a justificasse”* (p.329).

A hipótese de que há uma relação entre as raias luminosas e as frequências emitidas pelo hidrogênio com sua estrutura interna, é chamada pelo autor de uma espécie de ‘código da natureza’ que Balmer descobriu, mas não entendeu. Por outro lado, afirma que Bohr decifrou esse código utilizando o *quantum* de ação de Planck, o qual sanou as dificuldades do modelo atômico de Rutherford.

Para explicar o raciocínio de Bohr, o autor propõe inicialmente que seja suposto que ‘os elétrons’¹⁹ em um átomo só podem ter órbitas circulares e de qualquer raio. Contudo salienta que, de acordo com a Física Clássica, essas órbitas seriam instáveis. Em seguida, menciona que as raiais dos espectros, **de acordo com a fórmula de Balmer**, estavam associadas a números inteiros, **o que teria permitido a Bohr concluir** que esses números deveriam estar associados às órbitas estáveis ou estados estacionários, nos quais ‘os elétrons’ poderiam permanecer indefinidamente sem perder energia.

As informações contidas no parágrafo acima transmitem a idéia de que Bohr utilizou-se dos resultados de Balmer para determinar as possíveis órbitas para o elétron. Ou seja, a visão empirista é utilizada para desenvolver o conteúdo. Neste caso, o mais aconselhável seria utilizar os postulados para a inserção do assunto.

Para introduzir as expressões ‘fundamentais’ da teoria de Bohr o autor afirma que este se baseou na hipótese mencionada acima e na física clássica, mas não deixa claro em que pontos da Física Clássica. Aqui, o autor poderia ter explicitado que as expressões para r_n e E_n foram obtidas igualando-se a força coulombiana à força centrípeta e partindo do pressuposto de que a massa do núcleo é infinita. Após estas breves considerações, apresenta a equação para os raios das órbitas $r_n = n^2 \frac{e_0 h^2}{p m e^2}$ e ilustra as cinco primeiras órbitas do modelo de Bohr para o átomo de hidrogênio com uma ‘representação esquemática’. Em seguida, escreve a expressão dos níveis de energia E_n que podem ser ocupados pelo elétron $E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m e^4}{8 e_0^2 h^2}$.

O autor destaca que “o sinal da energia é negativo porque a energia em uma órbita n no infinito é nula, como convencionamos no estudo do potencial elétrico, e a carga do elétron é negativa. Assim, no infinito, a energia do elétron atinge seu valor máximo, que é zero. Na órbita mais próxima do núcleo, de ordem $n=1$, a energia do elétron é mínima, pois é negativa” (p.344). Talvez fosse importante deixar mais claro o que significa essa energia negativa, ou seja, que esses valores negativos indicam que o elétron não tem energia suficiente para escapar do átomo. Um gráfico dos níveis de

¹⁹ Na explanação do livro o autor refere-se a mais de um elétron; todavia, como se trata do átomo de hidrogênio acredita-se que seria melhor mencionar que é apenas um elétron.

energia de um elétron no átomo de hidrogênio em função das órbitas n é apresentado e comentado.

Na seqüência, é exibido o que o autor chama de ‘segundo postulado de Bohr’ dividido em duas partes: a primeira afirma que o elétron só pode ocupar órbitas bem determinadas e permanecer nelas sem emitir radiação; a segunda parte explica os saltos quânticos através da absorção ou emissão de fótons de energia $E = hf$, onde a diferença de níveis de energia entre dois estados estacionários é dado pela expressão $E_{\text{final}} - E_{\text{inicial}} = hf$. Através de figuras, demonstra o mecanismo dessas transições e relaciona a mudança de órbitas com as raias H_{α} e H_{β} do espectro de hidrogênio. Talvez esse postulado pudesse ser mais bem aproveitado se fosse apresentado antes das expressões para a energia e para os raios das órbitas. Isto possivelmente evitaria que a visão empirista fosse transmitida pelo texto.

Em um ‘boxe’ é explicita um pouco da história da vida de Bohr e suas relações com outros físicos.

Um outro aspecto a ser mencionado, é sobre o número dos postulados enunciados por Bohr. Em nota de rodapé, denominada pelo autor **Aprofundamento**, é dito que Bohr fundamentou sua teoria em dois postulados. No entanto, sabe-se que foram cinco os postulados formulados por Bohr. O livro apresenta-os na seguinte forma:

“1. Que o equilíbrio dinâmico dos sistemas nos estados estacionários pode ser discutido com o auxílio da mecânica clássica; enquanto a passagem do sistema entre estados estacionários diferentes não pode ser tratada da mesma forma. 2. Que o segundo processo é seguido pela emissão de uma radiação homogênea, para a qual a relação entre a frequência e o total da energia emitida é dada pela teoria de Planck” (p.345).

Nesta mesma nota, é comentado que Bohr se apoiou na Física clássica para determinar os raios das órbitas ou da energia do elétron em cada órbita, mas postulava a descontinuidade dos valores dos raios e das energias, sendo que essa contradição causou espanto na comunidade científica da época.

No último parágrafo, o autor conclui sua explanação destacando o mérito da teoria de Bohr, que solucionou as dificuldades do modelo atômico de Rutherford e ajustou a descontinuidade dos espectros expressa pela fórmula de Balmer. Ressalta que

“Bohr chegou a uma genial solução para o modelo atômico de Rutherford: ajustou com extraordinária simplicidade a descontinuidade dos espectros, expressa pela fórmula de Balmer, ao quantum de ação de Planck, oriundo da radiação do corpo negro, e ao quantum de luz de Einstein, do efeito fotoelétrico. Um resultado extraordinário para um procedimento teórico tão ambíguo!” (p.346)

Para a fixação dos conteúdos relativos ao átomo de Bohr, são propostas duas questões e cinco problemas. No espaço destinado às atividades experimentais, presente em todos os capítulos do livro, são propostas duas tarefas: uma delas se refere à utilização do radiômetro e a outra denomina-se “como ver o invisível”. Em cada uma delas, o autor explica o princípio de funcionamento e informa onde podem ser encontrados os equipamentos necessários para sua realização. Isso facilita o acesso a alunos e professores interessados em desenvolver tais atividades.

4.2.3 – Tópicos de Física 3 (Gualter, Newton & Helou, 2001)

No livro **Tópicos de Física 3** (Gualter, Newton e Helou, 2001), os assuntos são divididos em quatro grandes unidades: “Eletrostática”, “Eletrodinâmica”, “Eletromagnetismo”, e “Complementos”. O átomo de Bohr é estudado na primeira das quatro seções que compõem a última unidade:

1. Física Moderna: noções de Física quântica
2. Física Moderna: noções de teoria da relatividade
3. Física Moderna: comportamento ondulatório da matéria
4. Análise dimensional

A seção “Física Moderna: noções de Física quântica” tem a seguinte estrutura:

1. Introdução
2. Modelo ondulatório para radiações eletromagnéticas
3. Modelo quântico para radiações eletromagnéticas (Introdução; Observação e primeira interpretação do efeito fotoelétrico; Investigação do efeito fotoelétrico; Explicação do efeito fotoelétrico; Equação do efeito fotoelétrico; O elétron-volt)
4. A dualidade da luz (Células fotoelétricas; Célula fotoemissiva; Célula fotocondutiva).

5. O átomo de Bohr e as transições eletrônicas (Introdução; O modelo atômico de Bohr; Transições eletrônicas causadas pela incidência de radiação eletromagnética; Outras causas das transições eletrônicas; Análise espectral).

No livro há ausência de alguns conteúdos considerados relevantes para a contextualização histórica do assunto. Não são feitas referências aos estudos de Planck para a radiação do corpo negro nem aos resultados empíricos das séries de Balmer e Paschen.

Os postulados de Bohr são explicitados no decorrer do texto de forma clara e com desenhos ilustrativos.

Este livro se diferencia dos outros dois anteriormente analisados por trazer vários problemas sobre o conteúdo discutido, sendo que estes parecem estar de acordo com a abordagem dada ao assunto pelos autores. Os seis problemas sugeridos se destacam por seu caráter analítico, ou seja, não se constituem em meras repetições, mas exigem do aluno raciocínio e compreensão do tema para sua resolução.

Outra característica do livro refere-se ao estudo detalhado de como ocorrem as transições eletrônicas. Os autores fazem analogia entre os estados estacionários e os degraus de uma escada, utilizando-se de imagens para tais representações. Além disso, em notas de rodapé há exemplos de aplicação de tais conteúdos e comentários a respeito do assunto. São utilizadas figuras para explicar o fenômeno e feito um estudo bem detalhado dos possíveis casos de transição de um elétron.

O livro inicia a apresentação do conteúdo do modelo atômico de Bohr explicando e ilustrando com uma figura os níveis de energia de um elétron no átomo. Os autores explicitam que devido a não se ter acesso visual ao átomo, este sempre foi estudado por meio de modelos que ao apresentarem falhas foram aperfeiçoados ou até substituídos. Descrevem o átomo do modelo proposto por Rutherford e suas limitações na explicação de alguns fatos.

As inadequações do modelo de Rutherford para o átomo são explicadas detalhadamente, deixando claro a necessidade de se criar um novo modelo atômico. A

partir desse contexto os autores iniciam a abordagem da teoria de Bohr destacando que esta se baseou em idéias quânticas.

Na seqüência, é apresentado que Bohr postulou que para a eletrosfera de um átomo manter-se estável, os elétrons desse átomo só poderiam ter determinados níveis de energia denominados estados estacionários ou estados quânticos. Nesses estados o átomo não emite radiação mantendo sua eletrosfera estável. Há referências à nomenclatura e explicações sobre estado fundamental, estados estacionários e estados excitados. É destacado que para o elétron só são permitidos estados estacionários bem determinados.

Em seguida, é salientado que para o átomo de hidrogênio, que possui um único elétron, os níveis de energia possíveis são dados pela expressão $E_n = -13,6/n^2$ eV decorrente da teoria de Bohr. Segundo os autores, o valor negativo da energia “*significa que o elétron precisa receber energia para chegar ao nível zero, situação em que ele está deixando de interagir com o núcleo, ou seja, desvinculando-se do átomo*” (p.415).

Observa-se, novamente, que a expressão para os valores de energia é inserida de forma pouco satisfatória; os autores não dão nenhuma informação de como ela foi obtida. Além disso, não é apresentada a expressão para os raios das órbitas permitidas para o elétron.

Ainda, é exposto que “*Bohr também postulou que todo átomo ao passar de um estado estacionário para outro, emite ou absorve um quantum de energia (hf) igual à diferença entre as energias correspondentes aos dois estados*” (p.415). Exemplifica que para o elétron que ‘salta’ do nível de energia E_3 para o nível de energia E_2 , $hf = E_3 - E_2$.

Através de figuras, é demonstrado o processo em que o elétron passa de um nível de maior energia para um nível menor e vice-versa. Os autores justificam que “*esse fato também não pode ser explicado pela teoria de Maxwell, pois, segundo ela, a frequência da radiação emitida está relacionada com a frequência do movimento do elétron, o que não é verdade, já que a frequência da radiação emitida está relacionada apenas com a diferença de energias entre os estados inicial e final*” (p.415). Em ‘nota’, os autores colocam as limitações do modelo atômico de Bohr e a necessidade de uma nova abordagem para o átomo.

4.2.4 – Física 3 (Cabral & Lago, 2002)

O livro **Física 3** (Cabral e Lago, 2002) estrutura os conteúdos em quatro unidades: “Eletrostática”, “Circuitos elétricos”, “Magnetismo” e “Interação da radiação com a matéria”. Esta última unidade é constituída por dois capítulos: “Ondas eletromagnéticas” e “Física moderna e física atual”.

O capítulo sobre Física moderna e atual, onde se encontra o átomo de Bohr, é composto por cinco seções e um tópico especial:

Seção 1: O surgimento da teoria quântica

- A radiação do corpo negro
- A situação experimental (O modelo dos osciladores e a solução de Planck)

Seção 2: O efeito fotoelétrico

Seção 3: O espectro dos elementos

- A explicação dos espectros

Seção 4: Orbitais e a teoria quântica

- O início da teoria quântica para o átomo: o modelo de Bohr
- A teoria quântica (A luz é onda ou partícula? O elétron é onda ou partícula?)

Seção 5: Teoria da Relatividade

- A necessidade de uma nova teoria
- A teoria da relatividade (O éter e o experimento de Michelson-Morley)
- Simultaneidade
- A medida do tempo
- Matéria e energia

Tópico Especial: O nosso universo

- A busca pela resposta definitiva
- O universo em expansão (O Big Bang; Formam-se as galáxias; A formação de estrelas e planetas; As estrelas evoluem; A morte do nosso universo)
- Tópico avançado: O Laser

Após mencionar os pré-requisitos ao estudo deste capítulo, os autores listam os seguintes objetivos:

- Descrever a situação da física no final do século XIX;

- Descrever os experimentos precursores da Teoria Quântica: raias espectrais, radiação do corpo negro e efeito fotoelétrico;
- Descrever o modelo atômico de Rutherford e o de Bohr;
- Entender o conceito de quantização da energia;
- Usar a teoria quântica para explicar raias espectrais, radiação do corpo negro e efeito fotoelétrico;
- Compreender as limitações da mecânica Newtoniana;
- Descrever os experimentos que levaram à Teoria da Relatividade;
- Relacionar os argumentos que demonstram a impossibilidade da existência do éter;
- Enunciar os princípios básicos da Teoria da Relatividade;
- Enumerar aplicações tecnológicas advindas da Teoria da Relatividade e da Mecânica Quântica.

Entre os livros analisados, este é o único que propõe objetivos a serem atingidos com o estudo. Esta é uma característica importante, pois eles propiciam uma orientação tanto para o professor quanto para o aluno no desenvolvimento das atividades. Além disso, os objetivos podem servir de parâmetro para fins de avaliação.

Analisando a seqüência em que os conteúdos estão distribuídos, percebe-se que o contexto em que se encontra inserido o átomo de Bohr está basicamente de acordo com o sugerido e adotado como referencial para a presente análise.

Na explanação dos conteúdos, os autores utilizam como estratégia o uso de “quadros” com fins específicos de exemplificar a aplicação do assunto (“Isto tem utilidade?”), enfatizar aspectos essenciais do tema (“Lembre-se” e “Atenção”) e destacar personagens que estiveram presentes no desenvolvimento dos tópicos.

Na seção 3, há um estudo sobre os espectros onde são explicadas, através das séries, as cores emitidas por uma lâmpada de hidrogênio. Nesta discussão, é apresentada a expressão para as séries de Balmer. Após o estudo das séries, os autores explicitam que estas mais tarde foram *elegantemente explicadas pelo físico dinamarquês Niels Bohr* (p.503) e introduzem os postulados do modelo atômico de Bohr interligando os assuntos.

Como os postulados compõem a parte essencial do estudo de Bohr, eles deveriam fazer parte da seção específica sobre o átomo de Bohr explorada na seção seguinte, e não estarem expostos no estudo dos espectros. Esta abordagem e a seqüência em que estão inseridos os postulados permite um questionamento: será que os autores tentaram explicar os resultados da experiência através do uso da teoria, ou seja, por meio dos postulados de Bohr?

Em virtude da disposição dos acontecimentos ter seguido a ordem cronológica em que ocorreram e de alguns aspectos teóricos estarem dispostos em um local inoportuno, tem-se um indicativo de que talvez o texto esteja induzindo uma visão empirista da ciência, pois parece que a teoria está posta como necessária para explicar resultados experimentais já conhecidos.

Para tentar esclarecer se a visão empirista está realmente sendo transmitida pelos autores, procurou-se analisar outro conteúdo de Física Moderna presente no livro, mais precisamente, qual a relação existente entre o experimento de Michelson-Morley e a Teoria da Relatividade Especial?

Em um dos objetivos (*Descrever os experimentos que levaram à Teoria da Relatividade*, p.493), os autores enfatizam que os resultados experimentais obtidos por Michelson-Morley influenciaram o surgimento da teoria da relatividade, no entanto, se estes experimentos forem considerados como ponto de partida para o desenvolvimento da relatividade especial, estará caracterizada a visão empirista-indutivista da ciência.

A teoria da relatividade e o experimento de Michelson – Morley são tratados no livro de forma clara, porém, há novamente indícios da concepção empirista. Assim, “*as previsões da teoria da relatividade concordavam com todos os experimentos realizados, em especial com os experimentos que buscavam, sem sucesso, comprovar a existência do éter como o de Michelson – Morley*” (p.511). Após toda a explanação sobre o experimento de Michelson-Morley, os autores concluem dizendo que: “*as portas do caminho para a formulação da teoria da relatividade estavam abertas*” (p.512).

Desse modo, parece claro, ao menos nesses assuntos, a veiculação da visão empirista-indutivista da ciência pelos autores.

Além disso, ainda no estudo dos espectros, o livro apresenta a expressão de Planck para a energia e justifica que pela medida dos espectros e conhecendo as frequências das raias foi possível determinar a diferença de energia entre dois níveis.

Na seqüência ressalta que “*o modelo de Bohr mostrava que as possíveis energias do elétron poderiam ser calculadas por meio da expressão* (p. 503),

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8e_0^2 h^2} = -\frac{13,6}{n^2} eV ”$$

É conveniente salientar que esta expressão está definida em um local inadequado, pois se trata de uma informação fundamental do modelo de Bohr inserida no estudo dos espectros.

O livro conclui o estudo dos espectros destacando que através do cálculo da diferença de energia entre dois níveis foi possível determinar a frequência de onda emitida e, assim, explicar o espectro de hidrogênio.

Após essas considerações inicia-se a seção específica que contém o modelo atômico de Bohr. Nela é feita, inicialmente, uma abordagem superficial do modelo de Rutherford e apresentado que a expressão para a velocidade de um elétron em órbita seria obtida através da equação que iguala a força elétrica à força centrípeta. Os autores expõem que apesar de simples e coerente com a estrutura atômica, o modelo de Rutherford apresentava uma falha incorrigível, de acordo com a teoria de Maxwell.

Em seguida, os autores expressam que “*Bohr, em 1913, propôs uma solução engenhosa para este problema. Usando o conceito de quantização, proposto por Einstein para o efeito fotoelétrico e por Planck para a radiação do corpo negro (osciladores), estipulou que a energia dos elétrons em suas órbitas em torno do núcleo também era quantizada*” (p.505).

A seguir, é mencionado que a passagem de um nível de energia para o outro ocorre com a emissão ou a absorção de um *quantum* de energia. E também, que Bohr calculou a energia de cada nível do átomo de hidrogênio e obteve um valor de $-13,6/n^2 eV$.

Observa-se aqui, que os autores não explicam de onde provém este resultado para a expressão da energia, nem tampouco, que variáveis representa e como foi obtido o valor $-13,6$. O valor negativo da energia é interpretado como um indicativo de que o elétron está preso ao núcleo. A seção é concluída com a afirmação de que o espectro do átomo de hidrogênio é corretamente explicado pelo modelo de Bohr.

No final do capítulo, os autores sugerem uma atividade experimental, denominada “Testando a Física”, onde é apresentada a construção de um espectrômetro que serve para observar e medir as cores presentes em um feixe de luz, construído com material de fácil acesso para professores e estudantes. Na seqüência, são propostos problemas e questões. Os relacionados com o átomo de Bohr, em particular, são de nível acessível e compatível com a explanação teórica desenvolvida.

4.2.5 – Física: ciência e tecnologia (Torres et al, 2001)

O livro “Física: ciência e tecnologia” (Torres et al., 2001) é dividido em cinco grandes unidades:

1. Fundamentos da Ciência Física
2. Força e Energia
3. Ondas – Som e Luz
4. Eletricidade e Recursos Energéticos
5. Física Moderna

A unidade sobre Física Moderna é composta por três capítulos: Relatividade Especial, Física Quântica e Física Nuclear. O capítulo que trata da Física Quântica apresenta a seguinte estrutura:

1. Introdução
2. A radiação dos corpos e a teoria quântica de Planck
3. Efeito fotoelétrico
4. O modelo atômico de Bohr
5. O átomo de hidrogênio
6. A dualidade onda-partícula
7. O princípio da Incerteza

O contexto em que está inserido o modelo atômico de Bohr não está totalmente de acordo com o considerado adequado pela pesquisa: são apresentados, com uma

ampla abordagem, os estudos de Planck e a teoria do efeito fotoelétrico e, com um menor grau de detalhamento, as experiências e o modelo atômico de Rutherford. Contudo, não há nenhuma menção às expressões empíricas para as séries de Balmer e Paschen.

O livro inicia a seção sobre o ‘modelo atômico de Bohr’ ressaltando o modelo de J. J. Thomson e suas características. Em seguida, expõe que Rutherford e seus alunos, Geiger e Marsden, realizaram um experimento que ‘derrubou’ a teoria de Thomson e levou à elaboração de um novo modelo. Após descrever superficialmente essa experiência e os seus resultados, apresenta o modelo atômico de Rutherford e suas peculiaridades, ressaltando que nesta proposta, de acordo com a teoria de Maxwell, havia um sério problema: ‘os elétrons deveriam cair sobre o núcleo, provocando o colapso da matéria!’.

Em seguida, os autores mencionam que, para escapar da teoria da contínua emissão de radiação pelos átomos, Niels Bohr, em 1913, admitiu que a teoria de Maxwell não se aplicaria a sistemas em escala atômica. Utilizando a idéia da quantização de Planck, Bohr postulou que os elétrons se encontravam confinados em certos níveis de energia, sem emitir radiação. Esses níveis foram chamados de estados estacionários. Salientam ainda que, ao passar de um nível de energia ‘inferior’ para um outro mais ‘elevado’, um elétron absorve energia do meio externo e, ao retornar, ele emite a mesma energia absorvida na forma de radiação.

Na seção que trata do ‘átomo de hidrogênio’, os autores, inicialmente, explicitam que o hidrogênio é o mais simples átomo que se conhece, entretanto, o que se sabe sobre ele pode ser estendido a íons com um único elétron, como os He^+ e Li^{2+} . Ressaltam que a física que descreve o átomo de hidrogênio pode, com alguns aperfeiçoamentos, ser usada para átomos mais complexos.

Para explicar o espectro de emissão, o livro apresenta um exemplo no qual menciona o processo de funcionamento das lâmpadas utilizadas na iluminação pública (lâmpadas a vapor de mercúrio e vapor de sódio) e de luminosos de propaganda (neons). Salienta que ao analisar a luz emitida em um espectroscópio, observa-se uma série de linhas discretas e bem definidas, cada qual correspondendo a uma cor, caracterizada por um comprimento de onda específico. Esclarece, ainda, que o espectro de dois elementos nunca será igual; isso faz com que a espectroscopia se torne um excelente método para a identificação dos componentes de uma substância gasosa.

Na seqüência, os autores afirmam que o modelo atômico de Bohr não só explicava a existência das raias espectrais do hidrogênio, mas também permitia calcular seus comprimentos de onda com uma precisão de 0,02%. No entanto, elucidam que, apesar do sucesso para o átomo de hidrogênio, o modelo atômico de Bohr falhava na descrição de átomos mais complexos. Por outro lado, salientam que ele foi o elo de ligação entre a velha teoria quântica (1900 até cerca de 1925) e a nova teoria quântica, mais conhecida como mecânica quântica.

A seguir, o livro apresenta as hipóteses básicas, para o átomo de hidrogênio:

1. O elétron move-se em órbitas circulares em torno do próton sob influência da força de atração elétrica, que é força centrípeta responsável pelo movimento circular do elétron.
2. Apenas certas órbitas estáveis são permitidas ao elétron. Nessas órbitas o átomo não irradia energia. Assim, a energia total do átomo é conservada e a Física Clássica pode ser usada para descrever o movimento do elétron.
3. Ao passar de um estado estacionário para outro, o átomo absorve ou emite radiação. A energia do fóton absorvido ou emitido será igual à diferença de energias dos níveis envolvidos. Portanto, a frequência da radiação absorvida ou emitida será igual à do fóton envolvido na transição.
4. As órbitas permitidas ao elétron são aquelas nas quais o momento angular orbital (L) do elétron é um múltiplo inteiro de \hbar , onde $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ e $L = n\hbar$ para $n=1,2,3\dots$. Como o momento angular L é o torque da quantidade de movimento tem-se, para um movimento circular, $L = mvr$ e $mvr = n\hbar$.

Os autores asseveram que com essas quatro hipóteses Bohr calculou os possíveis níveis de energia e os correspondentes comprimentos de onda associados ao átomo de hidrogênio, obtendo ‘magnífica concordância com a experiência’ (Aqui, os autores não deixam claro de que experiência estão falando, mas parece que se referem aos espectros). Após essa explanação, calculam os raios das órbitas permitidas e suas respectivas energias, de acordo com o modelo atômico de Bohr.

Iniciam a dedução das expressões fundamentais mostrando que a força de atração elétrica entre o próton e o elétron é igual à força centrípeta. Depois, utilizando a energia cinética e o quarto postulado, encontram a expressão para a velocidade e para os

raios das órbitas permitidas. Em seguida, apresentam uma ilustração das três primeiras órbitas estacionárias para o átomo de hidrogênio.

Na seqüência, o livro explicita a fórmula para a energia potencial elétrica de um sistema de duas cargas e calcula a energia mecânica total do elétron no n -ésimo estado estacionário. Substituindo o valor do raio já calculado, obtém o valor para o n -ésimo nível de energia e a fórmula de Bohr para os possíveis estados estacionários para o átomo de hidrogênio. Como ilustração, mostra alguns níveis de energia permitidos para o hidrogênio.

Após essas considerações, o livro apresenta um exemplo no qual propõe calcular a energia, frequência, e o comprimento de onda de um fóton emitido pelo átomo de hidrogênio, quando este passa do primeiro estado estacionário excitado, $n=2$, para o estado fundamental, $n=1$. Para fixação, sugere cinco exercícios.

Este livro discute o assunto de uma maneira diferenciada, pois além de apresentar de forma clara o problema e os postulados de Bohr, também deduz as principais expressões que fazem parte deste modelo atômico, de acordo com o nível de ensino a que se dispõe. No entanto, apresenta quatro ao invés de cinco postulados.

Outro ponto que se destaca no livro é que, primeiramente, ele faz uma pequena explanação sobre os modelos atômicos de Thomson e Rutherford, introduzindo a necessidade de um novo modelo atômico. E, depois, trata separadamente o átomo de hidrogênio de acordo com o modelo de Bohr. Ainda, é interessante salientar que, para introduzir os espectros, os autores utilizam exemplos do cotidiano, como o funcionamento das lâmpadas e dos luminosos de propaganda, para facilitar o entendimento e despertar a atenção dos alunos.

4.2.6 – Física 2 (GREF, 1998)

A obra “Física 2: física térmica/óptica” do Grupo de Reelaboração do Ensino de Física (GREF, 1998) está dividida em:

1. Física Térmica

Parte 1 – Substâncias, propriedades e processos térmicos

Parte 2 – Máquinas térmicas e processos naturais

2. Óptica

Parte 1 – Processos Luminosos: interação luz-matéria

Parte 2 – Sistemas ópticos que possibilitam a visão das coisas

O segmento do livro sobre óptica, mais especificamente a parte 1, traz uma subseção que se intitula “Modelo de matéria baseado na Física Quântica”. Nela, são apresentadas, de forma sucinta, em aproximadamente três páginas, informações sobre a constituição dos átomos, níveis de energia, estados energéticos dos elétrons, saltos quânticos, representação dos níveis de energia, interação luz-matéria, processo de emissão e absorção de fótons. Segundo os autores, essa abordagem proporciona o estudo dos processos luminosos de um ponto de vista microscópico e permite que seja destacado o aspecto dual da luz (onda-partícula).

Além disso, nesse mesmo volume do GREF, os autores apresentam, em um apêndice denominado “apêndice 5”, uma explicação para o átomo de hidrogênio de acordo com o modelo de Bohr. Nessa explanação, inicialmente, o livro faz referência ao modelo de Rutherford e salienta sua incompatibilidade segundo a teoria eletromagnética clássica. Destaca que a teoria de Rutherford colocava em questão a estabilidade do átomo. Em seguida, menciona que em 1913 Niels Bohr - incorporando concepções quânticas ao modelo de Rutherford, admitindo que cada átomo possui uma série de valores bem determinados que correspondem a órbitas definidas nas quais os elétrons não irradiam energia e, supondo que a quantidade de momento angular dos elétrons em suas órbitas deve assumir valores bem definidos - mostrou que essas idéias podiam ser aplicadas ao átomo de hidrogênio e proporcionavam, também, a interpretação das séries espectroscópicas obtidas por Balmer e outros, até então não explicadas.

Na seqüência, o livro explicita que, através dos pressupostos acima mencionados e de equações da Física Clássica (que não foram discriminadas, nem apresentadas), Bohr calculou o valor da menor órbita possível, $R_1 = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m}$, e da energia a ela associada: $E_1 = 13,6 \text{ eV}$ (aqui, o livro não apresenta o sinal negativo no valor da energia). Para o cálculo de outros raios de órbitas e energias, apresenta as relações $R_n = n^2 R_1$ e $E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$, que trazem incorporada a idéia de quantização das órbitas. Destaca que $n = 1, 2, 3 \dots$ representa os diversos níveis de energia e o sinal negativo indica que o elétron não tem energia suficiente para escapar do átomo; “à medida que n cresce, o valor E_n aproxima-se de zero, ou seja, o elétron fica cada vez menos preso ao átomo, no limite, quando $n \rightarrow \infty$, $E_\infty = 0$ ” (GREF, 1998, p.338).

É importante destacar que não foi encontrado, em nenhuma parte do texto, algo que remeta o leitor a este apêndice.

Por outro lado, no volume 3 desta mesma coleção (“Física 3: eletromagnetismo”; GREF, 2000), também há informações referentes ao modelo atômico de Bohr. Segundo os autores, nesta abordagem são discutidos apenas aspectos essenciais do modelo do átomo para o estudo dos semicondutores. Além disso, ressaltam que no texto sobre óptica esse mesmo modelo foi discutido com o intuito de interpretar fisicamente os processos de produção e absorção da luz.

Nesta explanação, novamente, o livro expõe sobre o átomo, camadas eletrônicas, níveis de energia, estados nos quais o elétron pode se encontrar de acordo com o modelo de Bohr. Ainda, menciona sobre saltos quânticos, emissão e absorção de fótons na mudança de estados e apresenta um diagrama de níveis de energia para o átomo de hidrogênio. Em seguida, passa a considerar a forma como o elétron pode ser representado precisamente através de quatro números quânticos e destaca que sua distribuição obedece ao Princípio de Exclusão de Pauli. Para finalizar, exemplifica aplicando este princípio ao átomo de carbono.

Como se observa, a teoria de Bohr, no GREF, é apresentada em um contexto diferente das demais obras analisadas, pois o enfoque dado a este assunto, primeiramente, está direcionado para o estudo dos processos luminosos e depois para uma introdução aos materiais semicondutores. Assim, essa abordagem diferenciada, que não faz nenhum vínculo específico do tema com os seus aspectos históricos, não incorre em risco de disseminar uma concepção empirista da ciência.

Contudo, na ‘Apresentação Geral da Proposta’, no início do livro, os autores destacam que há outros pontos essenciais que não foram desenvolvidos no texto, como os históricos da evolução da ciência e do sistema produtivo. Ressaltam ainda, que desenvolver tais assuntos seria tão importante quanto aperfeiçoar aqueles já tratados, sempre que estes se revelarem inadequados ou insuficientes para os objetivos estabelecidos. Esta ressalva feita pelo livro merece consideração, uma vez que explicita que o material não visa ter autonomia e não é definitivo, podendo, portanto, ser aperfeiçoado ou complementado quando necessário.

4.3 – INTERAGINDO COM AUTORES DE LIVROS DO ENSINO MÉDIO²⁰

Apresenta-se agora, as perguntas encaminhadas aos autores de duas obras analisadas na seção anterior e as respectivas respostas, comentadas²¹.

4.3.1 – A interação com Gaspar

QUESTÃO 1- Esta questão está relacionada ao ‘boxe’ **Aprofundamento** da página 345 do livro **Física 3** (Gaspar, 2001).

Os postulados formulados por Bohr ao propor o seu estudo para o átomo fundamentaram todo o desenvolvimento de seu modelo. Neles estão as principais considerações feitas em sua teoria, ou seja, eles são o *núcleo* de seu programa de pesquisa²².

Tendo em vista a importância dos postulados no desenvolvimento do modelo atômico de Bohr, pergunta-se: é conveniente colocar os postulados e ‘hipóteses contraditórias de Bohr’ fora do corpo do texto e, ainda, considerá-los como um aprofundamento do assunto? A denominação **Aprofundamento** é devido a esta parte do conteúdo ser considerada inacessível ao aluno do Ensino Médio ou não interessar diretamente a este nível? Que sugestão poderia ser dada ao aluno para a abordagem dos ‘boxes’ (**História, Aprofundamento**): eles devem ser estudados preferencialmente na sequência em que foram apresentados no texto ou apenas ao final do estudo?

Resposta 1 - O autor inicia afirmando que a origem e o critério para a utilização dos quadros ou boxes foi a fluência do texto. Destaca que muitas vezes as “*explicações das explicações tornavam o texto confuso ou muito difícil de redigir*”, o que o fez optar por sua desvinculação. Com essa separação ele acredita que a leitura e o entendimento dos textos, em geral, tornam-se mais fáceis, uma vez que podem ser feitas em dois níveis de complexidade.

À denominação **Aprofundamento** o autor expõe que esta significa exatamente uma abordagem “*um pouco mais aprofundada*”, mas que não visa restrições quanto ao

²⁰ Baseado em Basso e Peduzzi, 2003b.

²¹ Embora se tenha analisado seis obras, optou-se por interagir com apenas dois autores, pela importância que isso teve em um dado momento da pesquisa (já que o acesso a um terceiro foi visivelmente bloqueado pela editora).

nível de ensino de que está tratando. Enfatiza que o objetivo é proporcionar ao aluno a oportunidade de realizar duas ou mais leituras.

Alerta ainda para um aspecto que passou despercebido na hora da elaboração das questões: o fato de que, no começo do livro há orientação específica em relação à forma com que os quadros deveriam ser abordados: *“Aliás, no início do livro há duas páginas que dão essa orientação, ou seja, sugerem que o aluno leia primeiro todo o texto do capítulo e depois retorne a ele incluindo alguns quadros nessa releitura”*.

Quanto à escolha dos quadros para a releitura, indica aos alunos que consultem o seu professor. *“Acho que o professor é quem sabe melhor o que o aluno pode entender e quem pode avaliar melhor a adequação dessas leituras às suas aulas”*.

QUESTÃO 2 - O comentário a seguir refere-se ao ‘boxe’ denominado **História**, também localizado na página 345 do livro **Física 3**.

Sabe-se, através de inúmeros estudos, que são muitas as discussões relacionadas à pertinência ou não da utilização didática da história da ciência no Ensino de Ciências. Há pesquisadores que defendem a sua utilização e acreditam que ela realmente contribui para a construção do conhecimento científico. No entanto, muitos se posicionam contrários, alegando os mais diversos motivos. Zanetic (1989)²³ examina bem essa questão. Entre outras coisas, destaca que em textos didáticos de disciplinas introdutórias de cursos superiores e nos destinados ao Ensino Médio têm-se quase sempre ‘arremedos de história’, os quais classifica como sendo: seqüências cronológicas de datas de grandes invenções e descobertas; datas de nascimento e morte de personagens envolvidos nos acontecimentos e ilustrações representando os personagens e seus feitos. Sendo assim, não seria melhor dar outra designação ao conteúdo proposto nesse ‘boxe’, tendo em vista que ele não apresenta informações necessárias para se considerar como uma história adequada - que auxilie na aprendizagem, motive e estimule o aluno a buscar novas informações? Não seria mais apropriado chamá-lo de ‘curiosidades’, ‘saiba que’, ou ‘um pouco da vida de Bohr’, ou qualquer outra coisa que não fosse **História**?

²² Lakatos, 1979.

²³ Zanetic, J. **Física Também é Cultura**. São Paulo: USP, Tese de Doutorado, 1989.

Resposta 2 - Na resposta a essa questão o autor inicialmente esclarece que não compartilha de receios de pesquisadores quanto à qualidade da história apresentada nos livros textos. Afirma ser adepto de uma pedagogia vygotskyana na qual “*não há informações contraproducentes, desde que tenham pertinência*”.

Elucida ainda que não vê “*mal algum*” em apresentar apenas o lugar e data de nascimento de um personagem, embora afirme não ter feito isso. Salienta que,

“mesmo essa informação pode ser útil ao aluno e/ou professor, pois dá a eles a oportunidade de localizar o cientista num contexto histórico e geográfico, o que sem ela não seria possível (nossos professores são extremamente carentes de recursos e informações – tenho certeza que eles apreciam até mesmo essas pobres informações)”.

Quanto ao questionamento referente ao nome do quadro **História**, o autor transcreve quatro dos quinze significados do verbete história do Dicionário Houaiss:

7. conjunto de dados concernentes a um indivíduo ou coisa - Ex: a h. [história] de uma família; 8. caso, aventura ou problema partícula - Ex: a h. de um divórcio; 9. relacionamento (p.ex.,o amoroso) - Ex: durou anos a h. entre os dois; 10. seqüência de ações, de acontecimentos reais ou imaginários; enredo, trama - Ex: a h. do filme envolve o espectador.

Afirmando que a pergunta feita restringe muito o sentido conferido ao termo história, destaca que “*história é também o que eu coloquei nos quadros, dados que me pareceram relevantes para a compreensão do conceito ou do contexto em que ele foi formulado*”. A história apresentada pelo quadro do livro é a seguinte:

Niels Bohr

O físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1965) era filho de um eminente fisiologista e da filha de um rico banqueiro judeu. Niels começou a se interessar pela Física ainda criança, estimulado pelo pai. Com vinte anos de idade ganhou um prêmio de pesquisa da Academia Dinamarquesa de Ciência e, aos 26 anos, depois do seu doutoramento foi trabalhar na Inglaterra com J.J. Thomson no laboratório Cavendish, em Londres. Depois de alguns meses mudou-se para Manchester, onde ficou quatro anos trabalhando com Rutherford.

Em 1913 propôs o seu modelo atômico, resolvendo as dificuldades do modelo atômico de Rutherford. Em 1919, voltou à Dinamarca como professor de física teórica. Como Rutherford, Bohr também formou uma equipe de físicos extraordinários. E, como ocorreu com Planck e Einstein, as idéias revolucionárias de Bohr demoraram a ser aceitas e reconhecidas, tanto que o Prêmio Nobel só lhe foi concedido em 1922.

Na seqüência, o autor deixa evidente que não acredita que se possa ensinar Física a partir da história, mas que o conhecimento do contexto e de algumas

particularidades da vida do cientista ajudam a compreender a Física. De qualquer modo, o significado do termo história, configurado na pergunta, é claramente diferente daquele que lhe confere o autor.

QUESTÃO 3 - O questionamento a seguir refere-se ao terceiro parágrafo da página 344 do livro **Física 3**.

Segundo Lakatos (1979)²⁴, o problema básico de Bohr era explicar o *‘enigma de como os átomos de Rutherford podiam permanecer estáveis’*. No entanto, alerta para o fato de que como as séries de Balmer e Paschen já eram conhecidas antes de 1913, alguns historiadores apresentarem a história como um exemplo de *‘ascensão indutiva baconiana’*, constituída das seguintes etapas: 1. O caos das linhas do espectro, 2. A lei empírica de Balmer e 3. A explicação teórica de Bohr.

Jammer, citado em Lakatos (1979), afirma que Bohr não ouvira falar nas fórmulas de Balmer e Paschen antes de escrever a primeira versão de seu trabalho. Além disso, Lakatos complementa que *“o progresso da ciência pouco se teria atrasado se nos faltassem os louváveis ensaios do engenhoso mestre-escola suíço: a linha especulativa da ciência, levada adiante pelas ousadas especulações de Planck, Rutherford, Einstein e Bohr teriam produzido dedutivamente os resultados de Balmer, como enunciados-testes de sua teoria, sem o chamado ‘pioneirismo’ de Balmer”*.

No terceiro parágrafo do texto analisado consta que *“... as raias dos espectros isoladas e descontínuas estavam associadas a números inteiros n , de acordo com a fórmula de Balmer. Bohr concluiu que esses números estariam associados às órbitas, que seriam estáveis”*. As informações contidas neste parágrafo transmitem a idéia de que Bohr se utilizou dos resultados de Balmer para determinar as possíveis órbitas para os elétrons. Este escrito não estaria passando uma visão empirista para o aluno?

Resposta 3 - Para esclarecer essa questão o autor explicita que baseou o conteúdo dos capítulos 13 e 14 no livro “Dos raios X aos quarks” de Emílio Segrè (1987), que na página 125 traz a seguinte afirmação atribuída a Bohr: *“Logo que vi a fórmula de Balmer, tudo se tornou claro para mim”*.

No parágrafo a que Gaspar se refere, Segrè afirma que:

*“Era óbvio que [Bohr] estava muito entusiasmado com o modelo, mas ainda não tinha analisado o espectro de hidrogênio. Os espectros tornaram-se a grande chave para o que veio depois, mas eram considerados muito complicados e um campo aparentemente indecifrável na época. No início de 1913 é que um estudante seu amigo, Hans Marius Hansen, indagou de Bohr o que é que seu modelo tinha a dizer a respeito dos espectros. Quando Bohr afirmou que nada tinha a dizer sobre o assunto, Hansen aconselhou-o a dar uma olhada na fórmula de Balmer. ‘Logo que vi a fórmula de Balmer, tudo se tornou claro para mim’ – **declarou Bohr muitos anos mais tarde** (grifos nossos)”.* (Segrè, 1987, p. 125)

Percebe-se que quando Bohr foi indagado sobre o que seu modelo tinha a dizer sobre os espectros, ele ainda nada sabia a respeito. É importante salientar que esta questão foi feita no início de 1913 e, segundo o próprio Segrè, o primeiro artigo escrito e publicado sobre o átomo de Bohr está datado de 5 de abril de 1913. Nota-se que passou muito pouco tempo entre questionamento, resposta de não conhecimento e publicação sobre o modelo.

Além disso, a declaração de que ‘após conhecer a fórmula de Balmer tudo ficou claro’, foi feita por Bohr **anos mais tarde**. Desse modo, ela parece não fornecer fundamentação suficiente para poder afirmar que Bohr utilizou-se dos resultados de Balmer para desenvolver a sua teoria (que é o que o livro **Física 3** sugere).

Depois, Gaspar menciona que em toda a sua coleção combateu veemente a transmissão da visão empirista. E que não seria o detalhe observado que invalidaria todo o resto. É importante salientar que não é, evidentemente, possível e nem intenção, aqui, generalizar a partir de uma única instância, sob pena de se incidir em um indutivismo ingênuo, sem uma ampla análise dos três volumes.

Na seqüência explícita: *“Acho também que é importante dar ao aluno a oportunidade de perceber de onde vieram os insights dos cientistas, e a experimentação sempre foi pródiga em oferecer insights.”*

Aqui, o vínculo insights-experimentação, mesmo sem a intenção do autor, pode reforçar o empirismo. Em seguida, Gaspar critica quem faz a crítica:

“Acho que você está com uma preocupação exagerada com possíveis idéias erradas que podem ser passadas aos alunos. Como já disse, essa

²⁴ Lakatos, I. O falseamento e a metodologia dos programas de pesquisa científica. In Lakatos, I. & Musgrave, A. (orgs), **A crítica e o desenvolvimento do conhecimento**. São Paulo, Cultrix, 1979.

idéia de que uma idéia errada é algo que prejudica indelevelmente o entendimento do aluno é, também, uma idéia errada...toda a idéia inicial adquirida em qualquer aprendizagem, por qualquer processo, sempre tem incorreções. É da natureza da mente humana. Quem garante é Vygotsky”.

QUESTÃO 4 - A informação comentada a seguir também se encontra na página 345 no ‘boxe’ **Aprofundamento**.

O texto afirma que foram dois os postulados formulados por Bohr. Entretanto, em sua obra “Sobre a constituição de átomos e moléculas”, Bohr enumera cinco postulados. Embora o conteúdo destes postulados possa eventualmente ser agrupado em um número menor, para fins didáticos, esta se constitui em uma informação incorreta. Não seria adequado fazer um comentário a esse respeito?

Resposta 4 – *“Não disse que eram só dois, disse que eram os dois ‘postulados básicos’. Mas concordo com você, vou corrigir e fazer o comentário que você sugere na próxima reimpressão”.*

Os dois postulados enunciados no livro são:

1. Que o equilíbrio dinâmico dos sistemas nos estados estacionários pode ser discutido com o auxílio da mecânica clássica; enquanto a passagem do sistema entre estados estacionários diferentes não pode ser tratada da mesma forma.
2. Que o segundo processo é seguido pela emissão de uma radiação homogênea, para a qual a relação entre a frequência e o total da energia emitida é dada pela teoria de Planck.

4.3.2 – A interação com Cabral & Lago

QUESTÃO 1- O comentário a seguir refere-se ao conteúdo do final da página 502 e ao primeiro parágrafo da página 503, do livro **Física 3** (Cabral & Lago, 2002). A concepção empirista da ciência considera que a construção do conhecimento científico se inicia com a observação. Segundo Bacon²⁵, a natureza é quem dá os fatos e a única

²⁵ Bacon foi o primeiro a sistematizar a filosofia empirista.

tarefa do cientista é descobri-los. Mas para isso, ele deve estar com a mente livre de preconceitos ou fontes de ilusão cognitiva²⁶.

Para os empiristas, a observação de um grande número de fatos e experimentos, a elaboração das hipóteses e a comprovação experimental permitem conclusões, que por indução levam à formulação das leis e teorias gerais. Desta forma, chega-se ao verdadeiro conhecimento científico. Estas etapas a serem seguidas mecanicamente caracterizam o chamado *método científico* que, segundo Gil Pérez et al. (2001), constitui-se em uma *visão deformada do trabalho científico*.²⁷

Para Popper (1982)²⁸, por exemplo, a ciência começa com um problema e não com uma observação. Uma característica dominante da moderna filosofia da ciência é a concepção de que toda a observação está impregnada de teoria.(Hanson,1975)²⁹

No entanto, vários trabalhos de pesquisa denotam que a concepção empirista-indutivista é a que prevalece na sala de aula e nos materiais didáticos (Köhnlein e Peduzzi, 2001³⁰, Moreira e Ostermann,1993³¹). Um dos motivos de ela continuar arraigada é porque reforça a convicção de que o conhecimento científico derivado dos dados e da experiência por ser provado, é definitivo e confiável.

Ao analisar a disposição dos conteúdos na seção sobre os espectros observa-se que os postulados estão inseridos como explicação para os resultados empíricos das séries. Sabendo-se que os postulados de Bohr são fundamentais em sua teoria, pergunta-se: não seria mais adequado dispô-los na seção específica sobre o modelo atômico de Bohr? Isso evitaria que fosse transmitida uma visão empirista pelo texto e ainda, poderia servir de base para a apresentação das expressões fundamentais do modelo. Na explanação feita pelo livro não fica subentendido que Bohr estava preocupado em

²⁶ Bacon, F. **Novum Organum ou Verdadeiras Indicações acerca da Interpretação da natureza**. São Paulo, Editora Abril Cultural, 1979.

²⁷ Gil Pérez, et al. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v.7, n.2, p.125-153, 2001.

²⁸ Popper, K. R. **Conjecturas e Refutações**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1982.

²⁹ Hanson, N. R. Observação e Interpretação. In: **Filosofia da Ciência**. São Paulo: editora Cultrix, 1975. Morgenbesser, S. (org.).

³⁰ Köhnlein, J. F. K. e Peduzzi, L.O.Q., Sobre a concepção empirista-indutivista no ensino de ciências. **Atas VII Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física**. 5 a 8 de junho de 2002. Águas de Lindóia – SP.

³¹ Moreira, M.A. e Ostermann, F. Sobre o ensino do método científico. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.10, n.2: p.108-117,ago.1993.

explicar os resultados empíricos conhecidos, ao invés de desvendar o paradoxo da estabilidade do átomo de Rutherford?

Resposta 1 - Os autores iniciam explicitando que ao apresentarem a Física Quântica foram mostradas três situações experimentais “*que levaram à formulação de Bohr*”: a radiação do corpo negro, o efeito fotoelétrico e os espectros de emissão e absorção do hidrogênio. “*Essas observações foram de grande valia para que se chegasse a um modelo de átomo*”.

A resposta dos autores corrobora a impressão inicial sobre a disseminação da visão empirista associada a esse assunto, uma vez que, destacam três situações experimentais que supostamente teriam levado Bohr a formular seu modelo. Em seguida, justificam que o motivo da disposição dos experimentos antes do modelo de Bohr é devido à seqüência histórica, já que a fórmula de Balmer para as linhas espectrais é de 1885 e, portanto, anterior à teoria de Bohr. Conforme mencionam: “*Esperamos que a seqüência histórica facilite a compreensão dos alunos neste nível. Achamos que isso também facilita o professor na abordagem do assunto*”.

Os autores não fizeram referência a dois pontos da questão proposta: à visão empirista observada no texto e a possível disseminação da informação de que Bohr estava preocupado em explicar os resultados empíricos ao invés de desvendar a instabilidade do átomo de Rutherford.

É importante salientar que a seqüência cronológica pode, sem dúvida, ser adotada e propiciar resultados positivos, no entanto, ela não deve tornar implícito ou suscitar o surgimento do empirismo.

QUESTÃO 2 - A pergunta a seguir está relacionada com os objetivos listados na página 493 do livro **Física 3**.

Entre os livros analisados em minha pesquisa, até o momento, este é o único que propõe objetivos relativos à aprendizagem. Esta é uma característica importante, pois eles propiciam uma orientação tanto para o professor quanto para o aluno no desenvolvimento das atividades. Além disso, os objetivos podem servir de parâmetro para fins de avaliação. Quais os critérios utilizados na definição dos objetivos? Por exemplo, foram levadas em consideração as sugestões dadas pelos Parâmetros

Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, os quais visam, entre outras coisas, o desenvolvimento de habilidades e competências?

Resposta 2 – Na resposta dada a essa questão os autores afirmam que sempre se nortearam pelos parâmetros curriculares. Destacam ainda, que os objetivos foram direcionados para aspectos mais importantes do conteúdo presentes em cada capítulo e pelo que eles imaginavam possível de ser alcançado com o estudo. Explicam que os objetivos não foram subdivididos em gerais e específicos, pois esta terminologia poderia confundir o aluno.

Não se atendo somente à pergunta, os autores indicam que é para observar que em todos os exercícios resolvidos foi atribuído um título que identifica a ‘situação problema’. Sugerem, neste caso, que o professor pode trabalhar essa situação antes da resolução numérica do exercício resolvido.

QUESTÃO 3 - O próximo questionamento está direcionado ao segundo parágrafo da página 505 do livro **Física 3**.

As expressões para a energia e para os raios das órbitas são fundamentais no modelo atômico de Bohr, pois através delas sabe-se quais órbitas são possíveis para o elétron e que energia ele pode ter em cada órbita. No entanto, a expressão para a energia é apresentada no estudo dos espectros, ou seja, em um local que não parece ser o mais adequado. No estudo específico sobre o átomo de Bohr é apenas destacado que Bohr calculou a energia de cada nível do elétron e obteve o valor de $-13,6/n^2$, mas não é mencionado de onde provém este valor. Não seria melhor explicar mais detalhadamente a expressão? Por que não apresentar a relação completa para a energia na seção específica do modelo atômico de Bohr ao invés de no estudo dos espectros?

Resposta 3 – Os autores afirmam que concordam com as sugestões feitas nesta questão e que irão reformular esta parte do texto na próxima edição do livro. Explicam que na edição analisada eles optaram por apresentar os valores para os níveis de energia de maneira mais simples, “*de modo a facilitar tanto o aprendizado do aluno quanto a árdua tarefa do professor em introduzir um assunto com tamanho grau de abstração para alunos de Ensino Médio, normalmente com muito pouco tempo disponível*”.

QUESTÃO 4 - A formação específica dos autores é na área de ciências exatas, ou seja, não é direcionada para o ensino. Isto causa uma certa curiosidade em se saber quais os motivos que os levaram a dedicar-se à produção de material didático: como surgiu o interesse pela produção de livros didáticos para o Ensino Médio? Por que este foi o nível de ensino escolhido uma vez que ambos os autores são professores universitários?

Resposta 4 – Inicialmente os autores destacam que esta é uma questão difícil de ser respondida concisamente, mas que escrever este tipo de material - os livros didáticos- lhes deu muito prazer. Explicam que alguns eventos combinados determinaram o início da produção de livros didáticos para o Ensino Médio: ambos tinham filhos cursando o Ensino Médio o que forneceu uma idéia das dificuldades pelas quais eles passavam com o material didático que recebiam de colégios e cursinhos. Além disso, salientam que ao mesmo tempo, eles ministravam aulas para alunos adolescentes nas fases iniciais de cursos de engenharia: *“Isto nos permitia (e permite) verificar como os alunos assimilam ou não os conceitos de Física, conceitos que, em princípio, deveriam ter sido aprendidos no Ensino Médio com certa facilidade”*.

Através da análise da apresentação do átomo de Bohr nos textos **Física 3** (Gaspar, 2001) e **Física 3** (Cabral e Lago, 2002), e das respostas às perguntas formuladas, constata-se que os autores transmitem uma visão empirista sobre a gênese deste conteúdo, seja apresentando situações experimentais que teriam levado Bohr a formular seu modelo ou vinculando os insights dos cientistas diretamente à experimentação.

Um dos autores vê pouca utilidade na história da Física para a aprendizagem dos conceitos, embora saliente que o conhecimento do contexto e de algumas particularidades da vida de um cientista possa auxiliar na compreensão da Física. Esta concepção de história não é a da autora deste trabalho. Além de estimular e motivar o estudante a buscar novas informações, a história pode contribuir para a aprendizagem dos conceitos, ser útil para lidar com as concepções alternativas, incrementar a cultura geral do aluno, desmistificar o método científico, mostrar que o conhecimento científico não é definitivo, entre outras coisas.

Apesar das divergências, algumas críticas foram explicitamente aceitas pelos autores dos livros, que se propuseram a fazer alterações em novas edições de suas obras. Nesse sentido, além de procurar contribuir para um melhor delineamento de um tema de

Física Moderna que está sendo incorporado em livros didáticos de Física do nível médio, denota-se que é possível o diálogo com autores. Ao menos, com aqueles preocupados com a melhoria do ensino de Física e atentos aos resultados da pesquisa nesta área.

4.4 - A TEORIA DE BOHR EM LIVROS UNIVERSITÁRIOS

Como subsídio para o delineamento de uma estratégia de ensino, para o átomo de Bohr no nível médio, optou-se por investigar a forma de apresentação da teoria de Bohr em livros universitários ou, mais especificamente, como os autores fazem para obter a fórmula para a quantização da energia, uma vez que essa quantização é a grande novidade do modelo atômico de Bohr. Esta avaliação não tem o mesmo grau de detalhamento conferido ao estudo dos livros do Ensino Médio: ela visa investigar se os livros universitários respeitam a evolução histórica dos fatos, ou seja, se os autores apresentam a teoria para o átomo de hidrogênio de acordo com Bohr ou se utilizam os conceitos introduzidos por De Broglie. A escolha dos livros foi feita levando-se em conta a utilização das obras em sala de aula.

4.4.1– Conceitos de Física Moderna (Beiser, 1969)

Considerações preliminares, dispostas na seção do átomo de Rutherford

Após explanar sobre o modelo de Rutherford, o livro propõe que seja examinado do ponto de vista clássico o átomo de hidrogênio. Esclarece que, por conveniência, será assumida a órbita eletrônica como sendo circular, embora fosse razoável admiti-la na forma elíptica.

A força centrípeta, $F_c = \frac{mv^2}{r}$, que mantém o elétron em uma órbita r a partir do núcleo, é a força eletrostática, $F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$. Assim,

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad (1)$$

A velocidade do elétron, v , está relacionada ao raio, r , de sua órbita pela equação

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 mr}} \quad (2)$$

A energia total, E , de um elétron em um átomo de hidrogênio é a soma da sua energia cinética, $T = 1/2mv^2$, e de sua energia potencial, $V = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$. O autor realça que o sinal negativo na energia potencial significa que a força que atua sobre o elétron está na direção $-r$. Portanto

$$E = T + V$$

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Substituindo v pelo seu valor da equação (2), obtém-se,

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (3)$$

A energia total de um elétron atômico é negativa; isto é necessário para ele ficar ligado ao núcleo. Se E fosse maior do que zero, o elétron não poderia permanecer em uma órbita fechada em torno do núcleo.

A experiência indica que são necessários 13,6 eV para separar um átomo de hidrogênio em um próton e um elétron; em outros termos, sua energia de ligação é $-13,6$ eV.

Utilizando o valor da energia em joule na equação (3), determina-se o raio orbital de um elétron no átomo de hidrogênio como sendo igual a $5,3 \times 10^{-11}$ m.

O autor esclarece que esta análise constitui uma aplicação direta das leis de Newton e Coulomb – ambas pilares da física clássica – mas, salienta que não está de acordo com a teoria eletromagnética que prevê que cargas elétricas aceleradas irradiam

energia na forma de ondas eletromagnéticas e, por essa razão, o elétron deveria perder energia continuamente, espiralando gradualmente em direção ao núcleo. Dadas as limitações da física clássica, comenta a necessidade da elaboração de um novo modelo que combine noções clássicas e modernas.

Explicação do modelo atômico de Bohr

Inicia, examinando o comportamento ondulatório de um elétron em órbita em torno de um núcleo de hidrogênio.

De acordo com De Broglie, o comprimento de onda do referido elétron é $\lambda = \frac{h}{mv}$. Substituindo nesta expressão a velocidade encontrada em (2), resulta

$$\lambda = \frac{h}{e} \sqrt{\frac{4pe_0 r}{m}} \quad (4)$$

Em seguida, o autor salienta que a partir do valor de r ($5,3 \times 10^{-11} \text{m}$) para a órbita do elétron, encontra-se o comprimento de onda do elétron ($33 \times 10^{-11} \text{m}$). Este comprimento de onda é exatamente igual ao perímetro da circunferência da órbita do elétron ($2\pi r = 33 \times 10^{-11} \text{m}$). Após vários argumentos, afirma que é possível postular que **um elétron pode rodar em torno de um núcleo indefinidamente sem irradiar energia desde que sua órbita contenha um número inteiro de comprimentos de onda de De Broglie.**

Sendo $2\pi r$ o comprimento de uma órbita circular de raio r , pode-se escrever a condição de estabilidade da órbita como:

$$n\lambda = 2\pi r_n \quad n=1,2,3,\dots \quad (5)$$

onde r_n designa o raio da órbita que contém n comprimentos de onda. O número inteiro n é denominado número quântico orbital.

Utilizando a expressão de λ , de (4), obtém-se

$$\frac{nh}{e} \sqrt{\frac{4pe_0 r_n}{m}} = 2\pi r_n$$

Assim, as órbitas estáveis do elétron são aquelas cujos raios são dados por

$$r_n = \frac{n^2 h^2 e_0}{p m e^2} \quad n=1,2,3,\dots \quad (6)$$

A órbita mais interna possui raio $r_1 = 5,3 \times 10^{-11} \text{m}$. Os outros raios são dados em termos de r_1 pela fórmula $r_n = n^2 r_1$, tal que o espaçamento entre as órbitas adjacentes cresce progressivamente.

As várias órbitas permitidas para o elétron envolvem diferentes energias. Inserindo os valores de r_n na expressão (3), têm-se os valores permitidos para os níveis de energia do átomo de hidrogênio

$$E_n = -\frac{m e^4}{8 e_0^2 h^2} \left(\frac{1}{n^2} \right) \quad n=1,2,3,\dots \quad (7)$$

Considerando o movimento nuclear e a massa reduzida

Inicialmente, o autor destaca que no desenvolvimento da teoria do átomo de hidrogênio foi admitido que o núcleo permanece estacionário enquanto que o elétron orbital gira em torno dele. Trata-se de uma hipótese razoável, pois a massa do próton é cerca de 1836 vezes maior que a massa do elétron, e a força eletrostática que cada um exerce sobre o outro possui a mesma grandeza para ambos e vale

$$F_e = \frac{1}{4 p e_0} \frac{e^2}{r^2}$$

Apresentando-se a condição, para que uma órbita estável de um átomo possua um número inteiro de comprimentos de onda de De Broglie de elétrons, têm-se,

$$n l = 2 p r$$

e, sabendo-se que o comprimento de onda de De Broglie é dado por $l = \frac{h}{m v}$, é possível escrever de um modo equivalente que

$$m v r = \frac{n h}{2 p} \quad (8)$$

Portanto, o momento angular do elétron deve ser um múltiplo inteiro de $h/2\mathbf{p}$. Em termos da velocidade angular, ω , do elétron, esta regra de quantização pode ser expressa como

$$m\omega r^2 = \frac{nh}{2\mathbf{p}} \quad (9)$$

Como o núcleo possui massa não infinita, tanto ele quanto seu elétron orbital giram em torno de um centro comum de massa.

Admitindo que o núcleo e o elétron de um átomo de hidrogênio se encontram nas extremidades opostas de uma 'barra de massa desprezível e de comprimento r ', o centro de massa, que se encontra a uma distância r_n do núcleo e r_e do elétron, pode ser determinado a partir da seguinte condição:

$$mr_e = Mr_n \quad (10)$$

onde

$$r = r_e + r_n \quad (11)$$

O momento angular total do átomo de hidrogênio é a soma do momento angular do elétron e do momento angular do núcleo,

$$L = m\omega r_e^2 + M\omega r_n^2$$

A velocidade angular ω é a mesma para as duas partículas. Como, de acordo Bohr, o momento angular deve ser um múltiplo inteiro de $h/2\mathbf{p}$, resulta

$$m\omega r_e^2 + M\omega r_n^2 = \frac{nh}{2\mathbf{p}} \quad (12)$$

Através das equações (10) e (11) encontra-se que

$$r_e = \left(\frac{M}{M+m} \right) r \quad (13)$$

e

$$r_n = \left(\frac{m}{M + m} \right) r \quad (14)$$

Substituindo-se r_e e r_n a equação (12) obtém-se a condição para o equilíbrio das forças

$$\left(\frac{mM}{M + m} \right) \omega^2 r^2 = \frac{nh}{2p} \quad (15)$$

Contudo, a equação (1) deve ser generalizada, de modo a considerar o movimento nuclear. A equação original é

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

que pode ser reescrita como

$$m\omega^2 r_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad (16)$$

pois a “força centrípeta sobre o elétron depende do raio de sua órbita r_e enquanto que a força eletrostática depende da separação r entre o núcleo e o elétron”.

Isolando r_e na equação acima e substituindo o seu valor na expressão (13), têm-se que

$$\left(\frac{mM}{M + m} \right) \omega^2 r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad (17)$$

onde

$$m' = \left(\frac{Mm}{M + m} \right) \quad (18)$$

é a massa reduzida do sistema.

Substituindo a massa reduzida nas equações (15) e (16) e considerando-se, ainda, a equação (14), obtém-se

$$m'wr^2 = \frac{nh}{2p} \quad (19)$$

e

$$m'w^2r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad (20)$$

Beiser assevera que partindo das equações (19) e (20) é possível obter uma expressão semelhante à (7). No entanto, no lugar da massa m do elétron aparecerá a massa m' reduzida do elétron, assim denominada por seu valor ser inferior ao valor de m . Desta forma,

$$E_n = -\frac{m'e^4}{8\epsilon_0^2h^2} \left(\frac{1}{n^2} \right) \quad (21)$$

Em função do movimento do núcleo, todos os níveis de energia do hidrogênio são alterados pela fração $\frac{m'}{m} = \frac{M}{M+m}$

Segundo o autor, esta aproximação para a massa reduzida remove uma discrepância entre os comprimentos de onda das várias linhas espectrais do hidrogênio preditos e os comprimentos de onda determinados experimentalmente.

Ao apresentar a teoria para o átomo de hidrogênio, este livro não respeita o contexto histórico, pois utiliza os conceitos propostos por De Broglie, que foram elaborados cerca de dez anos após a publicação do modelo atômico de Bohr para o átomo de hidrogênio.

4.4.2 – Física: fundamentos e aplicações (Eisberg & Lerner, 1983)

Estes autores, assim como Beiser, deduzem as expressões para o modelo atômico de Bohr a partir de argumentos propostos por De Broglie. No entanto, a abordagem feita pelo livro de Eisberg e Lerner difere da exibida por Beiser.

Explicam que o trabalho feito por Bohr foi cerca de uma década antes de se tomar conhecimento de que a dualidade onda-partícula se aplica a um elétron; o que permitiu a inferência de que há um comprimento de onda associado ao seu momento linear. Salientam que a justificativa utilizada por Bohr para a quantização da energia foi baseada em argumentos frágeis: na idéia de que os resultados dos cálculos realizados no domínio quântico de um sistema deveriam corresponder, no limite para números quânticos grandes, àqueles obtidos através de cálculos apropriados para um domínio clássico. Explicitam que “*a dedução mais simples feita por De Broglie leva à mesma fórmula da quantização da energia proposta por Bohr*” (p.355).

Destacam que a fórmula para a quantização da energia obtida pelo modelo de Bohr concorda ‘com um rigor incomum’ com os valores da energia de um elétron em um átomo de hidrogênio, entretanto, afirmam que este modelo enfrenta dificuldades fundamentais relacionadas com o princípio da incerteza (posição-momento), que foram notadas somente após os trabalhos de Bohr e De Broglie.

Utilizando-se dos argumentos de De Broglie, explicam que um elétron deslocando-se em órbita circular de raio r transporta consigo a sua onda de matéria associada. Este elétron tem momento linear de módulo constante p e sua onda de matéria tem comprimento $\lambda = \frac{h}{p}$. Para que a onda associada a uma ‘determinada transversal’ se superponha construtivamente com a onda associada com a transversal seguinte, é preciso que um número inteiro de onda λ se ajuste perfeitamente à distância $2\pi r$ em torno da órbita. Assim, a condição para que haja superposição construtiva é de que

$$n\lambda = 2\pi r \quad \text{para } n=1,2,3,\dots \quad (22)$$

Se esta condição não for satisfeita, a onda de matéria associada com as transversais subseqüentes do elétron não estará em fase e as ondas serão canceladas, conduzindo a uma onda total de intensidade zero, na qual De Broglie acredita que um elétron não pode se encontrar, pois se a intensidade da onda total for zero estará impedida a medida da posição do elétron.

Aplicando-se a relação de De Broglie, a condição sobre o comprimento de onda dada pela equação (22) é convertida em uma condição sobre o módulo do momento linear do elétron.

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi r / n} = \frac{nh}{2\pi r} \quad \text{para } n=1,2,3,\dots \quad (23)$$

Em relação ao cálculo da energia total do elétron de um átomo de hidrogênio, os autores esclarecem que consideram, além da energia do elétron, também a energia cinética do próton do núcleo. Salientam que devido ao próton mover-se em torno do centro de massa fixo do átomo e manter-se sempre do lado oposto do elétron é possível incluir nos cálculos o movimento nuclear. *“Isso é feito admitindo-se que a massa do próton é infinita, de modo que sua posição é fixa, e substituindo a massa real do elétron pela massa reduzida m ”*.

$$m = \frac{mM}{m + M}$$

Para satisfazer a segunda lei de Newton, iguala-se a força elétrica agindo sobre o elétron de massa reduzida, ao produto entre sua massa e sua aceleração centrípeta v^2/r ,

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad (24)$$

onde e é o módulo das cargas do elétron e do próton e r o raio da órbita do elétron.

Multiplicando-se a expressão (24) por r e escrevendo v como p/m ,

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{p^2}{m} \quad (25)$$

Considerando a expressão de p na equação (23), resulta

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 r^2 m} \quad \text{para } n=1,2,3,\dots$$

Isolando r e usando o número quântico n para identificar os valores permitidos para os raios das órbitas do átomo de Bohr, obtém-se

$$r_n = \frac{n^2 h^2 e_0}{p m e^2} \quad \text{para } n=1,2,3,\dots \quad (26)$$

Para calcular a energia total das órbitas permitidas para o elétron, inicialmente calcula-se a energia cinética. Usando a equação (25) para calcular p^2/m

$$K = \frac{p^2}{2m} = \frac{e^2}{8pe_0 r}$$

A energia potencial elétrica pode ser expressa como

$$U = -\frac{e^2}{4pe_0 r}$$

A energia total é a soma das energias cinética e potencial

$$E = -\frac{e^2}{8pe_0 r}$$

Fazendo $r=r_n$ e usando a equação (26), resulta a fórmula da quantização da energia para o átomo de hidrogênio.

$$E_n = -\frac{e^4 m}{8e_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} \quad \text{para } n=1, 2, 3,\dots$$

Este livro apresenta a teoria para o átomo de hidrogênio utilizando os conceitos de De Broglie, embora no início da explanação mencione que o trabalho desenvolvido por De Broglie foi cerca de dez anos depois do de Bohr. Os autores justificam sua opção por explicar o conteúdo desta forma, alegando que Bohr serviu-se de argumentos frágeis para justificar a quantização da energia e que a teoria de De Broglie é mais simples e, leva aos mesmos resultados.

4.4.3 – Física Moderna (Tipler & Llewellyn, 2001)

Inicialmente, o livro ressalta que Bohr optou por trabalhar com órbitas circulares em seu modelo, para simplificar os cálculos. Assim, se a carga do núcleo é

+ ze e a carga do elétron é $-e$, a força centrípeta necessária para que o elétron se mova em uma órbita circular é a força de Coulomb kze^2/r^2 . Então se

$$F = \frac{kze^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (27)$$

tem-se um modelo mecanicamente estável, uma vez que o potencial de Coulomb, $V = -\frac{kze^2}{r}$ fornece a força centrípeta necessária para que um elétron se mova em um círculo de raio r com velocidade v . Entretanto, é eletricamente instável, o elétron sofre uma aceleração em direção ao centro da órbita e irradia energia, conforme a eletrodinâmica de Maxwell. Classicamente, a frequência de rotação é dada por:

$$f = \frac{v}{2\pi r} = \left(\frac{kze^2}{mr}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{2\pi r} = \left(\frac{kze^2}{4\pi^2 m}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{1}{r^{\frac{3}{2}}} \sim \frac{1}{r^{\frac{3}{2}}} \quad (28)$$

A energia total do elétron é a soma das energias cinética e potencial

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \left(-\frac{kze^2}{r}\right) \quad (29)$$

Mas, de acordo com (27)

$$\frac{kze^2}{2r} = \frac{mv^2}{2} \quad (30)$$

Logo

$$E = -\frac{kze^2}{2r} \sim -\frac{1}{r} \quad (31)$$

o que mostra que, de acordo com a física clássica, o elétron iria chocar-se com o núcleo.

Após algumas considerações sobre os postulados de Bohr, o livro explicita (repetindo) que

$$F = \frac{kze^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (32)$$

Isolando v na expressão acima, obtém-se

$$v = \left(\frac{kze^2}{mr} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (33)$$

Um dos postulados do modelo atômico de Bohr diz que o momento angular do elétron do átomo de hidrogênio pode assumir apenas valores iguais a $nh/2\pi$, ou seja, o momento angular é quantizado. Assim,

$$L = mvr = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar \quad \text{para } n=1,2,3,\dots \quad (34)$$

onde n é um número inteiro chamado de número quântico principal e $\hbar = h/2\pi$.

Combinando (33) e (34)

$$r = \frac{n\hbar}{mv} = \frac{n\hbar}{m \left(\frac{kze^2}{mr} \right)^{\frac{1}{2}}}$$
$$r = \frac{n\hbar}{m} \left(\frac{mr}{kze^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Elevando ambos os termos ao quadrado e realizando as devidas simplificações, obtém-se os raios quantizados para as órbitas estacionárias

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{kze^2 m} = \frac{n^2 a_0}{z} \quad (35)$$

onde

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{mke^2}$$

é o raio de Bohr de valor $0,529 \text{ \AA}$.

Substituindo o valor de r_n na expressão (31), tem-se para a energia total do elétron

$$E_n = -\frac{kze^2}{2r_n} = -\frac{kze^2}{2} \left(\frac{mkze^2}{n^2\hbar^2} \right)$$

$$E_n = -\frac{k^2 z^2 me^4}{2n^2\hbar^2} = -E_0 \frac{z^2}{n^2} \quad n=1,2,3,\dots \quad (36)$$

onde

$$E_0 = \frac{mk^2 e^4}{2\hbar^2}$$

Observa-se que a energia do elétron é quantizada devido à quantização dos raios das órbitas. Isto indica que os estados estacionários correspondem a valores específicos da energia total.

Após esta abordagem, o livro discute a emissão ou absorção de fótons na transição entre dois níveis, define ‘estado fundamental’ e comenta os resultados em função dos valores conhecidos para as séries espectrais do hidrogênio.

Correção para a massa reduzida

O livro explicita que ao supor que o núcleo está imóvel, Bohr passa a considerar sua massa como sendo infinita. Em seguida, presume o seguinte raciocínio: se o núcleo tem massa M , sua energia cinética é dada por $Mv^2/2 = p^2/2M$, onde $p = mv$ é o momento. Para que o momento total do átomo seja nulo, é preciso que o momento do núcleo e o momento do elétron sejam iguais em módulo. Assim, a energia cinética total será

$$E_k = \frac{p^2}{2M} + \frac{p^2}{2m} = \frac{M+m}{2Mm} p^2 = \frac{p^2}{2\mathbf{m}}$$

onde

$$\mathbf{m} = \frac{mM}{m+M} = \frac{m}{1+m/M}$$

a *massa reduzida* do sistema.

Este livro aborda o átomo de hidrogênio respeitando a ordem cronológica dos fatos; diferente do proposto por Bohr, pois faz uma dedução geral para átomos de um elétron e não apenas para o hidrogênio.

4.4.4 – Física (Halliday & Resnick, 1981)

Após uma explanação sobre o modelo de Rutherford, os autores introduzem o modelo de Bohr destacando aspectos dos postulados, como, por exemplo, o fato de que as órbitas circulares deveriam ser quantizadas, ou seja, que o momento angular pode assumir apenas valores múltiplos de um número inteiro. Enfatizam idéias do eletromagnetismo clássico e suas insuficiências na explicação de fenômenos e ainda, mencionam que Bohr contornou essas dificuldades supondo que, do mesmo modo que ocorria com os osciladores de Planck, o átomo de hidrogênio só existe em determinados estados estacionários.

Ao iniciar a dedução da expressão para a energia, tecem as seguintes considerações: suponha-se que o elétron do átomo de hidrogênio percorra uma órbita circular de raio r , concêntrica com o núcleo. Admita-se ainda que o núcleo, que consiste de um único próton, tenha uma massa tão superior a do elétron que o centro de massa do sistema coincida praticamente com o do próton. Agora, calcula-se a energia desse átomo.

A segunda lei de Newton para o movimento do elétron é dada por

$$F = ma$$

Usando a lei de Coulomb, é possível escrever

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

Esta expressão permite escrever a energia cinética do elétron como

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (37)$$

A energia potencial do sistema próton-elétron é dada por

$$U = V(-e) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (38)$$

onde $V = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r}$ é o potencial do próton a uma distância igual ao raio da órbita do elétron.

A energia total E do sistema é

$$E = K + U = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (39)$$

Como, aparentemente, o raio da órbita pode ter um valor qualquer, o mesmo acontece com a energia. Assim, o problema de quantizar E se reduz ao de fazer o mesmo com r .

De (37), é possível obter a velocidade do elétron em termos do raio,

$$v = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m r}} \quad (40)$$

A frequência de rotação f_0 é

$$f_0 = \frac{v}{2\pi r} = \sqrt{\frac{e^2}{16\pi^3 \epsilon_0 m r^3}} \quad (41)$$

De (40), obtém-se o momento linear p :

$$p = mv = \sqrt{\frac{me^2}{4\pi\epsilon_0 r}} \quad (42)$$

O momento angular L é dado por

$$L = pr = \sqrt{\frac{me^2 r}{4\pi\epsilon_0}} \quad (43)$$

Conhecendo-se r , determinam-se os parâmetros da órbita K , U , E , v , v_0 , p e L . Assim, se qualquer uma dessas grandezas for quantizada, todas as demais também serão.

Bohr lançou a hipótese de que o momento angular L só pode assumir os seguintes valores:

$$L = \frac{nh}{2\pi} \quad n= 1,2,3,\dots \quad (44)$$

onde n é um número inteiro chamado *número quântico*.

De (43) e (44), tem-se

$$r = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} \quad n= 1,2,3,\dots \quad (45)$$

que mostra que r é quantizado.

Substituindo o valor de r em (39), obtêm-se os valores das energias dos estados estacionários permitidos

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} \quad n= 1,2,3,\dots \quad (46)$$

O tratamento dado ao átomo de hidrogênio por este livro, também, segue o proposto por Bohr em seu modelo, no entanto o livro não faz nenhum comentário sobre um possível aperfeiçoamento do modelo por meio do cálculo da massa reduzida do elétron, nem tampouco, apresenta os cálculos para tal.

CAPÍTULO 5 – PARA O ENSINO DO ÁTOMO DE BOHR NO NÍVEL MÉDIO

5.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o texto que se intitula “O átomo de Bohr sob o referencial lakatosiano: um texto para professores do ensino médio”, e sua avaliação com base em um questionário encaminhado a uma amostra de professores que ministram aulas no Ensino Médio. Além do texto os professores receberam um artigo sobre a filosofia de I. Lakatos (Silveira,1996) e uma carta de apresentação do material.

O questionário foi elaborado com o intuito de investigar as potencialidades do texto. É composto por quatro perguntas dissertativas que interrogam sobre aspectos gerais do texto e sua possível utilização em sala de aula e dispõe de um espaço no qual os respondentes podem fazer seus comentários, críticas e sugestões.

Optou-se por dispor o artigo sobre Lakatos junto ao material dirigido aos professores em virtude do possível surgimento de algum tipo de interesse a respeito de características mais peculiares do referencial adotado na organização do texto. Além disso, considerou-se que boa parte da amostra, ao qual o texto foi remetido, provavelmente, não teria nenhum conhecimento das idéias deste epistemólogo.

Já na carta de apresentação, explicou-se sobre a origem da pesquisa, seus objetivos e, principalmente, sobre o material que estava sendo entregue. Além disso, enfatizou-se a importância da colaboração de cada um dos participantes e, forneceu-se endereços para contato.

5.2 – O ÁTOMO DE BOHR SOB O REFERENCIAL LAKATOSIANO: UM TEXTO PARA PROFESSORES DO ENSINO MÉDIO

INTRODUÇÃO

O presente texto visa contribuir para o professor estruturar e desenvolver suas aulas sobre o átomo de Bohr no nível médio. Espera-se que, com este material, ele faça a transposição didática³² do assunto de acordo com o que julgar necessário; afinal, é ele quem tem um melhor conhecimento das dificuldades e do nível de compreensão de seus alunos.

Para estudar o modelo de Bohr o professor deverá ter em mente alguns conceitos e teorias que contextualizam o assunto, como os espectros, a radiação do corpo negro, o efeito fotoelétrico e o modelo atômico de Rutherford. Em virtude de não ser viável o desenvolvimento detalhado de todos estes temas optou-se por apresentar uma explanação histórica introdutória e indicar leituras complementares àqueles que sentirem necessidade de um maior aprofundamento.

Ao fazer as indicações de leitura procurou-se designar obras que fossem acessíveis; ou seja, não foram sugeridos livros com edições esgotadas, em outras línguas, ou que não pudessem ser encontrados no mercado atual. Contudo, sentiu-se uma certa dificuldade ao se fazer tal opção, porque a maior parte dos livros disponíveis no mercado não enfatiza o aspecto histórico que envolve os conteúdos. Mas, por outro lado, as referências utilizadas, como apoio, na elaboração deste texto, contemplam a história e, também podem servir de material de consulta. Assim, essas leituras além de permitirem uma melhor compreensão do assunto, servirão como ‘guias de orientação’ sobre informações essenciais para o professor em seu estudo.

Entre os assuntos que compõem o contexto em que se inseriram as idéias de Bohr estão às experiências e o modelo atômico de Rutherford, que serão abordados e desenvolvidos em virtude de o referencial da pesquisa enfatizar fortemente que o problema de Bohr, ao propor seu modelo, estava em explicar a instabilidade do átomo

³² A transposição didática é compreendida como um processo no qual “*um conteúdo do saber que foi designado como **saber a ensinar** sofre a partir daí, um conjunto de transformações adaptativas que vão torná-lo apto para ocupar um lugar entre os **objetos de ensino**. O **trabalho** que transforma um objeto do*

proposto pelo modelo de Rutherford. Além disso, a vertente metodológica³³ em que se insere este estudo considera essencial a apresentação e exploração dos limites dos modelos clássicos, para que a partir das restrições e limitações impostas pelas teorias clássicas sejam inseridos os temas relativos à Física Moderna e Contemporânea. Assim, considerou-se como necessário e adequado apresentar com um certo detalhamento, como introdução à teoria de Bohr, as experiências e o modelo atômico de Rutherford, bem como, suas limitações na explicação da estabilidade do átomo.

A apresentação do conteúdo seguirá, em linhas gerais, os aspectos salientados por Lakatos no artigo “*Bohr: um programa de pesquisa que progride sobre fundamentos inconsistentes*” (Lakatos, 1979), no qual ele acompanha e descreve o desenvolvimento do modelo atômico de Bohr. A abordagem que Lakatos dá ao átomo de Bohr ilustra, uma das maneiras, como se estruturam certos conhecimentos na ciência. Aos sucessivos refinamentos do modelo de Bohr, Lakatos denomina de M_1 , M_2 e M_3 , nos quais mostra como uma teoria orienta as atividades de produção do conhecimento. Além disso, explicita que quando uma teoria é confrontada com os dados experimentais ela pode precisar de alguns ajustes ou alterações, como aconteceu com o M_1 e o M_2 de Bohr. No entanto, admite que essas modificações devem ser feitas somente após a averiguação da ‘teoria observacional’ que está sendo utilizada para a interpretação dos dados, pois ela pode estar equivocada, como aconteceu com a série de hélio da estrela Pupis, que estava sendo interpretada como uma série do hidrogênio e não do hélio. Sugere, ainda, que se atente para o método observacional, que pode estar sendo utilizado de maneira incorreta ou sem a devida cautela. Ou seja, o desenvolvimento de Lakatos para a teoria de Bohr proporciona visualizar a íntima relação entre a teoria e a experiência na produção do conhecimento científico, sem transmitir uma imagem inadequada da atividade científica.

A visão de ciência apresentada por Lakatos se contrapõe a um dos principais problemas estudados pela moderna filosofia da ciência: a concepção empirista, que considera que a construção do conhecimento científico inicia com a observação. Segundo Bacon (1979), que foi o primeiro a sistematizar a filosofia empirista, a

saber a ensinar em um objeto de ensino é denominado de Transposição Didática” (Chevallard, 1985, p.39)

³³ Terrazzan (1994), classifica e caracteriza três vertentes metodológicas para a introdução da Física Moderna e Contemporânea no nível médio. São elas: 1) explorando os limites dos modelos clássicos; 2) evitando referências aos modelos clássicos e 3) escolhendo entre tópicos essenciais, ou seja, apresentando apenas alguns conteúdos considerados indispensáveis.

natureza é quem dá os fatos e a única tarefa do cientista é descobri-los, no entanto, sua mente deve estar livre de preconceitos ou fontes de ilusão cognitiva.

Para os empiristas, a observação de um grande número de fatos e experimentos, a elaboração das hipóteses e a comprovação experimental permitem conclusões que, por indução, levam à formulação das leis e teorias gerais. Desta forma, acreditam chegar ao verdadeiro conhecimento científico. Estas etapas a serem seguidas mecanicamente caracterizam o chamado *método científico* que, segundo Gil Pérez et al. (2001), constitui-se em uma, das muitas, *visões deformadas do trabalho científico*.

Para Popper (1982), por exemplo, a ciência começa com um problema e não com uma observação. Uma idéia dominante da moderna filosofia da ciência é a concepção de que toda a observação está impregnada de teoria (Hanson, 1975). Entretanto, vários trabalhos de pesquisa denotam que a concepção empirista-indutivista é a que prevalece na sala de aula e nos materiais didáticos (Köhnlein e Peduzzi, 2001, Moreira e Ostermann, 1993). Um dos motivos de ela continuar arraigada é porque reforça a convicção de que o conhecimento científico derivado dos dados e da experiência, por ser provado, é permanente e confiável. Neste sentido, a abordagem de Lakatos para o modelo atômico de Bohr desmistifica a concepção de que o conhecimento científico é definitivo e orienta para que não se transmita uma visão inadequada da produção deste conhecimento.

A motivação para desenvolver um texto sobre o modelo atômico de Bohr surgiu em virtude dos resultados obtidos em um trabalho de análise de livros³⁴. Foram examinados quatro livros didáticos de Física do nível médio³⁵ que continham o modelo atômico de Bohr e denotado que a abordagem dada ao assunto é, de modo geral, insatisfatória: o contexto em que o tema se encontra nem sempre é o adequado; o problema de Bohr ao formular seu modelo não é apresentado com clareza; os postulados são expostos de forma simplificada tanto no que tange à quantidade quanto ao conteúdo; há autores que transmitem uma visão empirista do assunto.

Também, vários livros consultados não contemplam o modelo atômico de Bohr. Entre eles:

³⁴ BASSO, A. C. & PEDUZZI, L. O. Q., O átomo de Bohr em livros de Física do Ensino Médio: um estudo exploratório. *Atas XV SNEF*. Curitiba, 2003.

³⁵ A amostra foi composta pelos seguintes títulos: “Física 3” (Cabral & Lago, 2002); “Física 3” (Gaspar, 2001); “Tópicos de Física 3” (Gualter, Newton & Helou, 2001); “Temas de Física 3” (Bonjorno & Clinton, 1997).

1. Física para o Ensino Médio – Gonçalves e Toscano, 2002.
2. Física – Gualter e André, 2002.
3. Física: Série Novo Ensino Médio – Paraná, 2002.
4. Universo da Física 3 – Sampaio e Calçada, 2001.
5. Física Completa – Bonjorno, 2001.
6. Física: Coleção Novos Tempos – Chiquetto, 2000.
7. Curso de Física – Máximo e Alvarenga, 2000.
8. Os Fundamentos da Física – Ramalho, Nicolau e Toledo, 1999.
9. Física para o Ensino Médio – Paraná, 1999.
10. Física Fundamental – Bonjorno, 1999.
11. Física Básica – Nicolau e Toledo, 1998.
12. Física Clássica – Calçada e Sampaio, 1998.
13. Física e Realidade – Gonçalves e Toscano, 1997.

Além dos resultados obtidos com a análise dos livros do Ensino Médio, a abordagem dada ao assunto por livros universitários também contribuiu para a elaboração do texto. Por meio de uma análise de alguns livros universitários fez-se um delineamento de como eles apresentam o átomo de Bohr, particularmente no que se refere à passagem do ‘contínuo-clássico para o discreto-quântico’, e percebeu-se que, de forma geral, há dois tipos de abordagem: a que segue a evolução histórica dos acontecimentos e a que utiliza conceitos de teorias formuladas posteriormente (De Broglie).

Em virtude de se acreditar e defender o uso da história e da filosofia da ciência no processo de ensino/aprendizagem de conceitos optou-se por desenvolver o texto sobre o modelo atômico de Bohr de acordo com a evolução histórica dos fatos, ou seja, na forma como foi proposto por Bohr e em concordância com o sugerido pelo referencial adotado.

CONTEXTUALIZANDO O ASSUNTO

Ao final do século XIX, o conjunto de leis que hoje denominamos de Física Clássica e que tinha a mecânica newtoniana por núcleo fundamental assumia tal importância que fez parecer que a Física havia atingido seu ápice. Lord Kelvin, antes do

descobrimto do elétron, dos raios X e da radioatividade, chegou a aconselhar jovens estudantes que não se dedicassem à Física, pois acreditava que ela estava quase concluída. No entanto, ele mesmo observou que havia dois fenômenos sem explicação: o experimento de Michelson-Morley, que buscava determinar a velocidade da luz incidente na Terra, vinda de diferentes direções, e o estudo da distribuição de energia da radiação emitida por sistemas conhecidos como corpos negros.

Paralelamente às inovações teóricas, o século XIX foi marcado por progressos no plano instrumental, como por exemplo, na espectroscopia. A espectroscopia ótica foi um campo da experimentação que certamente se antecipou muito com relação à teoria correspondente. Joseph Fraunhofer, em 1814, ao tentar melhorar a qualidade dos instrumentos de ótica, detectou centenas de linhas denominadas riscas, dispostas em regiões bem definidas do espectro. Em 1859, surgiu o primeiro espectroscópio digno desse nome, aperfeiçoado por Robert Bunsen e Gustav Kirchhoff (Biezunski, 1998).

Com o espectroscópio, Kirchhoff estudou as cores características das chamas de diferentes elementos químicos e conseguiu interpretar que as riscas observadas por Fraunhofer, em 1814, caracterizavam a presença de elementos químicos que absorviam a radiação em determinados comprimentos de onda. Também, verificou-se que excitando uma amostra de hidrogênio havia emissão de energia pelo átomo, o que assinalava o espectro de emissão. A espectroscopia permitiu efetuar avanços importantes no conhecimento do universo, entre eles, explicar a presença de riscas escuras no espectro do sol, determinar elementos presentes nas estrelas, revelar novos elementos existentes na terra (Biezunski, 1998). A elaboração da teoria quântica da matéria organizou sistematicamente esse acúmulo maciço e ordenado de informações sobre espectros.

Em 1884, Johann Balmer propôs uma série matemática que descrevia muito bem o, então conhecido, espectro do hidrogênio na faixa do visível. Entretanto, a fórmula foi deduzida empiricamente e não explicava a existência do espectro descontínuo, servia apenas para o cálculo do comprimento de onda de algumas linhas. Imediatamente, foi reconhecido que a fórmula encontrada por Balmer estava se referindo a algo fundamental, mas as implicações de sua fórmula eram enigmáticas

(Sacks, 2002). Este problema continuou em aberto por vários anos, até o surgimento do modelo atômico de Bohr³⁶.

Na tentativa de compreender o espectro da radiação térmica, Kirchhoff, em 1859, realiza os primeiros estudos envolvendo a radiação emitida pelo sol e por outros ‘corpos quentes’. Denota que se um corpo absorve uma certa quantidade de radiação térmica incidente, ele também emite a mesma quantidade de radiação. Ao considerar uma série de cavidades com diferentes materiais em suas paredes, Kirchhoff mostra que, a uma temperatura uniforme, o espectro da radiação emergente não depende da forma ou tamanho da cavidade, nem tampouco do material que são constituídas as paredes; depende, apenas, da temperatura absoluta do corpo e da frequência da radiação emitida (Peduzzi, 2002).

Em 1900, Max Planck, um dos pais fundadores da Física Quântica, voltou a analisar o problema a respeito do cálculo da intensidade da radiação, distribuída pelas diversas frequências, emitidas por materiais bastante aquecidos. Assim, passou a investigar a forma como a radiação e o corpo interagem. Este estudo causou uma revolução na teoria física ao revelar que o comportamento de pequenos sistemas obedece regras que não podem ser explicadas pelas leis das teorias clássicas. O mundo atômico e subatômico, por exemplo, não obedeceriam mais às regras até então empregadas, sendo necessárias novas interpretações, as quais nossa intuição não mais se aplicava.

O estudo da radiação de corpo negro, que levou à origem da teoria quântica, tinha algo de absoluto, pois segundo a definição de Kirchhoff, professor de Planck, a principal característica de um corpo negro perfeito é sua capacidade de reemitir toda a radiação que incide sobre ele; é um emissor e absorvedor perfeito. Para cada temperatura do sistema varia a natureza da radiação emitida. Um metal, por exemplo, quando aquecido pode emitir radiação visível, na forma de luz vermelha, ou invisível a nossos olhos, como o infravermelho (De Groote, 2001). A denominação ‘corpo negro’ foi dada em analogia com os corpos escuros, que absorvem a maior parte de energia neles incidentes. No entanto, um corpo negro pode ter qualquer cor, desde que seja um absorvedor e emissor ideal (Freire Jr. & Carvalho Neto, 1997).

³⁶ A respeito dos espectros consultar BRÁZ JR, D. & MARTINS, R. **Física Moderna: tópicos para o Ensino Médio**. Companhia da Escola, 1ª edição, Campinas, 2002. EISBERG, R. M. & RESNICK, R. **Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. Rio de Janeiro: Campus, 1994.

Diversas tentativas de explicar o comportamento da radiação utilizando conhecimentos da mecânica clássica e da termodinâmica não foram bem sucedidas, por volta de 1890; embora se conhecesse vários resultados experimentais que mostravam que, a diferentes temperaturas, a energia radiante era emitida com distintas frequências.

Planck conseguiu solucionar o problema usando preceitos muito estranhos à Física Clássica. Partículas oscilando em uma caixa podem, classicamente, emitir radiação em qualquer comprimento de onda ou frequência. Entretanto, para obter o que hoje chamamos da ‘lei da radiação de Planck’, foi necessário considerar que as partículas oscilando só poderiam emitir radiação em pacotes, e a energia destes seria proporcional à frequência na forma $E = hn$. A constante física h foi introduzida pelo próprio Planck e ficou conhecida como constante de Planck. A energia emitida passou a ser quantizada, ou seja, tratada de forma descontínua, discreta.

A hipótese da quantização da energia de partículas vibrando era contraditória a tudo o que se sabia na época, mas permitia resolver o enigma posto pelo corpo negro. Era tão radical que, mesmo reproduzindo exatamente uma observação experimental, não foi aceita até que viesse a ser adotada por Einstein em 1905 (De Groot, 2001).

Max Planck recebeu o prêmio Nobel de Física por esse trabalho 18 anos mais tarde, todavia, foi necessário uma teoria quântica consistente e elaborada para que a incrível capacidade de explicar e prever fenômenos físicos de sua proposta fosse aceita pela comunidade científica.³⁷

Em 1905, Albert Einstein estendeu a hipótese de Planck para uma nova direção: a quantização da energia dos osciladores para investigar as leis de produção e conversão da radiação. O objetivo era saber se as leis de produção e conversão da radiação eram estabelecidas como se a radiação fosse constituída por *quanta* de energia (Freire Jr. & Carvalho Neto, 1997).

Assim, Einstein, em uma inovação conceitual, se propôs a investigar se os fenômenos luminosos, que foram bem descritos ao longo do século XIX como fenômenos ondulatórios, poderiam ser considerados como compostos de pequenas

³⁷ Sobre a emissão de radiação térmica, equilíbrio térmico, corpo negro, tentativas de descrever e quantificar a radiação térmica, quantização da energia de Planck, surgimento do quanta, consultar ainda as referências: BRÁZ JR, D. & MARTINS, R. **Física Moderna: tópicos para o Ensino Médio**. Companhia da Escola, 1ª edição, Campinas, 2002. EISBERG, R. M. & RESNICK, R. **Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. Rio de Janeiro: Campus, 1994. GASPAR, A. **Física 3**. Editora Ática. São Paulo, 2001.

partículas de energia eletromagnética. Einstein questionava se a descrição de Maxwell era compatível com a fórmula do corpo negro de Planck e chegou à surpreendente conclusão de que “ *a energia pode ser absorvida e emitida pelo oscilador isolado apenas em ‘quanta’ de magnitude hn , isto é, que a energia de uma estrutura mecânica capaz de oscilações, bem como a energia da radiação, pode ser transferida apenas nesses ‘quanta’, em contradição com as leis da mecânica e da eletrodinâmica*” (Segrè, 1987, p. 89). Essa interpretação foi original, pois Planck não havia sugerido que a radiação seria constituída por pacotes discretos de energia. Einstein utilizou apenas a equação de Planck para calcular a energia de cada quanta de radiação.

Apoiado na idéia da quantização da radiação eletromagnética, Einstein desenvolveu cálculos com previsões experimentais bastante detalhadas sobre um fenômeno físico, já conhecido, chamado efeito fotoelétrico, que consiste na propriedade de um metal emitir elétrons quando sobre ele incide uma radiação de frequência apropriada. Este fenômeno provinha do fato de que alguns eletroscópios podiam ser descarregados quando sobre eles fosse incidida radiação, especialmente a ultravioleta. De acordo com Einstein, a energia dos elétrons emitidos deveria ser proporcional à frequência da radiação incidente, discordando da teoria do eletromagnetismo que previa a energia como sendo proporcional à intensidade.

As previsões de Einstein foram submetidas a testes experimentais bastante precisos e confirmadas por Robert Millikan. Como exemplo de uma evidência do modelo corpuscular introduzido por Einstein, pode-se mencionar o fato de os elétrons de uma placa metálica expostos à radiação ultravioleta deixarem a placa com uma energia cinética maior do que se estivessem expostos à luz vermelha, na mesma intensidade. Esse modelo também explica a emissão quase instantânea de elétrons de uma placa exposta à luz, o que a mecânica ondulatória previa ter um intervalo de tempo da ordem de minutos³⁸.

O progresso realizado a partir das idéias de Planck foi enorme. O que para Planck foi somente uma quantização de osciladores materiais que formavam as paredes do corpo negro, para Einstein era um fenômeno fundamental onde o próprio campo eletromagnético era quantizado. Apesar das enormes dificuldades apresentadas pela

³⁸ A respeito do efeito fotoelétrico, consultar as obras: EISBERG, R. M. & RESNICK, R. **Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. Rio de Janeiro: Campus, 1994. BRÁZ JR, D. & MARTINS, R. **Física Moderna: tópicos para o Ensino Médio**. Companhia da Escola, 1ª edição, Campinas, 2002. TIPLER, P. A. & LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 3ª. edição, Rio de Janeiro, LTC, 2001.

quantização para explicar fenômenos de propagação da luz, Einstein reconheceu sua natureza fundamental e não deixou de meditar sobre eles até que fossem encontradas soluções (Segrè, 1987).

Em 1911, época do modelo atômico de Rutherford, já se sabia que um gás emitia radiação quando aquecido ou passando uma corrente elétrica. Também, era comum o teste com materiais que, em contato com a chama de um bico de Bunsen, emitiam cores características. Em um procedimento um pouco mais sofisticado, a radiação expelida por um elemento excitado era coletada, colimada por uma fenda e depois de passar por um prisma ou uma rede de difração as suas diversas faixas de frequência eram separadas, originando as linhas de emissão que constituem o espectro do referido elemento. No entanto, não havia explicação para o fato de o espectro ser descontínuo. A radiação emitida pelos átomos excitados era associada ao movimento dos elétrons, contudo, nem a fórmula de Balmer, nem mesmo o modelo de Rutherford eram compatíveis com o espectro descontínuo (Braz Júnior & Martins, 2002).

Esse enigma da radiação emitida ter frequências bem definidas só foi solucionado quando, em 1913, Niels Bohr, com base na quantização da energia, oriunda da radiação do corpo negro e do efeito fotoelétrico, propôs uma correção para o modelo de Rutherford que solucionou o problema da instabilidade do átomo e ajustou com notável simplicidade a descontinuidade dos espectros, expressa pela fórmula de Balmer.

O ÁTOMO DE RUTHERFORD

Ao investigar a radioatividade natural dos elementos, Ernest Rutherford percebe que o urânio emite pelo menos dois tipos de partículas, chamadas de **a** e **b**. Através de um experimento, semelhante ao de J.J. Thomson, observou que a razão q/m para as partículas **a** era duas vezes menor do que para o próton, o que o fez suspeitar de que elas não passavam de átomos de hélio duplamente ionizados.

Rutherford e seus colaboradores deixaram uma amostra de substância radioativa – o rádio³⁹ – desintegrar-se, experimentalmente. Assim, partículas **a**⁴⁰ foram emitidas em uma câmara previamente evacuada e submetida a uma descarga elétrica.

³⁹ O rádio é uma excelente fonte de partículas **a** de alta energia.

Este procedimento proporcionou a visualização das linhas do espectro de hélio. A partir disso, Rutherford iniciou uma série de experimentos com partículas **a**, por serem providas de alta energia e terem massa relativamente elevada.

Os colaboradores de Rutherford constataram, nesses experimentos, que as partículas **a** são absorvidas por lâminas de metal com alguns centésimos de milímetros de espessura e que podem facilmente atravessar uma fina lâmina de ouro com a espessura de poucos décimos milésimos de milímetro. Observaram, ainda, que a maioria das partículas não sofria nenhum tipo de deflexão ou era defletida em um ângulo muito pequeno⁴¹. Todavia, pouquíssimas delas, surpreendentemente, sofriam grandes deflexões com ângulos maiores de 90°. Apesar de algumas retornarem para o lado da folha de ouro, o resultado contrariava o que o modelo de Thomson previra, pois se o núcleo fosse uma esfera positivamente carregada de raio 10^{-10} m, na qual os elétrons estavam ‘encharcados’, o choque de uma partícula **a** com o átomo poderia resultar apenas em uma pequena deflexão, mesmo que a partícula penetrasse profundamente no átomo. Rutherford salienta: *“Foi a coisa mais incrível que aconteceu em toda a minha vida. Era tão incrível quanto se você disparasse um projétil de 15 polegadas contra um pedaço de papel e o projétil ricocheteasse de volta”*. (Tipler & Llewellyn, 2001)

Deste modo, ficou claro que o modelo do ‘pudim de passas’ de J.J.Thomson não justificava as grandes deflexões. Assim, Rutherford propôs um outro modelo. Neste, a parte maciça e positiva do átomo está concentrada em um volume muito restrito, no centro do átomo – hoje denominado núcleo- que é envolvido por elétrons orbitando, que tornam o átomo neutro. Presume-se que a proposição, de um centro consistente e concentrado, foi feita em razão de o átomo de Thomson ser muito ‘macio’ e produzir uma força pequena para conceder grandes deflexões à partícula **a**. Se a carga positiva do átomo estivesse concentrada em uma pequena região, a força em impactos frontais seria muito maior.

Uma série de experimentos realizados por H. Geiger e E. Marsden confirmaram os cálculos de Rutherford para a variação da probabilidade de espalhamento com o ângulo, a carga do núcleo e a energia cinética das partículas **a**.

⁴⁰ As partículas **a** podem percorrer no ar uma distância de poucos centímetros, antes de parar; no vácuo, viajam grandes distâncias, sem perder energia; quando atingem determinadas substâncias, produzem pulsos visíveis de luz fluorescente.

Utilizando as partículas α , Rutherford inferiu que a matéria consiste principalmente de espaços vazios e que a parte mais compacta do átomo se concentra em uma região de massa muito grande, na qual há partículas que se repelem com grande intensidade.

O sucesso da teoria de Rutherford sobre o espalhamento de partículas α fez com que ele fosse considerado o descobridor do núcleo atômico (Wehr & Richard Jr, 1965).

A verificação experimental detalhada das previsões do modelo de Rutherford para o átomo deixou poucas dúvidas em relação à validade deste modelo (Eisberg & Resnick, 1994). No entanto, surgiram sérias questões a respeito da estabilidade de um átomo como o proposto por Rutherford, uma vez que os elétrons, que neutralizam o átomo como um todo, estariam constantemente acelerados em torno do núcleo e, de acordo com a teoria eletromagnética clássica, todos os corpos carregados acelerados irradiam energia em forma de radiação eletromagnética. Isso faria com que o elétron se movesse em espiral em direção ao centro do átomo até colapsar com o mesmo.

O problema da estabilidade do átomo de Rutherford levou Niels Bohr a formular outro modelo, no qual é realizado uma ampla revisão de conceitos da física clássica e introduzido elementos da física quântica.

O ÁTOMO DE BOHR

Em 1913, o físico dinamarquês Niels Bohr propõe uma correção para o modelo atômico de Rutherford com base na quantização da energia e combinando os trabalhos de Einstein, Planck e Rutherford.

O problema básico de Bohr era o de entender a estabilidade da matéria, ou seja, como os átomos do modelo proposto por Rutherford podiam permanecer estáveis, *“um perfeito milagre, quando considerado do ponto de vista clássico”* (Heisenberg, 1996).

O interesse em desvendar a estrutura do átomo está imerso em uma física em um processo que abrange várias transformações, manifestadas pela descoberta dos raios X, da radioatividade, da teoria de Einstein para o efeito fotoelétrico, das experiências e

⁴¹ As partículas sofrem deflexões devido à força coulombiana entre sua carga e as cargas positivas e negativas dos átomos da folha.

modelo atômico de Rutherford e dos estudos sobre os espectros e a radiação térmica. Além disso, aparecem evidências de que a física clássica é incapaz de lidar com fenômenos atômicos. Mencionando o desenvolvimento da teoria da radiação de energia e a confirmação de pressupostos introduzidos por esta teoria, Bohr ressalta que

“O resultado da discussão destas questões parece ser um reconhecimento geral de que a eletrodinâmica clássica não consegue descrever o comportamento de sistemas de dimensões atômicas. Qualquer que seja a alteração das leis do movimento dos elétrons parece necessário introduzir nas leis em questão uma quantidade alheia à eletrodinâmica clássica, a constante de Planck, ou, como muitas vezes é designada, o quantum elementar de ação.” (Bohr, 1989, p.96)

Paralelamente à busca de um modelo atômico satisfatório, os cientistas desta época também estavam interessados em explicar as séries espectrais dos elementos químicos. Em 1885, Balmer descobriu empiricamente uma fórmula para calcular a posição de linhas do espectro na região visível do hidrogênio. Em 1908, Paschen encontrou séries espectrais do hidrogênio na região do infravermelho. No entanto, ainda não havia nenhuma teoria que justificasse esses valores obtidos.

Cinco postulados constituem o ‘núcleo duro’ do programa de pesquisa de Bohr. O livro “Sobre a constituição de átomos e moléculas” (Bohr, 1989) apresenta-os na seguinte forma:

1. Que a energia radiada não é emitida (ou absorvida) da maneira contínua admitida pela eletrodinâmica clássica, mas apenas durante a passagem dos sistemas de um estado ‘estacionário’ para outro diferente.
2. Que o equilíbrio dinâmico dos sistemas nos estados estacionários é governado pelas leis da mecânica clássica, não se verificando essas leis nas transições dos sistemas entre diferentes estados estacionários.
3. Que é homogênea a radiação emitida durante a transição de um sistema de um estado estacionário para outro, e que a relação entre a frequência ν e a quantidade total de energia é dada por $E = h\nu$, sendo h a constante de Planck.
4. Que os diferentes estados estacionários de um sistema simples constituído por um elétron que roda em volta de um núcleo positivo são determinados

pela condição de ser igual a um múltiplo inteiro de $\frac{h}{2}$ a razão entre a energia total emitida durante a formação da configuração e a frequência de revolução do elétron. Admitindo que a órbita do elétron é circular, esta hipótese equivale a supor que o momento angular do elétron em torno do núcleo é igual a um múltiplo inteiro de $\frac{h}{2p}$.

5. Que o estado ‘permanente’ de um sistema atômico – isto é, o estado no qual a energia emitida é máxima – é determinado pela condição de ser igual a $\frac{h}{2p}$ o momento angular de cada elétron em torno do centro da sua órbita.

Com o primeiro e o segundo postulado, Bohr elimina o problema da estabilidade de um elétron se movendo em uma órbita circular. Ao postular que a emissão de radiação eletromagnética pelo elétron prevista pela física clássica não é válida para o caso de um elétron atômico, soluciona o paradoxo do átomo de Rutherford e estabelece um perfil de uma teoria incompatível com o eletromagnetismo maxwelliano. É interessante notar que Bohr compartilha os preceitos da teoria eletrodinâmica clássica; entretanto, a desconsidera quando admite a não emissão de radiação por um corpo carregado acelerado. Nestes postulados foi considerado o que se observava experimentalmente, ou seja, o fato de que a energia não é emitida de maneira contínua e de que os átomos são estáveis.

Rosenfeld explicita que

“O caráter arrojado (para não dizer escandaloso) do postulado quântico de Bohr nunca poderá ser acentuado com ênfase excessiva: que a frequência de uma radiação emitida ou absorvida por um átomo não coincidissem com qualquer frequência do seu movimento interno deve ter parecido à maior parte dos físicos contemporâneos como quase impensável”. (Rosenfeld, 1989, p. 71)

O terceiro postulado, retoma a idéia de Einstein de que a frequência de um fóton de radiação eletromagnética é igual à energia do fóton dividida pela constante de Planck.

Bohr baseia o seu modelo na existência do núcleo atômico e de elétrons descrevendo órbitas em torno do núcleo, no quarto postulado. Para simplificar, supõe que o elétron do átomo de hidrogênio se move em órbitas circulares.

No quinto, introduz a quantização do momento angular orbital de um elétron atômico se movendo sob a influência de uma força coulombiana inversamente proporcional ao quadrado da distância. Com esta consideração, supõe que o elétron se movendo em órbita circular obedece à mecânica clássica, no entanto, inclui a idéia não clássica da quantização do momento angular.

Com a quantização do momento angular, os raios das órbitas eletrônicas e as energias a elas associadas também passam a ser quantizadas.

Em suma, os postulados de Bohr misturaram de forma melindrosa aspectos da ‘velha’ física clássica com as novidades da física moderna da época. Em uma carta enviada a McLaren, em primeiro de setembro de 1913, Bohr expressa seu ponto de vista:

“Penso que estamos de acordo quanto à necessidade de novas hipóteses; mas pensa que serão necessários pressupostos tão desconcertantes como os que eu utilizei? De momento estou inclinado para idéias mais radicais e considero a aplicação da mecânica como tendo apenas validade formal”. (Rosenfeld, 1989, p. 71)

Assim, Bohr desenvolve conscientemente sua teoria a partir de fundamentos inconsistentes, ou seja, contrário à bem corroborada teoria de Maxwell para o eletromagnetismo e também ao corroborado modelo atômico de Rutherford (Lakatos, 1979).

A quantização da energia no modelo de Bohr

Bohr partiu da idéia clássica de que a força de atração elétrica, F , do núcleo positivo sobre um elétron é dada pela lei de Coulomb. De acordo com a mecânica clássica, a órbita do elétron teria que ser circular ou elíptica. Para simplificar os cálculos, Bohr optou por trabalhar com órbitas circulares, considerar, inicialmente, a massa do núcleo como sendo infinita e aplicar a sua teoria ao átomo de hidrogênio.

Para Lakatos, a parte do modelo de Bohr que leva em conta as considerações acima é denominado de primeiro modelo, ou M_1 . Este primeiro modelo continha o passo inicial de seu programa e previa fatos não preditos por nenhuma teoria anterior: os comprimentos de onda das linhas do espectro de emissão do hidrogênio.

Em um átomo de hidrogênio, o módulo da carga do núcleo devido ao próton será $|Q_p| = |e| = e$, onde e é a carga elementar do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)⁴². A carga de cada elétron em módulo é $|Q_e| = |-e| = e$. Assim, a força de atração coulombiana é dada por

$$F = K_1 \frac{|Q_p||Q_e|}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ee}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad (1)$$

onde ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo e r a distância entre o núcleo e o elétron. Esta força tem a direção radial e aponta para o centro, assim

$$F = m_e \frac{v^2}{r} \quad (2)$$

em que m_e é a massa do elétron e v , sua velocidade.

Igualando as duas expressões acima se obtém a estabilidade do sistema núcleo-elétron. Supõe-se que a massa do núcleo é infinita e o elétron gira ao redor do núcleo, supostamente parado.

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = m_e \frac{v^2}{r} \quad (3)$$

Até aqui, tudo clássico. Entretanto, de acordo com o eletromagnetismo, uma carga acelerada emite radiação eletromagnética, logo, a perda de energia do elétron o levaria a colapsar com o núcleo atômico, tornando impossível o seu movimento em uma órbita estável.

⁴² Como forma de tratamento didático, os cálculos serão desenvolvidos no Sistema Internacional (SI); Bohr utilizou outro sistema de unidades.

Para solucionar este problema, Bohr supôs que o momento angular orbital ($L = m_e v r$), também clássico, deveria ser constante para cada órbita eletrônica, uma vez que a força é central, e quantizado, tal que $L = n \frac{h}{2\pi}$, onde h é a constante de Planck e $n=1,2,3\dots$

A grande novidade é a quantização de L , uma idéia verdadeiramente original! Assim,

$$m_e v_n r_n = n \frac{h}{2\pi} \quad (4)$$

Logo, v_n será:

$$v_n = n \frac{h}{2\pi m_e r_n} \quad (5)$$

Substituindo (5) em (3), obtém-se,

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2} = m_e \frac{v_n^2}{r_n}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2} = m_e \frac{\left(\frac{nh}{2\pi m_e r_n}\right)^2}{r_n}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2} = m_e \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m_e^2 r_n^3}$$

Simplificando a expressão e isolando r_n ,

$$r_n = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} \quad n=1,2,3,\dots \quad (6)$$

A órbita de menor raio corresponde a $n=1$,

$$r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$$

As demais órbitas crescem com os números 4, 9, 16,... Desta forma,

$$r_n = n^2 r_1 \quad n=2,3,4,\dots$$

De (6) em (5), encontra-se a velocidade do elétron em função da órbita que descreve,

$$v_n = \left(\frac{nh}{2\pi m_e} \right) \left(\frac{\pi m_e e^2}{e_0 h^2 n^2} \right)$$

$$v_n = \frac{e^2}{2e_0 h n} \quad n=1,2,3,\dots \quad (7)$$

A energia, E_n , de cada estado é

$$E_n = E_{c_n} + E_{p_n} \quad (8)$$

em que E_{c_n} é a energia cinética do elétron e E_{p_n} é a energia potencial do sistema para a órbita n .

Considerando que o elétron se move com velocidade v_n ao redor do núcleo fixo, sua energia cinética E_{c_n} é dada por

$$E_{c_n} = \frac{m_e v_n^2}{2} \quad (9)$$

Como se viu, a força de Coulomb é a própria resultante centrípeta. Então

$$\frac{1}{4\pi e_0} \frac{e^2}{r_n^2} = m_e \frac{v_n^2}{r_n}$$

$$m_e v_n^2 = \frac{e^2}{4\pi e_0 r_n}$$

Dividindo ambos os membros da expressão acima por dois,

$$\frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} \quad (10)$$

$$E_{c_n} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} \quad (11)$$

A energia potencial elétrica do sistema núcleo-elétron vem da eletrostática

$$E_{p_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e(-e)}{r_n} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \quad (12)$$

Assim, escreve-se a energia total E_n como

$$E_n = E_{c_n} + E_{p_n} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} = \frac{e^2 - 2e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} \quad (13)$$

Substituindo o valor de r_n calculado em (6)

$$E_n = E_{c_n} + E_{p_n} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 \left(n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}\right)} = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8\pi\epsilon_0 h^2} \quad (14)$$

Portanto, a energia associada a cada estado estacionário do elétron é

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8\pi\epsilon_0 h^2} \quad (15)$$

Esta é a expressão da energia quantizada para o átomo de hidrogênio!

O sinal negativo da energia indica que o elétron não tem energia suficiente para escapar do átomo. Ele provém do referencial do potencial elétrico convencionado no infinito, onde a energia do elétron atinge seu valor máximo, que é zero.

Para $n=1$, E_1 vale

$$E_1 = -\frac{1}{1^2} \frac{(9,1091 \times 10^{-31})(1,6022 \times 10^{-19})^4}{8(8,8542 \times 10^{-12})^2 (6,6261 \times 10^{-34})^2}$$

$$E_1 = -2,1799 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$E_1 = -13,6057eV \quad (16)$$

A equação (15) especifica os níveis de energia do átomo de hidrogênio. O nível de energia E_1 é chamado de estado fundamental do átomo. De acordo com Bohr, quando um elétron sofre uma transição de um nível de energia E_{ni} para outro menor de energia E_{nf} , há emissão de um fóton de frequência

$$\mathbf{n} = \frac{E_{ni} - E_{nf}}{h}$$

Assim, de (15) tem-se que

$$E_{ni} = -\frac{1}{n_i^2} \frac{m_e e^4}{8e_0^2 h^2}$$

e

$$E_{nf} = -\frac{1}{n_f^2} \frac{m_e e^4}{8e_0^2 h^2}$$

Nestas condições, a frequência da radiação emitida é

$$\mathbf{n} = \frac{m_e e^4}{8e_0^2 h^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (17)$$

ou, em função do comprimento de onda, onde $\frac{1}{\mathbf{l}} = \frac{\mathbf{n}}{c}$ e c é a velocidade da luz no vácuo,

$$\frac{1}{\mathbf{l}} = \frac{m_e e^4}{8e_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (18)$$

Substituindo os valores conhecidos das constantes em (18), obtém-se

$$\frac{1}{\mathbf{l}} = \frac{(9,1091 \times 10^{-31})(1,6022 \times 10^{-19})^4}{8(8,8542 \times 10^{-12})^2 (6,6261 \times 10^{-34})^3 (2,9979 \times 10^8)} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

$$\frac{1}{I} = 1,0974 \times 10^7 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (19)$$

$$\frac{1}{I} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (20)$$

sendo R_H a constante de Rydberg para o átomo de hidrogênio.

A fórmula de Bohr (eq. 20) fornece a série de Balmer para $n_f = 2$ e a de Paschen para $n_f = 3$, respectivamente

$$\frac{1}{I_n} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{para } n = 3, 4, 5, \dots \quad (21)$$

$$\frac{1}{I_n} = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{para } n = 4, 5, 6, \dots \quad (22)$$

Como as séries de Balmer e Paschen eram conhecidas antes de 1913 e corroboram a teoria de Bohr, é necessário estar alerta e não apresentar os estudos de Bohr como sendo originados e direcionadas a explicar o valor já conhecido destas séries, pois, como já foi dito anteriormente, o problema que levou Bohr a formular sua teoria foi a instabilidade do átomo do modelo de Rutherford.

Segundo Lakatos, alguns historiadores apresentam a história do modelo atômico de Bohr como um exemplo de ‘ascensão indutiva’ baconiana, delimitada por:

- O caos das linhas do espectro;
- Uma lei empírica (Balmer);
- A explicação teórica (Bohr).

Isto faz com que a expressão empírica para a série de Balmer seja utilizada como justificativa para a elaboração da teoria de Bohr, o que a torna uma ótima fonte para uma apresentação empírico-indutivista do conhecimento científico. Contudo, a idéia de que a fórmula de Balmer possa ter despertado algum interesse em Bohr é equivocada, pois, durante o desenvolvimento de sua teoria, Bohr foi questionado por Hansen, um estudante amigo, a respeito do que o seu modelo tinha a dizer sobre os espectros e ele respondeu que nada tinha a pronunciar sobre o assunto. Somente anos mais tarde, Bohr

declarou que quando viu a fórmula de Balmer tudo ficou claro para ele. Esta é mais uma confirmação de que Bohr não tinha intenção de que sua teoria explicasse as linhas espectrais.

Embora o M_1 de Bohr tenha sido confirmado pelas séries de Balmer e Paschen e previsto novas séries, que foram descobertas posteriormente, Lakatos esclarece que nem todo o conteúdo deste primeiro modelo, que afirmava prever todas as linhas do espectro de emissão do hidrogênio, foi corroborado, pois a experiência denotava a presença de uma série anômala: a série de Pickering-Fowler (Lakatos, 1979).

Segundo Lakatos, Pickering descobriu essa série em 1896 no espectro da estrela Pupis; e Fowler, depois de haver descoberto sua primeira linha no sol, produziu toda a série num tubo de descarga que continha hidrogênio e hélio. Embora pudesse ser argumentado que esse resultado nada tinha a ver com o hidrogênio, uma vez que a estrela e o sol contêm muitos gases e o tubo continha hélio, a técnica possuía uma base teórica plausível - apesar de nunca testada - e conduzia a uma hipótese falseadora da lei de Balmer. A série deles continha o mesmo número de convergência da série de Balmer, por isso, foi considerada como uma série do hidrogênio. Bohr não ficou muito impressionado com Pickering e Fowler; não contradisse a observação experimental nem a validade de suas observações, mas contestou-lhes a teoria observacional. Para propor uma alternativa, elaborou um novo modelo, o M_2 (Lakatos, 1979).

O modelo salientado por Lakatos para ser o M_2 de Bohr é o do hélio ionizado, com dois prótons em torno do qual um elétron descreve uma órbita. Este modelo foi elaborado para explicar as séries de Pickering-Fowler⁴³.

O tratamento didático do M_2 de Bohr é semelhante ao realizado para o átomo de hidrogênio pois, como o átomo de hélio possui dois elétrons, ao ser ionizado ele fica com um único elétron, como o hidrogênio. Desta forma, para átomos de número atômico Z , mas com um único elétron pode-se apresentar, didaticamente, a dedução das expressões de uma maneira genérica e, aplicar tanto para o hidrogênio, como para o hélio ionizado ou o átomo de lítio duplamente ionizado. Assim, a força de atração entre o núcleo de carga Ze e os elétrons de carga e é dada por

⁴³ Em uma nova redação do texto seria mais apropriado substituir “Este modelo foi elaborado para explicar as séries de Pickering-Fowler” por “Este modelo foi elaborado para lidar com o problema levantado pelas séries de Pickering – Fowler”.

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(Ze)e}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} \quad (23)$$

Novamente, essa força tem direção radial e aponta para o centro,

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} = m_e \frac{v^2}{r} \quad (24)$$

A idéia da quantização do momento angular continua a mesma, logo v pode ser expresso, já quantizado, como em (5)

$$v_n = n \frac{h}{2\pi m_e r_n} \quad (25)$$

Analogamente ao realizado para o átomo de hidrogênio, ao substituir (25) em (24) obtém-se

$$r_n = n^2 \frac{e_0 h^2}{\pi m_e Z e^2} \quad n=1,2,3, \quad (26)$$

De (26) em (25) têm-se

$$v_n = \frac{Ze^2}{2e_0 h n} \quad n=1,2,3,\dots \quad (27)$$

A energia total de cada estado do sistema é dada por

$$E_n = E_{c_n} + E_{p_n} \quad (28)$$

Realizando as mesmas operações desenvolvidas para o átomo de hidrogênio, mas considerando um Z genérico, a expressão para a energia cinética do elétron na órbita n fica

$$E_{c_n} = \frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} \quad (29)$$

e a energia potencial

$$E_{p_n} = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \quad (30)$$

Calculando-se a energia total do sistema e substituindo-se nesta nova expressão o valor de r_n encontrado em (26), semelhante ao que foi feito para o átomo de hidrogênio, obtém-se a expressão para a energia associada a cada estado estacionário do elétron

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e Z e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \quad n= 1, 2, 3... \quad (31)$$

Esta é a expressão geral, para átomos de número atômico Z , que fornece os valores de cada nível de energia permitido para o elétron.

Assim, para o hélio ionizado E_n vale

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e 2^2 e^4}{8\epsilon_0^2 h^2}$$

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{2\epsilon_0^2 h^2} \quad n= 1, 2, 3... \quad (32)$$

Para $n=1$

$$E_1 = -\frac{1}{1^2} \frac{(9,1091 \times 10^{-31})(1,6022 \times 10^{-19})^4}{2(8,8542 \times 10^{-12})^2 (6,6261 \times 10^{-34})^2}$$

$$E_1 = -8,7196 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$E_1 = -54,4227 \text{ eV} \quad (33)$$

Equivalentemente à expressão (18), têm-se para o átomo de hélio ionizado que

$$\frac{1}{I} = \frac{m_e e^4}{2\epsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (34)$$

Substituindo os valores das constantes em (34)

$$\frac{1}{I} = \frac{(9,1091 \times 10^{-31})(1,6022 \times 10^{-19})^4}{2(8,8542 \times 10^{-12})^2 (6,6261 \times 10^{-34})^3 (2,9979 \times 10^8)} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

$$\frac{1}{I} = 4,3896 \times 10^7 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (35)$$

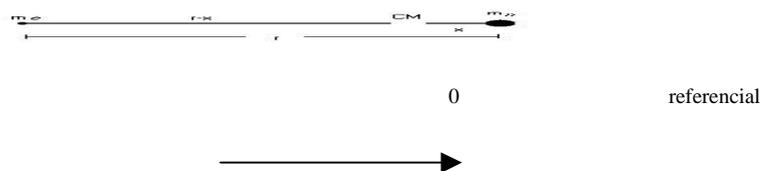
$$\frac{1}{I} = 4R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

De acordo com Lakatos, os valores dos comprimentos de onda na série de Fowler diferiam dos valores preditos pelo M₂. Lakatos afirma que quando Bohr foi questionado, por Fowler, reconheceu que obteve os valores através de um ‘cálculo tosco’, com base em um elétron descrevendo órbita em torno de um núcleo fixo e que precisava lapidar seu M₂ para que a discrepância entre os valores fosse ajustada. Elaborou o M₃, no qual considera que a órbita descrita pelo elétron ocorre em torno de um centro comum de gravidade e, realizando mais rigorosamente os cálculos, encontrou um termo corretivo dependente da relação da massa do elétron e a do núcleo: a massa reduzida.

A correção para a massa nuclear finita⁴⁴

O modelo que considera a massa nuclear como sendo finita foi denominado de M₃ de Bohr e, segundo Lakatos, a aparente refutação de M₂ converteu-se em uma vitória retumbante para M₃. Nesta época, Einstein declara que a teoria de Bohr foi uma das maiores descobertas (Lakatos, 1979).

Supondo que a separação entre um elétron e o núcleo do átomo seja r , a distância entre o núcleo e o centro de massa seja x e coincida com a origem do referencial adotado, assim pode-se expressar que



⁴⁴ Retirado da referência Peduzzi, 2002.

$$0 = \frac{m_n - m_e(r-x)}{m_n + m_e}$$

$$m_n x = m_e(r-x) \quad (36)$$

$$x = \frac{m_e r}{m_e + m_n} \quad (37)$$

Os momentos angulares orbitais do elétron e do núcleo em relação ao centro de massa podem ser escritos como

$$\vec{L}_e = \vec{r}_e \times m_e \vec{v}_e = m_e \mathbf{w}(r-x)^2 \vec{k} \quad (38)$$

e

$$\vec{L}_n = \vec{r}_n \times m_n \vec{v}_n = m_n \mathbf{w} x^2 \vec{k} \quad (39)$$

onde \mathbf{w} é a velocidade angular comum ao núcleo e ao elétron e \vec{k} um vetor unitário perpendicular ao plano das órbitas.

Logo, o momento angular do sistema será:

$$\vec{L} = \vec{L}_e + \vec{L}_n = L \vec{k} \quad (40)$$

$$L = m_e \mathbf{w}(r-x)^2 + m_n \mathbf{w} x^2 \quad (41)$$

Isolando $(r-x)$ em (36) e substituindo em (41)

$$L = \frac{m_n^2 \mathbf{w} x^2}{m_e} + m_n \mathbf{w} x^2$$

$$L = \left(\frac{m_n}{m_e} + 1\right) m_n \mathbf{w} x^2 \quad (42)$$

De (37) em (42)

$$L = \left(\frac{m_n + m_e}{m_e}\right) m_n \mathbf{w} \frac{m_e^2 r^2}{(m_e + m_n)^2}$$

$$L = \left(\frac{m_n m_e}{m_e + m_n} \right) \omega r^2 \quad (43)$$

A quantidade entre parênteses da equação (43) é chamada de massa reduzida, \mathbf{m} , do sistema elétron-núcleo, então

$$\mathbf{m} = \frac{m_e m_n}{m_e + m_n} \quad (44)$$

$$\mathbf{m} = \frac{(9,1091 \times 10^{-31})(1,6725 \times 10^{-27})}{9,1091 \times 10^{-31} + 1,6725 \times 10^{-27}}$$

$$\mathbf{m} = 9,1041 \times 10^{-31} \text{ kg} \quad (45)$$

Assim,

$$L = \mathbf{m} \omega r^2 \quad (46)$$

Mas para $m_n \gg m_e \Rightarrow \mathbf{m} = m_e$. Neste caso,

$$L = m_e \omega r^2 \quad (47)$$

Através da equação (47) é possível denotar que o momento angular do sistema é o momento do próprio elétron orbitando em torno do núcleo imóvel.

O M₃ de Bohr passou a considerar que o giro do elétron ocorre em torno de um centro comum de massa e que a massa do elétron é a sua massa reduzida. Logo, o valor da energia para o átomo de hélio no nível $n=1$ será

$$E_1 = -\frac{1}{n^2} \frac{\mathbf{m} e^4}{2e_0^2 h^2} \quad (48)$$

$$E_1 = -\frac{1}{1^2} \frac{(9,1041 \times 10^{-31})(1,6022 \times 10^{-19})^4}{2(8,8542 \times 10^{-12})^2 (6,6261 \times 10^{-34})^2}$$

$$E_1 = -8,7148 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$E_1 = -54,3927 \text{ eV} \quad (49)$$

A diferença entre os valores obtidos no M_3 (eq. 49) e no M_2 (eq. 33), foi a discrepância que o modelo M_2 de Bohr apresentou em relação às observações experimentais.

Assim, a expressão para a energia quantizada pode ser escrita como

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m Z^2 e^4}{8e_0^2 h^2} \quad (50)$$

que leva em consideração os ajustes feitos por Bohr no M_3 , fornece os níveis de energia permitidos para átomos de um elétron e representa a energia associada a cada estado estacionário do elétron.

Para Lakatos, o modelo de Bohr pode ser considerado como “*um programa de pesquisa que progride sobre fundamentos inconsistentes*” (Lakatos, 1979, p.172), e a história do programa pode ser caracterizada por:

1. Seu problema inicial (desvendar o enigma de como os átomos do modelo proposto por Rutherford poderiam permanecer estáveis);
2. Sua heurística positiva (a idéia de que os átomos eram análogos a sistemas planetários. “*Tudo isso estava planejado desde o princípio: a idéia de que os átomos eram análogos a sistemas planetários renunciou um longo, difícil, mas otimista programa e indicou claramente a política de pesquisa*”. Lakatos, 1979, p.180)
3. Os problemas que ele tentou resolver no decorrer de seu desenvolvimento (aperfeiçoou os modelos: M_1 para explicar a série de Pickering-Fowler e M_2 para ajustar os valores encontrados pela teoria e experiência).
4. Seu ponto de degeneração (Inicia com a refutação da fórmula de Bohr para moléculas diatômicas; acentua-se com problemas de desdobramentos não explicados no espectro de álcalis e, salienta-se ainda mais, com a falta de condições para solucionar problemas como a teoria das perturbações)
5. O programa pelo qual foi ultrapassado (A mecânica ondulatória: que explicava as condições quânticas de Planck e Bohr e também conduzia a um

‘fato novo emocionante’, a experiência de Davisson-Germer. Apresentava soluções que estiveram fora do alcance do programa de pesquisa de Bohr e elucidava as teorias *ad hoc* deste programa.)

ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE A PROPOSTA

Ao elaborar este material de estudo para professores do nível médio procurou-se, de uma maneira geral, fazer com que a abordagem do texto pudesse, ao mesmo tempo, contemplar, de forma clara e compreensível, os conceitos científicos presentes no assunto e o processo histórico envolvido na origem e desenvolvimento da teoria. Além disso, houve uma preocupação especial em transmitir uma concepção de ciência compatível com o que se considera adequado para o ensino. Este passo foi orientado por Lakatos que, além de alertar para os pontos onde uma possível disseminação da concepção empirista poderia ocorrer, também forneceu subsídios para o delineamento da estrutura de apresentação do texto.

Por outro lado, tem-se consciência de que alguns aspectos salientados no texto podem trazer dificuldades para o professor realizar a transposição didática para a sala de aula do nível médio. Por exemplo, como ensinar o produto vetorial presente na parte que trata da correção para a massa reduzida? Qual a melhor forma para apresentar conceitos que envolvem Física Moderna? Ou mesmo, o momento angular e sua quantização, qual a melhor abordagem? Estes são apenas alguns questionamentos que podem surgir ao se pensar em trabalhar este conteúdo no Ensino Médio. Contudo, o interesse do trabalho não está em apresentar ‘receitas’ ou ‘métodos infalíveis’ para o tratamento do átomo de Bohr neste nível; o objetivo é proporcionar ao professor uma abordagem adequada e o mais completa possível do assunto, para que este, com sua experiência em sala de aula, possa explicar o conteúdo da melhor forma, de acordo com suas possibilidades e perspectivas de ensino.

Com este texto em mãos o professor poderá analisar quais aspectos sobre o assunto ele considera mais importantes para serem estudados. Com um pouco de criatividade, pode despertar o interesse dos alunos propondo atividades, como, por exemplo, sugerir que eles realizem todos os passos para obter a expressão da energia quantizada para o átomo de hélio, como os desenvolvidos para o hidrogênio; ou ainda,

expor os valores encontrados para a energia e constante de Rydberg sem a correção para a massa reduzida e, propor aos alunos que façam novamente os cálculos utilizando a devida correção na massa dos elétrons. A partir da discrepância entre os valores encontrados, ele pode suscitar o embate, vivenciado no desenvolvimento da teoria de Bohr, entre a teoria e a experiência e explicitar os momentos em que a teoria precisou de ajustes para que fosse corroborada pelas observações experimentais. Com isso, é possível salientar que, antes de partir para as modificações na teoria, muitas coisas devem ser observadas, entre elas, a precisão experimental, a fidedignidade das observações e teorias observacionais.

Ainda, o texto pretende evidenciar ao professor como a visão empirista pode ser facilmente desencadeada pelo assunto. O exemplo proporcionado pelo modelo atômico de Bohr, alerta para os cuidados que se deve ter para que este tipo de concepção não seja repassada acriticamente ao estudante, nem em relação a este assunto nem a outros. Ou seja, o texto pode contribuir para uma melhor avaliação, pelo professor, da forma como assuntos da Física e, de outras áreas, são apresentados por materiais didáticos, paradidáticos, de divulgação científica e outros.⁴⁵

5.3 – A APLICAÇÃO DO TEXTO: ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.3.1 – A avaliação preliminar

Com o intuito de se fazer uma primeira investigação acerca das potencialidades do texto sobre o átomo de Bohr, desenvolvido para professores do nível médio, e de validar o questionário elaborado para avaliação deste, submeteu-se o texto, juntamente com as questões, a uma pequena amostra de professores, para que a partir de suas respostas, dúvidas e sugestões, fossem feitas as alterações necessárias ao melhoramento da proposta, antes de sua aplicação à amostra definitiva, de perfil semelhante à anterior.

Nesta análise preliminar, o texto “O átomo de Bohr no nível médio sob o referencial lakatosiano: um texto para professores” foi submetido à apreciação de quatro

⁴⁵ As referências bibliográficas do texto submetido aos professores não foram aqui apresentadas, pois se tornariam repetitivas, uma vez que são semelhantes às da dissertação.

professores de Física do nível médio. Dois deles eram licenciados⁴⁶, um mestre e um doutor. Destes, apenas o último não respondeu ao questionário.

Alguns aspectos foram levantados, entre eles, possíveis erros de redação, sugestões de apresentação e incorporação de novas referências bibliográficas. No entanto, nenhuma alteração significativa foi incorporada à versão inicial. É importante ressaltar que um dos respondentes discordou quase que totalmente da abordagem do texto, mas seus argumentos foram considerados como inconsistentes face aos objetivos da pesquisa.

Assim, este primeiro contato dos professores com o texto proporcionou uma visão geral de como, em princípio, seria a sua receptividade e, principalmente, permitiu verificar que as questões elaboradas avaliavam o que se tinha por objetivo; ou seja, estavam claras, não deixando, margem de dúvida em seus enunciados; mesmo com a não compreensão de um dos respondentes.

Apresenta-se a seguir, de um modo mais específico, os aspectos que mais se destacaram nas declarações dos professores, nesta análise preliminar.

Por um lado, um dos respondentes pareceu não ter compreendido o objetivo do texto, o qual foi explicitado logo nas primeiras páginas, pois insistiu em que o texto deveria ter sido orientado de modo que respondesse a pergunta: o que é matéria? Percebe-se que para este professor não ficou claro que a finalidade era discutir o modelo atômico de Bohr, e não apresentar a evolução dos estudos acerca do átomo, como ele faz menção: *“Faltam elementos importantes que mostrem como o modelo de Bohr foi influenciado por outros modelos, por exemplo, dos anéis saturnianos de Nagaoka”*. Outro ponto enfatizado por este mesmo professor esteve relacionado aos possíveis programas concorrentes com o programa de Bohr, como expõe a teoria de Lakatos. Neste caso, entende-se que houve um deslocamento da problemática, uma vez que o texto não visa apresentar as teorias que concorreram com a de Bohr, mesmo porque não houve nenhum outro programa de pesquisa com objetivos iguais ao de Bohr, se desenvolvendo paralelamente. Desta forma, justifica-se o porquê da não identificação dos possíveis programas concorrentes pelo professor. De um modo geral, ele alerta para coisas consideradas irrelevantes aos objetivos do texto e da pesquisa.

⁴⁶ Um dos licenciados é professor de Física a muitos anos, mas graduado em Química.

Por outro lado, os outros dois professores que participaram desta análise inicial não apresentaram grandes discrepâncias em suas respostas; concordaram com a contextualização dada ao assunto, apesar de terem levantado alguns problemas que poderiam ser originados em uma transposição didática para o Ensino Médio. Além disso, houve menção a um aspecto que já havia sido observado: a carência do texto em relação a figuras. Também, um dos professores enfatizou que *'não dispensaria outros textos e atividades experimentais'*; neste caso, parece que a essência do trabalho foi plenamente captada, pois em nenhum momento teve-se a ambição de que o texto fosse auto-suficiente; isso pode ser verificado já na parte da contextualização histórica, na qual se fez somente uma introdução histórica dos assuntos que foram considerados como essenciais para o estudo do modelo atômico de Bohr e, indicou-se várias outras obras para o aprofundamento dos temas.

Esses dois professores procuraram destacar, também, o mérito do texto e das possíveis contribuições que ele poderia oferecer, como, por exemplo: *"há dois aspectos pedagógicos relevantes aqui: um é o ensino de tópicos modernos de Física, o outro é apoiar o ensino da ciência numa visão epistemológica como a de Lakatos. O primeiro aspecto considero muito discutível. Quanto ao segundo, considero essencial"*. Ou ainda, mesmo mencionando que a educação necessita avançar para que o texto se torne amplamente útil, o professor infere: *"trabalhos como o seu ajudam a educação progredir, possibilitando o aprimoramento do professor do ensino médio"*.

Desta forma, após discutir as sugestões dadas nesta análise preliminar e incluir as considerações pertinentes, encaminhou-se o texto (já apresentado no capítulo cinco) e o questionário final para uma amostra definitiva de professores de Física do nível médio. As questões encaminhadas e os respectivos resultados são apresentados na próxima seção.

5.3.2 – A Avaliação 'Definitiva' do Texto

Nesta seção apresenta-se as questões que foram encaminhadas, juntamente com o texto sobre o modelo atômico de Bohr, aos professores de Física do nível médio e as correspondentes respostas.

Tal como no estudo preliminar, o material a ser avaliado foi entregue, aos professores, diretamente em mãos, quando possível, ou via correio. As respostas ao questionário, também, ou foram devolvidas em mãos ou, desta vez, via correio eletrônico.

O material (texto, questionário e artigo sobre Lakatos) foi dirigido a uma amostra diferenciada⁴⁷ de doze professores de Física do nível médio; destes, nove responderam ao questionário. Abaixo, a formação dos participantes da pesquisa, que serão designados por **P₁**, **P₂**, **P₃**, **P₄**, **P₅**, **P₆**, **P₇**, **P₈**, **P₉**.

P₁ – Mestre em Física e doutorando na área de Física (UFSC)

P₂ – Mestre em Física (UFSC)

P₃ – Mestrando em Educação Científica e Tecnológica (UFSC)

P₄ – Formando do curso de Licenciatura em Física (UFSC)

P₅ – Mestrando em Ensino de Física (UFRGS)

P₆ – Licenciado em Física (UFSC)

P₇ – Formando do curso de Licenciatura em Física (UFPEL)

P₈ – Licenciado em Física (UFRGS)

P₉ – Licenciado em Física (UFRGS)

A seguir, as questões e os respectivos posicionamentos.

QUESTÃO 1 - O texto sobre o modelo atômico de Bohr considera que o contexto em que se inseriram as idéias de Bohr estava constituído pelas experiências e o modelo atômico de Rutherford; por valores, conhecidos empiricamente, de algumas séries espectrais; pelos estudos sobre a radiação do corpo negro e o efeito fotoelétrico. A contextualização dada ao assunto é adequada? Que tópicos você considera necessário para a contextualização do tema? Comente sua resposta.

RESPOSTAS:

De um modo geral, dos nove professores que responderam a esta questão, sete deles concordam com a contextualização dada ao modelo atômico de Bohr; um dos participantes concorda, mas aponta restrições e o outro, discorda.

⁴⁷ Entende-se por amostra diferenciada professores que, supostamente, teriam conhecimento para fazer uma avaliação adequada do texto elaborado.

Mais especificamente, os principais aspectos abordados nas respostas de cada professor a essa pergunta foram:

P₁ – Inicialmente, este professor faz uma discussão sobre as principais teorias que estavam sendo desenvolvidas e que possivelmente influenciaram o modelo atômico de Bohr. Destaca que para a época, a instabilidade do átomo de Rutherford foi o ponto ‘chave’ para Bohr ‘bolar’ uma solução para este problema. Além disso, menciona que os estudos sobre a radiação do corpo negro, cuja ‘semente’ foi plantada por Planck e o retorno à teoria da partícula em 1905, por Einstein, são o ‘supra-sumo’ na construção da teoria de Bohr. Acrescenta, ainda, que as outras evidências, como as séries de Balmer e Paschen, apenas vieram ‘coroar este magnífico trabalho’. Em relação ao texto avaliado, **P₁** remete às seguintes palavras: “*Gostaria de salientar que o texto explica isso em muitos detalhes, relatando os fatos da época; fiquei até surpreso pelas belas passagens ali descritas*”.

P₂ – Para **P₂**, a contextualização dada ao modelo atômico de Bohr é adequada, pois “*contempla de modo informativo e temporal os assuntos relacionados*” ao desenvolvimento dessa teoria. O professor afirma: “*acredito que não seja necessário a inclusão de outros tópicos adicionais para a contextualização do tema proposto*”.

P₃ – “*Diante do que se propõe acho que está muito bem contextualizado*”.

P₄ – Já, para este professor, a contextualização foi muito abrangente. Justifica que muitos tópicos foram tratados, contudo, de maneira superficial. Ressalta que dependendo da formação do professor que utilizará o texto, esta contextualização poderá ser de difícil entendimento. Sugere que se repense a parte inicial do texto, isto é, a contextualização do assunto: “*ou se ‘enxuga’ um pouco, retirando alguns dos tópicos e reorganizando-os, ou (o que julgo ser mais interessante), se mantém os tópicos, porém tratando-os de maneira mais detalhada*”.

P₅ – Para **P₅**, o texto comporta todos os temas importantes à contextualização do átomo de Bohr. Todavia, a explanação é muito breve. Sugere: “*Talvez o assunto introdutório pudesse ser um pouco mais rico e aprofundado no sentido de valorizar os acontecimentos anteriores ao trabalho de Rutherford e Bohr*”. Menciona, também, que acredita que a história e a filosofia da ciência são uma ‘frutífera porta’ por onde é possível a introdução de idéias e conceitos a estudantes de vários níveis.

P₆ – Segundo este professor, é ‘extremamente’ válida a maneira como o modelo atômico de Bohr foi abordado pelo texto. Assevera que *“através da evolução e contextualização histórica dos fatos que antecederam a estruturação do átomo de Bohr, é possível mostrar ao estudante que o conhecimento científico não é elaborado graças a um lampejo de idéias, que um cientista teve ao trabalhar isoladamente ou sem nenhuma discussão com a comunidade científica”*.

P₇– Para este respondente a contextualização dada ao assunto é ‘extremamente adequada’. Menciona que embora todos os tópicos citados sejam necessários para contextualizar o tema, não seria possível atualmente tratá-los no nível médio em virtude da falta de tempo. Assim, mesmo se posicionando a favor do contexto proposto, ele acredita que se abordado somente o modelo atômico de Rutherford já se forneceria bons motivos para o tratamento do átomo de Bohr o qual, segundo ele, já deveria estar sendo abordado com mais ênfase na disciplina de Física. Contudo, ressalta que pode haver oscilações, no que tange a apresentação de tais tópicos, de uma escola para a outra.

P₈ – Para **P₈**, a contextualização dada ao assunto é bastante adequada; justifica que o tema está inserido dentro de um conjunto de outros temas indispensáveis para a sua compreensão. Neste sentido, argumenta que as idéias de Planck e Einstein certamente auxiliaram Bohr na elaboração de sua teoria.

P₉ – *“Acho adequada, por ter seguido uma ordem histórica do assunto...todos os tópicos citados no texto são importantes para um bom aprofundamento dos professores e, também, um bom entendimento”*.

Analisando-se às respostas desta questão percebe-se que, de um modo geral, os professores concordam com a contextualização dada ao assunto. Com relação a aprofundar ou retirar alguns tópicos, como sugerido por **P₄** e também mencionado por **P₅**, acredita-se que os assuntos poderiam, sim, ser tratados de forma mais aprofundada, contudo, isto demandaria a implementação de novos estudos, objeto de trabalhos futuros. Neste, optou-se por apenas introduzir esses conteúdos e indicar bibliografias para encaminhar o professor a leituras suplementares. Por outro lado, a idéia de retirar alguns tópicos, sem a devida justificativa, parece ser um tanto ‘apressada’, pois se assim fosse feito, o assunto poderia deixar de estar adequadamente contextualizado.

Além disso, **P₅** acha que seria interessante valorizar também os acontecimentos anteriores a Rutherford e Bohr. Neste caso, ele parece estar se referindo aos estudos sobre o átomo anteriores a Bohr, como os de Dalton, Nagaoka, Thomson. A observação é pertinente e deverá ser considerada em uma nova versão do texto.

QUESTÃO 2 - Além de contemplar a visão de Lakatos sobre o desenvolvimento do modelo atômico de Bohr, o texto também é enfático na crítica à disseminação da concepção empirista-indutivista da ciência. Neste caso, a apresentação do texto, organizada segundo Lakatos, pode ser considerada como uma maneira ‘eficiente’ de abordagem do modelo atômico de Bohr ou agrega elementos complicadores no ensino deste conteúdo ao expor e questionar a visão empírica deste assunto? Justifique.

RESPOSTAS:

Nesta questão, seis professores posicionaram-se favoráveis à abordagem dada pelo texto ao modelo atômico de Bohr (**P₃, P₅, P₆, P₇, P₈ e P₉**); um dos participantes concordou parcialmente (**P₄**) e, dois deles (**P₁** e **P₂**) optaram por não responder a esta pergunta, alegando não terem conhecimento suficiente para uma avaliação consciente.

Os respectivos pontos destacados nas respostas foram:

P₃ – Para este professor, a explanação do texto organizada segundo Lakatos é eficaz na apresentação do átomo de Bohr, assim como, proporciona uma visão clara e consistente da epistemologia de Lakatos.

P₄ – De acordo com este respondente, o texto avaliado é bastante claro em sua posição anti-empirista. Contudo, ressalta que considera desnecessárias às citações a Lakatos presentes no texto, uma vez que este se destina a professores do nível médio. Sugere que estas referências sejam feitas em uma introdução ou apêndice.

P₅ – Afirma: *“No meu ponto de vista, o texto não traz nenhum tipo de empecilho ou complicadores para o seu entendimento. A apresentação do modelo atômico de Bohr organizada segundo a visão de Lakatos parece-me muito pertinente”*.

P₆ – Para **P₆**, o modelo atômico de Bohr apresentado de acordo com o referencial lakatosiano demonstra nitidamente ao leitor os passos realizados por Bohr na construção de seu modelo. Além disso, salienta que *“a idéia de que ele [Bohr] resolveu*

estruturar um modelo atômico devido à inconsistência do modelo Rutherford é fundamental para uma boa compreensão da motivação de Bohr para fazer tal intento". Destaca, ainda, que a não disseminação da visão empirista também é um passo fundamental, pois ensina aos alunos uma visão correta da ciência. O que alega ser contrário ao que os livros de Física do Ensino Médio propõem (ou seja, que é a partir da experiência que se extrai o conhecimento científico).

P₇ – Diz: *“Acredito que seja uma maneira eficiente de abordar o modelo atômico de Bohr, e que a complexidade do assunto é que poderá apresentar junto aos alunos alguma dificuldade, todavia, amplamente plausível”*.

P₈ – Afirma: *“Por se tratar de um texto voltado a professores de Física, acredito que a abordagem do átomo de Bohr segundo as idéias de Lakatos não traz qualquer elemento complicador”*.

Segundo ele, a epistemologia de Lakatos pode ser considerada como uma das mais eficientes na transposição didática de temas científicos, pois fornece uma visão adequada da ciência e do chamado ‘método científico’. Ressalta ainda, que o professor de Física que acompanha as vertentes da filosofia da ciência pode fazer um bom uso do material e utilizá-lo como fonte de informações.

P₉ – Diz: *“Acho que a abordagem sob a visão de Lakatos é muito boa, pois segue uma lógica, que é importantíssimo para o ensino de ciências”*. Continua, destacando que a concepção empirista gera fatores que complicam o entendimento dos conceitos físicos pelos alunos. Menciona que para que esses conceitos sejam mais bem compreendidos, eles devem ser questionados, permitindo aos estudantes entender o que é a ciência e como se faz ciência.

Embora apenas sete professores tenham se posicionado sobre esta questão, pelo menos para seis deles a explanação do texto, segundo Lakatos, é considerada uma ‘boa’ maneira de se apresentar o átomo de Bohr. Somente um dos respondentes declara que as menções a Lakatos poderiam ser suprimidas do texto ou feitas separadamente. Contudo, ele não expõe argumentos fundamentados para tal, apenas diz que isso deveria ser feito devido ao texto ser para professores do nível médio, o que não possibilita maiores inferências.

É importante destacar, também, o posicionamento de P₈ em relação à epistemologia de Lakatos, que segundo ele parece ser bastante adequada para o tratamento de temas científicos em sala de aula. Já P₉ enfatiza o papel que uma adequada concepção de ciência pode representar na aprendizagem do aluno.

QUESTÃO 3 - O texto fornece subsídios para um ‘bom’ estudo do modelo atômico de Bohr? A abordagem dada ao assunto é clara e acessível? O aprofundamento é adequado para professores do nível médio? Comente.

Esta questão teve suas respostas bastante variadas em relação às anteriores. Apenas quatro, (P₁, P₇, P₈ e P₉), dos nove respondentes concordaram integralmente e não fizeram nenhuma suposição a respeito do texto e do público alvo ao qual ele se destina. Os demais participantes fizeram suposições, teceram comentários, sugeriram, como o exposto a seguir:

P₁ – Argumenta que o texto é um bom material de consulta para o estudo do modelo atômico de Bohr, uma vez que os livros do Ensino Médio não apresentam uma abordagem detalhada tanto no que tange a parte qualitativa quanto a quantitativa; além disso, não trazem o contexto histórico, as idéias que ‘fervilhavam’ na época, as dificuldades, os embates. *“O texto procura trazer a tona os questionamentos daquele período, mostrando as dificuldades e o caminho que foi percorrido para encontrar a saída desse labirinto”*. Assevera, ainda, que a linguagem utilizada no texto é adequada, não deixando, para ele, nenhum ponto obscuro. Afirma que *“esse material deve ser preparado ‘para ontem’, para que o professor possa tê-lo em mãos e opte por aprofundar ou não esse tópico”*.

P₂ – De acordo com este professor, o texto fornece os subsídios necessários para o conhecimento do modelo atômico de Bohr e sua abordagem é clara; contudo, não é acessível a todos os professores que atuam no nível médio. **P₂** justifica esse seu posicionamento ressaltando que a maioria dos professores deste nível estão afastados das universidades a vários anos e não são oferecidos cursos de aperfeiçoamento na área do ensino da Física. Por esses motivos, infere que vários conceitos, embora pareçam básicos, ficam esquecidos ou até deformados na concepção do professor. Desta forma, e em virtude do exposto acima, considera o *“aprofundamento das idéias do texto inadequado para o entendimento do assunto proposto”*.

P₃ – Para **P₃**, o texto está muito bom e escrito de maneira clara. Já com relação ao aprofundamento ressalta que se pode ter problemas, pois, segundo ele, a maioria dos professores de Física do nível médio não tem formação específica para o ensino desta matéria: são formados em áreas afins e assumem a disciplina por falta de professores habilitados. Neste sentido, propõe que se considere três grandes grupos de professores para a discussão: os que possuem uma ‘boa’ formação, incluindo as bases epistemológicas; os que têm formação, mas sem essas bases e os que não possuem formação adequada para a função. Com base nisso, elabora o seguinte questionamento: qual seria o público alvo principal a que se destina o texto?

Como forma de enfatizar mais esta questão instiga que para o primeiro grupo de professores o texto viria para enriquecer, complementar. Para o segundo, o texto ajusta-se perfeitamente, “*é bárbaro, encaixa-se como uma luva*”. Mas para o terceiro e maior grupo, como seria? Para estes, **P₃** acha que deveriam ser fornecidos mais alguns detalhes importantes no texto como, noções de álgebra, a série de hélio da estrela Pupis, a emissão de elétrons no efeito fotoelétrico, a matematização do quarto postulado, etc.

Complementa afirmando que o material de apoio, como o artigo que foi enviado junto ao texto, também seria de difícil acesso aos professores, em virtude de as escolas não disporem de tais materiais. Nesse caso, sugere que, se possível, seria interessante referenciar ‘sites’ da internet, os quais, certamente, seriam úteis.

Conclui salientando que “*o ideal mesmo, e neste caso você prestaria uma inestimável contribuição para o ensino de Física catarinense, seria proporcionar para este pessoal um curso de aperfeiçoamento, aproveitando este material*”.

P₄ – Destaca que o texto, sem dúvida, é claro, objetivo e acessível a ‘bons’ professores do Ensino Médio. Todavia ressalta que a grande maioria dos professores atuais de Física não teria condições de aplicá-lo em sala de aula, em virtude de sua má formação, que caracteriza por “*engenheiros e licenciados com grandes dificuldades em estrutura da matéria e física quântica*”.

P₅ – Semelhante ao exposto por **P₃**, **P₅** também menciona a necessidade de se pensar em dois tipos de públicos, os quais ele caracteriza como sendo: a) pessoas que tenham familiaridade com os assuntos que contextualizam o modelo atômico de Bohr, além de Química e Física; e b) pessoas que não tenham os conhecimentos acima

citados. Para os primeiros o texto oferece, segundo ele, ótimos subsídios para o estudo e a compreensão do modelo atômico de Bohr. Entretanto, para os segundos, o texto não trará benefícios, pois lhe faltarão os ‘subsunçores’, os quais ele define como sendo “*uma espécie de ancoradouro, onde o conteúdo a ser apreendido pode se firmar e interagir, dando condições para que a aprendizagem possa ser significativa*”.

P₆ – Para P₆ o texto em si é muito bom; mas, para que o professor possa pô-lo em prática é necessário rever vários fatores relacionados ao ensino de Física no nível médio (número de aulas e inclusão dos tópicos que contextualizam o átomo de Bohr).

P₇ – “*O texto a meu ver é extremamente claro e rico em subsídios para uma ótima abordagem deste tema, sendo amplamente adequado para professores de nível médio, professores de Física, é claro*”.

P₈ – Assevera: “*O texto fornece subsídios para um ‘bom’ estudo do tema, principalmente no que tange ao seu desenvolvimento histórico. A linguagem é clara e acessível, bem como o aprofundamento é adequado para professores de Física*”. Menciona, ainda, que na transposição didática do tema o professor deve levar em consideração as necessidades específicas de cada turma. Todavia, argumenta que não é necessário trabalhar em aula as demonstrações matemáticas, mas que conhecê-las é necessário, para ter mais segurança em relação a eventuais situações inesperadas que podem surgir na sala de aula.

P₉ – “*Acho que o texto é muito bom, ele aborda bem o assunto,... é claro e elucidativo*”. Sobre o aprofundamento, P₉ diz que é adequado para professores do nível médio, pois não apresenta cálculos complicados e, por isso, qualquer professor de Física poderia compreendê-lo sem maiores dificuldades.

Nesta questão, um aspecto bastante destacado diz respeito ao aprofundamento das idéias mencionadas no texto. Há uma preocupação fundada no fato de que os atuais professores de Física do nível médio não teriam condições de acompanhar e entender o assunto, utilizando o texto proposto. Neste sentido, várias considerações foram feitas, como, a falta de cursos de aperfeiçoamento, a formação acadêmica dos professores em atuação, ou seja, enfatiza-se principalmente a possível insuficiência de conhecimento, por parte dos professores, sobre os assuntos que norteiam o estudo do modelo atômico de Bohr.

Também, as suposições feitas por dois professores sugerem, explicitamente, a necessidade da realização de cursos de aperfeiçoamento. Contudo, não se pode deixar de mencionar aqui o papel fundamental que o interesse pessoal desempenha nesse processo, pois a realização de cursos não basta e não é o único meio para a aprendizagem da Física moderna e contemporânea. Os materiais com tais assuntos já se fazem presentes; mesmo os livros do nível médio abordam esses conceitos; no texto encaminhado, também, sugeriu-se referências que poderiam ser consultadas, ou seja, havendo interesse, as possibilidades de se sanar essas dificuldades são ampliadas.

QUESTÃO 4 - Você acha que o modelo atômico de Bohr deve ser estudado no nível médio? Por quê? Como professor, você utilizaria o texto proposto, ou parte dele, para trabalhar o tema no nível médio? Justifique

Dos nove professores que responderam esta questão, sete afirmaram que o átomo de Bohr deve ser estudado no nível médio, assim como outros conteúdos da Física Moderna e Contemporânea e declararam que utilizariam, sim, o texto proposto ou parte dele, ao ministrar aulas sobre o assunto. Os outros dois enfatizaram as dificuldades presentes neste nível e se posicionaram contrários ao estudo do modelo atômico de Bohr no Ensino Médio. Mais precisamente, as idéias expostas foram as seguintes:

P₁ – Assevera que nos dias de hoje o ‘mundo quântico’, extremamente presente no cotidiano das pessoas, desempenha um papel importante na explicação dos artefatos tecnológicos. Acrescenta ainda que suas experiências utilizando a Física Moderna no nível médio têm sido produtivas, pois permitiram demonstrar aos alunos que a física sofre mudanças, está em constante construção e, mesmo as teorias mais sólidas podem ser substituídas (*quebradas*). Neste sentido, traz à tona notícias que estão sendo apresentadas pela mídia, as quais questionam sobre a possibilidade de a velocidade da luz não ser constante. Alerta ainda, que poderiam ser colocados outros exemplos desta natureza, ou seja, de fatos que interrogam sobre as verdades científicas aceitas atualmente. Afirma “*o que é absolutamente certo hoje, pode deixar de ser amanhã. Às vezes, as verdades científicas são aceitas sem uma rigorosa avaliação...por isso nem sempre podemos basear verdades ou acreditar apenas naquilo que a ciência pode mostrar*”.

Referindo-se à segunda parte da pergunta, P₁ declara que utilizaria, sem dúvida, o material investigado, pois, segundo ele, o texto resgata o contexto histórico e mostra que as observações, quando fidedignas, podem despertar o instinto para as teorias e, corroborá-las. Além disso, chama a atenção para o fato de que teoria e experimentos podem caminhar juntos, não havendo, necessariamente, uma ordem de prioridade. Salienta: *“Acho que o texto faz também que o professor do Ensino Médio faça indagações, comece a se questionar de que a física é uma ciência e não está toda pronta, mas sim em processo de construção (principalmente quanto à Física Moderna)”*. Conclui afirmando que *“o professor como educador tem sempre que se atualizar, ou seja, o educador também tem de estar no processo de auto-educação”*.

P₂ – Segundo este professor, o modelo atômico de Bohr não deve ser estudado no nível médio. Ele destaca que a realidade da escola no Brasil é ‘caótica, medíocre e deprimente’. Além disso, expõe que as propostas de conteúdo apresentadas nos currículos são ‘utópicas’, embora mencione que estes não contemplam, na íntegra, nem os assuntos básicos relacionados à ciência física. Ressalta ainda que, mesmo com essa deficiência de conteúdo, os alunos *“não querem e não conseguem acompanhar o desenvolvimento dos conceitos”*. Afirma: *“Por mais lamentável que seja, essa é a dura realidade da fraca escola brasileira que vivenciamos hoje; e isso é opinião de vários professores que atuam no ensino de ciências exatas”*.

P₃ – Para P₃, o ensino do modelo atômico de Bohr não é apenas desejável, mas também necessário para explicar os fatos do dia-a-dia. Em relação à segunda parte da questão, este professor declara que utilizaria o texto tanto para trabalhar o modelo atômico de Bohr como para fins epistemológicos, para o qual afirma ser um ‘grande exemplo’. Além disso, ressalta que como o átomo de Bohr é normalmente apresentado na disciplina de Química, poderia se tentar trabalhar o assunto em conjunto, nas disciplinas de Química, Física e Matemática, em um curso de aperfeiçoamento multidisciplinar.

P₄ – Explicita seu posicionamento sobre esta questão afirmando que o átomo de Bohr deve ser apresentado sem dúvida nenhuma, assim como outros tópicos da física do último século: *“A inserção da física moderna no nível médio deveria ser um dos principais objetivos dos grupos de pesquisa em ensino de física. Como professor, certamente utilizaria o texto”*.

P₅ – *“Acredito que não só o modelo de Bohr, mas também introdução à relatividade, efeito fotoelétrico, radiação de corpo negro e tudo o mais que for possível acrescentar. Particularmente, acredito que nós professores estamos perdendo nossos alunos para a TV, internet e tantos outros tantos atrativos modernos toda a vez que escrevemos as siglas MRU, MRUV e tantas outras que não mais contribuem efetivamente com o cotidiano do aluno”*.

Em seguida, o professor destaca que denota dois obstáculos para se trabalhar o átomo de Bohr e os demais tópicos da física moderna. O primeiro está direcionado para o fato de as universidades centrarem seus processos seletivos na física clássica: *“queira ou não, são estas provas que norteiam os currículos escolares”*. O segundo refere-se a somente a física ‘lutar por modernidade’, enquanto que as demais disciplinas como a matemática, química, história estarem ‘ancoradas no porto velho’; ou seja, *“assim como a física atual, exploram conceitos que em nada contribuem para a modernização do ensino”*.

Quanto a trabalhar com o texto no nível médio, **P₅** salienta que esta é uma questão que envolve algumas variáveis: interesse do professor, dos alunos, nível de conhecimento dos alunos, entre outras. Afirma que se viesse a ensinar o átomo de Bohr, atualmente, utilizaria apenas parte do texto: ou a histórica ou os cálculos, pois para trabalhar o texto na íntegra seriam necessárias umas seis semanas.

P₆ – Este professor respondeu a primeira parte da questão de um modo mais geral, não se direcionando apenas ao modelo de Bohr, mas à Física moderna e contemporânea. Assevera que é necessário, sim, o ensino da Física moderna no nível médio. *“Acho que está na hora de deixar de ensinar durante meses cinemática, eletrostática, e mostrar algo que os alunos realmente se identifiquem”*.

No entanto, esclarece que em virtude das condições e do contexto atual da disciplina de Física, a utilização do material proposto torna-se ‘relativamente inviável’. Explica que, em primeiro lugar, os alunos do nível médio não têm conhecimento dos conceitos que são necessários para a compreensão do assunto como os espectros, a radiação do corpo negro e o efeito fotoelétrico. Infere que essa deficiência pode ser justificada, em parte, pelo insuficiente número de aulas destinado à matéria de Física. Neste sentido, indica duas possíveis medidas a serem tomadas para ampliar as

possibilidades de utilização do texto: a primeira seria incluir os conceitos referentes aos assuntos mencionados acima, “*para que o professor tenha as mínimas condições de utilizar este material*” e, a segunda, que não seria alvo de discussão, como bem lembra, seria ampliar o número de aulas destinadas à disciplina de Física.

Neste caso, no parágrafo acima, o professor expressa tanto a dificuldade do aluno quanto à do professor em relação aos conceitos que contextualizariam o modelo atômico de Bohr e sugere o tratamento aprofundado desses tópicos no texto. Todavia, esse não foi o objetivo do texto, uma vez que se deixou claro na apresentação do material que se faria apenas uma introdução histórica e seriam indicadas bibliografias para aqueles que precisassem aprofundar ou rever os conceitos que contextualizam o átomo de Bohr.

P₇ – Para este professor não somente o modelo atômico de Bohr deve ser integrado ao programa do Ensino Médio, mas também os outros temas da Física Moderna, em virtude de estarem presentes no dia a dia de todos. Destaca, no entanto, que essas idéias estão, na maioria das vezes, ocultas, por ignorância ou por medo, devido a ser um assunto pouco conhecido e quase sem domínio. Referindo-se à segunda parte da pergunta, assevera que com toda certeza utilizaria o texto “*pois se trata de um material muito acessível e que cobre uma falha da maioria dos livros do Ensino Médio em utilização no momento*”.

P₈ – Para este respondente o átomo de Bohr deve ser apresentado no nível médio, pois seu conteúdo é de extrema importância: “*a partir das relações que deve se estabelecer entre este tema, a radiação do corpo negro e o efeito fotoelétrico mostra-se características muito peculiares do mundo microscópico que se manifestaram no mundo macroscópico*”. Segundo ele, o texto constitui-se em uma ótima demonstração do caráter não empirista-indutivista da ciência.

Com relação à utilização do texto no Ensino Médio, o professor diz que tomaria o cuidado de salientar a validade do modelo de Rutherford, com as modificações propostas por Bohr apenas no que tange a existência de um núcleo positivo. Posteriormente, mencionaria que a idéia de elétrons em órbitas planetárias bem definidas seria substituída pela idéia da ‘nuvem de elétrons’, sem a definição precisa da posição dos elétrons no espaço, apenas da densidade de probabilidade.

P₉ – “Acho que o átomo de Bohr deve ser estudado no nível médio, pois é um modelo que trabalha vários conceitos importantes...utilizaria mais a parte histórica do texto,...para chamar a atenção dos alunos, e menos a parte de aprofundamento, que envolve muita álgebra, que é complicado para a compreensão dos alunos”.

Conforme as respostas a esta questão, dois professores acham que o átomo de Bohr não deve ser estudado no nível médio. Apresentam um posicionamento bastante pessimista em relação ao ensino em geral. Destacam apenas os pontos negativos, não demonstrando perspectiva de mudança. Isto é de certo modo lamentável, pois para estes não há solução para o atual estado da ‘arte’. Os demais concordam que deva haver alteração nos conteúdos a serem ensinados, em virtude do grande número de fenômenos do dia a dia que exigem a presença de tópicos de física moderna e contemporânea para serem explicados. Também, é interessante observar duas colocações feitas, que estariam dificultando esse processo de mudança: a de o vestibular ser centrado na física clássica e o fato de que somente a disciplina de Física busca a ‘modernidade’, enquanto que as demais estão, supostamente, estagnadas.

Em relação ao átomo de Bohr no nível médio, novamente, são ressaltados aspectos como a falta de base conceitual tanto por parte dos alunos como dos professores, a insuficiência de aulas. Mas, por outro lado, surgem idéias indicando caminhos que podem solucionar ou, pelo menos, minimizar os problemas, como, por exemplo, a sugestão de um curso de aperfeiçoamento multidisciplinar.

5. Comentários gerais, críticas e sugestões sobre o texto.

Neste espaço os professores fizeram desde comentários sobre a escrita do texto, expressões, simbologia, idéias de aplicação, reflexões, elogios, até esclarecimentos sobre partes do texto e sugestões de outras bibliografias que poderiam ser incluídas. Contudo, serão apresentadas, aqui, somente as observações mais relevantes para o crescimento e aperfeiçoamento do material submetido à avaliação e, as relacionadas à melhoria da qualidade do ensino de Física, de um modo geral.

A seguir, os comentários gerais apresentados pelos professores:

P₁ – Além de fazer indicações sobre alguns pontos específicos da redação do texto, este professor refere-se à ênfase dada à teorização ao invés da experimentação.

Ele expõe que em sala de aula a experimentação tem um ‘amplo sucesso na aprendizagem’ dos alunos; alega que nessas atividades os estudantes podem ‘ver’ e ‘tocar’, o que auxilia na compreensão dos conteúdos. No entanto, **P₁** ressalta que discorda de que a ciência só se realiza por meio de demonstrações; esclarece que nem sempre é possível realizar experimentos e que a teorização é necessária, sim. Afirma, ainda, que com certeza o maior problema que o estudo do texto pode desencadear está relacionado ao produto vetorial, já mencionado nas considerações finais da proposta; sugere que se poderia colocar uma figura indicando a direção dos vetores \vec{r} e \vec{v} e, mencionar que o produto desses dois gera um terceiro perpendicular ao plano gerado pelos dois anteriores. Ao finalizar declara que o trabalho o agradou bastante, estando bem escrito, em linguagem adequada e com esclarecimentos precisos.

P₂– Direciona seus comentários às condições apresentadas no ensino brasileiro. Segundo ele, a escola sem recursos materiais e financeiros, os baixos salários dos professores e o desinteresse dos alunos dificultam ou, até mesmo, impossibilitam a inserção de novos conteúdos e programas educacionais no nível médio; os quais poderiam transformar a visão dos conceitos científicos e filosóficos abordados na física. Neste sentido, ressalta que qualquer tentativa ou esforço de pesquisadores em educação para modificar estas concepções é praticamente em vão ou, como afirma, é “*fora da realidade vivida pelos professores na escola hoje*”.

P₃– Explicitou seus comentários no decorrer das questões anteriores.

P₄ – Enfatiza a importância de se conhecer um pouco mais sobre a ciência e a tecnologia, em virtude de se viver em uma sociedade altamente dependente de ambas. Assevera: “*precisamos difundir a verdadeira ciência e tecnologia entre todas as pessoas e, sem dúvida nenhuma, a educação tem um papel crucial neste processo. Está mais do que na hora uma mudança geral no ensino de ciências... é inadmissível gastarmos semanas ensinando termometria (transformações entre escalas térmicas), cinemática, ótica geométrica... enquanto deixamos de ensinar a fascinante física e tecnologia que há no funcionamento de um ‘hard disk’ de computador, de um forno microondas, de um rádio, televisão*”.

Continua, destacando que considera ‘louvável’ qualquer tentativa de inserir a física moderna no nível médio. Diz: “*Acho que o texto cumpre bem esse papel*”;

todavia, menciona que há dificuldades, principalmente no que se refere ao momento angular que, de acordo com ele, é um conceito difícil de ser tratado no nível médio. Outro ponto ressaltado diz respeito à linguagem do texto, que segundo **P₄** é muito acadêmica, “*é quase um artigo científico*”. Aconselha escrevê-lo de uma forma mais informal; adicionar figuras e ilustrações, de modo a deixá-lo mais atraente para o professor e até mesmo para os alunos.

P₅ – No espaço destinado aos comentários este professor apenas afirma que concorda com as ‘dúvidas’ colocadas nas ‘considerações sobre a proposta’ que foram apresentadas no final do texto, e que os comentários gerais já haviam sido feitos no decorrer das respostas anteriores. Contudo, algumas partes escritas em perguntas anteriores serão explicitadas aqui, devido a serem pertinentes.

Para este professor os textos acadêmicos são, na maioria das vezes, ‘sóbrios e estanques’ e, por isso, se tornam pouco atrativos às pessoas que não vivem o meio da pesquisa, entre elas, os professores do nível médio. Neste sentido, sugere que se inclua no texto, figuras, gráficos históricos, hipertextos, notas e outros artifícios que instiguem uma leitura mais dinâmica e atraente. Ressalta que seu objetivo não é dizer que o texto é desinteressante, mas que em certos casos as pessoas acabam optando por leituras mais agradáveis, as quais muitas vezes ‘pecam pela fidelidade científica’. Afirma: “*Parece uma incongruência, mas os pesquisadores produzem materiais de alta fidelidade científica que deixam de ser usados devido à sua apresentação*”.

P₆ – Diz que questiona as soluções criativas apresentadas pelo texto, nas ‘considerações sobre a proposta’, para despertar o interesse do aluno. Segundo ele, “*uma das poucas coisas interessantes que esse delicado assunto possa trazer para o aluno do ensino médio é a demonstração da evolução da ciência dentro de um contexto histórico*”. Acrescenta que devido ao assunto se tratar de algo com pouca relação com o cotidiano do aluno, é mais difícil de se encontrar artifícios que tornem a aula ‘prazerosa’. Desta forma, afirma acreditar que o material seria mais ‘aplicável’ a estudantes universitários, uma vez que os do nível médio não teriam uma fundamentação teórica necessária para a compreensão do mesmo. Além disso, salienta que muitos estudantes de graduação não sabem qual o motivo que levou Bohr a formular seu modelo, nem ao menos em que contexto histórico ele foi elaborado.

P₇ – Declara que o texto serve para a ‘aplicação direta’ a classes do nível médio, no entanto, indica que pode haver necessidade de ‘flexionamentos’, conforme o perfil da turma que se estará trabalhando.

P₈ – Segundo este professor, o texto deixou a desejar em sugestões de como poderia ser aplicado no nível médio; em que momento deveria ser feita sua inserção. Questiona: a inclusão deve ser feita logo após o eletromagnetismo, que é onde tradicionalmente se inserem os temas de Física Moderna? Você sugeriria suprimir algum conteúdo de Física Clássica em detrimento deste? O modelo de Bohr deve ser tratado de uma maneira rigorosa em relação à matemática que contempla? Poderia se fazer uso de recursos didáticos visuais, como internet, ilustrações? Contudo, ressalta que não está propondo a elaboração de uma ‘receita de como fazer’, mas sim, que fossem dadas sugestões de como poderia ser feito. Para ele, isso seria um elemento motivador para os leitores.

P₉ – *“Não tenho crítica nem sugestões, achei o texto muito bem elaborado”*.

Além de cada um dos respondentes reforçar sua opinião quanto ao ensino ou não da Física Moderna e Contemporânea no nível médio, alguns outros pontos ressaltados neste espaço merecem destaque. Entre eles, a sugestão de que se incluam figuras, ilustrações, gráficos, para que o texto não fique tão acadêmico e maçante; que sejam dadas idéias de como utilizar o texto, quando e de que forma. Além disso, foi aconselhado que a aplicação do material seja feita a universitários ao invés de alunos do Ensino Médio. Todavia, é importante ressaltar que o texto se destina ao professor. O que dele se esperaria então, em princípio, é uma ‘adequada’ transposição didática do mesmo para a sala de aula.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

De acordo com os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, a área de ciências, matemática e suas tecnologias deve ter por objetivo formar indivíduos para o exercício da cidadania, fornecendo meios para a interpretação dos fatos naturais e para a compreensão de equipamentos e procedimentos do cotidiano; articulando a eles uma visão de mundo natural e social. Neste sentido, a Física Moderna e Contemporânea assume um papel importante, tendo em vista a quantidade de fenômenos do dia a dia que necessitam desses conceitos para serem explicados.

Além disso, os PCNEM enfatizam que é essencial fazer com que o aluno compreenda a ciência como uma construção humana e entenda a maneira como esta se desenvolve. Isso pode ser feito de vários modos, mas também, na apresentação dos conteúdos, os quais devem ensejar uma visão adequada da natureza da ciência e do trabalho científico, que propiciam ao estudante uma compreensão coerente e crítica da atividade científica.

Através de uma análise de cinco livros didáticos de Física do Ensino Médio e de um Projeto de Ensino (o GREF) foi possível constatar que, na maioria das obras, o contexto em que o modelo atômico de Bohr está inserido não está totalmente de acordo com o considerado adequado pelo referencial da pesquisa; o qual assume que os assuntos que contextualizam o tema são os resultados empíricos já conhecidos das séries espectrais de Balmer e Paschen, os estudos sobre a radiação do corpo negro e o efeito fotoelétrico, as experiências e o modelo atômico de Rutherford.

Dentre as obras examinadas apenas duas delas (Gaspar, 2001; Cabral e Lago, 2002) contextualizam apropriadamente o assunto, ou seja, apresentam todos os tópicos considerados desejáveis para o estudo do átomo de Bohr. As demais expõem apenas alguns dos itens: Gualter, Newton e Helou (2001) fazem referências aos estudos de Rutherford e à teoria do efeito fotoelétrico; Torres et al (2001) exploram amplamente os assuntos considerados essenciais para o estudo do átomo de Bohr, mas não mencionam os valores já conhecidos das séries de Balmer e Paschen. Bonjorno et al (1997), faz somente uma rápida menção ao modelo atômico de Rutherford, não tratando nenhum outro tópico. A abordagem do GREF (1998) confere ao tema um enfoque peculiar, pois

faz referências a Bohr visando uma introdução ao estudo dos processos luminosos e dos materiais semicondutores.

Quanto à disseminação inadequada da concepção empirista-indutivista da ciência pelos livros, ela foi detectada em duas das obras analisadas (Gaspar, 2001; Cabral e Lago, 2002). Coincidentemente, elas foram às únicas que contextualizaram o assunto de acordo com o referencial da pesquisa. Aqui, é pertinente trazer à tona o que Lakatos ressalta em relação a isso; ou seja, o fato de que como as séries de Balmer e Paschen eram conhecidas empiricamente antes de 1913, o programa de pesquisa de Bohr pode ser, facilmente, apresentado como um exemplo de ascensão indutiva-baconiana, expressando à idéia de que Bohr propôs seu modelo com o intuito de explicar esses valores, ao invés de desvendar a instabilidade do átomo de Rutherford.

Denota-se que as obras que apresentaram o conteúdo descontextualizado, não transmitiram a visão empirista-indutivista. Contudo, é possível afirmar que a contextualização do assunto pode ser feita sem propagar visões distorcidas ou inadequadas sobre a origem e o desenvolvimento do modelo atômico de Bohr. Um exemplo é o texto desenvolvido e exposto no capítulo cinco.

A detecção da visão empirista nos dois livros originou alguns questionamentos, que foram remetidos aos respectivos autores. Esse contato possibilitou o esclarecimento de vários aspectos denotados nas obras. Assim, foi possível conhecer qual a intenção e com que objetivos os autores apresentaram o assunto; ou seja, passou-se a ter noção de pontos, importantes, não explicitados nos textos. Salienta-se que este tipo de atividade, que inclui a participação do autor e o permite expor sobre seu trabalho, deveria ser mais intensificada, uma vez que se mostrou interessante, devido às explicações dos autores, e produtiva, pois pode influenciar no melhoramento dos materiais didáticos. Todavia, percebeu-se que esse tipo de tarefa nem sempre é de fácil execução: uma das tentativas de contato com o autor de uma das obras, que demandou intermediação da editora, não foi bem sucedido, apesar de reiteradas tentativas.

Para uma melhor contextualização e desenvolvimento da pesquisa, optou-se por explicar sobre possíveis visões deformadas do conhecimento científico, segundo Gil Pérez et al. (2001), que podem ser transmitidas no ensino de ciências. Este estudo, juntamente com o de Lakatos sobre o átomo de Bohr, fundamentou teoricamente a

análise dos livros, o exame das respostas dadas pelos autores e, principalmente, contribuiu para a elaboração do texto destinado aos professores do nível médio.

Através do encaminhamento do texto elaborado para consideração crítica de uma amostra de professores de Física do nível médio, investigou-se sobre sua abordagem, apresentação, aprofundamento, se o modelo atômico de Bohr deveria ser estudado no nível médio e se o professor utilizaria o texto proposto para trabalhar o tema. Além disso, obteve-se várias sugestões para o seu aperfeiçoamento, entre elas, que se incluía imagens, gráficos, isto é, que o texto seja mais ilustrado.

Neste sentido, concorda-se com o sugerido e ressalta-se que isso pode ser feito em uma outra etapa, a qual deverá considerar os vários resultados de pesquisa já desenvolvidos nesta área. Também, as indicações de inclusão ou exclusão de novos assuntos ao texto, mencionadas por alguns professores, dirigem possibilidades de novas pesquisas ao tema.

Algumas colocações dos professores merecem destaque, como a feita por P₈, o qual afirma que o professor de Física que acompanha as vertentes da filosofia da ciência pode fazer um bom uso do material e utilizá-lo como fonte de informações (p.166). Essa observação é, certamente, tão estimuladora quanto preocupante, pois leva ao seguinte questionamento: e aqueles que não possuem uma certa familiaridade com a filosofia da ciência? Conseguiriam utilizar o material adequadamente? Neste sentido, emerge outra dúvida: será que o texto é, em princípio, aplicável a apenas uma amostra ‘diferenciada’ de professores? Ou ainda, como questiona P₃ (p.167), qual seria o público alvo para o texto? Professores com ‘boa’ formação e bases epistemológicas? Com formação adequada, mas sem essas bases? E os demais professores? O que poderia ser feito para que pudessem ser incluídos nesta amostra? Certamente, todas essas questões são pertinentes e desencadeiam a necessidade de novos estudos, mais direcionados.

Além disso, foi possível perceber que há dificuldades em relação aos assuntos da Física Moderna tratados; que existem preocupações não apenas com a parte conceitual, mas também com o ensino de aspectos relativos à natureza da ciência; que alguns professores desconhecem a existência dos novos livros do Ensino Médio, os quais já trazem tópicos de Física Moderna e Contemporânea. Enfim, conheceu-se alguns anseios dos professores, suas perspectivas e posicionamentos.

De acordo com o exposto por alguns respondentes, os professores atuantes no nível médio teriam dificuldades em abordar os tópicos que contextualizam o modelo atômico de Bohr, em virtude de grande parte dos que ministram a disciplina de Física serem formados em áreas afins, e não em Física; ou ainda, porque se passou muito tempo desde a graduação, e os conceitos aprendidos, não trabalhados, ficam quase que esquecidos. Desse modo, salientam que seria importante a realização de cursos de aperfeiçoamento, os quais, segundo os professores, são escassos, ou quase que ausentes. No entanto, novamente, ressalta-se que o interesse em aprender, desempenha um papel essencial, pois se ele não se fizer presente, nem mesmo o oferecimento de cursos poderá minimizar ou resolver o problema.

Embora mencionem essas dificuldades, a maioria dos professores assume que deve haver mudança nos conteúdos a serem apresentados no nível médio, alegando sua necessidade na explicação de fenômenos do cotidiano. Todavia, quando se trata de trabalhar o átomo de Bohr e aplicar o texto elaborado ou parte dele aos alunos, outros obstáculos são apontados, como, por exemplo, o baixo número de aulas semanais, o desinteresse dos alunos, a falta de base conceitual.

No que diz respeito às vertentes metodológicas que podem ser utilizadas na introdução da Física Moderna e Contemporânea no nível médio considerou-se, neste estudo, que a espanhola, de Gil e Solbes, a qual acredita ser indispensável à apresentação dos conteúdos da Física Clássica para a inserção da Física Moderna, é a que melhor se adequa à apresentação e o estudo da Física Moderna em geral, e do modelo atômico de Bohr, em particular. Desse modo, o ensino e a aprendizagem devem se desenvolver de forma construtiva através da explicitação da evolução histórica dos conceitos, os quais devem permitir ao estudante visualizar o processo de construção do conhecimento científico, seus momentos de crise, suas limitações, rupturas, remodelações, seus êxitos, enfim, o decurso percorrido para a obtenção do conhecimento. Neste sentido, o átomo de Bohr serve como exemplo, pois o modelo atômico de Rutherford teve dificuldades na explicação da estabilidade do átomo o que fez com que ele precisasse de ‘refinamentos’ e, até, de uma nova teoria.

Com base no que Gil e Solbes sugerem, é possível, ao se fazer uma transposição didática, apresentar o modelo atômico de Bohr no ensino médio da seguinte forma:

1. Trazer à tona as contribuições da Física Clássica pertinentes ao estudo do assunto (átomo de Rutherford, eletromagnetismo de Maxwell);
2. Elaborar uma situação ‘modelo’ de acordo com a Física Clássica (modelo atômico de Rutherford) e salientar as limitações dessa Física na explicação do problema, ou seja, explicitar a crise (no caso, estabilidade do átomo);
3. Introduzir os novos conceitos a partir da superação das concepções primeiras dos alunos e da reconstrução histórica (conceito de quantização, radiação eletromagnética, energia quantizada).

No entanto, essas etapas devem ser consideradas como uma das várias maneiras de se tratar o assunto no nível médio; podem ser ajustadas pelo professor em suas aulas de acordo com os objetivos visados com o estudo e não, apenas, serem seguidas cegamente. Contudo, a idéia de transposição didática do assunto remete à realização de uma outra fase do trabalho que a contemple e que traga sugestões, para o professor, de como tratar do tema, como destacado por P₉.

Além disso, trabalhos futuros poderiam analisar, nos livros universitários, qual o contexto histórico em que o modelo atômico de Bohr está inserido e qual a visão de ciência transmitida; uma vez que no presente estudo, somente verificou-se como alguns livros deste nível chegam à expressão para a energia quantizada. Afinal, é através destes materiais que o professor do nível médio obtém sua formação e, por isso, muitas vezes, o consulta, visando à retomada de conceitos, preparação de aulas, aprofundamento do assunto.

Neste sentido, pode-se inferir que se os livros universitários disseminam uma concepção inadequada da ciência ou do trabalho do cientista, estas visões estarão se enraizando no futuro profissional desde cedo, ou seja, desde sua graduação. Ou ainda, na pior das hipóteses, isto pode ocorrer, também no ensino médio, fazendo com que esse contato da graduação se torne apenas um reforço, que se intensifica em cada etapa realizada.

Por outro lado, como o modelo atômico de Bohr também é tratado em cursos de física que possuem em seus currículos uma disciplina relativa à evolução dos conceitos da Física, seria igualmente interessante constatar como ele e outros assuntos

são explorados; neste caso, visões distorcidas do conhecimento científico podem reforçar a concepção empirista-indutivista, a idéia de um método científico único e infalível, a visão cumulativa e linear.

O átomo de Bohr poderia ser utilizado, também, para avaliar a corrente metodológica espanhola no que se refere à inserção de tópicos de Física moderna no nível médio a partir das limitações impostas pela Física Clássica. Com esta avaliação, provavelmente, seriam observados aspectos mais específicos desta metodologia, até então, não considerados.

Enfim, espera-se que este trabalho venha contribuir para o ensino-aprendizagem do átomo de Bohr, tanto para professores do nível médio, quanto para alunos; e que a maneira como o assunto foi tratado sirva de inspiração para uma abordagem diferenciada de outros temas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANTES, P. **Imagens da natureza, imagens da ciência**. Editora Papirus. Campinas, 1998.

ALVETTI, M.A.S. **Ensino de Física Moderna e Contemporânea e a Revista Ciência Hoje**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

BACHELARD, G. **A epistemologia**. Tradução de Fátima Lourenço Godinho e Mário Carmino Oliveira. Edições 70, Portugal, 1971.

BACHELARD, G. **O novo espírito científico**. Edições 70, Lisboa, 1986.

BACHELARD, G. **A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento**. Tradução Estela dos Santos Abreu. Editora Contraponto. Rio de Janeiro, 1996.

BACON, F. **Novum Organum ou Verdadeiras Indicações Acerca da Interpretação da Natureza**. Trad. José A. R. Andrade, 2^a edição. Coleção Os Pensadores. Editora Abril Cultural, São Paulo, 1979.

BAHIA, M. T. **O empirismo nos livros didáticos: um convite ao debate**. Monografia de especialização, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

BASSO, A. C. e PEDUZZI, L. O. Q. O átomo de Bohr em livros de Física do Ensino Médio: um estudo exploratório. **Atas XV SNEF**. Curitiba, 2003a.

BASSO, A. C. e PEDUZZI, L. O. Q. O átomo de Bohr em livros didáticos de Física: interagindo com autores. Trabalho submetido à apresentação no **IV Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências**, Bauru, São Paulo, 2003b.

BEISER, A. **Conceitos de Física Moderna**. Traduzido por Gita K. Ghinzberg. Polígono e Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1969.

BEVERIDGE, W.I.B. **Sementes da descoberta científica**. Tradução de S. R. Barreto, São Paulo, 1981.

BIEZUNSKI, M. **História da Física Moderna**. Instituto Piaget, Lisboa, 1998.

BOHR, N. **Sobre a constituição de átomos e moléculas**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1989.

BONJORNO, J. R. et al. **Temas de Física 3**. Volume 3. Editora FTD, São Paulo, 1997.

BONJORNO, J. R. et al. **Física Fundamental**. Volume único. Editora FTD, São Paulo 1999.

BONJORNO, R. A. et al. **Física Fundamental - Novo**. Vol. único, editora FTD, São Paulo, 1999.

BONJORNO, R. A. et al. **Física Completa**. Vol. único, editora FTD, São Paulo, 2001.

BRASIL, Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio**. Ministério da Educação, Brasília, 1999.

BRÁZ JÚNIOR, D. e MARTINS, R. **Física Moderna: tópicos para o Ensino Médio**. Companhia da Escola, 1ª edição, Campinas, 2002.

BUNGE, M. **La ciencia, su método y su filosofía**. Editora século XX, Buenos Aires, 1980.

CABRAL, F. & LAGO, A. **Física 3**. Editora Harbra , São Paulo, 2002.

CALÇADA, C. S. & SAMPAIO, J. L. **Física Clássica**. Vol. 2. Editora Atual, São Paulo, 1990.

CALÇADA, C. S. & SAMPAIO, J. L. **Física Clássica**. 5 volumes. Editora Atual, São Paulo, 1998.

CAMPANARIO, J. M. et al. Invocaciones y usos inadecuados de la ciencia en la publicidad. **Enseñanza de las ciencias**, vol.19, nº1, 2001.

CAVALCANTE, M. A. e TAVOLARO, C. Uma oficina de Física Moderna que vise a sua inserção no Ensino Médio. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. Vol. 18, n.3, dezembro, 2001.

CAVALCANTE, M. A. PIFFER, A. e NAKAMURA, P. O uso da Internet na compreensão de temas de Física Moderna para o Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol.23, nº1, março, 2001.

CHALMERS, A. F. **O que é ciência afinal?** Tradução R. Fiker. Cap. I –III. Editora Brasiliense, São Paulo, 1993.

CHEVALLARD, Y. **La Transposition Didactique – du savoir savant au savoir enseigné**. Grenoble: La Pensee Sauvage éditions, 1985.

CHIQUETTO, M. J. **Física**. Coleção Novos Tempos. Vol. único, Ensino Médio; editora Scipione, 2000.

COELHO, J. G. Hume: Ceticismo e Demarcação. **Ciência & Educação**, v.6, n.2, p. 141-149, 2000.

COELHO, J.V. **Física Moderna no Ensino de Nível Médio**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 1995.

DE GROOTE, J.J. Max Planck e o início da teoria quântica. In: Física Moderna: mito e ciência. **Revista eletrônica de jornalismo científico Comciência**. Maio, 2002.

DE LA FUENTE, A. M. et al. Estructura atômica: análisis y estudio de las ideas de los estudiantes (8º de EGB). **Enseñanza de las Ciencias**, v.21, n.1, p.123-134, 2003.

DIAS, P. M. C. A (Im) Pertinência da História ao Aprendizado da Física (um Estudo de Caso). **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 23, n. 2, junho, 2001.

EISBERG, R.M. & LERNER, L. S. **Física: fundamentos e aplicações**. Tradução de Ivan José Albuquerque. Editora McGraw-Hill do Brasil, 1983.

EISBERG, R. M. & RESNICK, R. **Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. 8ª edição, Campus, Rio de Janeiro, 1994.

FEYERABEND, P. **Contra o método**. 2ª edição. Tradução de Octanny S. Mota e Leônidas Hegenberg. Rio de Janeiro, 1977.

FREIRE JR., O. & CARVALHO NETO, R. A. **O universo dos quanta: uma breve história da Física Moderna**. Editora FTD, São Paulo, 1997.

FREIRE – MAIA, N. **A ciência por dentro**. Editora Vozes, Petrópolis, 1991.

FREIRE, M. I. B. e BASTOS FILHO, J. B. É possível pensar sem teoria? O que veria um suposto *tábula rasa* teórico? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.12, n.2: p. 74-94, ago.1995.

FREITAG, B. et al, **O livro didático em questão**. 2ª edição. Editora Cortez, São Paulo, 1993.

GASPAR, A., **Física 3**. Editora Ática. São Paulo, 2001.

GIL PÉREZ, D.; MONTORO, I. F.; ALÍS, J. C.; CACHAPUZ, A. e PRAIA J. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v.7, n.2, p.125-153, 2001.

GONÇALVES, A. & TOSCANO, C. **Física e Realidade**. Vol. 1, 2 e 3; editora Scipione, 1997.

GONÇALVES FILHO, A. & TOSCANO, C. **Física para o Ensino Médio**. Série Parâmetros. Vol. único, editora Scipione, São Paulo, 2002.

GONÇALVES, A. Pesquisa dos livros didáticos de Física mais vendidos. Mesa Redonda **XV SNEF**. Curitiba, 2003.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA (GREF) **Física 2: Física térmica/óptica**. Editora da Universidade de São Paulo, 4ª edição, São Paulo, 1998.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA (GREF) **Física 3: eletromagnetismo**. Editora da Universidade de São Paulo, 4ª edição, São Paulo, 2000.

GUALTER, J. B. & ANDRÉ, C. M. **Física**. Vol. único; editora Saraiva, 3ª edição, São Paulo, 2002.

GUALTER, J. B; NEWTON, V.B. & HELOU, R. D. **Tópicos de Física 3**. Editora Saraiva, 15a. Edição, São Paulo, 2001.

HALLIDAY, D. & RESNICK, R. **Física**. Tradução de Antonio Luciano Leite Videira et al., 3ª edição, Vol 4, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1981.

HANSON, N. R. Observação e Interpretação. In: **Filosofia da Ciência**. Morgenbesser, S. (org.). Editora Cultrix, São Paulo,1975.

HEISENBERG, W. A parte e o todo: encontros e conversas sobre física, filosofia, religião e política. Contra-ponto, Rio de Janeiro, 1996.

HOUAISS, A. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Editora Objetiva. 1ª Edição, Brasil, 2001.

KAZUITO, Y., FUKU, L. F. & SHIGEKIYO, C. T. **Os alicerces da Física**. Vol. 1, 2ª edição. Editora Saraiva. São Paulo, 1989.

KÖHNLEIN, J. F. K. e PEDUZZI, L.O.Q., Sobre a concepção empirista-indutivista no ensino de ciências. **Atas VII Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física**. Águas de Lindóia, São Paulo, 2002.

KUHN, T. A Função do Dogma na Investigação Científica. **In: A Crítica da Ciência**. Organização e Introdução de Jorge Dias de Deus. Editora Zahar. Rio de Janeiro, 1974.

KUHN, T.S. **A estrutura das revoluções científicas**., Editora Perspectiva, São Paulo 1987.

KUHN, T. **A Estrutura das Revoluções Científicas**. Editora Perspectiva. São Paulo, 1996.

LAKATOS, I., **História da Ciência e suas Reconstruções Racionais e outros ensaios**. Edições 70, Tradução de Emília Picado Tavares Marinho Mendes, 1978.

LAKATOS, I. O falseamento e a metodologia dos programas de pesquisa científica. **In** Lakatos, I. & Musgrave, A. (orgs.) **A crítica e o desenvolvimento do conhecimento**. Cultrix, São Paulo, 1979.

LAKATOS, I., **La metodología de los programas de investigación científica**. Editora Alianza, 1983.

LINDBERG, D.C. **Los inicios de la ciencia occidental**. Ediciones Paidós Ibérica, S.A., 2002.

LOMBARDI, O. I. La pertinencia de la historia en la enseñanza de ciencias: argumentos y contraargumentos. **Enseñanza de las ciencias**, vol.15, nº3, p. 343-349,1997.

LOPES, A. R.C. Bachelard: o filósofo da desilusão. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. Vol 14, n.3, dez, 1996.

MAGALHÃES, M. F. et al. Uma Proposta para Ensinar os Conceitos de Campo Elétrico e Magnético: uma Aplicação da História da Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 24, n. 4, dez., 2002.

MARTINS, R. Mesa Redonda: Influência da História da Ciência no Ensino de Física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, vol.5, número especial. Jun, 1988.

MATTHEWS, M. R. History, philosophy and science teaching: the present rapprochement. **Science and Education**. Vol. 1, 1992.

MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.12, n.3, p. 164-214, 1995.

MÁXIMO, A. & ALVARENGA, B. **Curso de Física**. Vol. 1, 2 e 3; editora Scipione. São Paulo, 2000.

MEDEIROS, A. e BEZERRA FILHO, S. A natureza da ciência e a instrumentação para o Ensino de Física. **Ciência & Educação**, v.6, n.2, p 107-117, 2000.

MEDEIROS, A. e MONTEIRO, M.A., A invisibilidade dos pressupostos e das limitações da teoria copernicana nos livros didáticos de Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v.19, n.1: p.29-52, abr.2002.

MOREIRA, M. A. & MASINI, E. F. S. **A aprendizagem significativa. A teoria de David Ausubel**. Editora Moraes, 1982.

MOREIRA, M.A. e OSTERMANN, F. Sobre o ensino do método científico. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.10, n.2: p.108-117,ago.1993.

NICOLAU, G. F. & TOLEDO, P.A. **Física Básica**. Vol. único, editora Atual, São Paulo, 1998

OSTERMANN, F. A epistemologia de Kuhn. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. Vol 14, n.3, dez, 1996.

OSTERMANN, F. **Tópicos de Física Contemporânea em escolas de nível médio e na formação de professores de Física.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

OSTERMANN, F. & RICCI, T., Relatividade Restrita no Ensino Médio: contração de Lorentz-Fitzgerald e aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos de Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física.** V.19, n.2: p.176-190, 2002.

PARANÁ, D. N. **Física.** Vol. 1; editora Ática, São Paulo, 1993.

PARANÁ, D. N. S. **Física para o Ensino Médio.** Vol. único; editora Ática, 2ª edição, São Paulo, 1999.

PARANÁ, D. N. S. **Física.** Série Novo Ensino Médio. Vol. único, editora Ática, 2002.

PAULO, I. J. C., **Elementos para uma proposta de inserção de tópicos de Física Moderna no Ensino de Nível Médio.** Dissertação de mestrado. UFMT, Cuiabá, 1998.

PEDUZZI, L. O. Q. A história e a filosofia da ciência na formação do licenciado em Física. Mesa Redonda. **Atas VII Conferência Interamericana sobre Educação em Física,** Porto Alegre (Canela) RS, 3-7 de julho, 2000.

PEDUZZI, L. O. Q. Sobre a utilização didática da História da Ciência. In: **Ensino de Física: Conteúdo, Metodologia e Epistemologia numa Concepção Integradora.** PIETROCOLA, Maurício (Org), p. 151-170. Editora: UFSC, 2001.

PEDUZZI, L.O.Q. **Tópicos de Física Moderna: introdução à mecânica quântica.** Programa de Formação Continuada à Distância. Curso de Complementação para a Licenciatura em Física. Secretaria de Estado da Educação da Bahia, 2002.

PINTO, A.C. & ZANETIC, J., É possível levar a Física Quântica para o Ensino Médio? **Caderno Catarinense de Ensino de Física.** V.16, n.1: p 7 –34. Florianópolis, 1999.

POPPER, K.R. **Conjecturas e Refutações.** Tradução de Sérgio Bath. Editora da Universidade de Brasília, 2ª edição, Brasília, 1982.

RAMALHO, F., FERRARO, N. G. & SOARES, P.A.T. **Os fundamentos da Física.** Vol.1, 5ª edição. Editora Moderna, São Paulo, 1989.

RAMALHO, F., FERRARO, N. G. & SOARES, P.A.T. **Os fundamentos da Física**. Vol.1, editora Moderna, São Paulo, 1993.

RAMALHO, F., NICOLAU, G. F. & TOLEDO, P. A. **Os fundamentos da Física**. Vol. 3. 7ª edição revisada e ampliada; editora Moderna, São Paulo, 1999.

ROBILOTTA, M.R. O cinza, o branco e o preto – da relevância da história da ciência no ensino da Física. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. V. 5, nº especial; Florianópolis, jun. 1988.

ROSENFELD, L. Introdução. **In: BOHR, N. Sobre a constituição de átomos e moléculas**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1963.

RUSSEL, B. **História da Filosofia Ocidental**. Livro terceiro, tradução de Breno Silveira, 3ª edição, Companhia Editora Nacional, São Paulo, 1969.

SACKS, O. **Tio tungstênio: memórias de uma infância química**. Tradução Laura Teixeira Motta. Editora Companhia das Letras, São Paulo, 2002.

SAMPAIO, J. L. & CALÇADA, C. S. **Universo da Física 3**. Editora Atual, São Paulo, 2001.

SANDOVAL, J. S. E CUDMANI, L. C., **Epistemologia e História de la Física en la Formación de los Profesores de Física**. Revista Brasileira de Ensino de Física. Vol.15, nº (1 a 4), 1993.

SANTOS, M.E.V.M. **Mudança Conceptual na sala de aula – um desafio pedagógico**. Biblioteca do educador. Livros Horizonte, 1991.

SEARS, F., ZEMANSKY, M. e YOUNG, H. **Física**. Vol.4, 2ª edição. Tradução de José Lima Accioli. LTC, Rio de Janeiro, 1985.

SEGRÈ, E. **Dos raios X aos quarks**. Editora da Universidade de Brasília, Brasília, 1987.

SILVEIRA, F.L. A filosofia da ciência de Karl Popper: o racionalismo crítico. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. V.13,n.3:p.184-196, dez.1996.

SILVEIRA F.L. e OSTERMANN, F. A insustentabilidade da proposta indutivista de 'descobrir a lei a partir de resultados experimentais'. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, número especial: p.7-27, jun.2002.

SNYDERS, G. A. **Alegria na Escola**. Editora Manole, São Paulo, 1988.

TEIXEIRA, E. S., EL-HANI, C. N. e FREIRE JR. O. Concepções de estudantes de Física sobre a natureza da ciência e sua transformação por uma abordagem contextual do ensino de ciências. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**. V.1(3) p.111-123, 2001.

TERRAZZAN, E. A. **Perspectivas para a inserção da Física Moderna na escola média**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

TIPLER, P. A. e LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 3ª. edição, LTC, Rio de Janeiro, 2001.

TORRES, C. M. A. et al. **Física: ciência e tecnologia**. Vol. único, editora Moderna, São Paulo, 2001.

USTRA, STRIEDER & TERRAZZAN. **Condicionantes estruturais para o ensino de Física Moderna**. Atas do V Encontro de Pesquisadores em Ensino de Física. Águas de Lindóia, São Paulo, 1996.

WEHR, M. R. & RICHARD Jr., J.A. **Física do átomo**. Tradução Carlos Campos de Oliveira, Editora Ao Livro Técnico S.A, Rio de Janeiro, 1965.

ZANETIC, J. **Física Também é Cultura**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

ZYLBERSZTAJN, A. Revoluções Científicas e Ciência Normal na Sala de Aula. **In: Tópicos em Ensino de Ciências**. Marco Antônio Moreira e Rolando Axt (Org). Sagra. Porto Alegre, 1991.